

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GRİ SULARIN SERBEST YÜZEY AKIŞLI YAPAY SULAK ALAN
SİSTEMLERİNDE ARITIM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Tamer ÇETİNKAYA

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Mühendisliği ve Yönetimi Programı

NİSAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GRİ SULARIN SERBEST YÜZEY AKIŞLI YAPAY SULAK ALAN
SİSTEMLERİNDE ARITIM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Tamer ÇETİNKAYA
(501181738)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Mühendisliği ve Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahmut Ekrem KARPUZCU

NİSAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501181738 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ali Tamer ÇETİNKAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Gri suların serbest yüzey akışlı yapay sulak alan sistemlerinde arıtım performansının değerlendirilmesi” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mahmut Ekrem KARPUZCU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Sait YAZGAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hatice İNAN
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 12.04.2022
Savunma Tarihi : 27.04.2022



Annem ve rahmetli babama,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca rehberliği, eleştirileri ve tavsiyeleri ile yardımlarını hiç esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Mahmut Ekrem KARPUZCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Çok değer verdiğim ve bir parçası olmaktan gurur duyduğum İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü hocalarıma teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitim sürecimi dostluklarıyla zenginleştiren ve tez sürecimde desteklerini her daim hissettiren sevgili arkadaşlarım Umut BEKÇİ, Özgün YILMAZ ve Fatih KIZILCAN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar boyunca sistem kurulumu ve tezin sonuçlanmasıda desteğinden ötürü Ömer Furkan KILIÇ'a teşekkür ederim. Özellikle laboratuvar çalışmalarında yardımları ve manevi desteği için değerli meslektaşım Arş. Gör. Gökşin ÖZYILDIZ'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde manevi desteklerini esirgemeyen, hem değerli arkadaşlarım hem de meslektaşlarım olan Arş. Gör. Kadir ÖZÇELİK, Arş. Gör. Ali İzzet CENGİZ, Arş. Gör. Minel BODUR, Arş. Gör. Yasemin AKDAĞ, Arş. Gör. Hazal GÜLHAN ve Arş. Gör. Dilşad SOYLU'ya teşekkür ederim.

Aynı ofisi paylaştığım değerli meslektaşlarım Arş. Gör. Gamze CEYLAN PERVER, Arş. Gör. Nergis DİLSİZOĞLU, Arş. Gör. Nilay BİLGİN SARITAŞ ve Arş. Gör. Burçin COŞKUN'a tez yazım aşamasındaki desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Sevgileri ve fedakarlıkları ile beni daha güçlü kılan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca bana olan inançları, sonsuz destekleri ile ablam ve beni kendi hayatlarının önüne koyarak bugünlere gelmemiz için ellerinden geleni yapan rahmetli babam Tamer ÇETİNKAYA ve canım annem Hülya ÇETİNKAYA'ya ne kadar şanslı olduğumuzu her daim hissettirdikleri için çok teşekkür ederim. Hayatımda oldukları için çok şanslı hissettiğim ablam Burcu KARADAĞ ve eniştem Ahmet KARADAĞ'a çok teşekkür ederim.

Nisan 2022

Ali Tamer Çetinkaya
Çevre & İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Anlam ve Önemi	1
1.2 Tezin Amaç ve Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Giriş	5
2.2 Yapay Sulak Alanlar.....	7
2.2.1 Yapay sulak alanların avantaj ve dezavantajları	9
2.2.2 Yapay sulak alan tipleri.....	10
2.2.2.1 Serbest yüzey akışlı sulak alan (SYS).....	11
2.2.2.2 Yatay akışlı yüzeyaltı sulak alan (Y-YAS)	13
2.2.2.3 Dikey akışlı yüzeyaltı sulak alan (D-YAS).....	14
2.2.2.4 Hibrit yapılı yapay sulak alan.....	14
2.2.3 Serbest yüzey akışlı sulak alanlarda giderim mekanizmaları.....	17
2.2.3.1 Fiziksel mekanizmalar.....	19
2.2.3.2 Kimyasal mekanizmalar	21
2.2.3.3 Biyolojik mekanizmalar	23
2.3 Gri Su.....	24
2.3.1 Gri suların karakterizasyonu	28
2.3.1.1 Fiziksel parametreler	31
2.3.1.2 Kimyasal parametreler	32
2.3.1.3 Biyolojik parametreler.....	33
2.3.2 Gri suların arıtılması ve yeniden kullanımı.....	34
2.3.2.1 Gri suyun arıtılması.....	35
2.3.2.2 Gri suyun arıtılmadan bertarafında potansiyel riskler.....	36
2.3.2.3 Gri suyun yeniden kullanımı	38
2.3.2.4 Gri suyun yeniden kullanım kılavuzları	40
2.3.3 Türkiye’de gri suyun yeniden kullanımı	44
2.4 Gri Suların Sulak Alanlarda Arıtım Performansları	45
3. MATERYAL VE YÖNTEM	49
3.1 Numunelerin Alınması	50
3.2 Sulak Alan Reaktörünün İşletilmesi	53
3.3 İzlenen Parametreler	54
3.3.1 Sıcaklık, renk ve koku.....	54

3.3.2 pH.....	55
3.3.3 Bulanıklık.....	55
3.3.4 Askıda katı madde (AKM).....	56
3.3.5 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam organik karbon (TOK)	56
3.3.6 Toplam azot (TN).....	58
3.3.7 Toplam fosfor (TP)	59
3.3.8 Klor ve sülfat.....	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
4.1 Bulgular	61
4.1.1 Gri suyun karakterizasyonu	61
4.1.2 Pilot ölçekli sulak alan reaktörü işletilmesi ve arıtma performansları.....	64
4.1.3 Pilot ölçekli sulak alan reaktörü deney sonuçları.....	67
4.1.3.1 KOİ – TOK	68
4.1.3.2 AKM	72
4.1.3.3 TP	73
4.1.3.4 TN	75
4.1.4 Serbest yüzeyli sulak alan reaktöründe kirletici giderim verimleri	78
4.2 Tartışma.....	80
4.2.1 Laboratuvar ölçekli çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.....	80
4.2.2 Çıktıların yeniden kullanım standartları kapsamında irdelenmesi.....	84
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
5.1 Suyun Yeniden Kullanımı ve Döngüsel Ekonomiye Katkı	88
5.2 Suyun Yeniden Kullanımının Özellikleri.....	89
5.3 Döngüsel Ekonomide Suyun Yeniden Kullanımının Katkısı.....	90
5.4 Öneriler.....	92
5.4.1 Sistem seçimi önerisi	92
5.4.2 Döngüsel ekonomi kapsamında öneri	92
5.4.3 Tasarım önerisi.....	93
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ.....	109

KISALTMALAR

ABR	: Anaerobik Biyoreaktör
AKM	: Askıda Katı Madde
Al	: Alüminyum
BAF	: Biyolojik Havalandırılmış Filtreler
BM	: Birleşmiş Milletler
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
Ca	: Kalsiyum
Cl	: Klor
CO₂	: Karbon dioksit
ÇOK	: Çözünmüş Organik Karbon
D-YAS	: Dikey Akışlı Yüzeyaltı Sulak Alan
ET	: Evapotranspirasyon
Fe	: Demir
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
IUPAC	: Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
KM	: Katı Madde
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LAS	: Lineer Alkilbenzen Sülfonat
MBBR	: Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktör
MBR	: Membran Biyoreaktör
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
N	: Azot
Na	: Sodyum
NH₄-N	: Amonyak Azotu
NO₃	: Nitrat
NPEO	: Nonil Fenol Etoksilat
NTU	: Nefelometrik Bulanıklık Birimi
OM	: Organik Madde
PO₄-P	: Fosfat

POP	: Kalıcı Organik Bileşikler
RBC	: Döner biyodisk
SAR	: Sodyum Adsorpsiyon Oranı
SBR	: Ardışık Kesikli Reaktör
SO₄	: Sülfat
SYS	: Serbeset Yüzey Akışlı Sulak Alan
TN	: Toplam Azot
TOK	: Toplam Organik Karbon
TP	: Toplam Fosfor
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UAKM	: Uçucu Askıda Katı Madde
UASB	: Yukarı Akışlı Çamur Yataklı Reaktör
UNDP	: Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
UV	: Ultraviyole
XOC	: Ksenobiyotik Bileşikler
YAS	: Yüzeyaltı Akışlı Sulak Alan
YSA	: Yapay Sulak Alan
Y-YAS	: Yatay Akışlı Yüzeyaltı Sulak Alan
Zn	: Çinko

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: SYS’lerde kirletici giderim mekanizmaları (Kadlec ve Wallace, 2009)	18
Çizelge 2.2: SYS’lerde kullanılan tipik bitkiler ve özellikleri.....	19
Çizelge 2.3: Farklı gri su kaynaklarının karakterizasyonu	30
Çizelge 2.4: Ükelere göre gri suyun yeniden kullanım amaçları ve standartları.....	41
Çizelge 3.1: Laboratuvar ölçekli çalışmalarda ölçülen parametreler ve ölçüm sıklıkları	53
Çizelge 4.1: Laboratuvar ölçekli gri su karakterizasyon çalışması	62
Çizelge 4.2: Laboratuvar ölçekli çalışma ile TÜBİTAK’ın uzun süreli karakterizasyon çalışma sonuçlarının karşılaştırılması	63
Çizelge 4.3: Gri suyun SYS sistemi içindeki ortalama giriş ve çıkış konsantrasyonları	68
Çizelge 4.4: Otel ham gri su ve kampüs gri suyu karakterizasyonları	81
Çizelge 4.5: Farklı bitki türleri ekilmiş SYS’lerde ham gri su konsantrasyonlarının karşılaştırılması	82
Çizelge 4.6: SYS ve hibrit YSA sistemlerinde ham gri su konsantrasyonlarının karşılaştırılması	83



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Serbest Yüzey Akışlı Sulak Alan(SYS) (Wallace ve Kadlec, 2009)	12
Şekil 2.2: SYS sistemi yer alan tipik bir arıtma şeması (Wallace ve Kadlec, 2009). 12	
Şekil 2.3: Hibrit yapılı sulak alan sistemi varyasyonları	15
Şekil 2.4: Hibrit yapılı sulak alan sistemi varyasyonları	15
Şekil 2.5: 2100 yılı Dünya nüfus projeksiyonu (UNDP, 2021)	25
Şekil 2.6: Dünya su kıtlığı haritası (IWMI, 2019)	25
Şekil 2.7: Gri su kategorileri ve kaynakları	26
Şekil 2.8: Evsel su kullanımı (Beler Baykal ve Giresunlu, 2014)	27
Şekil 3.1: Yapay sulak alan reaktörü	49
Şekil 3.2: Bitki numunesi alınan bölge, Elmalı Baraj kolu	50
Şekil 3.3: SYS reaktörünün işletilmeye başlanması	51
Şekil 3.4: Gri su numunesi alınan otel arıtım şeması (TÜBİTAK, 2015)	52
Şekil 3.5: pH metre cihazı	55
Şekil 3.6: KOİ ölçüm aşaması	57
Şekil 3.7: TOK ölçüm cihazı	58
Şekil 3.8: Toplam azot ölçüm kiti ve uygulama prosedürü	59
Şekil 3.9: Spektrofotometre ve örnek ölçüm sonucu	59
Şekil 4.1: KOİ ve TOK parametrelerinin zamana bağlı değişimi	70
Şekil 4.2: SYS sistemlerinde KOİ yüklerine karşı çıkış KOİ konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)	71
Şekil 4.3: AKM parametresinin zamana bağlı değişimi	72
Şekil 4.4: TP parametresinin zamana bağlı değişimi	74
Şekil 4.5: SYS sistemlerinde TP yüklerine karşı çıkış TP konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)	75
Şekil 4.6: TN parametresinin zamana bağlı değişimi	76
Şekil 4.7: SYS sistemlerinde TN yüklerine karşı çıkış TN konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)	77
Şekil 4.8: SYS sistemlerinde TN yüklerine karşı çıkış NH ₄ -N konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)	78
Şekil 4.9: SYS sisteminde kirleticilerin ortalama giderim verimleri	79
Şekil 4.10: Sistemin işletmeye alındığı ilk gün(sol taraf) ve sistemin işletildiği 30. gün(sağ taraf)	80
Şekil 4.11: Otel gri su arıtımında mevcut haldeki MBR sistemi ile SYS sisteminin karşılaştırılması	83





GRİ SULARIN SERBEST YÜZEY AKIŞLI YAPAY SULAK ALAN SİSTEMLERİNDE ARITIM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Doğal kaynaklar sınırlı olmakla birlikte su, canlıların yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmeleri adına vazgeçilmez bir kaynaktır. Hızlı nüfus artışı ve sanayileşmenin yükselişiyle birlikte su kullanımının yoğunlaşması, küresel su kıtlığı kavramının başlıca sebebi olarak öne çıkmaktadır. Su kullanımının yoğunlaşması suya olan talebin ve su kaynakları üzerindeki baskının artmasına sebep olurken, mevcut su kıtlığının gelecek yıllarda “su krizine” dönüşmesine de sebebiyet verecektir. Dünyanın azımsanmayacak bir bölümünün şu an bile temiz içme suyuna erişimi olmadığı bilinmektedir. Bir önlem alınmadığı takdirde, zaman geçtikçe bu sorunun daha da kritik bir seviyeye ulaşması kaçınılmazdır. Bu sorunun önüne geçebilmek için sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi kavramlarının su kaynakları yönetimine entegre edilmesi gerekmektedir. Atık suların yeniden kullanımı bu entegrasyonun önemli bir adımıdır. Atık suların yeniden kullanımı kapsamında da öncelikle, evsel nitelikli atık suların büyük bir bölümünü oluşturan ve az kirlilik yüküne sahip gri suların yeniden kullanımı üzerinde çalışmak makul bir çözüm önerisi olmaktadır. Bu bağlamda, gri suyun yeniden kullanımı, atık suyun önemli bir bölümünü değerli bir su kaynağına dönüştürerek, sürdürülebilirlik çerçevesinde önemli bir rol oynayacaktır. Bu bağlamda, yüksek arıtma performansı gerektirmeyen ve değeri bilinmeyen gri su, tez çalışması kapsamında irdelenmiştir.

Gri su, kirlilik oranı zayıf bir atıksu olsa dahi yeniden kullanımı için ülkemizdeki mevzuatlar çerçevesinde arıtılması, içeriğinde bulunan patojenler ve hastalık yapabilecek diğer kirleticilerin giderilmesi gerekmektedir. Bu arıtmadan sonra gri su yeniden kullanım açısından yüksek bir potansiyele sahiptir. Gri suyun yeniden kullanımı, su kaynaklarının korunmasının yanında atıksu arıtma tesisine gelen hidrolik yükün azaltılması, su temini ve atıksu arıtma kaynaklı ekonomik külfetin azaltılması gibi faydalara da sahiptir.

Yapılan tez çalışması ile yeniden kullanımı ihmal edilen kaynak olarak öne çıkan gri suyun doğal arıtma sistemlerinde arıtımı sağlanarak kritik bir sorun haline gelecek olan su kıtlığına bir çözüm önerisi getirilmek istenmiş ve Türkiye için gri su yönetimi ile ilgili doğal arıtım metodolojisi oluşturularak, bu anlamdaki boşluğu doldurmak amaçlanmıştır. Türkiye çevre politikalarına katkı sağlama amacı ile de çalışmaya özgün bir değer katmak hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda; gri suların laboratuvar çalışmaları ile karakterizasyonunun belirlenmesinin ardından, gri su ile beslenen laboratuvar ölçekli serbest yüzey akışlı yapay sulak alan reaktörünün arıtma performansı değerlendirilmiştir. 2015 yılında TÜBİTAK tarafından yayınlanan fizibilite raporuna dayanak olan Taksim’de yer alan büyük ölçekli bir otelden gri su numuneleri alınmıştır. Tez çalışmaları kapsamında elde edilen karakterizasyon sonuçları rapor değerleri ile karşılaştırılmış olup, büyük bir farklılık görülmemiştir. Pandemi koşulları nedeniyle otelin tam kapasite ile çalışmaması sonucu azot ve fosfor

gibi besin maddelerinin konsantrasyonları raporda yer alan değerlerden düşük çıkmıştır. Buna karşın daha az su tüketimi neticesinde KOİ gibi değerler için ortalamadan yüksek değerler elde edilmiştir. Çalışmalar neticesinde, organik maddelerin giderimi konusunda tatminkâr sonuçlar elde edilmiş, ancak azot giderimi konusunda istenilen arıtım performansı sağlanamamıştır. Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemleri için en önemli giderim mekanizmaları adsorpsiyon, sorpsiyon ve filtrasyondur. Bunlara ek olarak, hasat zamanına dikkat edildiği takdirde, besin maddelerinin bitki bünyesine alımı da giderim mekanizması olarak ortaya çıkabilmektedir. Hasat zamanı gelen bitkinin sistemde tutulması ise bünyesindeki besin maddelerinin sisteme geri salınmasına neden olacağından bu durumun giderim olarak sayılamayacağı düşüncesi de çalışmalarda belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan sistem özelinde bakıldığında, 30 günlük işletme sonunda KOİ ve TOK parametreleri için yaklaşık %90 oranında, toplam fosfor için yaklaşık %85 oranında, organik azot için yaklaşık %65 oranında, toplam azot için de %10 oranında bir giderim gözlemlenmiştir. Toplam fosfor giderimine bakıldığında, literatürdeki çalışmalara oranla yüksek bir giderim verimi elde edilmiş olsa da, sistemin işletme süresinin arttırılmasıyla bu oranın düşmesi beklenmektedir. Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemlerinde biyolojik fosfor giderimi olmadığı için fosfor, sediment üzerinde adsorpsiyon ve bitki bünyesine alım ile giderilmektedir. Sistem başlangıcında adsorpsiyon ve bitki bünyesine alımın çok olması beklenirken, zaman içerisinde sisteme geri salınımın meydana gelmesi kaçınılmazdır. 30 günlük işletme boyunca kullanılan bitkinin hasat zamanı gelmediği ve sedimentin adsorplama kapasitesi tamamlanmadığı için giderim veriminde düşüş gözlemlenmemiştir. Giriş atık suyndaki düşük fosfor konsantrasyonu da bu durumun başka bir sebebidir. Toplam azot giderimine bakıldığında ise, literatürdeki çalışmalara oranla düşük bir giderim verimi elde edildiği söylenebilir. Azot gideriminin sağlanabilmesi için nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerinin gerçekleşmesi gerekmektedir. Amonyak azotu giderimine bakılarak nitrifikasyon adımının gerçekleştiği, toplam azot giderimine bakılarak da denitrifikasyon adımının gerçekleşmediği yorumunu yapmak mümkündür. Sistemin sürekli olarak beslenmesi, açık bir sistem olması ve giriş gri suyunun zayıf karakterli olması sistem içerisindeki oksijenin tamamen tüketilmemesine ve bunun sonucunda denitrifikasyon için gerekli olan anoksik/anaerobik koşulların meydana gelmemesine neden olmaktadır.

Azot ve fosfor gibi besin maddelerinin giderimi konusunda serbest yüzey akışlı sulak alanlar etkin olmasa da yüzeyaltı akışlı sulak alanlar ile hibrit işletilmesinin sonuçları literatürden araştırılmış ve gelecek çalışmalarda bu konunun üzerinde durulması ile su sorununa daha da uygun bir çözüm bulunacağı kanısına varılmıştır. Genel olarak, çalışmada kullanılan gri suyun azot ve fosfor değerleri düşük olduğu için yetersiz görülen arıtım performansı da atık suların yeniden kullanım standartlarının içerisinde kalmasına yetmiştir. Dünya genelinde atık suyun ve özellikle gri suyun yeniden kullanım standartları incelenerek, çıkış suyunun uygunluğu araştırılmıştır. Tez kapsamında deneyleri gerçekleştirilen parametreler için standartlara uygunluk gösterilmiş olup, mikrobiyolojik indikatörler konusunda belirsizlik mevcuttur. Mikrobiyolojik indikatörler için yapay sulak alan sistemlerinin çok etkili olmadığı bilindiği için, çıkış suyunun dezenfeksiyon prosesine tabi tutulması ile bu sorunun da çözüleceği düşünülmektedir. Literatürde de bu konuyla ilgili etkinliği kanıtlanan örnek çalışmalar bulunmaktadır.

Bununla birlikte, dolgu malzemesi olarak sediment yerine içme suyu arıtma çamuru kullanımı fosfor giderimi konusunda etkin bir yöntem olarak literatürde yer alsa da, bu

konuyla ilgili ülkemizde pek çalışma bulunmamaktadır. Bu konunun irdelenmesi de hem döngüsel ekonomi hem de gri su arıtımı konusunda ülkemizde doğal arıtım metodolojisi oluşturulması açısından önemli bir husus olarak ön plana çıkmakta olup bu hususta çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Ayrıca, tez çalışmasında bu sistemin uygulanabilirliği açısından önerilerde bulunulmuştur. Buna göre sulak alan sistemleri, yüksek alan gereksinimleri nedeniyle yer kısıtı olan yerlerde çok tercih edilmemektedir. Buna karşılık özellikle villa tipi sitelerin oluşturduğu alanlarda rekreasyonel amaçlı süs havuzlarının yerini sulak alan sistemlerinin alması ile rezervuar amaçlı kullanım ve peyzaj sulama olarak gri suyun yeniden kullanımı önerilmektedir. Bununla birlikte şebeke suyu kullanımı azaltılıp, hem çevresel hem ekonomik anlamda fayda sağlanacaktır.

Su sorunu, büyük ölçekli bir su krizine dönüşmeden önlem alınması ve çözüm önerileri getirilmesi gereken ivedi bir husustur. Doğal arıtma sistemleri ise sürdürülebilirlik kapsamında kendine yetebilen sistemler olarak öne çıkmaktadır. Tez çalışması ile doğal arıtma sistemleri kullanılarak atık suyun arıtılarak yeniden kullanımı ve bu sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılması vurgulanmıştır. Doğal arıtma sistemleri döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilerek, başka proseslerden çıkan atıkların giderim amacıyla kullanım çalışmalarının arttırılması gerekliliği önerilip, doğal kaynakların korunması amaçlanmıştır.



EVALUATION OF TREATMENT PERFORMANCE OF GRAY WATER IN FREE SURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS

SUMMARY

Water, which is a limited natural resource, is indispensable for living things to continue their vital activities. With the rapid population growth and the rise of industrialization, the intensification of water use stands out as the main reason for the concept of global water scarcity. The intensification of water use causes the demand for water and the pressure on water resources to increase. This situation will cause the current water scarcity to turn into a “water crisis” in the coming years. It is known that a substantial part of the world does not have access to clean drinking water even now. Unless a precaution is taken, it is inevitable that this problem will reach an even more critical level as time goes on. In order to prevent this problem, the concepts of sustainability and circular economy should be integrated into water resources management. Wastewater reuse is an important step in this integration. Within the scope of the reuse of waste water, it is a reasonable solution to work on the reuse of gray water, which constitutes a large part of domestic waste water and has a low pollution load. The reuse of gray water will play an important role in the framework of sustainability by transforming a significant portion of wastewater into a valuable water resource. In this context, gray water, which does not require high treatment performance and whose value is unknown, has been examined within the scope of the thesis.

Although gray water is a wastewater with a low pollution load, it must be treated within the framework of the legislation in our country for reuse. Pathogens and other contaminants that can cause disease must be removed. After this treatment, gray water has a high potential for reuse. The reuse of gray water has benefits such as both the protection of water resources and the reduction of hydraulic load to the wastewater treatment plant, reducing the economic burden of water supply and wastewater treatment.

With the thesis study, gray water, which stands out as a resource whose reuse is neglected, has been treated in natural treatment systems and it has been desired to propose a solution to water scarcity, which will become a critical problem. In addition, it is aimed to fill the gap in this sense by creating a natural treatment methodology for gray water management for Turkey. It is aimed to add a unique value to the study with the aim of contributing to the environmental policies of Turkey. Within the scope of the thesis, after determining the characterization of gray water by laboratory studies, the treatment performance of a laboratory scale free surface flow constructed wetland reactor fed with gray water was evaluated. Gray water samples were taken from a large-scale hotel in Taksim, which was the basis for the feasibility report published by TUBITAK in 2015. The characterization results obtained by these studies were compared with the reported values and no major differences were observed. As a result of the hotel not working at full capacity due to pandemic conditions, the concentrations

of nutrients such as nitrogen and phosphorus were lower than the values in the report. On the other hand, as a result of less water consumption, higher values were obtained for the COD parameter than the average. With these studies, satisfactory results were obtained in the removal of organic substances, but the desired treatment performance in nitrogen removal could not be achieved. The most important removal mechanisms for free surface flow wetland systems are adsorption, sorption and filtration. In addition to these, if attention is paid to the harvest time, the uptake of nutrients into the plant is seen as a removal mechanism. However, studies have also stated that this situation cannot be counted as a removal, as the plant will be kept in the system at harvest time and the nutrients in its body will be released back to the system. Considering the system used in the study, a removal of approximately 90% for COD and TOC parameters, approximately 85% for total phosphorus, approximately 65% for organic nitrogen, and 10% for total nitrogen was observed at the end of 30 days of operation. Considering the total phosphorus removal, although a higher removal efficiency was obtained compared to the studies in the literature, this rate is expected to decrease with increasing the operating time of the system. Since there is no biological phosphorus removal in free surface flow wetland systems, phosphorus is removed by adsorption on the sediment and uptake into the plant body. While adsorption and uptake are expected to be high at the beginning of the system, it is inevitable that nutrients are released back into the system over time. Since the harvest time of the plant used during the 30-day operation did not come and the adsorptive capacity of the sediment was not completed, no decrease in the removal efficiency was observed. The low phosphorus concentration in the inlet wastewater is another reason for this situation. Considering the total nitrogen removal, it can be said that a lower removal efficiency was obtained compared to the studies in the literature. In order to achieve nitrogen removal, nitrification and denitrification processes must take place. It is possible to interpret that the nitrification step is realized by looking at the ammonia nitrogen removal, and the denitrification step is not realized by looking at the total nitrogen removal. The continuous feeding of the system, the fact that it is an open system and the weak characterization of the inlet gray water have caused the oxygen in the system not to be completely consumed. As a result, it can be said that the anoxic/anaerobic conditions required for denitrification do not occur.

Although free surface flow wetlands are not effective in removing nutrients such as nitrogen and phosphorus, the results of hybrid operation with subsurface flow wetlands have been investigated in the literature. It has been concluded that a more suitable solution to the water problem will be found by focusing on this issue in future studies. In general, since the nitrogen and phosphorus values of the gray water used in the study were low, the inadequate treatment performance was sufficient to keep the wastewater within the reuse standards. The suitability of the effluent was investigated by examining the reuse standards of wastewater and especially gray water around the world. Compliance with the standards has been demonstrated for the parameters tested within the scope of the thesis, and there is uncertainty about microbiological indicators. Since it is known that constructed wetland systems for microbiological indicators are not very effective, it is thought that this problem will be solved by subjecting the effluent to the disinfection process. In the literature, there are sample studies that have proven their effectiveness on this subject.

In addition, the use of drinking water treatment sludge instead of sediment as a filling material is included in the literature as an effective method for phosphorus removal.

However, there are not many studies on this subject in our country. Examining this issue is an important issue in terms of establishing a natural treatment methodology in our country within the scope of both circular economy and gray water treatment. It is recommended to carry out studies on this issue.

In the thesis study, suggestions were made in terms of the applicability of this system. Accordingly, wetland systems are not very preferred in places with space constraints due to high space requirements. On the other hand, it is recommended that wetland systems replace recreational ornamental pools, especially in areas formed by villa-type sites. In this way, it will be possible to reuse gray water as reservoir use and landscape irrigation. In addition, the load of local water transmission will be reduced, and both environmental and economic benefits will be provided.

Before the water problem turns into a large-scale water crisis, it is an urgent matter that needs to be taken and solutions offered. Natural treatment systems, on the other hand, stand out as self-sufficient systems within the scope of sustainability. In the thesis study, it was emphasized that the reuse of wastewater by using natural treatment systems and the dissemination of the use of these systems. By evaluating natural treatment systems within the scope of circular economy, it was suggested to increase of researches related to the use of wastes from other processes for the purpose of pollution removal, and it was aimed to protect natural resources.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Anlam ve Önemi

Artan kuraklık ve su kaynaklarına olan baskı, atıksuların yeniden kullanımına olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle evsel atık suların hacimce %75’lik bir kısmını oluşturan gri suların geri kazanımı, artan bu baskıyı azaltacaktır (Abdalrahman ve diğ., 2017). Gri suların geri kazanımı ve yeniden kullanımı için, yüksek maliyet ve enerji gerektiren geleneksel arıtma sistemleri yerine, daha az enerji gerektiren ve karbon ayak izi düşük yeşil teknolojilerin kullanımı sürdürülebilir su yönetimi açısından önemlidir. Bu çalışmanın amacı, düşük maliyetli ve yüksek arıtma performanslarına ulaşan yapay sulak alan sistemlerinde gri su arıtımının araştırılması ve yeniden kullanımının sağlanmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda; gri suların laboratuvar çalışmaları ile karakterizasyonunun belirlenmesinin ardından, gri su ile beslenen laboratuvar ölçekli yapay sulak alan reaktörlerinin arıtma performansları araştırılacaktır. Çıkış suyu kalitesine göre ise bu kalitedeki suların uygun kullanım alanları belirlenecektir.

Bu çalışmalar sonucunda ulaşılmak istenen hedefler aşağıdaki gibidir:

1. Gri suyun yönetimi ile ilgili doğal arıtım metodolojisi oluşturmak.
2. Çıkış suyu kalitesine bağlı olarak şebeke suyu kullanımlarını azaltmak.
Böylece hem temiz su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlamak hem de şebeke suyu kullanım maliyetlerini düşürmek.
3. “Ulusal Su Planı” çerçevesinde ilgili hedeflere katkıda bulunmak.

1.2 Tezin Amaç ve Kapsamı

Su stresi, dünyanın birçok yerinde artık bir gerçeklik olarak kabul edilmektedir. Önümüzdeki yıllarda su tüketiminin önemli ölçüde artması ve iklim değişikliğinin de bu durum üzerindeki etkisiyle su stresi üzerindeki baskının daha da yükselmesi beklenmektedir (Collivignarelli ve diğ., 2020). Bu baskının hafifletilmesi için su tüketimlerini azaltmanın yanı sıra, olası bir çözüm de atıksuların yeniden kullanımıdır. Atıksular, günümüzde özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde su kıtlığı sorununun üstesinden gelmeye yardımcı olabilecek değerli bir kaynak olarak düşünülmektedir (Dominguez ve diğ., 2018).

Son yıllarda atıksuların geri kazanılması için, özellikle evsel düzeydeki su kıtlığı ile başa çıkabilme açısından gri suyun geri kazanılmasına yönelik araştırmalar artmıştır. Gri sular; tuvalet sifonu hariç lavabolardan, duşlardan ve çamaşır makinesinden üretilen evsel atıksulardır ve toplam evsel su kullanımının %50-80'ini oluşturur (Santasma ve diğ., 2013). Yağmur suyu hasadı gibi hidrolojik koşullara bağlı kaynakların kullanıldığı yöntemlerin aksine gri sular, sürekli tedariki nedeniyle kurak ve yarı kurak bölgelerde alternatif bir su kaynağı olarak güçlü avantajlara sahiptir. Bu özellik, diğer atıksuların aksine, gri sudaki kirleticilerin basit bir arıtma sistemi ile arıtılmasına izin vererek, suyun yerinde arıtılmasına olanak sağlar. Gri suların arıtımı için, son yıllarda araştırılan uygulamalardan biri de yapay sulak alan sistemleridir.

Yapay sulak alanlar, özellikle gelişmekte olan ülkeler açısından atıksu arıtımı ve yeniden kullanımı için dikkate değer sistemlerdir. Bu sistemler, birçok kirletici maddeyi ayrıştırabilen veya dönüştürebilen birçok abiyotik ve biyotik süreci barındıran biyolojik filtre olarak çalışan karmaşık sistemlerdir. Bitkiler vasıtasıyla atıksudaki kirleticilerin tutulması (fitoremediyasyon) bu sistemlerin önemli proseslerindendir. İnşa edilen bu sulak alanlar; düşük enerji gereksinimleri, kolay çalıştırma ve bakım, kırsal alanlarda yaygın uygulama, yüksek kirletici uzaklaştırma verimliliği ve çeşitli kaynaklardan farklı atıksu türlerini arıtma yeteneğine sahiptirler. Ayrıca yapay sulak alan ortamı, bitki örtüsünün sabitlenmesi, sisteme giren suyun eşit olarak dağıtılması, mikrobiyal büyüme için yüzey alanının sağlanması ve partiküllerin filtrelenmesi ve yakalanması gibi işlevleri yerine getirmektedir (Raphael ve diğ., 2020).

Bu tezin konusu; değerli bir kaynak olarak görülen gri suların, gelişim ve optimizasyon aşamasında olan yapay sulak alan sistemlerinde arıtılabilirliğinin ve geri kazanım potansiyelinin araştırılmasıdır. Gri suların arıtılması ve yeniden kullanılmasıyla, kaynak tüketimi d ş r leceğinden ve atıksu arıtma tesislerine gelen yük azalacağından dolayı küçük ve b   k    ekte çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar sağlanacaktır.

Bu çalışmada, gri su yönetimi için yapay sulak alan sistemlerinin performansı tespit edilecek ve tam    ekli uygulamalara rehberlik edebilecek veriler sağlanacaktır. Bu çalışmadan elde edilecek çıktılar literatürde mevcut olan benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak kullanılan bitki türlerinin kirletici giderim verimi bakımından üstün ve zayıf yönleri ortaya konulacaktır. Ayrıca gri su yönetimi konusunda, doğal arıtma sistemleri açısından ulusal ve uluslararası literatüre katkı sağlanacaktır.

Bu  alışmalar sonucunda ulaşılmak istenen hedefler aşağıda belirtildiği şekildedir:

1. Gri suyun yönetimi ile ilgili ülkemize özgü standart bir yaklaşım oluşturmak.
2. Sistemin uygulandığı yapılar da şebeke suyu kullanımında düşüş sağlamak. Bu sayede hem temiz su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlamak hem de şebeke suyu kullanımı maliyetlerini düşürmek.
3. “On Birinci Kalkınma Planı”, “Ulusal Su Planı” ve “Planlı Alanları İmar Yönetmeliği”  er evesindeki ulusal hedeflere katkıda bulunmak.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Dünya nüfusunun yaklaşık üçte birinin temiz içme suyuna erişimi olmadığı tahmin edilmektedir (WHO, 2017). Küresel su kıtlığının başlıca sebepleri, nüfus artışı, ekonomik gelişmeler neticesinde tarım ve sanayide yoğun su kullanımı, artan yaşam standardı ve iklim değişikliği olarak sayılabilir (Kummu ve diğ., 2010). Bu nedenle su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi çok önemlidir. Bu bağlamda, döngüsel ekonomi kavramının atıksu konusuna entegrasyonunun sağlanması gerekmektedir. Gri su, tuvalet sifonu hariç, lavabolardan, duşlardan ve çamaşır yıkamadan kaynaklanan, kirlilik seviyesi düşük atıksudur. Evsel nitelikli atıksuların %70'e yakını gri su oluşturmaktadır (Oron ve diğ., 2014). Miktar olarak fazla olmasının yanı sıra idrar, dışkı ve tuvalet kağıdı içermediği için evsel atık suya göre daha az kirlilik yüküne sahiptir. Gri su kullanımı, iklim değişikliğine uyum sağlamaya, gıda güvenliğini artırmaya, içme suyu tedarikini genişletmeye ve çevredeki kirleticileri azaltmaya yönelik yerel ve ulusal çabaların önemli bir bileşeni olarak giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır (Beck ve diğ., 2013). Bu nedenle, gri suyun yeniden kullanımı, atık suyun önemli bir bölümünü değerli bir su kaynağına dönüştürerek, sürdürülebilirlik çerçevesinde önemli bir rol oynayabilir (Shaik ve Ahammed, 2020).

Birleşmiş Milletler (BM) raporuna göre Dünya nüfusunun 2050 yılı itibariyle 9,8 Milyara yükseleceği tahmin edilmektedir (Url-1). Artan Dünya nüfusunun yanı sıra su talebi de her geçen yıl yükselmektedir. Dünya Bankası 1 Ocak 2021 "Su Kaynakları Yönetimi" raporuna göre 2050 itibariyle küresel bazda su talebinin %20 ila %30 arasında artacağı tahmin edilmektedir. Yine aynı raporda yer alan önemli bir istatistik de günümüzde dünyadaki şehirlerin dörtte birinin su sıkıntısı yaşadığı ve kentsel su talebinin gelecek 30 yıl içinde %50 ila %70 arasında artmasının beklenmesidir (Url-2). Su talebinin artması su kaynakları üzerindeki baskının artmasına ve mevcut su kıtlığının gelecek yıllarda "su krizine" dönüşmesine neden olacaktır. Birleşmiş Milletler Üniversitesi 2030 yılında su talebinin su arzından %40 fazla olacağını tahmin etmektedir (Url-3).

Türkiye su zengini bir ülke değildir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Türkiye'de kişi başına düşen su miktarı 1566 m³/yıl olarak açıklanmıştır. Bu miktar dikkate alındığında, ülkemiz su stresi çeken ülkeler arasında yer almaktadır. TÜİK

nüfus projeksiyonlarına göre 2050 senesinde ülke nüfusunun 100 milyonu geçeceği göz önünde bulundurulduğunda, ülkemizde kişi başına düşen yıllık su miktarı 1000 m³'ün altına düşeceği ve böylelikle gelecekte su fakiri ülkelerden birisi olacağımız kaçınılmaz bir gerçektir. Bu durumun önüne geçilmesinin tek yolu temiz su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltmak olup, uygun arıtma teknolojileriyle atıksuların geri kazanımı ve yağmur suyu hasadı çalışmaları ile alternatif su kaynaklarının oluşturulması bu bağlamda etkin bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde yıllık su tüketiminin %74'ünü sulama faaliyetlerinin oluşturduğu düşünüldüğünde, oluşturulacak alternatif su kaynaklarının bu alanda da kullanımı toplam su tüketiminin azaltılması açısından yüksek öneme sahiptir (Url-4).

Gri su, tuvaletlerde oluşan ve insan kaynaklı organik kirleticileri içeren atık sular haricindeki; yani çamaşır ve bulaşık makinaları, lavabolar ve banyolardan kaynaklanan kirlilik seviyesi düşük ve miktarı yüksek olan atıksu akımıdır. Evsel nitelikli atıksuların %70'e yakını gri su oluşturmaktadır (Oron ve diğ., 2014). Miktar olarak fazla olmasının yanı sıra idrar, dışkı ve tuvalet kağıdı içermediği için evsel atıksuya göre daha az kirlilik yüküne sahiptir. Evsel atıksuda bulunan organik kirletici yükünün yaklaşık %30'u, besi maddesinin ise 10-%20'si gri sudan kaynaklanmaktadır (Beck ve diğ., 2013). Gri su, kirlilik olarak zayıf bir atıksu olsa dahi yeniden kullanımı için ülkemizdeki mevzuatlar gereği arıtılması, içeriğinde bulunan patojenler ve hastalık yapabilecek diğer kirleticilerin giderilmesi gerekmektedir. Arıtılmış gri su yeniden kullanım açısından yüksek bir potansiyele sahiptir. Gri suyun yeniden kullanımı, su kaynaklarının korunması dışında atıksu arıtma tesisine gelen hidrolik yükün azaltılması, su temini ve atıksu arıtma kaynaklı ekonomik külfetin azaltılması gibi faydalara da sahiptir (Beck ve diğ., 2013).

Gri suyun arıtılması için, membranlar ve kum filtreleri gibi basit fiziksel filtrasyon sistemlerinden biyolojik, kimyasal ve fiziksel arıtma mekanizmalarını içeren yüksek derecede otomatik ve enerji yoğun sistemlere kadar bir dizi teknoloji kullanılmıştır (Li ve diğ., 2009). Buna ilaveten, geçmişte, düşük maliyetli, daha az arazi gereksinimi olan, sürdürülebilir ve verimli teknolojiler kullanılarak ikincil (içme suyu harici) uygulamalar için gri suyun arıtılması ve yeniden kullanılması araştırılmıştır (Ramprasad ve diğ., 2017). Bu sistemlerden bir tanesi de doğal sulak alanları taklit eden serbest yüzey akışlı yapay sulak alanlardır. Serbest yüzey akışlı yapay sulak alanların faydaları arasında, yüksek arıtma kapasitelerinin yanı sıra yaban hayatı ve

habitat çeşitliliğini desteklemesi, rekreasyonel faaliyetler (örn. kuş gözlemciliği), su depolama ve çevre estetiğini iyileştirmesi bulunur (Stefanakis ve diğ., 2014). Yapay sulak alanlar geleneksel sistemlere göre daha az bakım gerektirmesi, düşük kurulum ve işletme maliyeti nedeniyle son yıllarda popülerlik kazanmıştır (Ramprasad ve diğ., 2017). Bu sistemler genellikle çeşitli atık su akımlarını arıtmanın ekonomik ve enerji açısından verimli bir yolu olarak önerilmektedir (Liu ve diğ., 2015). Akış düzenlerine göre sınıflandırılmış çeşitli yapay sulak alan türleri vardır. Bu türler serbest yüzey akışlı yapay sulak alanlar ve yüzeyaltı akışlı yapay sulak alanlardır. Bu sistemlerin birçok modifikasyonu olduğu gibi hibrit olarak da uygulanmaktadır (Lim ve diğ., 2012).

2.2 Yapay Sulak Alanlar

Yapay sulak alanlar, doğal sulak alan ekosistemlerinde bulunan ekolojik süreçleri kullanmak, sulak alan bitkilerini, toprakları ve ilgili mikroorganizmaları kullanarak atık sudan kirleticileri uzaklaştırmak için tasarlanmış bir teknoloji olarak tanımlanabilir (EPA, 2004; Yadav ve Ghaitidak, 2013). Başka bir deyişle, inşa edilmiş arıtma sulak alanları, sulak alan bitki örtüsünün, topraklarının ve mikrobiyal popülasyonlarının doğal işlevlerini kullanarak yüzey suyu, yeraltı suyu veya atık akışlarındaki kirleticileri arıtmak için tasarlanmış ve inşa edilmiş mühendislik sistemleridir (Stottmeister ve diğ., 2003). Yapay sulak alanlarda, doğal süreçler kirleticileri stabilize etmeye, ayırmaya, biriktirmeye, parçalamaya ve metabolize etmeye/mineralize etmeye yardımcı olur (Nelson, 2014). Yapay sulak alanlar, teknik atık su arıtma yöntemlerine doğal bir alternatiftir (Stottmeister ve diğ., 2003). Ayrıca yapay sulak alanlar, mansaptaki su kütleleri için minimum tehdit oluşturan sürdürülebilir bir arıtma yöntemidir (Melbourne water, 2005).

Yapay Sulak Alanlar (YSA), evsel atık suların, tarımsal atık suların, petrol rafinerisi atık sularının, kompost ve çöp sızıntı sularının, kâğıt fabrikalarından, tekstil fabrikalarından gelen endüstriyel atık suların arıtılması için birincil ve ikincil arıtma için uygulanmaktadır. Dikkatli bir şekilde tasarlanıp, işletilir ve bakımı yapılırsa yapay sulak alanlar düşük maliyetli ve etkili bir arıtma teknolojisidir (Davis ve diğ., 1995). Bununla birlikte son zamanlarda zayıf kirlilik yüküne sahip gri suyun arıtımı ve yeniden kullanımı için yapay sulak alanlar popüler bir alternatif haline gelmektedir. Yapay sulak alanların en büyük dezavantajı alan gereksinimi olarak ortaya çıksa da kentsel

bölgelerde rekreasyon amaçlı olarak inşa edilmiş bir sulak alan tasarlanıp, atık suların arıtımı konusunda fayda sağlanabilir.

Ek olarak, sulak alanlar çoğu ekosistemden daha yüksek bir biyolojik aktivite oranına sahip olduğundan, geleneksel atık sularda meydana gelen yaygın kirleticilerin birçoğunu, biyolojik üretkenlik için kullanılabilecek zararsız yan ürünlere veya temel besinlere dönüştürebilirler. Bu dönüşümler, güneş, rüzgâr, toprak, bitkiler ve hayvanlardan oluşan doğal çevresel enerjileriyle sulak alanın kara alanı sayesinde gerçekleştirilir. Bu kirletici dönüşümler, nispeten düşük maliyetli hafriyat, borulama, pompalama ve birkaç yapı için elde edilebilir. Sulak alanlar, işletmesi ve bakımı en ucuz arıtma sistemlerinden biridir. Bir sulak alan arıtma sisteminde doğal çevresel enerjiler hâkim olduğu için, arıtma hedeflerini karşılamak için tipik olarak minimum fosil yakıt enerjisi ve kimyasallar gereklidir.

Atık stabilizasyon havuzu, aktif çamur prosesi, membran biyoreaktör (MBR), damlatma filtreleri, yukarı akışlı çamur yataklı reaktör (UASB), hareketli yataklı biyofilm reaktörü (MBBR) ve ardışık kesikli reaktör (SBR) gibi çeşitli atık su arıtma teknolojileri vardır. Her arıtma teknolojisinin farklı arazi alanı gereksinimi, maliyeti, geri ödeme süresi ve giderim verimliliği vardır (Von Sperling ve de Lemos Chernicharo, 2005; Sato ve diğ., 2007; Gnanadipathy ve Polprasert, 1993; Sawajneh ve diğ., 2010; Chernicharo ve diğ., 2009; Sundaresan ve Philip, 2008; Chen ve diğ., 2010). Yukarıda bahsedilen tüm teknolojiler arasında, yapay sulak alan, daha az işletme ve bakım süresi ile sürdürülebilir ve düşük maliyetli arıtma teknolojisi olarak bulunmuştur (Sonavane ve diğ., 2008; Khazaleh ve Gopalan, 2018). Ancak, aerobik, fakültatif ve anaerobik bölgelerde farklı atık su türlerini arıtmak için inşa edilmiş sulak alanın dinamik davranışının yanı sıra ortam ve bitki örtüsü seçimi için uygun yönergeler yoktur. Literatür ve sınırlamalara dayalı olarak, bu çalışmanın amacı, gri su arıtımı konusunda bitki seçimi, kirletici giderim verimliliği ve suyun yeniden kullanımı dikkate alınarak yapay sulak alanların yaygınlaştırılmasını desteklemektir.

2.2.1 Yapay sulak alanların avantaj ve dezavantajları

Bir sulak alanın işlevi ve bu işlevin insanlar üzerindeki etkileri, sulak alanın havzadaki diğer ekosistemlerle olan ilişkisine bağlıdır. Sulak alanlar oldukça karmaşık yapılar olduklarından, doğal yaşama ve insan yaşamına dair birçok fonksiyona sahiptirler.

Tez kapsamında çalışılan, serbest yüzey akışlı sulak alan sistemlerine bakılacak olursa, düşük işletme ve bakım maliyetine sahip sürdürülebilir bir arıtma teknolojisi olması ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, özellikle serbest yüzey akışlı sulak alan sistemleri doğal sulak alanları taklit ettikleri için doğal sulak alanların sağladıkları faydalara sahiptirler.

Bu faydalar sıralanacak olursa; (TÜBİTAK, 2011)

1. Farklı canlı türleri için yaşam alanı oluşturmak
2. Biyolojik üretim ve çeşitlilik sağlamak
3. Su temini, kalitesi ve hidrolojinin geliştirilmesini sağlamak
4. Fırtına ve sel etkisini azaltmak
5. Erozyonu önlemek
6. Sulak alanlarda tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin gerçekleştirmek
7. Sulak alanlarda rekreasyon, eğitim ve araştırma olanağı sağlamak gibi pozitif etkiler sayılabilir.

Yapay sulak alanlar, yaklaşık tesis maliyetinin %1-2'si ile atık suların arıtımını sağlayan, düşük işletme ve bakım maliyetine sahip bir arıtma alternatifidir. Yapay sulak alanlardan arıtılmış sular, rezervuar kullanım suyu olarak, bahçe sulama, araç yıkama sulaması ile rekreasyonel amaçlar için kullanılabilir. Arıtılmış su, mansap su kütlelerine giden kirleticilerin konsantrasyonunu azaltır (Melbourne water, 2013). Yapay sulak alanlar, BOİ (%80-%90), KOİ (%60-%85) ve AKM (%80-%95) için yüksek giderim verimliliği sağlar. Ayrıca, amonyak azotu ve fosforun giderilmesinde de yardımcı olur. Bir çalışmada, sulak alanda bitki örtüsü olarak kullanılan *Phragmites australis* ve *Typha latifolia*, daha yüksek azot ve fosfor giderim oranı sağladığı saptanmıştır. (Sudarsan ve diğ., 2018). Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemlerinde direkt biyolojik fosfor giderimi olmasa da, bitkinin bünyesine alması, adsorpsiyon gibi mekanizmalar ile uzaklaştırma sağlanmaktadır. Bu da bitki seçiminin kirletici giderim veriminde etkisini ortaya koymaktadır.

Her arıtma alternatifinin bazı sınırlamaları vardır. Yapay sulak alanların dezavantajları ise aşağıda yer almaktadır:

- i. İnşa edilmiş sulak alanda kullanılan bitki örtüsü daha yüksek biyokütle üretir, bu nedenle sistemin optimum giderim verimini elde etmek için düzenli hasat gereklidir. Bu, inşa edilen sulak alanın bakım maliyetini artırır.
- ii. Her bitki türünün kirleticiler için farklı giderim verimleri vardır ve sulak alana sadece birkaç tür ekilebilir, bu nedenle inşa edilen sulak alanda her kirleticinin en yüksek verimde giderilmesi mümkün değildir.
- iii. İnşa edilmiş sulak alanlardaki arıtma işlemi, diğer arıtma işlemlerine göre zaman alır. Mevsimsel olarak etkilenmektedir. (Chintakovid ve diğ., 2008). Yaz mevsiminde birçok türün giderim verimi kış mevsimine göre daha iyi olmaktadır.
- iv. İnşa edilen sulak alanda bulunan kontamine bitkilerin uygun şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir (Ahalya ve diğ., 2003; Ghosh ve Gopal, 2010; Lasat, 2000).
- v. Serbest yüzey akışlı yapay sulak alanlarda, ağır metaller gibi bazı kirleticiler sucül fitoremediasyon için etkili değildir. Serbest su yüzeyinde sivrisinek üremesi de ana sorundur.

Bunların yanı sıra, dezavantaj olarak bazı makalelerde yer alan anaerobik koşullar nedeniyle metan gazı oluşturma, enerji üretimi konusunda değerlendirilirse önemli bir fayda haline dönüşecektir. Ayrıca, sivrisinek gibi problemler için çalışmalar yapılmış olup, bazı çözüm önerileri getirilmiştir (TÜBİTAK, 2011)

2.2.2 Yapay sulak alan tipleri

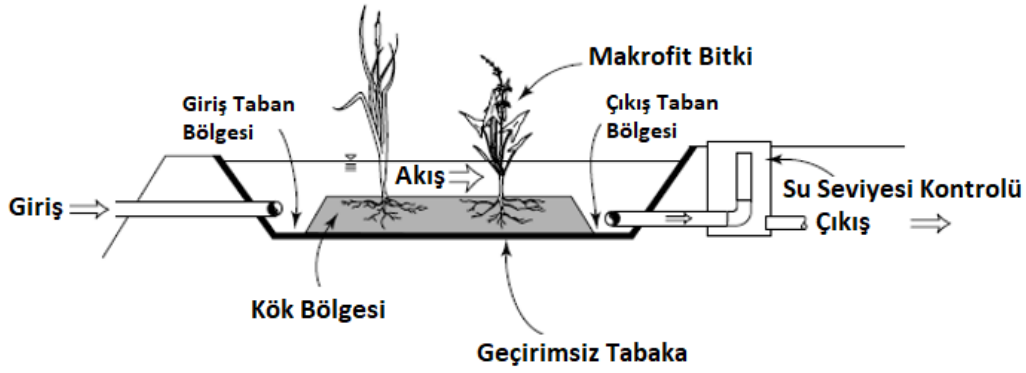
Yapay sulak alanlar, gelişmiş arıtma kapasitesi için doğal sulak alan ekosistemlerinin belirli özelliklerini vurgulamak üzere tasarlanmış insan yapımı sistemlerdir.

Yapay sulak alanlar, Serbest Akışlı Sulak Alan Sistemleri (SYS) ve Yüzey altı Akışlı Sulak Alan Sistemleri (YAS) olarak iki ana tipe ayrılır. SYS, suyun yatay olarak aktığı ve sulak alan yatağı yüzeyi boyunca işlem gördüğü kalıcı bir su derinliğine sahiptir. YAS sistemleri ayrıca atık suyun yataktan nasıl aktığına bağlı olarak yatay akışlı (Y-YAS) ve dikey akışlı (D-YAS) olarak alt kategorilere ayrılır. Y-YAS sistemlerinde su, yüzeye yakın bir uçtan girişe sürekli olarak verilir ve ortam boyunca yatay olarak karşı uçtaki çıkışa akar. D-YAS sistemlerinde su, üst yüzeyden aralıklı olarak (gruplar halinde) beslenir ve ortam boyunca dikey olarak akar (Cooper ve diğ., 1996). Bu iki

tasarım, farklı arıtma performans seviyeleri ile sonuçlanan farklı baskın süreçlere sahiptir ve bunlar, sulak alan uygulamalarının başlangıcından beri kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Bu araştırmalar neticesinde de, özellikle bu iki tip sulak alanın entegrasyonu benimseyen hibrit yapay sulak alan sistemleri daha yüksek arıtım verimliliği konusunda popüler hale gelmiştir. Yapay sulak alanlarda kirletici giderimi, organik madde ve azotun (N) giderilmesini sağlayan biyolojik mikrobiyal işlemlerle birlikte çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerin bir işlevidir. Giderim verimliliği açısından, YSA'lar %98'e varan yüksek BOİ ve KOİ giderimi, %99'a varan patojenik gösterge azalması göstermiştir (Vymazal, 2009; Vymazal 2005; Frazer-Williams ve diğ., 2008). Bu nedenle yapay sulak alanlar, birincil atık suyun basit, ucuz ve sağlam arıtımı için doğal bir yol sağlar. Aktif çamur gibi geleneksel arıtma sistemlerinden farklı olarak, yapay sulak alanlar, Y-YAS varyantında düşük organik konsantrasyonlu (<50– 80 BOİ₅ mg/L) (Vymazal, 2009) ve D-YAS varyantında ise yüksek organik konsantrasyonlu atık suları arıtabilmektedir. (Langergraber ve diğ., 2009). Bu, yapay sulak alan teknolojisini, kaynağa bağlı olarak çok çeşitli organik konsantrasyonlara sahip olan gri su arıtımı için uygun hale getirir. Farklı kimyasal özelliklere sahip atık suların işlenmesinde YSA'ların kanıtlanmış etkinliğine rağmen, çoğu gri su yeniden kullanım projesi şu ana kadar MBR, MBBR ve RBC gibi gelişmiş arıtma teknolojilerini tercih etmiştir (Surendran ve Wheatley, 1998; Friedler ve diğ., 2005; Nolde, 2000). Ancak, yapay sulak alan teknolojisi, gri su geri dönüşümü için bir arıtma seçeneği olarak daha yaygın hale gelmelidir.

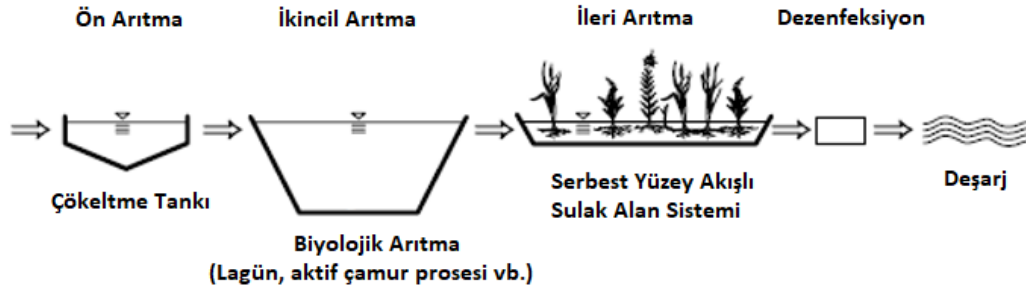
2.2.2.1 Serbest yüzey akışlı sulak alan (SYS)

Bu sulak alanlar ya tasarım gereği ya da tasarım konfigürasyonunun kaçınılmaz bir sonucu olarak, açık su, yüzen bitki örtüsü ve yeni ortaya çıkan bitkileri içerir. Yerel düzenlemelere ve toprak koşullarına bağlı olarak, akış ve sızmayı kontrol etmek için setler ve izolasyonlu malzemeler kullanılabilir. Atık su sulak alandan akarken, çökeltme, filtrasyon, oksidasyon, indirgeme, adsorpsiyon ve çökeltme işlemleriyle arıtılır. Tipik bir SYS sistemindeki bileşenler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Serbest Yüzey Akışlı Sulak Alan(SYS) (Wallace ve Kadlec, 2009)

SYS inşa edilmiş sulak alanlar doğal sulak alanları yakından taklit ettiğinden, böcekler, yumuşakçalar, balıklar, sürüngenler, kuşlar ve memeliler gibi çok çeşitli vahşi yaşamı çekmeleri şaşırtıcı olmamaktadır (Kadlec, 1999). İnsanların patojenlere maruz kalma potansiyeli nedeniyle, SYS sulak alanları nadiren ikincil arıtma için kullanılır (EPA, 2004). SYS sistemi için en yaygın uygulama, ikincil veya üçüncül arıtma işlemlerinden kaynaklanan atık suların ileri düzeyde arıtılması içindir. SYS sulak alanlı bir arıtma dizisinin tipik bir uygulaması Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 SYS sistemi yer alan tipik bir arıtma şeması (Wallace ve Kadlec, 2009)

Kadlec ve Wallace SYS sisteminin, tüm iklimler için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, özellikle soğuk bölgelerde buz oluşumu hidrolik olarak kış çalışmasını engelleyebilir ve azot dönüşümleri gibi bazı giderim işlemlerinin oranlarının daha düşük olacağı söylenebilmektedir. Açık suyu buz kapladığında, atmosferden oksijen transferi azalır ve oksijene bağımlı arıtma süreçleri azalır. AKM giderimi gibi diğer işlemler buzun altında yaz koşullarına göre daha etkilidir. Suyu kışın depolamak ve yılın sıcak döneminde arıtmak genellikle daha verimlidir (Kadlec ve Wallace, 2009).

SYS sistemi, pik akışlar ve değişen su seviyeleri ile başa çıkma yetenekleri nedeniyle kentsel, tarımsal ve endüstriyel yağmur sularının arıtılması için neredeyse özel bir seçimdir. Maden atık sularının arıtılması, yeraltı suyu iyileştirme ve sızıntı suyu arıtımı için sıklıkla tercih edilirler (Vymazal, 2009).

SYS sistemleri, öncelikle insan kullanımı ve vahşi yaşam habitatı şeklinde önemli yan faydalar sağlayabilir. Arıtma bataklıkları ucuz değildir, ancak genellikle alternatif teknolojilerle rekabet eden sermaye maliyetine sahiptir. İşletme maliyetleri, alternatiflere kıyasla tipik olarak oldukça düşüktür (Kadlec ve Wallace, 2009).

Serbest su yüzeyi oluşturulmuş sulak alan, atık suyun yüzey üzerinden aktığı doğal bir sulak alandır. Atık su kalitesinin iyileştirilmesi ile birlikte taşkın önleme ve kıyı şeridi erozyon kontrolü için faydalıdır (Farooqi ve diğ., 2008). Serbest su yüzeyi inşa edilmiş sulak alanlarda gelişen bitkiler (*Typha*, *Phragmites*, *Scirpus*), batık bitkiler (*Potamogeton*, *Elodea*) ve yüzen bitkiler (*Eichornia*, *Lemna*) gibi çok çeşitli bitkiler kullanılabilir (DBT, 2019).

2.2.2.2 Yatay akışlı yüzeyaltı sulak alan (Y-YAS)

Y-YAS sistemleri, sulak alan bitki örtüsü ile dikilmiş çakıl veya toprak yataklarından oluşur. Bunlar tipik olarak, toprak dağılmasından veya yüzey suyu tahliyesinden önce birincil atık suların arıtılması için tasarlanmıştır. Atık suyun ortamın yüzeyinin altında kalması amaçlanır ve bitkilerin kökleri ve rizomlarının içinde ve çevresinde akar. Arıtma işlemi sırasında suya maruz kalınmadığı için, insan veya yaban hayatının patojenik organizmalara maruz kalmasıyla ilişkili risk en aza indirilir. Düzgün işletilen Y-YAS sulak alanları sivrisinekler için uygun yaşam alanı sağlamaz.

Bu sistemlerde atık su akışı sediment altında yer aldığından dolayı SYS sistemlerine göre daha soğuk koşullarda çalışabilmektedir. Önemli bir operasyonel husus, ortamın tıkanma eğilimidir. Ancak Y-YAS sistemleri, SYS sistemlerinin sağladığı yan faydalar için aynı fırsatları sağlamaz.

Atık su aerobik ve anaerobik koşullara maruz kalır. Y-YAS sistemlerinde kök bölgesinde anaerobik koşul oluşur ve organik madde anaerobik koşulla bozunur (DBT, 2019). Y-YAS sistemleri, BOİ, KOİ, amonyak azotu, fosfat, AKM, vb. gibi kirleticilerin giderilmesinde etkilidir (Solano ve diğ., 2004; Steer ve diğ., 2002). Y-YAS, dikey akışla oluşturulmuş sulak alanlara göre daha fazla arazi alanı gerektirir,

ancak daha iyi denitrifikasyon potansiyeli sunar (Saeed ve diğ., 2012; Knight ve diğ., 2000; Calheiros ve diğ., 2007; Sudarsan ve diğ., 2018).

2.2.2.3 Dikey akışlı yüzeyaltı sulak alan (D-YAS)

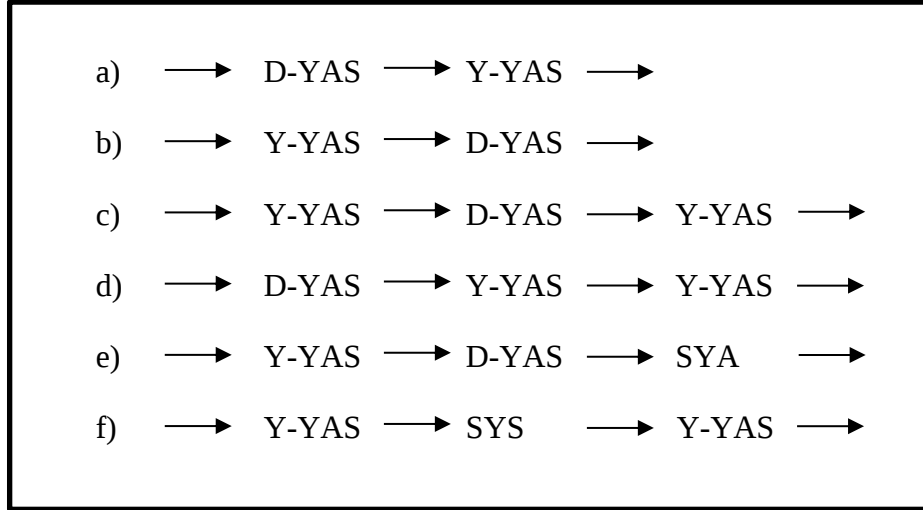
Dikey akışlı sulak alan, atık suyun sulak alanın tepesinden battığı ve alttan tahliye edildiği bir sulak alandır. Atık su yatağın içinden dikey olarak akar. Dikey akışlı sulak alan aerobik koşul sunar, bu nedenle yüksek nitrifikasyon, BOİ, KOİ ve diğer kirletici giderimleri sağlanır. Dikey akışlı sulak alan için arazi alanı gereksinimi 1-3 m²/N olup, Y-YAS sistemlerinden daha azdır ancak Y-YAS'lardan daha fazla bakım gerektirir (DBT, 2019).

Y-YAS sistemlerinin sınırlı oksijen transferi nedeniyle amonyağı oksitleme kapasitesi sınırlıdır. D-YAS sistemleri Avrupa'da daha yüksek seviyede oksijen transferi sağlamak ve böylece nitrifiye edilmiş bir atık su üretmek için geliştirilmiştir. Bu sistemler, nitrifikasyon-denitrifikasyon proseslerini beraber kullanabilmek için Y-YAS veya SYS sistemleriyle birleştirilebilir (Cooper ve diğ., 1999).

D-YAS sistemlerinin amonyağı oksitleme kabiliyeti, yüksek amonyak içeren belediye veya evsel atık suların arıtım uygulamalarında kullanılmasıyla kanıtlanmıştır. Çöp sızıntı suları ve gıda işleme atık suları litre başına yüzlerce miligram amonyak seviyelerine sahip olabilir ve azaltmanın anahtarı nitrifikasyon yeteneğidir. Başarılı D-YAS sulak alanları bu nedenle bu atıklar için arıtma sürecinin bir parçasını oluşturmuştur (Burgoon ve diğ., 1999; Kadlec, 1999).

2.2.2.4 Hibrit yapılı yapay sulak alan

Hibrit bir YSA tasarımı, arıtma performansını en üst düzeye çıkarmak için her özel bileşenden yararlanarak farklı aşamalar için farklı tasarımlara sahip olabilir. İlk olarak, Y-YAS ve D-YAS sistemlerinin bir kombinasyonu anlamına gelen çok aşamalı arıtma sistemi olarak ortaya çıkmıştır (Davis ve diğ., 1995). Hibrit yapılı sulak alanların giderim verimliliği, diğer yapay sulak alan türlerine göre daha fazladır. Atık suyun özelliklerine göre aerobik veya anaerobik koşullara göre farklı inşa edilmiş sulak alan türleri farklı giderim verimlerine sahiptir, hibrit yapılı sulak alan sistemleri birçok varyasyon ile oluşturulabilmektedir (Saeed vd., 2012; Yazdania ve Golestanib, 2019; Barbera vd., 2009). Hibrit yapılı sulak alan sistemlerinin bazı varyasyonları Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Hibrit yapılı sulak alan sistemi varyasyonları

Çoklu ve/veya hibrit aşamalarındaki giderim seviyelerinin, yeniden kullanıma uygun atık su üreten tek aşamalı sistemlerden daha etkili olduğu gösterilmiştir. Hibrit sulak alan varyasyonları kirletici karakterizasyonlarına göre farklı avantajlara sahiptir ve bunlara göre şekillendirilebilir. Örnek vermek gerekirse, dikey (D-YAS) ve yatay akış sistemleri (Y-YAS), Y-YAS-D-YAS veya D-YAS-Y-YAS hibrit sulak alan tasarımları farklı avantajlara sahiptir. İki aşamalı Y-YAS-D-YAS hibrit sistemleri, son D-YAS aşamasında düşük denitrifikasyon nedeniyle BOİ, KOİ, SS, bakteri ve amonyağın iyi bir şekilde giderilmesini sağlar, ancak toplam azotu gideremez (Vymazal, 2005; Cooper, 1999). Yatay akış sistemiyle hibrit bir YSA'nın başlatılması, BOİ'nin giderileceği ve dikey akış aşamasında nitrifikasyona müdahale etmesinin önleneyeceği anlamına gelir. Bununla birlikte Cooper (1999), BOİ, KOİ ve bakterileri gidermek ve ayrıca tüm amonyak azotunu nitrata oksitlemek için öne bir D-YAS yerleştirilmesini önerir. Bu aynı zamanda aerobik bozunmaya maruz kaldıkları için gri suda bulunan yüzey aktif maddelerin parçalanmasına da yardımcı olacaktır (Kuhnt, 1993). Sulu çözeltilerdeki yüzey aktif maddeler sıvı/gaz veya katı/sıvı arayüzünde birikme eğilimindedir (Shafran ve diğ., 2005), bu sayede sulak alanlardan askıda kalan katıların uzaklaştırılması, yüzey aktif maddelerin uzaklaştırılmasında ve genel kimyasal toksisitenin giderilmesinde (yatay akış tasarımı) önemli bir rol oynamaktadır. Tek, iki-aşamalı ve çok-aşamalı hibrit tasarımların giderim yüzdelere bakıldığında, çok-aşamalı hibrit tasarımın bulanıklık, KOİ, BOİ'nin yüksek oranda giderilmesi nedeniyle sulamada yeniden kullanım için gri suyun arıtımında daha uygun olduğunu göstermektedir. Çok aşamalı bir tasarım, tüm olumlu özelliklerin

optimize edilmesi için D-YAS sisteminin öne ve uca yerleştirilebileceği daha iyi bir tasarım seçeneği sunar. Ancak, Y-YAS sistemi olmadan çok aşamalı bir D-YAS sisteminin arıtma performansı literatürde yaygın olarak rapor edilmemiştir. BOİ, KOİ, bakteri ve amonyak azotunun çoğunu giderdikten sonra, özellikle gri suyun arıtılması için yüksek oksijen transfer kapasitesinden yararlanacak olan sonraki D-YAS yataklarında bunların giderilmesinin (logaritmik olarak) devam etmesi mümkündür.

Bunlarla birlikte sulak alan tipleri içerisinde yer alması da ek teknolojilerle birleştirilmiş sulak alanlar da özellikle yeniden kullanım standartlarının sağlanması açısından son zamanlarda popüler hale gelmiş ve bu konu üzerine çalışmalar yapılmıştır. En çok karşılaşılan ek teknoloji olarak dezenfeksiyon sayılabilir. Buna ek olarak, enerji üretimi konusunda anaerobik sistemlerle birleştirilmiş sulak alan çalışmaları da bulunmaktadır.

Bazı çalışmalar, mevcut sulak alanlara filtrasyon, ultraviyole (UV) arıtma vb. gibi farklı teknolojilerin eklenmesine odaklanmıştır. Bu fiziksel, kimyasal veya biyolojik teknolojiler, özellikle bulanıklık veya mikrobiyal göstergeler gibi bazı kirleticiler için atık su arıtımını iyileştirmek için uygulanmıştır (Russo ve diğ., 2019a; Toscano ve diğ., 2013).

İtalya'da, Russo ve diğ. (2019a), bir yıl boyunca bir UV ünitesiyle birleştirilmiş tam ölçekli bir Y-YAS sistemini test etmiştir. Bulgular, sistemin E. coli, somatik kolifajlar ve Clostridium perfringens sporları gibi mikrobiyal göstergelerin giderilmesinde oldukça verimli olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Sklarz ve diğ. (2013), arıtılmış atık su ile sulanan toprakta E. coli tespit edilmediğinden, tarımsal yeniden kullanımda UV ışık dezenfeksiyon işleminin etkinliğini kanıtlamıştır.

Türkiye'de, Ayaz ve diğ. (2015), anaerobik ön arıtma, bir Y-YAS ve bir D-YAS sistemlerinden oluşan küçük bir toplulukta inşa edilmiş üç aşamalı bir hibrit pilot sistem işletmişlerdir. Ön arıtma, bir anaerobik biyolojik reaktör (ABR) ve paralel çalışan bir yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı (UASB) reaktöründen oluşmuştur. Bu bölümde organik maddeler ve AKM kısmen giderilmiştir. Kombine sistem, ortalama olarak azotu %90 ve organik maddenin %95'ini gidermiştir. Yazarlar, Y-YAS ve D-YAS kombinasyonunun organiklerin ve AKM'nin giderimini optimize ettiğini, D-YAS sisteminin fosforu etkin bir şekilde azalttığını ve nitrifikasyonu uyardığını belirtmişlerdir. Genel olarak, tek bir YSA'dan daha yüksek performans göstermiş

olup, atık su devridaimi de organiklerin ve TN'nin giderimini de artırabileceği vurgulanmıştır (Sklarz ve diğ., 2009).

Ali ve diğ. (2018), Pakistan'da test edilen iki tam ölçekli sistemin her ikisi de mevsimsel faktörlerden etkilendiğini belirtmiştir. Birinci sistem anaerobik biyolojik reaktör (ABR), doymuş bir D-YAS ve SYS sisteminden oluşmuş; ikinci sistem ise ABR, Y-YAS ve SYS sisteminden oluşmuştur. Tek veya hibrit YSA'lar üzerinde yapılan deneylerdeki çeşitli bulgulara benzer şekilde, yaz aylarında daha fazla giderim verimliliği elde etmişlerdir (Ayaz, 2008; Kim ve diğ., 2016; Ramprasad ve diğ., 2017). Genel olarak, sistem, KOİ (%73,6), BOİ₅ (%76,2) ve NH₄-N (%52,8) için daha yüksek giderim oranları sağlamıştır. İstisna olarak, ikinci sistemin AKM giderim verimliliği az bir miktarda olsa birinci sistemden düşük elde edilmiştir. İki sistem arasındaki arıtım verimliliği farkı, temel olarak ikincil arıtma olarak Y-YAS veya D-YAS sisteminin kullanılmasından kaynaklanmıştır.

2.2.3 Serbest yüzey akışlı sulak alanlarda giderim mekanizmaları

Sulak alanlardaki arıtma prosesleri, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesleri içerir. Başlıca fiziksel süreç, BOİ azalmasının başlıca nedeni olan askıda kalan partikül maddelerin çöktürülmesidir. Kimyasal süreçler, fosfor ve ağır metallerin büyük ölçüde uzaklaştırılmasından sorumlu olan adsorpsiyon ve çökelmeyi içerir. Biyolojik süreçler açısından ise arıtma mikroorganizmalar tarafından sağlanmaktadır (Gopal, 1999). Sabit film veya serbest bakteri gelişimi nedeniyle, biyolojik işlemler organik maddenin bozunmasına, aerobik bölgelerde nitrifikasyona ve anaerobik bölgelerde denitrifikasyona izin verir. Mikrobiyolojik aktivite, giderim performansı için anahtar parametredir. Atık sudaki bazı bileşenler için yapay sulak alanlardaki temel giderim mekanizmalar Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 SYS'lerde kirletici giderim mekanizmaları (Kadlec ve Wallace, 2009)

Kirletici	Giderim Mekanizması
Biyobozunur Organikler	Bitki ve döküntü yüzeylerinde fakültatif ve anaerobik bakteriler tarafından biyolojik dönüşüm
Askıda Katı Maddeler	Fitrasyon, çökeltme
Azot	Nitrifikasyon/denitrifikasyon, bitki alımı, buharlaşma
Fosfor	Filtrasyon, çöktürme, bitki alımı
Ağır Metaller	Bitki kökleri ve yüzeyde adsorpsiyon, çökeltme
Patojenler	Doğal çürüme, filtrasyon, çökeltme, bitki köklerinden alım

Yapay sulak alan performansı, sıcaklık, uygulanan hidrolik yük, bitki örtüsü, ortam vb. gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Tilak ve diğ., 2016; Solano ve diğ., 2004).

Fiziksel süreç, atık suda bulunan ve kirleticilerin uzaklaştırılmasına yol açan asılı parçacıkların çökmesini içerir. Hidrolik bekletme süresi ne kadar yüksek olursa çökeltme o kadar fazla olacaktır (DBT, 2019). Sedimentasyon işlemi, partiküllerin yerçekimine bağlı olarak çökmesi ve bu partiküllerin tankın dibinde birikmesidir. Sedimentasyon işlemi sadece organik maddeyi azaltmakla kalmaz, aynı zamanda koliform bakterileri de ortadan kaldırır (Dotro ve diğ., 2015).

Sulak alanda kullanılan bitkiler, mikrobiyal büyüme için büyük bir yüzey alanı sağlar, bu da organik maddenin dengelenmesine yardımcı olur, fiziksel filtrasyon işlevini geliştirir ve dikey akış sisteminin tıkanmasını önler (Brix, 1994). Ayrıca, besin dönüşümüne katkıda bulunurlar, akışa mekanik direnç sunarlar, alıkonma süresini artırırlar, asılı partiküllerin yerleşmesini kolaylaştırırlar ve kökler büyüdükçe ortam yoluyla suyun iletkenliğini iyileştirirler. Özellikle, sazların rizomları dikey ve yatay olarak büyür ve ortam boyunca hidrolik bir yol sağlamak için toprağı açar. Ayrıca, oksijeni, kamışların yaprakları ve gövdeleri yoluyla, içi boş rizomlardan aşağıya ve köklerden dışarı doğru ortamın daha derin tabakasına taşırlar ve dolayısıyla ağır metallerin kök yüzeylerinde oksidasyonuna ve çökmesine yardımcı olurlar (Gopal, 1999).

En sık kullanılan bitki türleri *Scirpus* sp. (saz), *Typha* sp. (kuyruk) ve *Phragmites communis* (sazlık). Tipik özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.2'de açıklanmıştır (Crites ve Tchobanoglous, 1998; Reed ve diğ., 1995).

Çizelge 2.2 SYS'lerde kullanılan tipik bitkiler ve özellikleri



Bulrush



Cattail



Reeds

Parametreler			
Bulunabilirlik	Dünya genelinde	Dünya genelinde	Dünya genelinde
Sıcaklık, °C	16-27	10-30	12-23
pH Toleransı	4-9	4-10	2-8
Maksimum Tuzluluk Toleransı, ppt	20	30	45
Sediment İçindeki Kök Uzunluğu, m	0,6	0,3	0,4
Habitat Değeri	Tohum ve kökleri su kuşları ve balıklar için besin kaynağı	Tohum ve kökleri su kuşları ve balıklar için besin kaynağı	Çoğu kuş ve hayvan için düşük besin değeri
Kuraklık Direnci	Kısmen	Kısmen	Yüksek
Büyüme Hızı	Kısmen hızlı	Hızlı	Çok Hızlı

Azot ve fosforun bitki alımı, önemli bir giderim etkisi değildir, çünkü bunlar alınır ve genellikle çürüme sırasında salınır. Alım oranları potansiyel olarak yüksek olsa da, hasat edilen bitki biyokütlesi azot ve fosforu uzaklaştırabilir, ancak hiçbir araştırma hasattan dolayı önemli bir giderim performansı göstermemiştir.

Giderim süreçleri gri su arıtımı çerçevesinde irdelenecek olursa, fiziksel, kimyasal ve biyolojik(mikrobiyal) mekanizmaların iyice anlaşılması gerekmektedir.

2.2.3.1 Fiziksel mekanizmalar

Gri su arıtımı için ilk rapor edilen teknolojiler, temel olarak kaba filtrasyon gibi fiziksel arıtma mekanizmalarıydı (Hypes ve diğ., 1975). Filtrasyon, yosun, tortu, kil ve diğer organik ve inorganik partikül maddelerin giderilmesine yardımcı olduğu için suyu

arıtmak için uzun yıllardır kullanılan bir işlemdir. Günümüz su arıtma tesislerinde granüler ortam filtreleri veya membran filtreler kullanılmaktadır. Sulak alan arıtma tesisleri granüler ortam kullanır ve düşük filtrasyon hızlarında (yavaş filtrasyon prensibinde) çalıştırılır. Yavaş filtrasyon sistemleri, pıhtılaşma ve geri yıkama gerektirmediklerinden, etkili bir şekilde inşa edilmesi ve çalıştırılması kolaydır. Bu sistemlerin, bulanıklığı 50 NTU'nun altında olan atık sular için uygunluğu kanıtlanmıştır (Kadlec ve Wallace, 2009).

Fiziksel mekanizmalardaki ana süreç, suyun substrat ortamından geçerken yerçekimi etkisi altında partikül maddelerin mekanik olarak çöktirdiği/filtrelendiği çökelmedir.

Filtrasyon prosesleri sadece partikül ve gözenek boyutları ile belirlenebilmesine rağmen, moleküllerin (sorpsiyon) ortam yüzeylerine çözünmüş moleküllerin bölünmesinden fiziksel veya kimyasal yapışması hala önemli bir rol oynamaktadır. Sorpsiyon, sıvı fazda bulunan maddelerin adsorbe edildiği ve katı faz üzerinde toplandığı ve böylece sıvı fazdan ayrıldığı bir kütle transferi işlemini içerir. Bu prosesler içme suyu proseslerinde tat ve sentetik organik kimyasalların uzaklaştırılması için kullanılmaktadır. Sorpsiyon, bileşiklerin hidrofobikliğinin yanı sıra substrat ortamının kimyasal yapısı ve organik madde içeriği ile belirlenir (Imfeld ve diğ., 2009). Dolayısıyla filtrasyon verimliliği (sorpsiyon ve filtrasyonun kapsamı), adsorpsiyon kapasitesinin azalması (Omari ve diğ., 2003) ve azalan gözeneklilik nedeniyle yapay sulak alan yaşlandıkça değişir (Blazejewski ve Murat-Blazejewska, 1997; Langergraber ve diğ., 2003). Aktif karbon kullanımının, 186 mg/L BOİ başlangıç konsantrasyonuna sahip gri suyu arıtırken adsorpsiyon yoluyla organiklerin giderilmesini iyileştirdiği ve yeniden kullanım standartlarını karşıladığı gösterilmiştir (Pidou ve diğ., 2008). Aktif karbonun etkinliği, laboratuvar ölçeğinde ve pilot ölçekli çalışmalarda gösterilmiştir. Ancak, pratik uygulama için gerekli olan yatak ömrünün ve değiştirme sıklıklarının belirlenmesi gerekmektedir.

2.2.3.2 Kimyasal mekanizmalar

Sulak alan sistemlerinde çeşitli çevresel koşullar altında geniş bir kimyasal reaksiyon yelpazesi meydana gelir. Hâkim koşullar, çeşitli biyokimyasal reaksiyonların hem termodinamik fizibilitesini hem de enzimatik yeteneği belirler (Kadlec ve Knight, 1996). Sulak alan sistemlerinde meydana gelen biyokimyasal süreçler, kirletici türleri oksitlenmiş ürünlere dönüştürmek veya boyutlarını artırmak ve daha sonra fiziksel bir süreçle (sedimentasyon) gidermek için gerekli işlemleri kapsamaktadır. Sulak alan sistemlerinde kirleticinin giderilmesini etkileyen kimyasal süreçler, sulak alan sistemi içinde (örneğin atık su ile alt tabaka arasındaki iyon değişimi), sulak yüzeyinde ve rizosfer ölçeğinde meydana gelen çeşitli diğer işlemlere bağlıdır. Pıhtılaştırma gibi kimyasal işlemler, gri su arıtımında organik elementlerin düşük oranda uzaklaştırıldığını göstermiştir ve yeniden kullanım için gerekli arıtma standartlarını her zaman karşılayamazlar (Pidou ve diğ., 2008). Bu nedenle uygunlukları düşük kuvvetli gri su içindir.

a. Sulak alan yüzey reaksiyonları

Uçucu hale getirme (yatak yüzeyindeki su fazından atmosfere doğrudan kirletici emisyonu) önemli bir kirletici giderme yoludur (Susarla ve diğ., 2002). Buhar basıncı ve Henry sabiti, organik bileşiklerin uçuculuğunu ve fitovolatilizasyon davranışını belirlemede önemli faktörlerdir (Imfeld ve diğ., 2009). Bazı bitkiler örn. kavak ağaçları hidrofobik sistemlere dikildiklerinde metil tert butil eter (MTBE) (Hong ve diğ., 2001) ve klorlu organik bileşikleri (Ma ve Burken, 2003) fitovolatilize edebilirler. Uçucu hidrofobik bileşiklerin uzaklaştırılması için hem uçucu hale getirme hem de bitki buharlaştırma işlemleri önemlidir. Bununla birlikte, fitovolatilizasyon, doymamış bölgelerdeki kirleticilerin yavaş difüzyon hızları ve suya doymuş bölgelerdeki laminar akış, doğrudan buharlaşmayı engellediği için, yüzey altı sistemlerinde daha az aktif rol oynar (Imfeld ve diğ., 2009). Bu nedenle, doğrudan buharlaşma yoluyla nispeten düşük kütle transferleri meydana gelir. Sulak alan sistemlerindeki bitki yoğunluğu ve sulak alanın yüzey alanı, sulak alan sistemindeki buharlaşmanın hızını ve boyutunu etkileyen kriterlerdir. (Tunçsiper, 2009; Matamoros ve diğ., 2007).

b. Substrat ortam-su arayüz reaksiyonları

Bu reaksiyonlar aracılığıyla organik kimyasalların bozunması, oksidasyon ve indirgeme gibi olaylarla daha az kararlı bileşikler haline dönüşmesi gerçekleşir. Örneğin, gri suda bulunan iki aromatik yüzey aktif madde, Lineer alkilbenzen sülfonat (LAS) ve Nonil fenol etoksilat (NPEO), aerobik koşullar altında daha hızlı bozular. Meydana gelen mekanizmalardan bazıları, katı (medya) ve sıvı (su) faz arasındaki iyon değişimi, bitki alımı (fitoekstraksiyon ve fitoakümülyasyon) ve foto oksidasyondur. Bununla birlikte, yüksek biyokütleli bitkilerin kullanımı ile fitoekstraksiyon, düşük ve orta konsantrasyonda kimyasal madde içeren topraklarda nispeten daha başarılıdır (Ernst, 2005; Sebastiani ve diğ., 2004). Giderim mekanizmaları kirleticiden kirleticiye göre verimlilik açısından değişiklik gösterir. Mesela, bazı kirleticiler (örneğin aromatik yüzey aktif maddeler) baskın olarak oksik koşullarda daha yüksek giderim potansiyeline sahiptirler. Koşullar ağırlıklı olarak sırasıyla oksik, anoksik ve anaerobik şeklinde oluşmaktadır. Sulak alanın daha derinlerine doğru inildikçe, kimyasal bileşik giderim verimliliği yüksek oranda klorlu organikler gibi anaerobik olarak parçalanabilen bileşikler lehine değişir (Matamoros ve diğ., 2007).

Kimyasal mekanizmalardan etkilenen başlıca kirleticiler azot, fosfor ve ağır metaller ile bakteri ve virüslerdir. İçme suyunda suyun yumuşatılması ve demineralizasyon (Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ ve NO₃ iyonlarının uzaklaştırılması) için kimyasal mekanizmalar kullanılmaktadır. Ancak iyon değişimi için pıhtılaştırıcıların (ek kimyasalların) ve/veya özel ortamların kullanılması, yapay sulak alan teknolojisinin maliyetinin artmasına neden olur. Zhao ve diğ. (2009), “alum çamuru” olarak bilinen bir pıhtılaştırıcı olarak alüminyum sülfat kullanımından kaynaklanan su arıtma çamurunun atık su arıtımında değerli bir malzeme olduğunu göstermiştir. İçme suyu çamurundaki alüminyum iyonları, çeşitli kirleticileri özellikle fosforu uzaklaştıran adsorpsiyon ve kimyasal çökeltme işlemlerini geliştirir, bu da alum içerikli çamuru yapay sulak alanlar için uygun bir ortam haline getirir.

Ayrıca, kimyasal türlerin parçalanması ve giderilmesi, çözünmüş organik karbon (ÇOK) konsantrasyonlarında değişikliklere neden olur. ÇOK, toksik bileşiklerin biyoyararlanımını değiştirmek (Driscoll ve diğ., 1995) ve ekosistem metabolizmasını düzenlemek (Hanson ve diğ., 2003) gibi su sistemlerinde birkaç önemli işlevi yerine getirir. Bu nedenle, yüzey suyundaki ÇOK konsantrasyonunu tahmin etme veya

kontrol etme yeteneği, inşa edilmiş sulak alandaki bir dizi ekolojik süreç için bilgi sağlayabilir. Bu nedenle ÇOK, bir tasarım kriteri olarak da kullanılabilir.

2.2.3.3 Biyolojik mekanizmalar

Biyolojik arıtma mekanizmaları, kirleticileri büyüme döngülerinin bir parçası olarak parçalamak için gelişmiş bir organizma topluluğunu kullanır. Bu tür mekanizmalar esas olarak bakteri ve bitki metabolizmasını içerir. Mikroorganizmalar, birçok sulak alan sürecine aracılık eder ve temel olarak, yapay sulak alanlarda bozunabilir organik kirleticilerin dönüşümü ve mineralizasyonundan sorumludur (Sleytr ve diğ., 2009). Bakteri metabolizması, koloidal katıların ve çözünür organiklerin bitki destekli bakteriler tarafından giderildiği baskın bir biyokimyasal mekanizmadır. Giderilen ana bileşenler arasında koloidal katılar, BOİ, azot ön plana çıkmaktadır. Y-YAS ve D-YAS sistemlerinde akıştaki farklılıklar ve bunun sonucunda ortaya çıkan oksijen transfer kapasiteleri nedeniyle, iki sistem biyolojik sistemlerin uç noktalarını doğal bir formatta sunar. Biyolojik süreçler, sulak alan sisteminde organik kirleticilerin parçalanması (fito parçalanma ve mikrobiyal parçalanma) veya farklı organik bileşiklere dönüştürülmesiyle meydana gelen yıkıcı süreçlerdir. Bununla birlikte, yapay sulak alanlardaki mikrobiyal topluluk bileşimleri hakkında hala bilgi eksikliği vardır. Fitodegradasyon (rizodegradasyon ve fitotransformasyonu içerir), organik bileşiğın bitki enzimleri veya enzim kofaktörleri tarafından parçalanması şeklinde açıklanmaktadır (Susarla ve diğ., 2002). Bu metabolik dönüşümler, organik bileşiklerin doğası ve özellikleriyle birlikte sulak alandaki bitkilerin türüne bağılıdır. Bazı sulak alan bitkileri, bazı organik bileşikleri diğerlerinden daha iyi parçalayabilir. Örnek vermek gerekirse, kavak ağacının klorlu organik bileşikler için yüksek bozunma potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir (Newman ve diğ., 1997). Birçok durumda fitodegradasyon, bitkiler tarafından alınan kirleticinin hızla veya tamamen bozunduğu fiziksel ekstraksiyon (fitoekstraksiyon ve fitobirikim) içeren fitoremediasyon prosesleri altındaki bir alt prosestir (Susarla ve diğ., 2002).

Organik bileşiklerin mikrobiyal bozunması, sulak alan sistemindeki bileşiklerin fiziko-kimyasal doğasına da bağılıdır. Toksik ve diğeri organik bileşiklerin giderilmesinin, büyük ölçüde, karmaşık organik bileşiklerin basit organik ve inorganik bileşiklere aşamalı olarak dönüştürülmesi mikrobiyal aktivitenin hakim olduğu aerobik ve anaerobik süreçlerin bir sonucu olduğuına inanılmaktadır (Reddy ve D'Angelo, 1997).

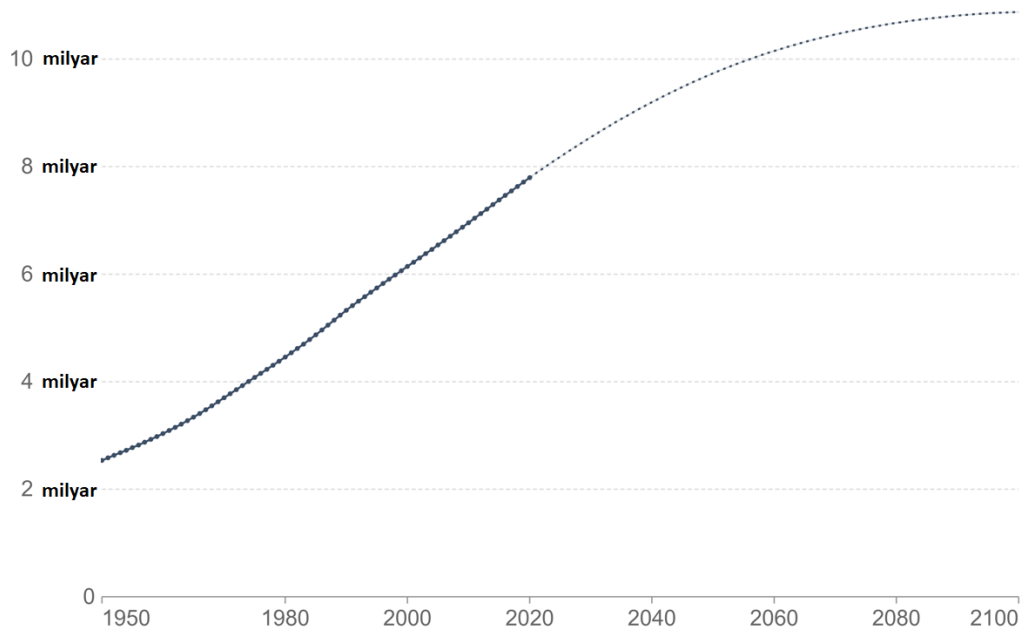
Bu süreçler pH ve sıcaklık gibi çevresel koşullardan etkilenir. Örnekleme gerekirse, Kadlec ve Reddy (2001) mikrobiyal reaksiyonların sıcaklıktan etkilendiğini ve tepkilerin tipik olarak 15 °C'nin altındaki sıcaklık değişimleri için 20-35 °C'lik normal koşullardan daha büyük olduğunu belirtmişlerdir.

Sonuç olarak, yapay sulak alan arıtma teknolojisi için tasarım hususları esas olarak organik maddeler ve katı maddelerin giderimi olarak ortaya çıkmıştır. Bu amaçlarla tasarlandıkları için atık sudan organiklerin uzaklaştırılmasında etkilidir (Vymazal, 2002). Gerçekten de sulak alanların atık suyundan BOİ, KOİ, AKM ve koliformları uzaklaştırma kabiliyeti, besin maddelerinden %30-45 oranlarında daha fazladır (Vymazal, 2007; Neralla ve diğ., 2000; Gopal, 1999). Ancak atık su geri dönüşümü için tüm kategorilerin dikkate alınması önemlidir.

Besin maddeleri ve patojenler açısından düşük olan gri su ile uğraşırken, ekosistem süreçlerinin daha derinden anlaşılması gerekir. Bu, sulak alan boyutu, konumu, ortam seçimi, bitki seçimi gibi tasarlanabilecek teknolojinin her yönünü içerir.

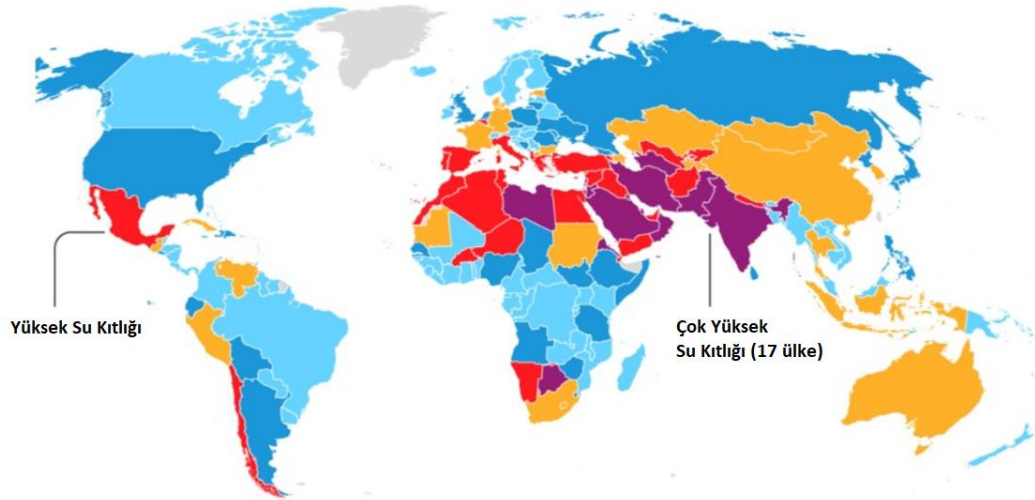
2.3 Gri Su

UNDP'nin öngördüğü gibi, dünya nüfusunda çarpıcı bir artış beklenmekte ve Şekil 2.5 dünya nüfusunun 80 yıl içinde bugünkü nüfusundan yaklaşık iki kat daha fazla olacağını göstermektedir. Ancak mevcut kaynaklar değişmeyecek ve artan nüfusun taleplerini karşılamak her geçen gün daha da zorlaşacaktır. Sürdürülebilirlik, bu kaynakların daha uzun süreler boyunca optimal kullanımını sağlayacak kavramdır. Bu kaynaklardan biri de sudur ve su kıtlığı dünyanın birçok yerinde halihazırda bir sorundur. Dünya nüfusunun beşte biri, talepleri için yeterli hijyenik sudan yoksundur. Yeterli su kaynaklarının geliştirilmesi için yeterli finansal kaynağın bulunmadığı, su kıtlığı olan havzalarda yaşayan insan sayısı 1,6 milyardır (IWMI, 2007). Dünya su kıtlığı haritası, sadece az gelişmiş ülkelerin su kıtlığı yaşamadığına işaret edilen Şekil 2.6'da verilmiştir. Bununla birlikte, gelişmekte olan ve gelişmiş ülkeler de su sıkıntısı veya kıtlığı sorunları yaşamaktadır, ancak bunun nedenleri farklıdır. Az gelişmiş ülkeler genellikle fiziksel sebeplerden değil, ekonomik yetersizlik nedeniyle tehdit altındadır, ancak gelişmiş ülkeler az gelişmiş ülkelerin vatandaşlarından çok daha fazla su tükettikleri için nüfuslarının su ihtiyacını fiziki olarak yani su kaynakları yetersizliğinden karşılamakta sorun yaşamaktadırlar. (IWMI, 2007).



Şekil 2.5 2100 yılı Dünya nüfus projeksiyonu (UNDP, 2021)

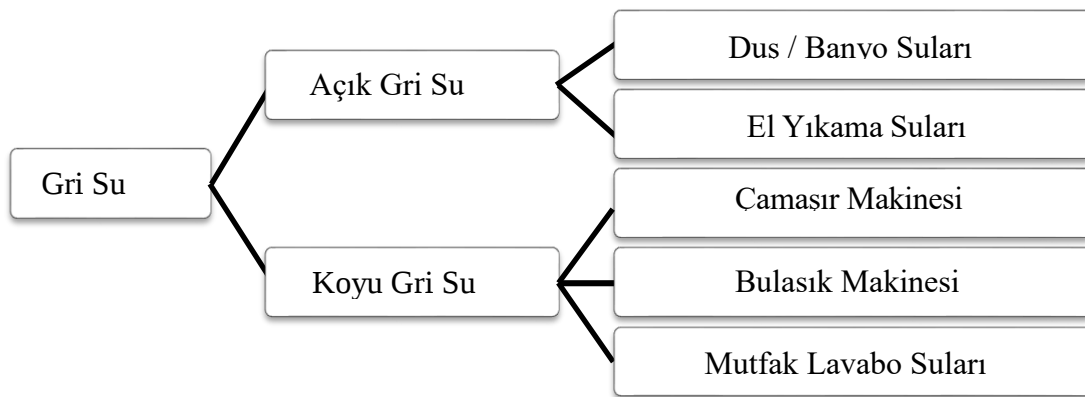
Çok Yüksek Yüksek Orta - Yüksek Orta - Düşük Düşük



Şekil 2.6 Dünya su kıtlığı haritası (IWMI, 2019)

Dünyanın tatlı su kaynağı giderek kıt hale geldikçe, alternatif su kaynaklarına daha fazla ilgi gösterilmesi gerekli hale gelmiştir. Suyun yeniden kullanımı, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi, yeşil ekonomiler ve kentsel planlama ile ilgili tartışmalarda önemli bir ivme kazanmaktadır. Bu bağlamda, evsel atık suyun %75'ini oluşturan ve evsel atık sudan daha düşük kirletici konsantrasyonlarıyla daha çekici bir su kaynağı olan gri su ön plana çıkmaktadır. Yeterli miktarda suya sahip olmak önemli bir konu iken, tatmin edici kalitenin sağlanması diğer bir gerekliliktir. Kalite alanında suyun “amaca uygun” kullanımı da bir diğer önemli husustur. Bu, amaçlanan kullanım gereksinimlerinin, bu özel amaç için kullanılacak suyun kalitesiyle verimli bir şekilde eşleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilebilmektedir.

Gri su, banyolardan, duşlardan, lavabolardan, çamaşır makinelerinden, bulaşık makinelerinden ve mutfak lavabolarından gelen suyu içeren ancak tuvaletlerden gelen akıntıları hariç tutan atık su olarak tanımlanmaktadır (Jefferson ve diğ., 2000; Eriksson ve diğ., 2001; Friedler ve Hadari, 2006). Bazı yazarlar, mutfak atık suyunu diğer gri su akıntılarından hariç tutmaktadır (Christova-Boal ve diğ., 1996; Al-Jayyousi, 2003; Ghunmi, 2009). Duşlar ve küvetler de dahil olmak üzere banyodan çıkan atık su, açık gri su olarak adlandırılır (Friedler ve Hadari, 2006). Çamaşır yıkama tesislerinden, bulaşık makinelerinden ve bazı durumlarda mutfak lavabolarından daha fazla kirlenmiş atık içeren gri su, koyu gri su olarak adlandırılır (Birks ve Hills, 2007). Bazı gri su kaynakları ve bileşenleri Şekil 2.7’de sunulmuştur.

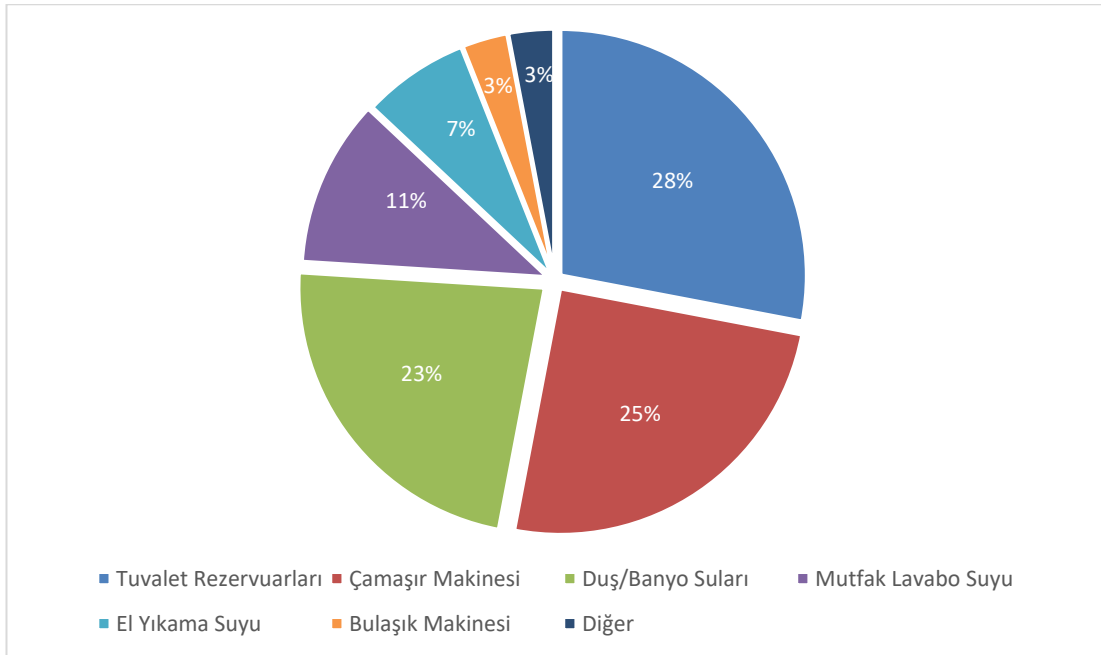


Şekil 2.7 Gri su kategorileri ve kaynakları

Gri su fraksiyonlarının ayrılmasının nedeni, gri suyun karakterinin üretildiği yere göre değişmesidir. Açık gri su, organik madde ve besin maddeleri açısından daha düşük kirlilik potansiyeline sahipken, koyu gri su, mutfak ve çamaşır makinelerinde

kullanılan deterjanlar nedeniyle fosfor dahil daha yüksek konsantrasyonlara sahiptir (Oruçtut, 2013). Açık gri su, gri suyun büyük kısmını oluşturur, çünkü el yıkama, ardından diş fırçalama ve duş, bir evde en fazla su tüketen aktivitelerdir (Eriksson ve diğ., 2003). Oldukça benzer yaşam tarzlarına, benzer boru tesisatlarına ve su tüketim seviyelerine sahip belirli bir coğrafi bölge için, gri su kalitesindeki ana değişkenliğin kaynağı, muhtemelen kullanılan ev temizlik ve kişisel bakım ürünlerinin (malzemelerinin) türü ve miktarı olacaktır. Bununla birlikte, çoğu içerik listesinde sağlanan sınırlı bilgi nedeniyle, bugüne kadar ev temizlik ve kişisel bakım ürünlerinde bulunan kimyasalların doğrudan risk değerlendirmesi zor olmuştur. Üreticiler, yasaların gerektirdiği minimum bilgileri sağlama eğilimindedir ve çoğu durumda ticaret ve diğer nedenlerle gerçek IUPAC (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) kimyasal adları yerine ticari adları kullanırlar. Gri su toksisitesi ile ev kimyasallarında bulunan farklı kimyasal bileşenler arasındaki ilişkiyi kurmak önemlidir. Bu, gri su özelliklerini ve arıtma gereksinimlerini tahmin etmeyi kolaylaştıracaktır.

Şekil 2.8’de farklı amaçlar için evsel su kullanımı görülmektedir ve tuvalet rezervuarları için su kullanımının %28 ile en büyük payı oluşturduğu görülmektedir. Çamaşır makineleri suyun %25’ini kullanır, bunu sırasıyla %23 ve %7 ile banyo/duş ve lavabolar izler. (Beler Baykal ve Giresunlu, 2014)



Şekil 2.8 Evsel su kullanımı (Beler Baykal ve Giresunlu, 2014)

Şekil 2.8'deki yüzdeler, banyo/duş ve lavabolardan kaynaklanan gri suyun evsel atık suyun %30'unu oluşturduğunu, yani evsel atık su ve gri suyun diğer fraksiyonlarına göre daha kolay arıtılabilen açık gri su olduğunu göstermektedir. Evsel su kullanımından elde edilen açık gri su, evsel atık su kullanımının %28'ini oluşturan sifonlu tuvaletler için su ihtiyacının karşılanmasında tekrar kullanılabilir. Arıtılan gri su miktarı ihtiyaç duyulan miktardan fazla ise ev temizliği, sulama veya süs bitkisi sulama gibi faaliyetler için kullanılabilir.

Gri suyun yeniden kullanımı, sürekli olarak kullanılabilen ve içilebilir olmayan kullanımlar için arıtılabilen umut verici bir alternatif su kaynağıdır (Chong ve diğ., 2015). Giderek artan bir şekilde, gri su kullanımı iklim değişikliğine uyum sağlama, gıda güvenliğini artırma, içme suyu tedarikini genişletme ve çevredeki kirleticileri azaltma konusundaki yerel ve ulusal çabaların önemli bir bileşeni olarak görülmektedir (Drechsel ve diğ., 2015).

Gri su arıtma yöntemleri saha koşullarına ve gri su özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Bir gri su arıtma sisteminin tasarımı öncelikle su kalitesine, arıtılacak miktara ve yeniden kullanım uygulamalarına bağlıdır.

2.3.1 Gri suların karakterizasyonu

Gri su özelliklerinde gözlemlenen farklılıklar, gri suyu üreten insanların ürün türlerindeki (Knops ve diğ., 2007) ve davranışlarındaki (yaşam tarzları, su tüketimi, sosyo-ekonomik vb.) farklılıklarla bağlantılıdır (Eriksson ve diğ., 2002).

Toksisite açısından, Eriksson ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada, kullanılan kimyasal bileşenlerin bir yansıması olarak gri suyun genel toksisitesine en fazla katkıda bulunan kaynakların çamaşır ve mutfak suları olduğunu bildirmiştir. Ev kimyasallarında kullanılan başlıca bileşikler, yüzey aktif maddeler, kokular ve tatlar, çözücüler ve koruyucular olarak sınıflandırılır. Tüm bu ürün kategorileri, tek başlarına veya kombinasyon halinde, özellikle bazı gri su geri dönüşüm uygulamaları için çevresel bir tehlike oluşturan toksisiteye yol açar. Bu bilgi boşluğu, potansiyel olarak tehlikeli kimyasal türlerin işleme süreci boyunca geçişi ve akıbeti hakkında herhangi bir sonuca varmayı zorlaştırmaktadır (Knops ve diğ., 2007; Eriksson ve diğ., 2002). Örneğin toprak sistemlerindeki yüzey aktif maddeler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir, ancak bu çalışmalarda uygulama ortamı gri su değil, çoğunlukla kanalizasyon çamuruymuştu. Ancak diğer ksenobiyotik organik kimyasalların hem arıtma süreçleri hem de bir bütün

olarak çevre üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır (Jefferson ve diğ., 2000; Eriksson ve diğ., 2002). Sürfaktanlar gri sudaki en büyük bileşik grubudur ve rizosfer topluluklarında değişikliklere ve bitkilerin topraktan su alımını etkileyen topraktaki suyun kılcal yükselmesine neden olma potansiyeline sahiptir. Yine de gri su arıtma ve geri dönüşümdeki akıbetleri kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Ayrıca, gri su geri dönüşümü için, bu kimyasalların giderilmesinde arıtma prosesinin/teknolojisinin güvenilirliği ve verimliliği daha önemli hale gelmektedir.

Tipik olarak, gri suyun organik madde ve besin konsantrasyonları, idrar, dışkı ve tuvalet kağıdının dahil edilmemesi gerçeğinden dolayı evsel atık sudan daha düşüktür (Eriksson ve diğ., 2002). Gri su, askıda ve çözünmüş katılar, asidik ve alkali bileşikler, katı yağlar, sıvı yağlar ve gres dahil olmak üzere çok çeşitli kirleticilerden oluşur. Ağır metaller, nitratlar, fosfatlar ve ksenobiyotik bileşikler gibi diğer kirleticiler rapor edilmiştir (Rakesh ve diğ. 2020). Eriksson ve diğ. (2002), Danimarka'da ev kimyasal ürünlerinin kullanımı nedeniyle gri suda sunulabilecek 900 potansiyel ksenobiyotik organik bileşik tanımlamıştır. Palmquist ve Hanæus'a (2005) göre, gri su sodyum, kalsiyum, potasyum, kükürt, magnezyum ve alüminyum gibi metaller içerir. Mikroorganizmalar; biyolojik mikroplar, ilaç, sağlık ve kişisel bakım ürünleri ve boyalar gri suda gözlemlenmiştir (Oteng-Peprah ve diğ. 2018). Gri suda bahsedilen maddelerin tespiti, gri su bileşiminin karmaşıklığını gösterir.

Su kalitesi, farklı kullanımlara bağlı olarak kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerle tanımlanabilir.

Çizelge 2.3, banyo, mutfak, çamaşırhane ve karışık kaynaklı gri atık su dahil olmak üzere çeşitli gri atık su türlerinin karakterizasyonuna dayalı olarak literatür verilerini özetlemektedir. Verilerin dört kategoriye ayrılmasının nedeni bu grupların özelliklerinin farklı olmasıdır. Bu bilgi, arıtma potansiyelini ve geri kazanılan atık suyun yeniden kullanımını değerlendirirken önemlidir.

Çizelge 2.3 Farklı gri su kaynaklarının karakterizasyonu

Referanslar Parametreler	Karışık kaynaklı gri su			Çamaşırhane			Mutfak			Banyo	
	<i>Collivignarelli ve diğ. (2020)</i>	<i>Bani-Melhem ve Smith (2012)</i>	<i>Li ve diğ. (2009)</i>	<i>Ghaitidak ve Yadav (2013)</i>	<i>Shaikh ve Ahammed (2020)</i>	<i>Li ve diğ. (2009)</i>	<i>Ghaitidak ve Yadav (2013)</i>	<i>Shaikh ve Ahammed (2020)</i>	<i>Pidou ve diğ. (2008)</i>	<i>Shaikh ve Ahammed (2020)</i>	<i>Li ve diğ. (2009)</i>
Sıcaklık (°C)		22.6–24.3			22.4–35.0			24.4–30.9		25.8–29.0	
Bulanıklık	310–626	26–318	29–375	328–444	34–510	50–444	133–211	210–357	42–51	19–375	44–375
İletkenlik	1140–2508	360–1300		29–7030			14–970		1174.6		
KM (mg/L)				2021–2700			679–1272				
AKM (mg/L)	17.7–36.3	18–169	25–183	188–315	33–4564	68–465	134–625	11–3934		19–793	7–505
pH	7.8–8.8	5.2–10.2	6.3–8.1	8.3–9.3	5–10.3	7.1–10	6.5–7.7	5.58–10	7.3–7.8	5.94–8.40	6.4–8.1
BOİ ₅ (mg/L)	427–616		47–466	44.3–462	44–3330	48–472	40.8–890	185–2460	129–203	20–673	50–300
KOİ (mg/L)	1051–1603	40–1270	100–700	58–1339	58–4155	231–2950	58–1340	411–8071	477–673	64–903	100–633
TOK (mg/L)											
TN (mg/L)	25.4–41.8		1.7–34.3	14–28	2.8–31	1.1–40.3	6.44–6.44	0.5–65	13.4–19.4	2.7–148	3.6–19.4
NH ₄ -N (mg/L)									0.7–1.3		
TP (mg/L)	3.1–8.5		0.11–22.8		0.2–51.6	0,171	0.69	2.7–187		0.1–60	0.11–48.8
PO ₄ -P (mg/L)		0.23–0.98							1.2–1.4		

Gri su akıntıları, üretim kaynağına, kişisel alışkanlıklara ve su kullanımına göre farklı kalite gösterir. Jefferson ve ark. (2000) ve Al-Joyyousi (2003) gri suyun kalitesinin coğrafi konum ve demografik özelliklere de bağlı olduğunu belirtmektedir. Gri suyun özellikleri fiziksel parametreler, kimyasal parametreler ve biyolojik parametreler olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir.

2.3.1.1 Fiziksel parametreler

Sıcaklık, toplam katılar, toplam çözünmüş katılar, askıda katılar, bulanıklık ve elektriksel iletkenlik dahil olmak üzere bazı parametreler gri suyun fiziksel özelliklerinde ifade edilebilir. Gri su sıcaklığı tipik olarak 18-35°C aralığındadır. Nispeten yüksek sıcaklık, mikrobiyolojik aktivitelerin artmasına neden olabilir (Allen ve diğ., 2010). Toplam katı konsantrasyonu, 400 ve 2700 mg/L aralığında rapor edilmiştir. En yüksek değer çamaşırlardan ve evyelerden kaynaklanmaktadır. Toplam katı kirleticilerin büyük bir kısmı çözünmüş olanlara atfedilir. Toplam çözünmüş katılar için elde edilen değerler 180 ila 2400 mg/L olarak belirtilmiştir. Literatür, gri suda 100-1000 mg/L aralığında toplam askıda katı madde değerlerini bildirmiştir. Ancak bu aralığın dışında kalan miktar da rapor edilmiştir (Bani-Melhem ve Smith 2012; Mostafazadeh ve diğ. 2019; Shaikh ve Ahammed 2020). Çamaşır ve bulaşıkların yıkanması nedeniyle en yüksek konsantrasyon çamaşırhane ve mutfakta oluşmaktadır. Diğer askıda katı kaynaklar, kişisel bakım ürünleri, diş macunu, tıraş atıkları, cilt, saç, vücut yağları ve gıda parçacıkları ve çeşitli tekstillerden elde edilen lifler olabilir (Ghaitidak ve Yadav 2013). Elektriksel iletkenlik aralığı 14 ile 3000 µS/cm arasında çok değişkendir. Bir kaynak, hammaddelerinde fosfat, sodyum ve potasyum bulunması nedeniyle deterjanlardır. Ayrıca eski tesisat sistemi, taşıma sırasında gri su kaynaklarına sızması nedeniyle elektrik iletkenliğini artırabilir. Bulanıklık için elde edilen değerler 26 ila 510 NTU aralığında ölçülmüştür. Bu değerler, askıda madde bulunması nedeniyle farklı kaynaklarda değişiklik göstermiştir (Oteng-Pepurah ve ark. 2018; Rakesh ve diğ., 2020)

2.3.1.2 Kimyasal parametreler

Çok çeşitli parametreler gri suyun kimyasal özelliklerini belirleyebilir. Bu parametreleri tanımlamanın temel zorluğu, kirletici kaynaklarının çok çeşitli olması ve detaylı olarak bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. Gri sudaki kimyasalların önemli bir kısmı ev kimyasallarından elde edilmektedir. Gri suda elde edilen pH değeri 5 ile 10 arasında değişmektedir ve gri suyun kaynağındaki pH ve alkaliniteye bağlıdır. Çamaşır atık sularındaki pH değerinin yüksek olması, deterjanlarda kullanılan alkali maddelerden kaynaklanmaktadır (Li ve diğ., 2009). Biyokimyasal oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$) ve kimyasal oksijen ihtiyacı ($KOİ$) gibi geleneksel atık su parametreleri her zaman atık su özelliklerinde rapor edilmiştir. $BOİ_5/KOİ$ oranları, gri suyun biyolojik olarak bozunabilirliğini tanımlar. Gri sudaki ortalama oranların 0,3-0,7 aralığında olduğu rapor edilmiştir, bu da gri sudaki organik maddenin neredeyse yarısının biyolojik olarak parçalanabilir olduğunu gösterir. En düşük $BOİ_5/KOİ$ değerleri $KOİ$ 'yi artıran ksenobiyotik organik bileşiklerin (XOC 'ler) mevcudiyeti nedeniyle kaydedilir. XOC 'ler, ev kimyasallarında ve farmasötiklerde bulunabilen karmaşık organik bileşiklerdir. XOC 'ler ayrıca kimyasal maddelerin ayrıştırılması veya kimyasalların gri su arıtımı sırasında kısmi modifikasyonu yoluyla da üretilebilir. XOC 'ler biyolojik bozulmaya karşı dirençlidir ve yağ dokularında biyolojik birikime meyleder. Ayrıca son derece düşük konsantrasyonlarda bile suda yaşayan organizmalar için aşırı derecede toksiktirler (Fatta-Kassinos ve diğ., 2011).

Yüzey aktif maddeler, temizlik kimyasallarının kullanılması nedeniyle gri suda bulunan başlıca kimyasal bileşiklerden biridir. Yüzey aktif maddeler, temizlik ürünlerindeki başlıca aktif maddedir. N ve P gibi besinler ve türevleri, kimyasal özelliklerde bildirilen diğer kimyasallardır. Besin değerlerinin yüksek olması mutfak ve çamaşır yıkama faaliyetleri ile ilgilidir (Eriksson ve diğ., 2002).

Metallerin ve diğer elementlerin konsantrasyonları tamamen gri su kaynağına bağlıdır. Örneğin, çamaşır suyu, toz çamaşır deterjanlarında kullanılan birkaç anyonik yüzey aktif maddeye karşı bir karşı iyon olarak sodyum nedeniyle yüksek bir sodyum değeri içerir (Eriksson ve diğ., 2002). Eriksson ve Donner (2009), gri suda kadmiyum, cıva, kurşun ve nikel gibi ağır metallerin varlığını bildirmiştir. Gri sudaki metal içerikleri, tipik belediye atık sularında kaydedilenlerden daha düşüktür. Ancak, yüzey suları için

çevresel kalite standartları için önerilen sınır değerlerin üzerinde metal konsantrasyonlarının olmamasına özen gösterilmelidir (Eriksson ve Donner 2009).

Yağ ve gres, mutfak lavaboları ve banyo duşları ile ilişkili gri sudaki diğer önemli parametrelerdir. Yağ ve gres konsantrasyonu 50 ila 100 mg/L aralığında rapor edilmiştir (Rakesh ve diğ., 2020).

2.3.1.3 Biyolojik parametreler

Gri su, vücut ve giysilerin yıkanması, tuvalet sonrası ellerin yıkanması, bebeklerin ve bebek bezlerinin yıkanması ile atık suya giren bakteri, protozoa ve virüs gibi mikroorganizmaların yanı sıra pişmemiş sebze ve çiğ etlerden oluşmaktadır. (WHO, 2006). Gri suyun mikrobiyal özellikleri fekal kontaminasyona bağlıdır. Ancak, gri su tanımına göre, dışkı kirliliği, dışkıyla kontamine çamaşırların (yani bebek bezlerinin) yıkanması, çocuk bakımı ve duş gibi faaliyetlerle sınırlıdır (WHO, 2006). Gri suda indikatör bakteriler koliformlar, *Escherichia coli* ve enterokoklar olarak rapor edilmiştir.

E. coli konsantreleri 100 mL başına $1,3 \times 10^5$ ve $2,5 \times 10^8$ arasında elde edilirken, termotolerant koli 100 mL başına $9,4 \times 10^4$ ila $3,8 \times 10^8$ aralığında ve dışkı streptokokları $5,1 \times 10^5$ ila $5,5 \times 10^8$ arasında rapor edilmiştir. Bu göstergeler gri suda enterik patojenik bakterilerin (örn., *Salmonella*, *Campylobacter*), protozoaların (örn., *Cryptosporidium*, *Giardia*) ve virüslerin (örn. rotavirüs, norovirüs) mevcudiyeti olasılığını düşündürür (Ottoson ve Stenström 2003). Friedler ve diğ. (2011), gri suda cilt patojeni (*Pseudomonas aeruginosa*) ve solunum patojeni (*Legionella pneumophila*) dahil olmak üzere fırsatçı patojenleri bildirmiştir. Bu patojenler, sucul ve karasal habitatlarda yaygın olarak dağılabilir. Örneğin, birçok sıcak kanlı memelinin bağırsaklarında *Pseudomonas aeruginosa* bulunmuştur; ancak bağırsak mikrobiyotasının baskın bir üyesi olduğu bilinmemektedir (Gross ve diğ., 2006). Ayrıca, gri suda *Cryptosporidia*, *Shigella* ve *Entamoeba histolytica* dahil diğer mikroorganizmalar gözlemlenmiştir (Oteng-Pepurah ve diğ., 2018; Rakesh ve diğ., 2020).

2.3.2 Gri suların arıtılması ve yeniden kullanımı

Dünyanın yaklaşık dörtte üçü sudan oluşsa da su, özellikle de tatlı su, insanlığın hemen hemen tüm ihtiyaçlarını karşılayacak sınırlı bir kaynaktır. Dünya genelinde su sıkıntısı ve kıtlığı sorunları bilinen bir gerçektir ve toplumlar bu baskıyı hafifletmenin yollarını aramaktadır. Tarihte uzun zaman dilimleri boyunca dikkatin çoğu niceliğe ayrılmıştır; ancak suyun kalitesi de bir o kadar önemlidir.

Şu anda zorluk, öngörülen kullanım amaçları için yeterli kaliteye sahip yeterli miktarda su sağlamaktır. Bu, suyun yeterli miktarda değil, amaca uygun kalitede kullanılmasını tavsiye eden “amaca uygunluk” yaklaşımını odak noktası olarak, suyun çeşitli taleplere tahsis edilmesini gerektirmektedir. Bu söylemden çıkan canlı bir sonuç, özellikle günlük evsel atıksu kullanımının %25'inin sifonlu su tüketiminden kaynaklandığını bilerek, mevcut uygulamada en sık görülen durumda olduğu gibi tuvaletleri içme suyu kalitesinde su ile yıkamak değil, bunun yerine gri su kullanmaktır (Oron ve diğ. 2014). Gri suyun bahçelerin sulanması, araba yıkama ve hatta ev içi ve çevresinde genel temizlik için kullanılmasıyla faydalar artırılabilir.

Gri suyun yeniden kullanımı, atık suyun %75'e kadarını su döngüsüne geri dönüştürerek evsel atık su yönetimini ve evsel su tedarikini entegre eder ve böylece onu alternatif bir su temini aracı olarak kullanır. Gri su uygun şekilde arıtılırsa, belki de içilebilir kullanımlar dışında, su döngüsünün herhangi bir noktasına geri döndürülebilecek değerli bir su kaynağıdır (Wenlin ve diğ., 2012; Beler Baykal, 2014). Bu, özellikle halihazırda su sıkıntısı/kıtlığı yaşayan ülkeler/(kentsel) alanlar için çok önemlidir. Gerçekten de gri suyun yeniden kullanımı, tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı hafifletmeye ve bozulmamış suyu daha değerli amaçlar için kullanmaya yardımcı olan bir uygulamadır.

Evsel atık su akımının toplanıp kullanılacağı uygulama için gri suyun gerekli kalitede arıtılması durumunda suyun amaca uygun kullanımı sağlanacaktır. Gri su şu anda çoğunlukla sulama ve tuvalet sifonu için kullanılmakta, ancak üniversite spor sahalarının ve peyzajlarının sulanması, araçların yıkanması, yangından korunma sistemleri, beton imalatı, yeraltı suyu beslemesi ve rekreasyonel havuzlar gibi birçok alanda uygulanabilir nitelikte olabilir. (Okun, 1997; Pidou ve diğ., 2008). Özellikle sulama için kullanıldığında sabun ürünleri ve deterjanların içerdiği besinler bitkiler tarafından alınacak ve bu da arıtılmış gri su ile sulamayı daha da cazip hale getirecektir

(Bob Boulware, 2013). İçme suyu kullanan ancak içme suyu kalitesi gerektirmeyen tuvalet sifonu, araç yıkama ve diğer uygulamalar arıtılmış gri su ile yapılırsa, içme suyuna olan talep azalacak ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı sağlanacaktır.

2.3.2.1 Gri suyun arıtılması

Atık su arıtma teknolojileri, filtrasyon veya membranlar gibi fiziksel arıtma seçeneklerini; döner biyolojik diskler (RBC), biyolojik havalandırılmış filtreler (BAF), membran biyoreaktörler (MBR) gibi biyolojik tabanlı teknolojiler ve elektro-pıhtılaşma, foto katalizörler ile membran kimyasal reaktörler gibi kimyasal işlemleri içermektedir (Pidou ve diğ., 2007). Bununla birlikte, bu arıtma teknolojilerinin çoğu, özellikle müşteri harcamaları açısından bakıldığında (GWI, 2010) yüksek işletme ve yatırım maliyetlerine sahiptir ve bu da onları küçük ölçekli yerel arıtma ve içilebilir olmayan yeniden kullanım için çekici kılmamaktadır. Genellikle daha düşük harcamalarla ikincil ve/veya üçüncül arıtma standartlarını karşılayan teknolojiler için hane halkı harcamalarının minimum düzeyde tutulması cazip olacaktır. Yapay sulak alan(YSA) teknolojileri, bu harcama kriterini karşıladıkları için evsel atık suların arıtılması için düşük maliyetli arıtım teknolojisine sahip sistemler olarak tanıtılmaktadır (IWA, 2000). Arıtma teknolojisi, derinlemesine filtrasyon (filtreleme ve adsorpsiyon yoluyla askıdaki ve çözünmüş parçacıkların dezenfeksiyonu ve uzaklaştırılması ile sonuçlanan partiküler maddenin çıkarılması) ve mikrobiyal etkinin artırılması (BOİ'nin azalmasıyla sonuçlanan) prensiplerine dayanır. Yapay sulak alanlarda bu iki işlemin kombinasyonu hem partiküllerin hem de partiküllerle ilişkili organiklerin uzaklaştırılmasını sağlar.

Gri su arıtımı için yapay sulak alanların kullanımı, özellikle konvansiyonel arıtma sistemlerinde sorun yaşanan bölgelerde son yıllarda artış göstermiştir. Gri su için kum filtrasyonu gibi fiziksel arıtma sistemleri en basiti olmasına rağmen (Kadlec ve Knight, 1996), biyolojik arıtma sistemleri genellikle en popüler olanıdır. Bunu kapsamlı ve fiziksel arıtma sistemleri takip eder.

Yapay sulak alan tarafından sağlananlar gibi filtrasyona dayalı bir teknolojinin atık sudaki partikülleri ve çözünmüş kimyasalları uzaklaştırmadaki etkinliği iyi olarak belgelenmiştir (Kadam ve diğ., 2008; Heistad ve diğ., 2006; Kern ve Idler, 1999). Bununla birlikte, biyo-fiziksel ve kimyasal süreçleri optimize etmek, ihtiyaç duyulan arıtma verimini karşılamak ve yeniden kullanım standartlarını karşılamak için yapay

sulak alanların uygun mühendislik tasarımı, inşaatı ve işletimi hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Aslında, YSA'lar için tasarım hususları hala karmaşıktır ve mevcut yapay sulak alan teknolojileri için genel değildir (IWA, 2000). Arıtma hedefleri ve farklı atık su türleri için endişe duyulan çeşitli (organik) kimyasal bileşiklerin istenen ölçüde giderilmesi, uygun tasarım ve işletme parametrelerinin tanımlanması için ana kriterlerdir. Şu anda var olan zorluk, sürdürülebilir ve güvenilir arıtma performansı için yapay sulak alan tasarımını ve farklı atık su türlerinin (örneğin, gri su) arıtılmasını optimize etmektir. Bunun nedeni, yapay sulak alan çalışmalarından elde edilen sonuçların, arıtma teknolojisinin farklı senaryolar altında kullanılabilmesine rağmen, sulak alan sistemi içinde meydana gelen süreçlerin hala iyi anlaşılmadığını göstermesidir.

2.3.2.2 Gri suyun arıtılmadan bertarafında potansiyel riskler

Gri suyun yeniden kullanımı hem doğrudan hem de arıtmadan sonra mümkündür (Bob Boulware, 2013). Arıtılmadığında klozet rezervuarlarında sifon suyu için tekrar kullanılabilir ancak dezenfeksiyon için klorür peletlerinin kullanılması gerekir (Oruçtut, 2013). Gri suyun bir başka doğrudan yeniden kullanım uygulaması, yeraltı suyu beslemesidir (Allen ve diğ., 2010) ve bu uygulama, toprak filtrasyon işlemi arıtma sağladığı için en uygun fiyatlı ve kolay seçeneklerden biridir (Oruçtut, 2013).

Ancak, gri suyun arıtılmadan yeniden kullanılması insan sağlığı, bitkiler ve toprak, çevre ve tesisat açısından zorluklara neden olmaktadır. Gri su bertarafı ile ilgili bazı potansiyel risklerin altı çizilmiştir.

- Atık suda bulunan mikroorganizmalar, özellikle fekal indikatör bakterilere bağlı patojenler, hastalıkları insan, bitki ve deniz yaşamına iletir (Eriksson ve Donner, 2009). Gri su içeren mutfak atık suyunda daha yüksek E.coli konsantrasyonları tespit edilmiştir. Bunun nedeni, mutfak atık suyunda bakteri üremesi için gerekli olan mevcut organik madde ve besinlerden kaynaklanıyor olabilir. Yüzey suyuna girerken yüksek gri su sıcaklığı mikrobiyal büyümeye neden olabilir. Gri su, enterik organizmaların yanı sıra Staphylococcus aureus ve Pseudomonas aeruginosa gibi birçok fırsatçı patojen içerir (Al-Gheethi ve diğ., 2016). Örneğin, Staphylococcus aureus zatürreye, kalp kapakçığı enfeksiyonlarına, kemik enfeksiyonlarına ve cilt enfeksiyonlarına neden olabilir.

- Gri suyun mikrobiyal ve kimyasal kontaminasyonu insan sağlığı için potansiyel bir risk oluşturmaktadır. Patojenlerin evresel bulaşması, doğrudan gri su ile temas, kontamine içme suyu içmek, sebze, kabuklu deniz ürünleri veya kontamine su veya toprağa maruz kalan diğer gıda ürünlerini yemek gibi birkaç farklı yolla gerçekleşir. İnsan sağlığına yönelik riski azaltmak ve gri suyun yeniden kullanımından kaynaklanan rahatsızlıktan kaçınmak için, insanların gri su ile temasından kaçınılması, gri su ile içme suyu kaynağı arasında çapraz bağlantı olmaması, gri suyun yenilebilir sebze ve bitkilerle doğrudan temas etmemesi tavsiye edilir(WHO, 2006).
- Gri atık su, yüzey aktif maddeler ve yağlar gibi bazıları yavaşça bozunan yüksek konsantrasyonda organik madde içerir. Gri su en yaygın olarak bitkileri sulamak için kullanıldığından, bitki sağlığı kirleticilere karşı en savunmasızdır. Gri su başta azot ve fosfor olmak üzere içerdiği besin maddeleri nedeniyle bitkilere faydalı olabilir; ancak sodyum ve klorür nedeniyle bazı bitki türleri için zararlı olabilir (WHO, 2006). Toprağın uzun süre gri suya maruz kalması, toprakta yüksek düzeyde yüzey aktif madde, yağ ve gres oluşmasına neden olur. Sonuç olarak, toprak hidrofobikliğine, toprak su direncine ve toprak özelliklerinin azalmasına ve bitkiler üzerinde zararlı etkilere yol açar (Siggins ve diğer., 2016). Gri su, toprak alkalinitesi ve tuzluluğunu artırma; toprağın suyu emme-tutma yeteneğini azaltma eğilimindedir.
- Deterjan ve çamaşır ürünleri sodyum içerir. Bu elementin yüksek seviyeleri yaprakların renginin solmasına ve yanmasına neden olabilir. Sodyum bileşiklerinin toprak yapısı üzerindeki etkisini ölçmek için sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) kullanılır. SAR'daki (13 veya daha yüksek) bir artışın toprak özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabileceği ve yetiştirilecek bitki türlerini sınırlayabileceği gösterilmiştir. Yüksek sodyum, bazı bitkiler için toksik olabilir ve kalsiyumun onlara ulaşmasını engelleyebilir. Deterjan ve çamaşır ürünleri ayrıca bor, klorrlar ve peroksitler gibi bitkilere zararlı diğer kimyasalları da içerir (WHO, 2006).
- Deterjan ve çamaşır ürünleri ayrıca bor, klor ve peroksitler gibi bitkiler için zararlı olan diğer kimyasalları da içerir. Ağartıcılar sıklıkla bitkilere zarar verebilecek klorrlar içerir. Yeni genişleyen yaprakların ağartma eğilimi, klorla ilgili hasarın bir belirtisidir. Ayrıca, çoğu bitki bora aşırı duyarlıdır. Bor

toksitesitesi, yaprakların kenarlarında yanık bir görünüm, yaprak çukurlaşması, kloroz, dalların geri dönüşü, erken yaprak dökümü ve azalan büyüme ile karakterizedir (Gross ve diğ., 2005).

- Gri suyun yeniden kullanımından kaynaklanan ana çevresel risklerden biri yeraltı suyu kirliliğidir. Gri suda bulunan bazı maddeler, yeniden kullanım alanının altında yatan yeraltı suyu rezervlerine girebilir (WHO, 2006). Toprağın uzun süre gri suya maruz kalması zamanla toprak yapısında bozulmaya neden olur. Bu nedenle, özellikle sığ su tablasına sahip alanlarda ve sızıntıya meyilli topraklarda, yeraltı suyunun gri su ile kirlenmesi riski artar (Siggins ve diğ., 2016).
- Gri su, özellikle büyük miktarlarda yüzey sularına deşarj edildiğinde, içerdiği azot ve fosfor nedeniyle ötrofikasyonu tetikler. Ötrofikasyon, su şeffaflığının azalmasına, çözünmüş oksijen seviyelerinin azalmasına, balıkların ve diğer su canlılarının tükenmesine, su kalitesinin bozulmasına ve toksik fitoplankton vakalarına neden olur (Carey ve Migliaccio 2009).
- Gri su, içerdiği ağır metaller ve XOC'ler nedeniyle su kaynaklarında toksisiteye neden olur. LAS ve nonilfenol gibi yüzey aktif maddeler en yüksek çevresel etkiye sahiptir (Eriksson ve diğ.. 2002). Son derece düşük konsantrasyonlarda bile suda yaşayan organizmalar için inanılmaz derecede toksiktirler (Benami ve diğ. 2016).

2.3.2.3 Gri suyun yeniden kullanımı

Suyun yeniden kullanım pazarı, artan finansman mevcudiyeti ve yeniden kullanım çözümlerinin sürdürülebilirlik kapsamında yer alması nedeniyle tarımsal kullanım gibi daha düşük değerli uygulamalardan endüstriyel ve evsel kullanım gibi daha yüksek değerli uygulamalara gri suyun yeniden kullanımının büyümesini ve geçişini kaydetmiştir (GWI, 2010). Su kıtlığı, bugün tüm dünyada önemi artan dünya çapında bir sorundur. Sürdürülebilir olmayan tüketim, kentsel kirlilik ve iklim değişikliğinin etkileri su kaynaklarını azalmaya ve bozmaya devam ediyor. Yüksek su talebi ve su kıtlığı baskılarını ele almak, mümkün olan her yerde suyun ekonomik kullanımını ve yeniden kullanımını sunan yaklaşımları (teknolojileri) gerektirir (Bieker ve diğ., 2009). Su kaynakları sorunlarıyla karşı karşıya olan birçok şehirde, gri suyun yeniden kullanımı, güvenilir su kaynaklarının güvence altına alınmasında bir sonraki doğal

adım haline gelmektedir (EPA, 2001). Genel olarak atık su geri dönüşümü, son yıllarda entegre su kaynakları yönetiminin ayrılmaz bir parçası olarak ortaya çıkmış, tatlı su kaynaklarının korunmasını teşvik etmiş ve aynı zamanda kirliliği azaltmıştır. Konvansiyonel atık su arıtma sistemi, sanitasyon nedenleriyle, sıvı atıkları hijyenik bir şekilde toplamak ve tesis dışında merkezi olarak arıtmak için tasarlanmıştır. Ancak, doğal kaynakların artık karşılayamadığı yüksek su talebi nedeniyle, özellikle üretim süreci döngüsü içinde, yani bir ev içinde (bundan böyle dahili geri dönüşüm olarak anılacaktır) su geri dönüşümü, atık su arıtma işlerinin felsefesini ve teknoloji tasarımlarını değiştirmektedir. Dahili geri dönüşüm, merkezi sistemlerde sermaye ve işletme maliyetlerini en aza indirmeye yardımcı olur, çünkü su küçük bir işlem döngüsünde tutulur (Jefferson ve diğ., 2000). Çoğu insan kendi atık sularıyla uğraşırken rahat hissettiğinden, dahili geri dönüşüm psikolojik olarak da tercih edilir (Jeffrey ve Jefferson, 2010). Bu nedenle dahili olarak geri dönüştürülmüş su, küçük ölçekli bile olsa hem düşük hem de yüksek kaliteli uygulamalar için alternatif bir servis suyu kaynağı sağlar. Yerel atık su arıtımı ve yeniden kullanımı, ulaşım boru ağlarının, enerjinin, sızıntılardan kaynaklanan tehlikelerin ve diğer altyapı maliyetlerinin azaltılması açısından mantıklıdır. Evdeki farklı kaynaklardan (gri su ve siyah su) gelen su akışlarının ayrılması, evsel atık suyun arıtma ve yeniden kullanım için yeterli şekilde arıtılmasına yönelik ilk adımdır. İki tür atık suyun ayrılması, daha sonra yalnızca düşük kirlilik seviyeleri sergileyen gri suların kullanılmasını sağlar (Jefferson ve diğ., 2000). Bu şekilde, suyun kanalizasyon işlerinden elde edildiği pahalı geri dönüşüm kurulumundan kaçınılır. Ayrıca yüksek teknoloji arıtma teknolojilerine olan ihtiyaç da azalır.

Geleneksel olarak evlere sağlanan tüm su içme kalitesindedir, ancak yalnızca küçük bir oran, gelişmiş ülkelerde %3'ten az ve gelişmekte olan ülkelerde %1'den az (Ahmad ve El-Dessouky, 2008) içmek ve/veya yemek pişirmek için kullanılır. Örneğin, Birleşik Krallık'ta, su kaynağının %12'si yıkama için, %35'i tuvaletler, %20'si duş/banyo için, %6'sı dış mekân kullanımı ve ev içi diğer içilemeyen kullanımlar için kullanılmaktadır (EA, 2001). Bu nedenle gri su tipik olarak toplam evsel su akışının yaklaşık %65'ini temsil eder. Gri suyun hem miktar hem de kaynak olarak ekonomik değeri büyük ölçüde hafife alınmaktadır. Kıtık alanlarında (Gross ve diğ., 2008; Otterpohl ve diğ., 2003) ve/veya düşük su kalitesi tedarik hizmetlerinde, gri suyun tarım ve diğer amaçlar için yeniden kullanımı çok önemlidir. Gri suyun ev çevresinde

içilemeyen ihtiyaçlar için yeniden kullanılması hem insanlara hem de çevreye önemli ölçüde su ve maddi tasarruf sağlar. Gelişmekte olan ülkeler için bu aynı zamanda gıda güvenliğinin artması ve halk sağlığının iyileştirilmesi anlamına da gelmektedir (Madungwe ve Sakuringwa, 2007; Morel ve Diener, 2006).

Ev düzeyinde gri suyun arıtılmasıyla ilgili temel zorluk, kirletici yükünden ve değişkenlik yapısından kaynaklanmaktadır. Gri su, temel olarak tüketici ürün seçimindeki değişikliklerden (Knops ve diğ., 2007) ve kullanıcı alışkanlıklarından (Eriksson ve diğ., 2003) kaynaklanan değişikliklere tabidir. Bunlar, gri suyun arıtılabilirliğini etkileyen gri su özelliklerinin tahmin edilemezliğine (Prathapar ve diğ., 2005; Royal Society of Chemistry, 2008) ve katı yeniden kullanım standartlarını karşılamak için arıtma tutarlılığına (EPA, 2004) yol açar. Bu nedenle zorluk, büyük hacimli atık su ile uğraşan merkezi sistemlerde gözlemlenen çeşitli tamponlama avantajlarının yokluğunda gri suyu idare edebilecek düşük teknolojiye küçük ölçekli teknolojileri tasarlamaktır.

2.3.2.4 Gri suyun yeniden kullanım kılavuzları

Geri kazanılan gri su, yeniden kullanım için dört kriteri karşılamalıdır: hijyenik güvenlik, estetik, çevresel tolerans ve ekonomik fizibilite (Nolde, 2000). Farklı yeniden kullanım uygulamaları, farklı su kalitesi spesifikasyonları gerektirir ve bu nedenle basit süreçlerden daha gelişmiş olanlara kadar değişen farklı arıtma işlemleri gerektirir. Gri su izleme için standart değerler ülkeye göre değişir. Çok az sayıda yeniden kullanım kılavuzu, gri su geri dönüşümü düşünülmüş olarak tasarlanmıştır (Li ve diğ., 2009). Aslında çoğu ülke, gri suya uyguladıkları standartları geri kazanılmış belediye atık sularına uygulamaktadır. Bununla birlikte, İngiltere, Almanya, Japonya ve Avustralya gibi bazı ülkeler gri suyun yeniden kullanımı için özel standartlar oluşturmuştur. Çizelge 2.4 gri suyun yeniden kullanımı için standart değerlerin örneklerini göstermektedir. Yeniden kullanım kriterleri arasında gözlemlenen farklılıklar ihtiyaç, uygulamalar ve sosyal faktörlerdeki farklılıkları yansıtır (Pidou ve diğ., 2007)

Çizelge 2.4 Ülkelere göre gri suyun yeniden kullanım amaçları ve standartları

	BOİ (mg/L)	AKM (mg/L)	pH	Bulanıklık (NTU)	Cl ⁻ (mg/L)	Toplam Koliform (cfu/100 mL)	Fekal Koliform (cfu/100 mL)	E.Coli (cfu/100 mL)	Yeniden Kullanım Uygulaması
WHO, 2006 ⁽¹⁾	10	10				10			Tuvalet rezervuar
	20	10				200			Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
	240	140				1000			Süs havuzu, meyve ve sebze sulama
Queensland, Avustralya ⁽²⁾	10	10	6,5-8,5	1	0,2-1			1	Tuvalet rezervuar, çamaşır makinesi, araç yıkama
	10	10	6,5-8,5	5				1	Yüzey sulama
	20	30						10	Tarımsal sulama
Victoria, Avustralya ⁽³⁾					-				Tuvalet rezervuar, çamaşır makinesi, yüzey sulama
	20	30							Tarımsal sulama
New South Wales, Avustralya ⁽⁴⁾	20	30						10	Tuvalet rezervuar, çamaşır makinesi
	20	30						30	Yüzey sulama
Berlin, Almanya ⁽⁵⁾	5				<1	10			Servis suyu
Arizona, ABD ⁽⁶⁾						800			Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
California, ABD ⁽⁷⁾				2	<5	23			Kentsel kullanım
						240			Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması

Çizelge 2.4 (Devamı) : Ülkelere göre gri suyun yeniden kullanım amaçları ve standartları

Florida, ABD ⁽⁸⁾	20	5				25	Kentsel kullanım
						800	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
Georgia, ABD ⁽⁹⁾	5	5	6-9	2		23	Sulama, araç yıkama
Hawaii, ABD ⁽¹⁰⁾				2		23	Kentsel kullanım, piştirilmeden yenen meyve sebze sulaması
Nevada, ABD ⁽¹¹⁾	30					23	Kentsel kullanım
	30					400	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
New Jersey, ABD ⁽¹¹⁾		5		2	>1	14	Sulama, araç yıkama
Teksa, ABD ⁽¹²⁾	5			3		75	Kentsel kullanım, piştirilmeden yenen meyve sebze sulaması
	20			5		800	Tarımsal sulama
Washington, ABD ⁽¹³⁾	30	5	6-9			0	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
	30	30				200	Sulama
Çin ⁽¹¹⁾	15			10	>0,2	100	Tuvalet rezervuar
				20	>0,2	100	Sprey sulama
	15			5	>0,2	3	Bahçe sulama
Kıbrıs ⁽¹⁴⁾				20		50	Sulama
				5		200	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
İngiltere ⁽¹⁵⁾			5-9,5	10	<2	10	Sprey sulama, çamaşır makinesi, araç yıkama
			5-9,5	10	<2	1000	Tuvalet rezervuar
			5-9,5		<0,5	1000	Bahçe sulama

Çizelge 2.4 (Devamı) : Ülkelere göre gri suyun yeniden kullanım amaçları ve standartları

İsrail ⁽¹¹⁾	15	15			<0,5	3	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
	35	30			<0,15	250	Piştirilerek yenen meyve ve sebze sulaması
Japonya ⁽¹⁶⁾			5,8-8,6		>0,4		Sulama
			5,8-8,6			1000	Tuvalet rezervuar
	<10		5,8-8,6	<10			Kentsel kullanım
Kore ⁽¹¹⁾	10		5,8-8,5	5		10	Tuvalet rezervuar
	10		5,8-8,5	5			Sprey sulama
	10		5,8-8,5	10			Bahçe sulama
Kuveyt ⁽¹¹⁾	10	10			>1	100	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
Arabistan ⁽¹¹⁾	10	10	6-8,4			3	Kentsel kullanım
Türkiye ⁽¹⁷⁾	20		6-9	2	>1	0	Piştirilmeden yenen meyve ve sebze sulaması
	30	30	6-9	2	>1	200	Piştirilerek yenen meyve ve sebze sulaması

(1) WHO, 2006. (2) Queensland Plumbing and Wastewater Code, 2011. (3) Victoria EPA, 2013. (4) New South Wales Department of Energy, Utilities and Sustainability, 2008. (5) Nolde, 1996. (6) OASIS, 2002. (7) State of California, 2000. (8) State of Florida, 1998. (9) State of Georgia, 2009. (10) Hawaii Department of Health, 1991. (11) Canada Mortgage Housing and Corporation, 2005. (12) Texas Commision on Environmental Quality, 2005. (13) Washington State Building Code Council, 2007. (14) Oron ve diğ., 2014. (15) BS-8525-1, 2010. (16) Ogoshi ve diğ., 2001. (17) Su Kalitesi ve Kontrolü Yönetmeliği, 200

Gri su arıtımı ve yeniden kullanımındaki başlıca engeller, sınırlı insan ve finansal kaynaklar, atık su arıtımının güvenilirliği, sistem enerji talebi, sistemin ekonomik fizibilitesi, halkın algısı ve istekliliği, sosyal ve kurumsal kabul, su hakkı sorunları ve siyasi süreç, yetersiz kodlar ve yönergeler, vb. olarak karşımıza çıkmaktadır. Gri suyun yeniden kullanımının zorlukları patojen, belirli topraklarda tuz birikmesi, mikroorganizmaların hızlı artışı, sivrisinek tehdidine yol açan bakım eksikliği, alt kullanıcılar için ciddi sonuçlara yol açan akışlarda akış aşağı deşarjın azalmasıdır (Yadav & Ghaitidak, 2013).

Türkiye için gri su konusunda herhangi bir yeniden kullanım standardı bulunmamaktadır. Su sorunu da ülkemizde ciddi bir boyuta ulaşacağı düşünüldüğünde, bu konuda gerekli çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasının bir amacı da gri su arıtımı için doğal arıtma metodolojisi oluşturmak ve diğer ülkelerin uyguladıkları standartları ortaya koyarak, ülkemiz için de gri suyun yeniden kullanımı kapsamında yapılacak çalışmalara yardımcı olabilmektir.

2.3.3 Türkiye’de gri suyun yeniden kullanımı

Gri suyun yeniden kullanımı konusunda ülkemizi ele alacak olursak, potansiyel su kıtlığı ile karşılaşacak ülkeler arasında yer almaktayız. Bu nedenle, sürdürülebilirlik ve kısıtlı kaynakların yeniden kullanımı konusunda gereken önemi vermemiz gerekmektedir.

Gri suyun yeniden kullanımı ve yağmur suyu hasadı ülkemizde ön plana çıkmakta olup, bu konular çeşitli eylem planlarında yer almaya başlamıştır. On Birinci Kalkınma Planı’nda (2019-2023) açıklanan “Kentsel Altyapı Hedeflerine” göre 2018 yılında %1,2 olan “Arıtılmış Atıksuların Yeniden Kullanım Oranının 2023 yılında %10’a yükseltilmesi hedeflenmektedir. Tarım ve Orman Bakanlığı’nın yayımladığı “Ulusal Su Planı’nda (2019-2023)” yer alan politikalar arasında “Gri su kullanımı ve yağmur suyu hasadı teknolojileri teşvik edilmelidir” maddesi yer almaktadır. İstanbul özelinde değerlendirildiğinde ise İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) tarafından 1 Mart 2021 tarihinden itibaren, inşaat alanı toplamı 30 bin metrekarenin üzerinde olan yapılarda gri su projesi ve bin metrekarenin üzerindeki parseller için, yağmursuyu hasadı proje onayı zorunluluğu getirilmiştir. Yasal mevzuatlar gereğince, bu zorunlulukların sahada uygulanması gerekmekte, ancak pratik uygulamanın nasıl yapılacağı konusunda uygulamalar yaygın olarak bilinmemektedir.

Türkiye'nin sürdürülebilirlik yönetimi konusunda faaliyet gösteren ilk kuruluşlarından biri olan bir şirketin bu konularda yaptığı projeler incelediğinde, sertifikasyon almış 136 projeden sadece iki projesinde gri su yeniden kullanımı konusunda çalışma yapıldığı, beş projesinde de yağmur suyu ile birlikte gri su yeniden kullanımı konusunda çalışma yapıldığı belirlenmiştir. Yapılarda daha çok yağmur suyu geri kazanımı ve yeniden kullanımı konusunda çalışmalar yapılmış olup, gri suyun yeniden kullanımı konusunda ilerlemelere ihtiyaç bulunmaktadır. Bu konuların irdelenmesi ve bilgilendirici dokümantasyonların oluşturulması ile teşvik edici bir etki oluşturulması amaçlanmaktadır. Projeler, yeniden kullanım açısından incelendiğinde ise genel olarak peyzaj amaçlı kullanım ve rezervuar amaçlı kullanım ön plana çıkmaktadır. Bu konularda da daha yüksek arıtım verimleri elde edilerek kullanım amaçlarının fazlalaştırılması gerekmektedir.

Endüstriyel yapıların gün geçtikçe artması ve kentsel dönüşüm uygulamalarının gelecekte daha da yoğunlaşacağı düşünüldüğünde gri su geri kazanım sistemlerinin nasıl teşkil edilmesi gerektiği ile ilgili bilgilere açıklık getirilmesi ve bu çalışma ile bir doğal arıtım uygulama metodolojisi oluşturulması hedeflenmektedir.

2.4 Gri Suların Sulak Alanlarda Arıtım Performansları

Yapay sulak alan sistemlerinde giderim verimi bitki türlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada da, önceden yapılan çalışmalar ışığında, bir bitki türü seçilip sulak alan sisteminin arıtım performansı değerlendirilmiştir. Collivignarelli ve diğ. (2020) tarafından yapılan “Gri Su İçin Yatay Akışlı Yüzeyaltı Yapay Sulak Alan Arıtımı ve Yeniden Kullanımı” çalışmasında, laboratuvar ölçeğinde *Phragmites australis* (Kamış), *Carex oshimensis* (Kareks) ve *Cyperus papyrus* (Papirüs) bitki türleri ayrı ayrı test edilip, kirletici giderim verimleri arasında çok yüksek olmasa da belirli farklar olduğu ortaya konmuştur. *Carex oshimensis* bitki türünün diğerlerine kıyasla daha yüksek giderim verimine sahip olduğu yapılan analizlerle belirtilmiştir (Collivignarelli ve diğ., 2020). Yapılan bir başka çalışmada ise, *Cyperus papyrus* ve *Phragmite karka* bitki türleri karşılaştırılmış, özellikle KOİ giderim verimleri arasında yaklaşık yüzde 20 oranında fark olduğu, *Cyperus* türünün daha etkili olduğu gösterilmiştir (Qomariyah ve diğ., 2017).

Raphael ve diğ. (2020) tarafından yapılan “Kampüs gri sularının *Rhynchospora corymbosa* (L.) Britton (Çiçek açan saz) ile bitkilendirilmiş kesikli olarak işletilen

serbest yüzey akışlı yapay sulak alanının değerlendirilmesi” çalışmasında, incelenen kampüste üretilen gri suyun, kişi başına toplam su tüketiminin yaklaşık %45'ine tekabül ettiği belirtilmiştir. Pilot ölçekli sistemde yaklaşık 2,5 günlük bir hidrolik bekletme süresi ile KOİ, TN, TK ve AKM için yüksek arıtma verimleri elde edilmiştir. Ayrıca, Zn, Al, Mn ve Fe gibi metaller için gri sudaki başlangıç konsantrasyonları düşük olmasına rağmen yüksek arıtma verimleri elde edilmiştir. Geleneksel sürekli akış ile işletilen sistemlere göre sonuçlarda çok açık farklılıklar olmadığı bildirilmiştir (Raphael ve diğ., 2020).

Prasad ve diğ. (2021) tarafından yapılan “*Su Sümbülü (Water Hyacinth)* Bitkisi Kullanılan Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulak Alanlardan Gri Su Arıtımı İçin Küçük Ölçekli Bir Çalışma” isimli bildiride, Hindistan’da bir üniversite kampüsünde bulunan öğrenci yurdunun gri sularının su sümbülü kullanılan yapay sulak alanda arıtımı ile ilgili analizler sunulmuştur. Farklı bekletme süreleriyle sürekli akışla işletilen reaktörde, sistemin 2 günlük bekletme süresinde verimli çalışacağı ve yüksek BOİ₃ (%89) ve KOİ (%79) giderim verimleri elde edileceği bilgisine ulaşılmıştır (Prasad ve diğ., 2021).

Yulistyorini ve diğ. (2019) tarafından yapılan “*Ipomoea Aquatica*’lı (*Su İspanağı* ile bitkilendirilmiş) Dikey Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulak Alan (D-YAS) İle Öğrenci Yurdu Gri Suyunun BOİ ve AKM'sinin Giderilmesi” çalışmasında, Endonezya Malang Eyalet Üniversitesi öğrenci yurdunda üretilen gri su, iki adet laboratuvar ölçekli *Su ispanağı* ile bitkilendirilmiş yapay sulak alanlarda arıtılmıştır. Sistem yüksek arıtım performansı (%91 BOİ ve %94 AKM giderimi) göstermiştir. Ayrıca arıtılmış bu gri su Endonezya Sağlık Bakanlığı’nın tuvalet sifonu, bahçe işleri ve yeraltı suyu deşarjı için yönetmeliklere uygun standardı sağlamıştır (Yulistyorini ve diğ., 2019).

Gupta ve Nath (2018) tarafından yapılmış olan çalışmada üniversite kantininde oluşan gri suyun üç farklı bitki türü (*P. Australis*, *P. karka*, ve *I. Aquatica*) ve iki farklı yapay sulak alan sisteminde (serbest yüzey akışlı ve dikey yüzeyaltı akışlı sulak alanlar) arıtım performansı incelenmiştir. Bu çalışma ile hem yapay sulak alan sistemleri karşılaştırılmış hem de farklı bitki türlerinin giderim üzerine etkileri ortaya konulmuştur. Toplam çözünmüş katılar, nitrat, fosfat, toplam alkalinite ve sülfat çalışmada sonuçları ortaya konulan parametrelerdir. Sulak alan sistemleri karşılaştırıldığında, serbest yüzey akışlı sistemlerin yaklaşık %25-35 oranında daha

yüksek bir arıtma performansına sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bitki türleri açısından bakıldığında, arıtma performanslarının sulak alan sistemlerine göre farklılık göstermiştir. Serbest yüzey akışlı sistemde, *P. Australis* türü en iyi arıtma performansına sahipken, dikey yüzeyaltı akışlı sistemde *I. Aquatica* daha iyi bir arıtma performansı göstermiştir. Sonuç olarak, arıtılmış gri suyun belirli standartları sağladığını ve peyzaj sulama veya tuvalet sifon suyu olarak yeniden kullanılmasının uygun olacağını vurgulanmıştır.

Bir diğer çalışmada, Bolton ve Randall (2019), “Gri su arıtımı için entegre bir yapay sulak alan mikrobiyal yakıt hücresi ve kum filtreleme sisteminin geliştirilmesi” çalışmasında, laboratuvar ölçekli entegre sulak alan ve biyolojik kum filtrasyonu kullanılarak 3 farklı özellikteki el yıkama gri suyundan *E.coli* bakterilerinin tamamını ve KOİ’nin %99’unu giderdiğini bildirmiştir. Ayrıca, arıtılmış gri su Güney Afrika içme suyu standartlarını sağlamış ve sistemden enerji elde edilmiştir (Bolton ve Randall, 2019).

Arden ve Ma (2018), yapay sulak alanlar için 11 farklı arıtma verimliliği listelemiştir. Bu araştırmalara göre genel olarak BOİ₅ gideriminin %63–98 oranlarında; AKM gideriminin yüzey altı akış sistemleri için %64–98 oranlarında, serbest yüzey akışlı sistemler için %25 oranında; bulanıklık gideriminin %47–97 oranlarında; toplam azot gideriminin %44–59 oranlarında ve toplam fosfor gideriminin %24–63 oranlarında olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bakteri, protozoa ve virüsler için yaklaşık 1-2 günde giderim sağlandığını öne sürmüştür (Arden ve Ma, 2018). Ancak göreceli yüksek arıtım verimlerine sahip bu sistemler için, gri su arıtımı ve yeniden kullanımı hususunda az sayıda çalışma (toplam 38 sistemi tanımlayan yalnızca 13 makale) bulunmaktadır. Dahası, literatürün çoğunluğu pilot sistemler ve çok küçük uygulamalarla ilgilenmekte olup, tam ölçekli sistemlere atıfta bulunan yalnızca birkaç çalışma vardır.

Yapılan çalışmalarda, gri suyun yapay sulak alanlarda arıtılmasının faydaları ve çıkış suyunun kullanım alanlarının çeşitliliği de vurgulanmıştır. Yapay sulak alanlar ile organik kirleticiler ve patojenlerin başarıyla uzaklaştırılabildiği, bu nedenle arıtılmış suyun peyzaj sulama, rekreasyonel alan veya rezervuarlarda kullanım için güvenilir olduğu belirtilmiştir. Bu sistemler, sistemin çalışması için gerekli enerji olmadığından veya daha az enerji gerektirdiğinden, enerji konusunda ekonomik bir fayda sağlamaktadır. Ek olarak, makrofit bitkilerinin kullanımının yeşil bir çevre

oluşturacağından bahsedilmiştir (Qomariyah ve diğ., 2017). Başka bir çalışmada ise, yapay sulak alanların uygun dezenfeksiyon işlemleriyle birlikte uygulanması ile insani amaçlı kullanım dışı uygulamaları için uygun atık su sağlayabileceği gösterilmiştir. Aynı çalışmada, hidrolik bekletme süresinin önemi vurgulanmış ve 3–5 günlük bir hidrolik bekletme süresi ile tasarlanan sulak alanların genellikle kısıtlı yeniden kullanım için kimyasal / fiziksel standartları karşılayabileceği belirtilmiştir. Gri su arıtımında, yapay sulak alanlar bağımsız bir proses olarak kullanılırsa, mikrobiyolojik atık su standartlarını güvenilir bir şekilde karşılayamayacağı belirtilmiştir. Bu nedenle, kombine sistemler halinde farklı prosesler ile entegrasyonunun sağlanması gerektiği vurgulanmıştır. Literatürde, gri suyun yapay sulak alanlarda arıtılması konusunda farklı yaklaşımlar ve görüşler bulunmakla birlikte, yapılan çalışma ile bu konu hakkında deneysel sonuçlar ortaya koyularak literatüre katkıda bulunmak amaçlanmış ve farklı kullanım alanlarına yönelik öneriler sunulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Taksim’de yer alan gri suyun ayrı olarak toplandığı büyük ölçekli bir otelden gri su numuneleri alınmıştır. Otelden alınan ham gri suyun karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları dahilinde ölçülmüş parametreler; kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik karbon (TOK), askıda katı madde (AKM), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP), klor, sülfat, bulanıklık, pH ve sıcaklıktır.

Çevre Mühendisliği Bölümü binasında eksi ikinci katta bulunan İTÜ Çevre Mühendisliği Toprak Laboratuvarı’nda yer alan 70 cm uzunluğunda, 30 cm genişliğinde ve 40 cm yüksekliğinde cam akvaryumlar yapay sulak alan reaktörü olarak kullanılmıştır. Tabanlarına yüksekliği 20 cm olacak şekilde sulak alandan alınmış sediment numuneleri yerleştirilmiş ve bu sedimentlere literatür araştırması sonucu seçilen bitki türü ekilmiştir. Oluşturulan sulak alan reaktörünün üzerine, 60 cm mesafeden günde 12 saat ışık verecek şekilde ayarlanmış olan floresan lambalar yerleştirilmiş, böylece bitkilerin fotosentez yapabilmeleri sağlanmıştır. Laboratuvarda yer alan sulak alan modeli Şekil 3.1’de görülmektedir. Oluşturulan sulak alan modeli sürekli akışlı bir reaktör olarak tasarlanmıştır. Giriş suyu reaktörün alt kısmında bulunan cam akvaryumdan bir pompa yardımıyla sulak alan reaktörüne aktarılmış, çıkış suyu yine 25 litrelik bir başka bidonda toplanmıştır.



Şekil 3.1 Yapay sulak alan reaktörü

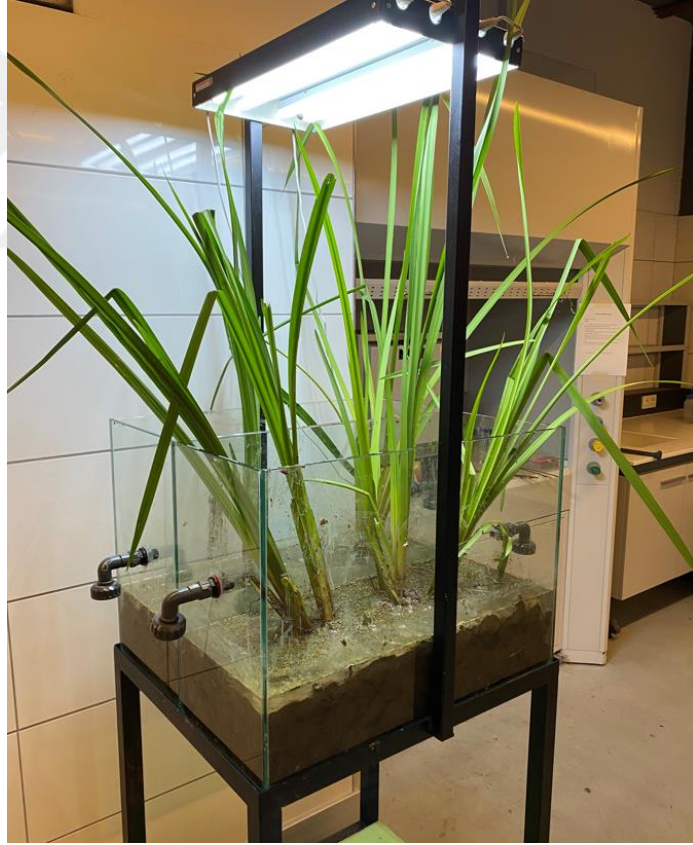
3.1 Numunelerin Alınması

Sulak alan reaktörünün işletilebilmesi için gerekli sediment ve bitki türü Elmalı barajı kolundan, içme suyu arıtma tesisi çevresi yakınından alınmıştır. Şekil 3.2’de numunelerin alındığı yerin ve alınan bitkilerin görselleri yer almaktadır. Görseller üzerinden de görüleceği üzere doğal sulak alan konumundaki alanın fiziksel olarak bir filtreleme yaptığı, bulanık olan giriş suyunun şeffafa yakınlaşarak çıktığını söylemek mümkündür.



Şekil 3.2 Bitki numunesi alınan bölge, Elmalı Baraj kolu

Bitki seçimi ve sediment için literatür araştırması yapılmış olup, yakın çevredeki alanlarda da keşifler yapılarak en uygun tür seçilmeye çalışılmıştır. İstanbul'da Ömerli Rezervuarı ağzında dizayn edilmiş olan yapay sulak alan sistemlerinden numune alınmak istenmiş, ancak sistem işletmeye alınmadığından ve bitki ekimi gerçekleştirilmediğinden ötürü alternatif yerlere yönelinmiştir. Numunelerin alındığı bölge küçük doğal bir sulak alan olarak görev yapmakta olup, en baskın bitki türü olan *Scirpoides Holoschoenus* (Bulrush – Sazlık), deneylerde kullanılmak üzere alınmıştır. Bitkiler ve yetiştikleri ortam sedimenti, öncesinde dezenfekte edilmiş olan saksılar ile laboratuvara getirilmiştir. Toplam altı saksıda 8 bitki numunesi ve yeterli olacak kadar sediment toplanmıştır. Bitkilerin laboratuvar ortamında aklimasyon sürecini hızlandırmak için bölgeden yaklaşık 20 litre doğal su da yaşamsal faaliyetlerini sürdürmeleri için alınıp, reaktörlere bitkiler ekildikten sonra ilave edilmiştir. Reaktörün işletmeye başlatıldığı anki görünümü Şekil 3.3'te yer almaktadır.

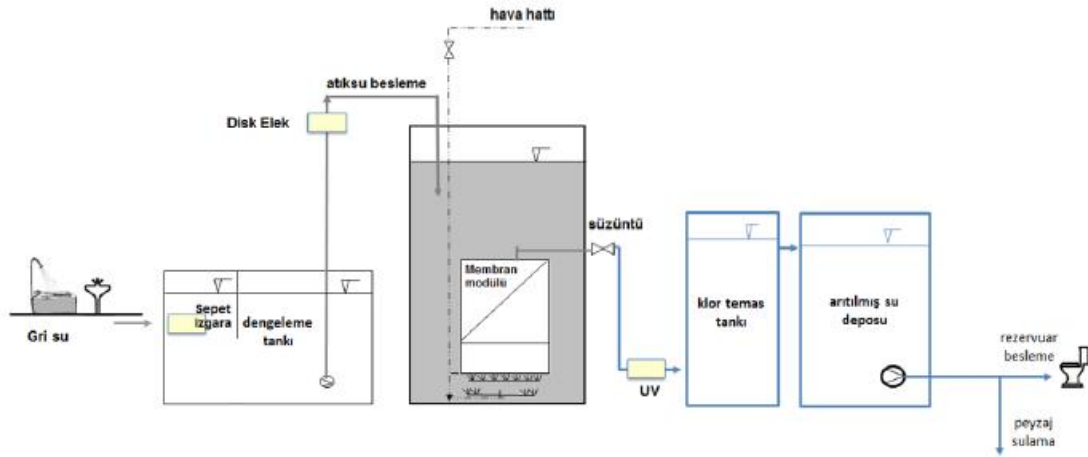


Şekil 3.3. SYS reaktörünün işletilmeye başlanması

Deneysel çalışmalarda reaktör işletmeye alındıktan sonra seçilen bitki türünün aklimasyonu sağlanmıştır. Bitkilerin aklimasyon süresi seçilen bitki türüne göre literatür araştırmaları sonucu belirlenmiştir. Literatürden araştırılan bilgiler ışığında

bitkilerin aklimasyon sürecini tamamlaması için 45 gün boyunca besleme çözeltisi ile gerçekleştirilip, bu süreç boyunca bitkilerin pH değeri ölçülmüş ve dış görünüşlerinin değişimi kontrollü bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu tür bitkilerin toleransı olan pH aralığı 6,0-9,0 olduğu için besleme çözeltisi pH değeri kontrol edilmiş, günlük olarak da reaktör içi numune alınarak bu aralık içinde kalması sağlanmıştır. Besleme çözeltisi, KH_2PO_4 'ten 0,005g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 'ten 0,1 g, KNO_3 'den 0,005g, NaCl 'den 2 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 'dan 0,25 g, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'dan 2.25 g 15 L hacminde saf suda çözülerek hazırlanmıştır. pH değeri NaOH ile 8.3'e sabitlenmiştir. İzlenen süreçte, zamanla pH azalması gözlemlendiği için, besleme çözeltisi pH değeri 8'e yakın olacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen koşullar biyolojik aktivitenin sağlanması için ve alınan bitki numunelerinin bulundukları koşullara benzer koşullarda büyümelerinin devamı açısından önemlidir.

Reaktörün işletilmesi için gri su numunesi, İstanbul'da yer alan büyük ölçekli bir otelden temin edilmiştir. Gri suyu ayrı olarak toplayan otel, membran biyoreaktör (MBR) kullanarak gri suyu arıtıp, peyzaj sulama ve rezervuar suyu olarak gri suyu yeniden kullanarak, bu kapsamda pilot otel olarak literatürde yer almaktadır (TÜBİTAK, 2015). Otelde kullanılan akım şeması da aşağıdaki Şekil 3.4'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.4 Gri su numunesi alınan otel arıtım şeması (TÜBİTAK, 2015)

Hem TÜBİTAK tarafından yayınlanmış raporda hem de 2015 yılında yapılmış olan gri su ile ilgili tez içerisinde otelin giriş gri suyunun karakterizasyonu yer aldığı için, bu tez kapsamında da yapılmış karakterizasyon çalışması verileri, literatür verileriyle

kıyaslanmış ve verilerin doğruluğu bir ölçüde kontrol edilmiştir. Karakterizasyon çalışması ve karşılaştırma grafiği, bir sonraki bölümde gösterilmiştir.

Reaktörlerin arıtma verimlerini ölçmek için izlenecek parametreler KOİ, TOK, AKM, toplam azot, toplam fosfor, klor, sülfat, pH, bulanıklık ve sıcaklıktır. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda ölçülen parametreler ve ölçüm sıklığı aşağıda yer alan Çizelge 3.1 içerisinde verilmiştir.

Çizelge 3.1 Laboratuvar ölçekli çalışmalarda ölçülen parametreler ve ölçüm sıklıkları

Parametre	Ölçüm Metodu	Ölçüm Sıklığı
AKM	APHA, 2017	3/hafta
KOİ	APHA, 2017	3/hafta
TOK	Cihaz ile ölçüm	3/hafta
pH	Anlık	3/hafta
Bulanıklık	Bulanıklık ölçen cihaz	3/hafta
Sıcaklık	Termometre ile ölçüm	3/hafta
TN	Kit ile ölçüm	2/hafta
TP	Kit ile ölçüm	2/hafta
Sülfat ve Klor	IC ile ölçüm	1/hafta

3.2 Sulak Alan Reaktörünün İşletilmesi

Sulak alan reaktörü içerisinde bitkilerin aklimasyon süreci tamamlandığında, literatür araştırmaları neticesinde işletme koşulları belirlenmiştir. İşletme aşamasında, hidrolik bekletme süresi, hidrolik yükleme hızı parametreleri önem kazanmaktadır. Yaklaşık 80 L hacminde olan reaktörün hidrolik bekletme süresi 3 gün olarak seçilmiştir. Bunu sağlayabilmek için reaktör girişinde küçük motorlu akvaryum pompaları kullanılmış, çıkış suyunun ise cazibeli olarak akması sağlanmıştır. Pompalar yardımıyla günlük 9 L gri su reaktöre beslenmiştir. Reaktörün yüzey alanı 0,21 m² olduğu için, işletme

esnasında sistemin hidrolik yükleme hızı $0,0427 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-gün}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Kadlec ve Wallace (2009) tarafından verilen 0,014-0,05 değerleri arasında yer almaktadır. Çıkış numuneleri günlük olarak alınmış olup, laboratuvarında yer alan 4°C sabit sıcaklıktaki soğuk odalarda depolanmış, en geç 3 gün içerisinde analizleri tamamlanmıştır. Sistem toplamda 30 gün boyunca işletilmiş olup, iki kere otelden giriş gri su numunesi alınmıştır. Gri su karakterizasyonu yapılırken değerler birlikte değerlendirilmiştir. Parametrelerin ölçümü ikili olacak şekilde yapılmış olup, hata riskini en aza indirmek amaçlanmıştır.

3.3 İzlenen Parametreler

Gri su, organik madde seviyelerinin, fiziksel ve kimyasal parametrelerinin ve görünümünün ölçülmesi yoluyla analiz edilebilir. Bu bölüm, ölçülen parametreleri açıklamaktadır. AKM, KOİ, TOK gibi standart parametrelerin ölçümleri APHA standartlarına uygun şekilde, belirtilen yöntemler uygulanarak yapılmıştır. TN ve TP ölçümleri ise tutarlılığı kanıtlanmış kitler kullanılarak ölçülmüştür. Gri su karakterizasyonu hakkında literatürden alınan bilgiler ışığında kullanılan kitlerin ölçüm aralıkları seçilmiştir.

3.3.1 Sıcaklık, renk ve koku

Sıcaklık, su kütlelerinin kimyasal ve biyolojik aktivitelerinde hayati bir rol oynar. Her zaman dış ortamdan etkilenir, bu nedenle reaktör içerisindeki su sıcaklığı çok olmasa da değişkenlik göstermiştir. Sıcaklık en düşük 27.4, en yüksek 27.9 olarak ölçülmüştür. Arıtılmamış ve arıtılmış gri suyun sıcaklığı, deneysel çalışmanın süresi boyunca önemli ölçüde değişmediği yapılan başka çalışmalarda vurgulanmıştır (Prasad ve diğ., 2021). Gri suyun sazlık kullanılarak yapılan fitoremediasyon işlemi, renk ve kokuda makul bir azalma gösterdi. Giren suyun rengi gri iken, deneyin kademeli süresinde gri renkten şeffaflığa önemli bir azalma oldu. Arıtım sürecinin ilk aşamasında az derecede hoş olmayan bir koku oluşmuştur. Literatürde, bunun gri sudaki sülfürden kaynaklandığı belirtilmiştir. Arıtım işlemi sonrası bu tarzda bir kötü kokuya rastlanmamıştır. Arıtım öncesi, az miktarda olan sülfürün de giderildiği sonucuna varılabilir.

3.3.2 pH

pH, 7'nin nötr olduğu logaritmik bir ölçekte bir çözeltinin asitliğini veya alkaliliğini ifade eden bir rakamdır. Daha düşük değerler asidik ve yüksek değerler daha alkalidir. Arıtmadan önce gri suyun pH'ı 7.9'du. pH değişikliğine, katyon ve anyon köklerinin alımı, CO₂ solunumu, organik asitlerin köklerden atılımı ve mikrobiyal aktivitedeki dengesizlik neden olmaktadır (Chen, 2003). pH ölçümünün yapıldığı Thermo Fisher Scientific marka Orion Star A211 model cihaz Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 pH metre cihazı

3.3.3 Bulanıklık

Bulanıklık, görünüm özelliği olup, özellikle numunenin ışığı nasıl ilettiğinin ölçümüdür. Bulanık su ışığı çok iyi iletmez. Bu, sudaki kolloidal partiküller nedeniyle ışık saçılmasından kaynaklanır. Birimleri, Nefelometrik Bulanıklık Birimleri (NTU) olarak bilinen standartlaştırılmış ölçümlerdir.

Bulanıklık, öncelikle estetikle bağlantılı bir ölçümdür. Bununla birlikte, daha bulanık olan su genellikle daha yüksek BOİ, KOİ ve patojen seviyelerine sahiptir. Işık geçirgenliği mevcut kolloidal parçacıkların hem boyutuna hem de sayısına bağlı olduğundan, bulanıklığı AKM ile ilişkilendirmenin oldukça zor olduğunu belirtmek önemlidir. AKM'nin hacim başına kütle birimi olarak ölçülmekte, bulanıklık ise NTU ile belirlenmektedir. Aynı AKM seviyelerine sahip iki numune, farklı partikül boyutu dağılımlarına sahipse, farklı bulanıklık okumalarına sahip olabilir.

Çalışmada, giriş gri su numunesinin bulanıklık değeri 31 NTU olarak ölçülmüştür.

3.3.4 Askıda katı madde (AKM)

AKM, bir su numunesinde bulunan filtrelenebilir partikül katıların miktarının bir ölçüsüdür. Partikül madde bakteri ve diğer patojenleri barındırabileceğinden, su kalitesinin önemli bir ölçüsüdür. Birimleri mg/L olarak rapor edilir ve laboratuvarında test edilir.

AKM, suyun bütünlüğünü düzenlemede önemli bir faktördür. Askıda katı madde miktarı arttıkça suyun bulanıklığı artar. Askıda katı maddeler inorganik maddelerden, bakterilerden ve alglerden kaynaklanmaktadır. AKM miktarındaki azalma, temel olarak bitkilerin kök sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Bitkinin büyümesiyle kök kapasitesinin emilimi artar ve bu nedenle çökeltme yoluyla daha fazla askıda katı madde filtrelenebilir. Daha düşük bir su akış hızı sırasında, askıda katı maddelerde bir artış olur ve dolayısıyla bitki dokuları tarafından katı filtrasyonunda bir artış olmaktadır (Abdul Aziz ve diğ., 2020). Ham gri suyun AKM değeri 38 mg/l idi. Askıda katı madde tayini için Milipor filtreler kullanılmış, 100 mL hacimde numune kullanılmıştır. AKM tayini ardından, numune kül fırınında bekletilmiş ve uçucu askıda madde (UAKM) tayini de yapılmıştır. UAKM değeri ise 7 mg/L olarak göreceli düşük bir değer olarak belirlenmiştir.

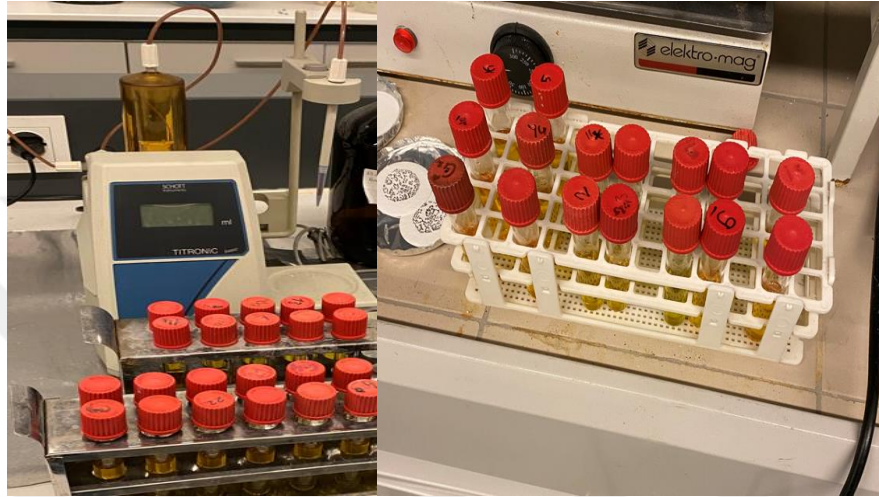
3.3.5 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam organik karbon (TOK)

KOİ ve BOİ, bir numunede bulunan organik madde miktarlarını ölçer ve su kalitesinin değerlendirilmesinde anahtar parametrelerdir. Organik maddeyi tamamen oksitlemek için gerekli oksijen konsantrasyonunda rapor edilirler. BOİ, aerobik solunum yoluyla parçalanabilen organik maddeyi ifade eder. KOİ, BOİ'yi kapsar ve ayrıca kimyasal işlemle oksitlenebilen organik bileşikler de içerir. Literatürün gözden geçirilmesi BOİ ve KOİ ile sahada kolayca ölçülebilen parametreler (örn. pH, bulanıklık, ÇO) arasında bir korelasyon ortaya koymamıştır.

KOİ, gri sudaki evsel ve endüstriyel kirleticileri oksitlemek için gereken oksijen miktarını gösterdiği için su kirliliği kontrolünde en hayati faktördür (Nur Izzah Hamna Abdul Aziz et al., 2020). Aerobik ve anaerobik bakteriler atık suyun KOİ'sinin azaltılmasında aktif rol oynarlar. Sudaki çözünmüş oksijen, fotosentez işlemi ile artırılır ve bu öylece, KOİ içeriğini parçalayıcı aerobik bakterilerin aktivesini başlatmak için gerekli aerobik koşullar oluşur. Fitoremediasyon ile KOİ'deki azalma,

gri suyun ikincil kullanımlar için kullanıldığında iyi sonuçlar doğuracağını ortaya koymuştur. (Adonadaga ve diğ., 2020, Chavan ve Dhulap, 2012).

Bu çalışmada genel bir değerlendirme yapıldığı için KOİ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. APHA metoduna uygun olarak yapılan ölçüm örneği aşağıda yer alan Şekil 3.6 üzerinden gösterilmektedir. Otelden alınan giriş gri suyunun karakterizasyon çalışmaları literatürde de yer aldığı için yaklaşık bir BOİ/KOİ oranı söylemek mümkündür.



Başlangıç KOİ değeri 158 mg/L olarak ölçülmüştür. Karakterizasyon çalışmaları içerisinde yer alan değerler arasında bulunmuştur. Pandemi nedeniyle otelin boşluğu yüksek değerlerin çıkmasına izin vermemiştir. Bu KOİ değeri de ortalamanın altında kalan bir değer olmuştur.

Wallace ve diğ. (2002) TOK değerleri için farklı su numunlerini analiz etmiş ve TOK analizinin içme suyunda dezenfeksiyonun öncüsü olduğu sonucuna varmıştır. TOK değerleri fazla ise dezenfektan dozu arttırılmalı veya dezenfektanın temas süresi arttırılması gerekliliğini belirtmiştir.

Edward Todd Urbensky (2001) ise yaptığı çalışmada doğal sularda hem inorganik karbon hem de organik karbon içeren maddeleri tanımlamıştır. Niemiryce,(2006) BOİ ve KOİ'nin toplam organik karbon(TOK) değerleri ile doğru orantılı olduğu gözlemlemiştir. TOK analizinin KOİ değerlerinin dolaylı bir tahmini olduğu sonucuna varılabileceğini dile getirmiştir. Bu çalışmalardan da yola çıkarak TOK ölçümleri Şekil 3.7'de gösterilen Shimadzu marka TOC-V_{CPN} model cihazda gerçekleştirilmiş ve TOK ile KOİ arasında kabaca bir oran olduğu sonucuna varılmıştır.



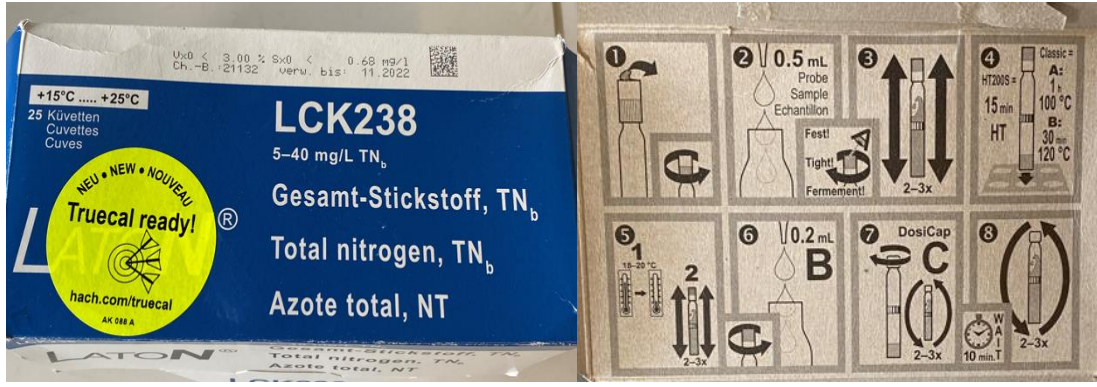
Şekil 3.7 TOK ölçüm cihazı

3.3.6 Toplam azot (TN)

Amonyak, nitrat ve nitrit azot döngüsünde önemli bileşiklerdir. Amonyak, temizlik ürünleri yoluyla gri suya dönüşebilir ve yaygın olarak gübre olarak kullanılır. Nitrifikasyon prosesinde biyolojik süreçler aracılığıyla, amonyak nitrojen gazı oluşturmak üzere denitrifikasyona uğramadan önce nitrata ve ardından nitrite dönüştürülür. Denitrifikasyon anaerobik bakteriler tarafından gerçekleştirilir. Bu seviyeler ppm veya mg/L olarak rapor edilir.

Gri sudaki azot seviyeleri nispeten düşüktür. Ana azot kaynağı, ev tipi gri sudaki mutfak atık suyudur ve en düşük azot seviyeleri banyo ve çamaşırhane gri suyundandır.

Bu çalışmada amonyak ve toplam azot (TN) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Amonyak ölçümü APHA standardına uygun olarak, TN ölçümü ise Hach-Lange firmasından temin edilen 5-40 mg/L aralığa sahip kitlerle ölçülmüştür. Kitlerin ve uygulama prosedürünün görselleri aşağıdaki Şekil 3.8’de yer almaktadır. Kitler için belirlenmiş ölçüm aralıkları sonuçlar bu değerler arasında ise doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Kitler için gerekli prosedürler uygulandıktan sonra İTÜ MEMTEK Laboratuvarı’nda yer alan Hach-Lange markalı spektrofotmetre ile ölçümler sağlanmıştır. Ölçüm yapılan cihazın da görseli aşağıdaki Şekil 3.9’da bulunmaktadır.



Şekil 3.8 Toplam azot ölçüm kiti ve uygulama prosedürü

Giriş gri suyu karakterizasyonunda toplam azot miktarı 8,57 mg/L olarak okunmuş ve bu miktarın 6,62 mg/L gibi büyük bir kısmının amonyak azotu olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.9 Spektrofotometre ve örnek ölçüm sonucu

3.3.7 Toplam fosfor (TP)

Fosfat (PO_4^{3-}), bazı bulaşık deterjanlarının kullanımından dolayı gri suya dönüşebilen bir iyondur (Schneider, 2009). Fosfat ve diğer fosfor formları, bitki büyümesi ile ilgili önemli besinlerdir. Sudaki fazla fosfor veya fosfat alg patlamalarına neden olabilir. Toplam fosfor (TP) konsantrasyonları, genellikle milyonda kısım (ppm) veya mg/L olarak rapor edilir. Literatürden görüldüğü üzere, özellikle çalışılan gri su TP konsantrasyonları çok yüksek değildir. Karakterizasyon çalışmaları sonucu da TP konsantrasyonu 2,67 mg/L olarak ölçülmüştür. TP tayini de TN tayinine benzer şekilde Hach-Lange marka kitlerle gerçekleştirilmiştir. TP için kit okuma değerleri 0,5-5 mg/L

olacak şekilde seçilmiştir. Prosedürlerin uygulanmasından sonra, TN için kullanılan spektrofotometre kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

3.3.8 Klor ve sülfat

Tuzlu ortamda yaşayabilen bitkilere halofit denir. Bu bitkiler, tuzlu ekosistemde hayatta kalmak için uygun bir ozmotik eğimi korumak için tuz iyonlarını bünyelerinde biriktirir ve saklar. Na^+ ve Cl^- gibi iyonlar devir daim yapan gri suda birikir ve mahsullere zarar verecek seviyelere ulaşır. Na^+ ve Cl^- içeren bu tür aşırı birikim yapan bitkiler, sulak alanlarda fito-desalinizasyona işlemini gerçekleştirirler. Çeşitli koşullarda yaşayabilen *Scirpoides Holoschoenus*'nun (sazlık) bir yapay sulak reaktöründe gri sudan Na^+ ve Cl^- gideriminde iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir (Eric ve diğ., 2014).

Sülfat (SO_4^-), sodyum lauril sülfat içeren sabun ve deterjanların kullanımından gri suya dönüşebilen bir iyondur. Kötü kokulu hidrojen sülfür (H_2S) üreterek bakterilerin anaerobik solunum yapması için oksijen kaynağı olarak kullanılır (Harshman, P.E. & Barnette, 2000). Sülfat seviyeleri ppm veya mg/L olarak rapor edilir.

Çalışmada klorür tayini APHA standart yöntemi ile ölçülmüş olup, sülfat tayini için iyon kromatograf (IC) cihazı kullanılmıştır.

Giriş gri suyu sülfat değeri 32 mg/L, klor konsantrasyonu ise 65 mg/L olarak ölçülmüştür. Çıkışta ise %50'ye yakın bir giderim sağlandığı görülmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Bulgular

4.1.1 Gri suyun karakterizasyonu

Tez kapsamında yapılan çalışmada kullanılan gri su 15 gün periyotlarla olmak üzere iki kez İstanbul’da yer alan gri suyu ayrı toplanan büyük ölçekli bir otelden alınmıştır. Reaktör hacmi ve hidrolik yükleme hızı düşünülerek tek seferde 135 L gri su numunesi alınmıştır. Alınan numunelerin karakterizasyon çalışmaları yapıldıktan sonra, reaktör içerisinde işletmeye alınmıştır. Alınan numuneler deneysel çalışmalar süresince laboratuvar içerisinde yer alan 4°C sabit sıcaklıktaki soğuk odada bekletilmiştir. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında KOİ, TOK, TN, TP, sülfat, klor ile pH, sıcaklık ve bulanıklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, gri su karakterizasyonu birçok faktöre bağlı ve değişken özelliktedir. Bu nedenle, bu çalışmada iki kez alınan gri su numunelerinin karakterizasyon çalışmalarının doğruluğunun saptanması açısından otelden alınan uzun süreli ham gri su numunelerinin karakterizasyon çalışmaları ile karşılaştırılması ve tez kapsamında o değerlere de yer verilmesi daha doğru bir yaklaşım olarak görülmüştür. Karşılaştırma olarak kullanılacak veriler TÜBİTAK tarafından yapılan fizibilite raporu içerisinde yer almaktadır ve bu rapor kapsamında yaklaşık bir yıl boyunca ham gri su izleme çalışmaları yapılmıştır. Tez çalışmasında da yapılan karakterizasyon çalışması bu veriler ile karşılaştırılıp, ortaya konulmuştur.

Laboratuvar ölçekli çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 4.1 Laboratuvar ölçekli gri su karakterizasyon çalışması

Parametreler	Ortalama	Min. – Maks.
pH	7,23	7,18 – 7,26
Sıcaklık	27,6	27,4 – 27,9
Bulanıklık	30	27 – 33
KOİ	159	122 – 195
TOK	52	35 – 68
TN	9,05	8,57 – 9,47
NH4-N	5,45	4,14 – 6,72
TP	1,81	0,99 – 2,67
AKM	41	28 – 54
UAKM	7,5	5,5 – 11

Ham gri suyun farklı bileşenlerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri Çizelge 4.1 içerisinde yer almaktadır. Genel literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında ortalama değerler açısından çok uç değerlere rastlanmamıştır. Otelden alınan gri suyun karakterizasyon çalışması uzun süreli olarak TÜBİTAK tarafından da yapıldığı için Çizelge 4.2’de elde edilen sonuçlar ile karşılaştırması yer almaktadır. Su tüketimi düşük olduğunda, KOİ konsantrasyonunun tipik olarak yüksek olduğu ve bunun tersi olduğu bildirilmiştir (Olanrewaju ve Ilemobade, 2015). Pandemi nedeniyle otelde konaklayan insan sayısının az olması su tüketiminin düşüşüne sebep olmuştur. Bunun sonucu olarak da ortalama KOİ değerinin çalışmada daha yüksek olduğu söylenebilir. KOİ değerini diğer literatür çalışmaları ile kıyaslayınca ise ölçülen KOİ değerinin çok daha düşük olduğu gözlemlendi. Bunun sebebi ise alınan atık su numunelerinde iyi bir organik kaynağı olabilecek mutfak atık suyunun dahil edilmemesinin bir sonucu olabilir. Fosfor içeren deterjanların yasaklanmadığı ülkelerde yıkama deterjanları gri sudaki fosfatların birincil kaynağıdır (Travis ve diğ., 2012). Fosfor genellikle et, balık ve kümes hayvanları ürünleri gibi protein açısından zengin yiyeceklerin sunulmasında kullanılan bulaşıkların temizlenmesi, ağız yıkama atıkları ve açık giderlere akması yoluyla gri suya ulaşır. Çizelgede yer alan TP değerinin ortalamaya göre göreceli düşük olma sebebi oteldeki misafirlerin azlığından dolayı deterjan kullanımının azalmasına bağlanabilir.

Çizelge 4.2 Laboratuvar ölçekli çalışma ile TÜBİTAK'ın uzun süreli karakterizasyon çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

Parametreler	Otel Gri Su Karakterizasyonu (Laboratuvar)		Otel Gri Su Karakterizasyonu (TÜBİTAK)	
	Ortalama	Min. – Maks.	Ortalama	Min. – Maks.
pH	7,23	7,18 – 7,26	7,45	7,12 – 7,71
Sıcaklık	27,6	27,4 – 27,9	-	-
Bulanıklık	30	27 – 33	-	-
KOİ	159	122 – 195	105	<30 – 470
TOK	52	35 – 68	-	-
TN	9,05	8,57 – 9,47	7,4	<0,5 – 43
NH ₄ -N	5,45	4,14 – 6,72	1,44	<0,05 – 6,8
TP	1,81	0,99 – 2,67	3,2	0,4 – 8,8
AKM	41	28 – 54	66	10 – 468
UAKM	7,5	5,5 – 11	42	<5 – 288

4.1.2 Pilot ölçekli sulak alan reaktörü işletilmesi ve arıtma performansları

Ham gri suyun karakterizasyon çalışmaları yapıldıktan sonra yapay sulak alan reaktörü içerisinde işletmeye alınmıştır. İşletme koşulları literatürde yer alan çalışmalar baz alınarak seçilmiş olup, hidrolik bekletme süresi olarak 3 gün seçilmiştir.

Bitkileri çevreden kirleticileri uzaklaştırmak için kullanan ve yüksek verimliliği, düşük maliyeti ve hasat kolaylığı nedeniyle çevrecilerin dikkatini çeken yeşil ve çevre dostu teknikleri içeren doğal arıtma yöntemi olarak yapay sulak alanlar öne çıkmaktadır. Özellikle sucül bitki benzeri çalışmada da kullanılan “Bulrush” türü bitkiler, verimli büyümesi ve hasat kolaylığı nedeniyle diğer bitkilere göre önemli bir avantaja sahiptir. Uzun ve yoğun köklere sahip makrofitler, besinlerin emilimi için esastır ve asılı partikül maddelerin yakalanması ve emilmesi için bir ortam görevi görür (Kim ve Kim, 2000). Atık suyun özellikleri, fitoremediasyon sürecinde daha yüksek giderim elde etmede hayati bir rol oynamaktadır. Su bitkileri, suyun pH'ına ve besinlerin genel büyümesini ve uzaklaştırılmasını kontrol eden atmosfer sıcaklığına karşı oldukça hassastır. pH ve su sıcaklıkları sırasıyla 6–9 ve 15–38 °C aralığında olup, bitki büyümesi için uygun kabul edilmiştir (Shah ve diğ., 2014). Bu nedenle, bu çalışma boyunca su sıcaklığı 27.4 ile 27.9 °C arasında değişmiştir. Vymazal (2007), optimum performans için minimum 20°C'lik bir sıcaklık bildirmiştir, bunun altında nitrifikasyon oranı 6 °C'de sıfıra ulaşana kadar azaldığını ortaya koymuştur. Bu nedenle bu çalışma uygun sıcaklık ve pH altında gerçekleştirilmiştir. Genel olarak deney, canlı organizmaların besin emilimi ve biyokimyasal reaksiyonları için uygun olan optimum pH (7–8) altında gerçekleştirildi (Qin ve diğ., 2016).

Bulanıklık, suda asılı kalan maddelerin ölçüsüdür. Bu çalışmada ortalama %90 oranında giderim gözlenmiştir. Bulanıklığın giderilmesi için olası giderim mekanizmaları tortulaşma ve filtrasyondur (Trang ve diğ., 2010). Bu çalışmada, bulanıklık giderme esas olarak fiziksel mekanizmalar yoluyla gerçekleşmiştir. Çökeltme işlemi organik ve inorganik partikülleri gidererek bulanıklığın azalmasına neden olmuştur (Vymazal 2005). Benzer sonuçlar Ramesh-kumar ve diğ. (2019) tarafından da elde edilmiştir.

Azotun uzaklaştırılması, bitki tarafından besin olarak alınması, adsorpsiyon, buharlaşma, nitrifikasyon ve denitrifikasyon kombinasyonları yoluyla gerçekleşir. Çeşitli azot formları arasında amonyak gideriminin en yüksek olduğu bulunmuştur

(Chen ve diğ., 2010). Nitrifikasyon prosesi üzerinde en fazla etkiye sahip olan faktörler çözünmüş oksijen seviyesi, sıcaklık ve alıkonma süresidir. Bulrush, yoğun lifli kök sistemi nedeniyle yüksek nitrifikasyon sergiler. Amonyak giderimi pH ve sıcaklığa bağlıdır (Wallace ve Knight 2006), ancak bitki çürümesi çözünmüş oksijen miktarını azaltır ve dolayısıyla arıtma performansını da etkiler. Bu çalışmada gözlemlenen arıtma performansı, iyi gelişmiş bir rizosfer yoluyla nitrifikasyona ve bitki alımına bağlanabilir. Çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını en verimli şekilde artıran sucul bitki türleri de en yüksek nitrifikasyon oranlarını gösterir. Bu araştırma için çalışma süresi boyunca amonyak azotunda ortalama %65,43 azalma gözlemlendi. Diğer çalışmalarda ise, Fox ve diğ. (2008) ile Nahlik ve Mitsch (2006), amonyak azotunda sırasıyla %60-%85 ve %40.34 azalma sağlamıştır. Bitki, biyofilmler için geniş bir yüzey alanı sağlayarak denitrifikasyon oranını etkiler, böylece denitrifikasyonlar için gerekli olan uygun bir ortam sağlar (Sooknah, 2000). Çalışma sonuçlarına bakıldığında toplam azot konsantrasyonunda istenen düzeyde bir arıtma olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak reaktör içerisinde anoksik/anaerobik koşulların oluşmadığı ve böylece denitrifikasyon sürecinin gözlemlenmediği söylenebilir. Giderim verimliliğinde dalgalı bir değişim gözlemlendiği görülebilir. Sistem özelinde anoksik/anaerobik koşulların oluşmama sebebi olarak sistemin sürekli olarak işletilmesi ve giriş atık suyunun zayıf karakterizasyonu nedeniyle sistemdeki oksijeni tüketmeye kapasitesinin yetmediği yorumu yapılabilir.

Ana bitki aynı zamanda olgunlaşırken, bebek bitki (eşeysiz büyüme) büyümesi, hayatta kalması ve gelişmesi için besin maddelerine ihtiyaç duyan tam büyüme aşamasındadır, bu nedenle sadece olgunlaşmış ana bitkinin çıkarılması gerekir. Fosfor, bitkilerde vejetatif üreme ve büyümesi için önemli bir besin maddesidir. Fosforun uzaklaştırılması sorpsiyon ve bitkinin büyümesi için kullanması olmak üzere iki ana mekanizma ile gerçekleşir. Fosfor giderimi için ana kaynak, bitkinin vejetatif ve stolon büyümesidir. Fosfordaki azalma, bitki ve mikroorganizmalar tarafından besin olarak tüketilmesi (Rangel-Peraza ve diğ. 2019), partikül maddelerin kökler yoluyla süzülmesi ve çökelme mekanizması (Shah ve diğ., 2014) yoluyla olmuştur. Stolon büyümesi için beslenme ihtiyacı, gri suda bulunan besinler tarafından karşılanır. Kadlec (2005), bitki tarafından rapor edilen toplam alımın sadece %10-20'sinin bitkide kalıcı olarak depolandığını ve geri kalanının ayrıştırma işlemi yoluyla suya geri döndüğünü bulmuştur. Bu nedenle, ayrışmayı önlemek için bitkinin arıtma

sisteminden zamanında çıkarılması çok önemlidir. Bu çalışmadan ve mevcut besin konsantrasyonunda biyokütlenin büyüme ve ayrışma döngüsü ekimden sonraki 30 gün içinde meydana gelmemiştir ve bu nedenle yapılacak çalışmalar ile bitkinin hasat zamanının belirlenmesi ve o zamana kadar olgunlaşan biyokütlenin hasat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, biyokütlenin hasadı, uzaklaştırma işleminin devam etmesi ve sürdürülebilir olması için önemlidir. Fitoremediasyonda, bitki üretkenliği, doğrudan gri su arıtma işlemi sırasında besin maddesi uzaklaştırma verimliliği ile ilgilidir. Ayrıca, besin giderme verimliliği, temas eden sistemin, yani reaktörün çalışma koşullarına bağlıdır. Makrofitlerin üretkenliği, yeterli su kaynağına sahip oldukları için karasal ve ekinlerden daha yüksektir (Shah ve diğ., 2014). Saz tipi bitkilerin kökleri, büyümesi ve çoğalması için besinlerin asimilasyonunda önemli bir rol oynar. Bulrush, besinleri emmekten sorumlu olan uzun ve yoğun köklere sahiptir ve bu nedenle, asılı partikül maddeyi yakalamak ve emmek için ortam görevi görür (Qin ve diğ., 2016). Bir fito-düzenleme biçimi olan rizofiltrasyon, gri sudaki kirleticilerin degradasyonu ve filtrasyonunda yer alan mekanizmadır. Gri suda bulunan besinler, büyümeleri için gerekli olan bitkiler için besin görevi görür. Büyüme hızı, bitkinin besin maddesi uzaklaştırma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bulrush, biyokütlesini 7-15 gün içinde ikiye katlama potansiyeline sahip bir su makrofitidir (Coetzee ve diğ., 2014). Daha yüksek üretkenliği, besin giderme kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. İlk başta, bitki taze olduğunda, besin alımı hızlı olacak ve bu da olgun bitkilere göre daha yüksek besin uzaklaştırma oranlarına yol açacaktır. Bu nedenle, sürekli olarak verimli bir şekilde uzaklaştırma elde etmek için biyokütlenin düzenli olarak hasat edilmesine ihtiyaç vardır.

Gri su, genellikle siyah suyun ayrılması nedeniyle belediye atık sularına kıyasla daha düşük bir besin seviyesine sahiptir. Besin seviyesindeki bu farklılık, büyüme hızını ve dolayısıyla hasat süresini değiştirir. Hasat sıklığı, bulrush kullanılarak hedeflenen etkili fitoremediasyonda kilit bir faktördür (Ting ve diğ., 2018). Mevcut biyokütle ile uzaklaştırılacak besinler arasındaki dengeyi korur. Bitki dokusunun faydalı ömründen sonra çürümesi, büyük miktarda oksijenin parçalanması ve tüketilmesiyle sonuçlanan ve dolayısıyla fitoremediasyon sürecini engelleyen doğal bir süreçtir (Mishra ve Maiti 2017).

Nahlik ve Mitsch (2006), belirli bir zamanda biyokütlenin %30 hasat edilmesini ve bunun sonucunda arıtım süreci boyunca optimum besin maddelerinin

uzaklaştırılmasını önermiştir. Bu süreçteki zorluk, süreci dezavantajlı hale getiren olgun ana bitkilerle birlikte bebek bitkinin ayırım gözetmeksizin hasat edilmesidir. Bebek bitki tipik olarak ana bitkiye, başlangıçta büyüme ve gelişme için gerekli besinleri sağlayan stolon yoluyla bağlanır. Böylece, ana bitki çıkarılırken bebek bitki de yanlışlıkla çıkarılır. Ana ve bebek bitkinin tamamen çıkarılmasını önlemek için, bir hasat yönteminin çalışılması ve geliştirilmesi gerekmektedir.

4.1.3 Pilot ölçekli sulak alan reaktörü deney sonuçları

Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere pilot ölçekli sulak alan reaktöründe yapılan deneysel çalışmalar kapsamında KOİ, TOK, TN, TP, klor, sülfat ile pH, sıcaklık ve bulanıklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Klor ve sülfat ile amonyak ölçümü için ham gri su numuneleri, işletme ortası ve işletme aşamasının sonu olmak üzere çift numune çalışılarak toplamda 8 sonuç elde edilmiştir. Diğer parametreler için sistem girişleri ile birlikte ilk üç gün çiftli ölçüm gerçekleştirilip, devamında 3 günlük periyotlarla ölçümlere devam edilmiş ve sistem toplam 30 gün boyunca işletilmiştir. Kirleticilerin giderim verimleri aşağıda tek tek irdelenmiştir.

Serbest yüzey akışlı sulak sisteminde 30 gün içinde arıtıldıktan sonra gri su numunelerinin ortalama kirletici giderim verimlerinin özeti Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Mikrobiyolojik indikatörler incelenmemiş olsa da, sulak alan sistemlerinin bu indikatörleri giderme de etkin olduğu söylenemez. Bu nedenle, arıtılmış atık suyun yeniden kullanımı konusunda, arıtılmış gri suyun dezenfeksiyon prosesine de tabi tutulup yeniden kullanım standartlarını sağlayabileceği söylenebilir. Evapotranspirasyon (ET) ile, azalan su hacmi nedeniyle çözünmüş bileşiklerin konsantrasyonu artar, temas süresi ve kirletici konsantrasyonu artar. Bu nedenle, özellikle ET'nin 2 mm/gün'ün üzerinde olduğu durumlarda (Białowiec ve diğ., 2014), çalışma alanında deneyimlenen (ortalama ET 6 mm/gün) giderim verimlilikleri de etkilenir. Çalışmadaki bazı kirleticiler, özellikle organik kirleticiler için giderim verimi değerlerinin düşük olmasının nedeni bu olabilir. Bu aynı zamanda, yapay sulak alanlarda büyük su kaybına yol açan bir girişim olan ET'nin hidrolik bekletme süresinin artışı da sınırladığı bazı çalışmalarda belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 Gri suyun SYS sistemi içindeki ortalama giriş ve çıkış konsantrasyonları

Parametreler	Giriş Konsantrasyonu	Çıkış Konsantrasyonu
Bulanıklık (NTU)	30	3
KOİ (mg/L)	159	14
TOK (mg/L)	52	6,78
TN (mg/L)	9,05	8,15
NH4-N (mg/L)	5,45	1,86
TP (mg/L)	1,81	0,24
AKM (mg/L)	41	6,1
UAKM (mg/L)	7,5	-

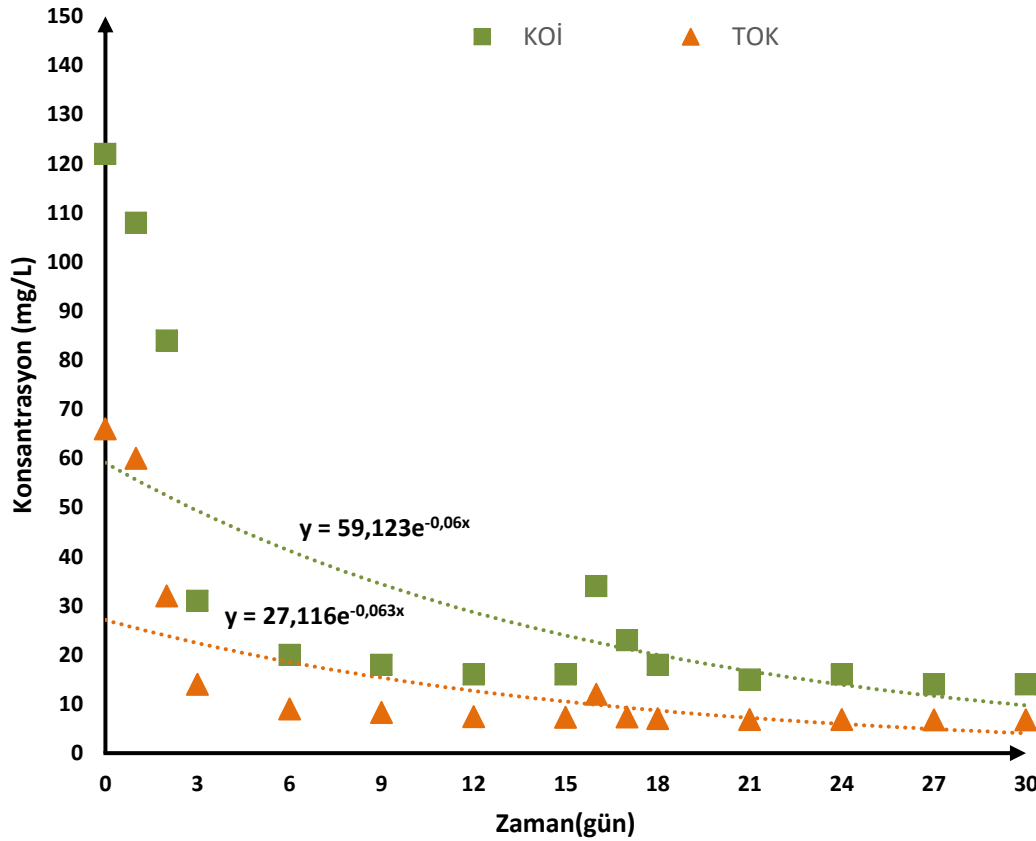
4.1.3.1 KOİ – TOK

Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere KOİ ve TOK parametreleri için yaklaşık %80 oranında giderim ilk üç gün içerisinde gerçekleşmiştir. Bitkilerin besleme çözeltisi ile beslenmesinden dolayı kirletici konsantrasyonuna sahip bir atık su ile temas ettiklerinde bitki bünyesine hızlı bir alım gerçekleşmiş ve sonrasında kararlı bir hale geldikleri görülmektedir. 15. Günde yeni bir ham gri suyun sisteme girişi olduğu için giderimlerde bir dalgalanma meydana gelmiş ve sonrasında sistem tekrar kararlı hale gelmiştir. Diğer çalışmalara bakıldığında giderim verimlerinin tutarlı olduğunu söylemek mümkün olsa da diğer çalışmalarda belirli bir gün işletimden sonra giderim verimlerinde düşüş görülmüştür. Bunun nedeni bitkinin taşıma kapasitesini doldurduğu ve hasat zamanı geldiğinin işareti olarak açıklanırken, tez kapsamında yapılan çalışmada bu durum gözlenmemiştir. Buradan da tez kapsamında kullanılan “Bulrush” bitkisinin hasat zamanının bir aydan fazla olduğu çıkarımı yapılabilir. İşletme süresi arttırılarak hasat zamanı da ileride yapılacak çalışmalarda belirlenmesi gereken bir konudur.

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), gri sudaki organik bileşiklerin varlığının bir göstergesidir. Toplam organik karbon (TOK) ise bir su örneğinde bulunan organik bileşik miktarının başka bir ölçüsüdür. KOİ organik maddenin bütünü temsil ederken, TOK parametresi organik maddenin karbonlu kısmını temsil etmektedir. Bu nedenle her zaman KOİ değerinin TOK değerinin üzerinde olması gerekmektedir.

KOİ ve TOK parametrelerine bakıldığında yaklaşık belirli bir oran belirlenebileceği gözükse de bu durum ham gri su karakterizasyonuna bağlı ve değişken olduğu yorumu yapılabilir. Yapılabilecek en doğru çıkarım ise giderim verimlerine bakılarak doğru orantılı olarak azaldığı söylenebilir. Başta oran yüksek olsa da zamanla birlikte değerlerin birbirine yaklaştığı yorumu yapılabilir.

KOİ'deki ortalama azalma (%91), arıtma sisteminin KOİ'yi önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Yüksek giderim değeri, fotosentetik aktiviteler sırasında çözünmüş CO₂'yi azaltan ancak kök bölgesi çevresindeki çözünmüş oksijeni artıran, böylece sulak alan substratı içinde aerobik bir koşul yaratan ve atık sudaki organiklerin bozulmasını sağlayan bitkinin varlığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, daha yüksek KOİ giderme verimliliği, kısmen deney boyunca yapay sulak alanlarda muhafaza edilen su derinliğine bağlı olabilir. Uygun su derinliği, sistemde aerobik, anoksik ve anaerobik mikrobiyal bozunmanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirlemek için sulak alan içindeki çözünmüş oksijen miktarını etkiler. Ayrıca sistem içinde görülen alg benzeri yüzen bitkilerin varlığını da etkilemiştir. Genel olarak, suyun derinliği ne kadar yüksek olursa, çözünmüş oksijen miktarı da o kadar yüksek tutulabilir. Bu sonuç Hee-Jeong ve Seung-Mok (2012) tarafından yapılmış olan serbest yüzey akışlı sulak alan çalışması ile uyumludur. KOİ giderim verimliliği bir yüzey altı akışlı sulak sisteminde *Cyperus Haspan*'ı kullanan Akınbile ve diğ.nin elde ettiği %60,7'den daha yüksektir (2012). Haghshenas-Adarmanadi ve diğ. (2016) tarafından *Typha Latifolia*, *Arundo Donax* ve *Phragmites Australis* kullanılarak işletilen yatay-dikey akışlı hibrit yapılı sulak alan sisteminde de sırasıyla %80, %81 ve %76 KOİ giderim verim değeri elde edilmiştir. Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemlerinde daha yüksek KOİ giderimi görülmektedir. Bunun nedeni SYS'lerde çoğu arıtma işleminin toprakta değil su sütununda gerçekleşmesi olarak söylenebilir. SYS'lerde toprağın ana rolü, bitkilerin büyümesini desteklemektir (Vymazal, 2013).



Şekil 4.1 KOİ ve TOK parametrelerinin zamana bağlı değişimi

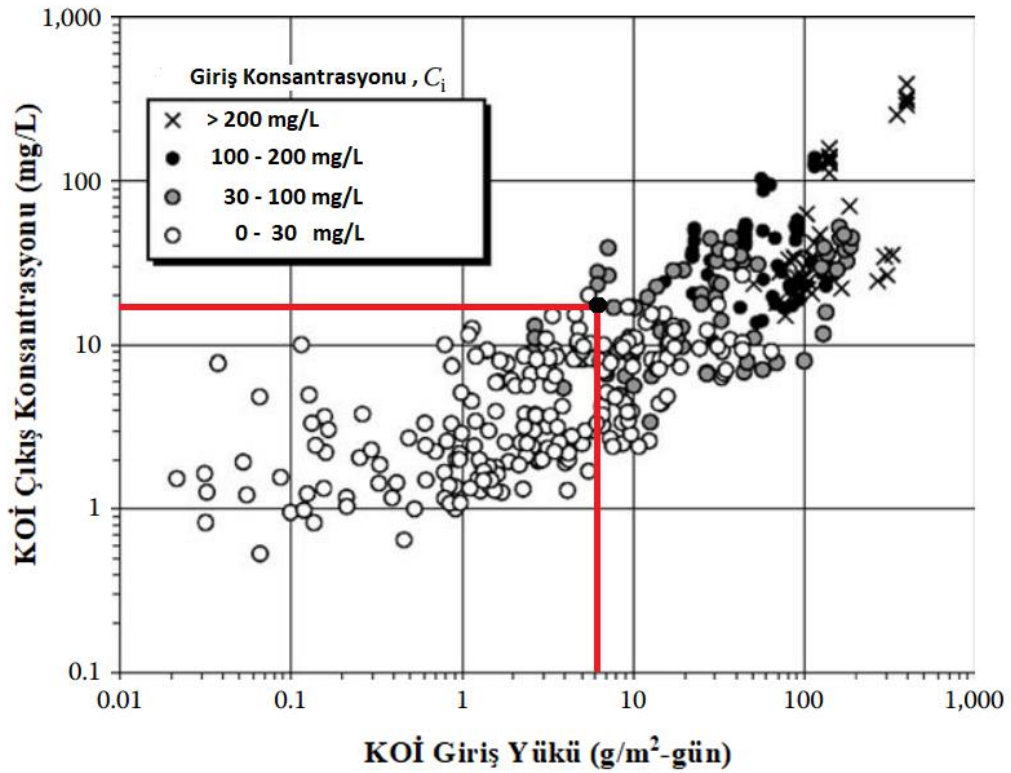
Grafikten de görüleceği üzere üstel fonksiyon olarak konsantrasyon değişimlerinin matematiksel ifadesi gösterilebilir. Bu denklem aracılığıyla kirleticilerin bu sistemdeki yarılanma ömrü bulunarak yorumlama yapmak mümkündür. Kirletici gideriminin 1. derece bozunma denklemine göre, yarılanma ömrü bozunma hızı katsayısı yardımıyla hesaplanabilir. Denklemden yer alan “e” sayısının üstel kuvveti bozunma hız katsayısını vermektedir. İki parametre için bu değerler yakın olduğu için tek bir yarılanma ömrü hesaplamak, iki parametreyi de yorumlamak için yeterli olacaktır.

$$t_{1/2} = \ln(2) / k$$

Formül yardımıyla kirleticiler için yaklaşık 11 günlük bir yarılanma ömrü hesaplanmıştır. Ancak, sisteme gri su beslemesi başladığında sediment üzerinde yüksek bir adsorpsiyon gerçekleştiği için giderimin ilk üç günlük periyotta yüksek olması, denklemin R^2 doğruluk değerinin de 0,7’lerde olmasına neden olmaktadır.

Sistemin kararlı duruma geçmesi ile bu denklemin daha anlamlı hale geldiğini söylemek mümkündür.

Serbest yüzey akışlı sulak sistemlerinde giderim yolları adsorpsiyon ve filtrasyona dayalı olduğu için alansal yük üzerinden giderim yorumlamak daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Kirleticilerin alan bazlı günlük giriş yükleri ve çıkış konsantrasyonlarının yer aldığı 138 SYS sistemini içeren detaylı grafik Kadlec ve Wallace(2009) tarafından literatürde yer almaktadır. Çalışma özelinde KOİ parametresinin günlük bazda alansal yükü ortalama giriş konsantrasyonu ile hidrolik yükleme hızının çarpımı şeklinde elde edilebilmektedir. Buna göre, sistemdeki hidrolik yükleme hızı $0,0427 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-gün}$ olduğu için, otelden alınan gri suyun günlük KOİ yükü $6,78 \text{ g/m}^2\text{-gün}$ olarak hesaplanmıştır.



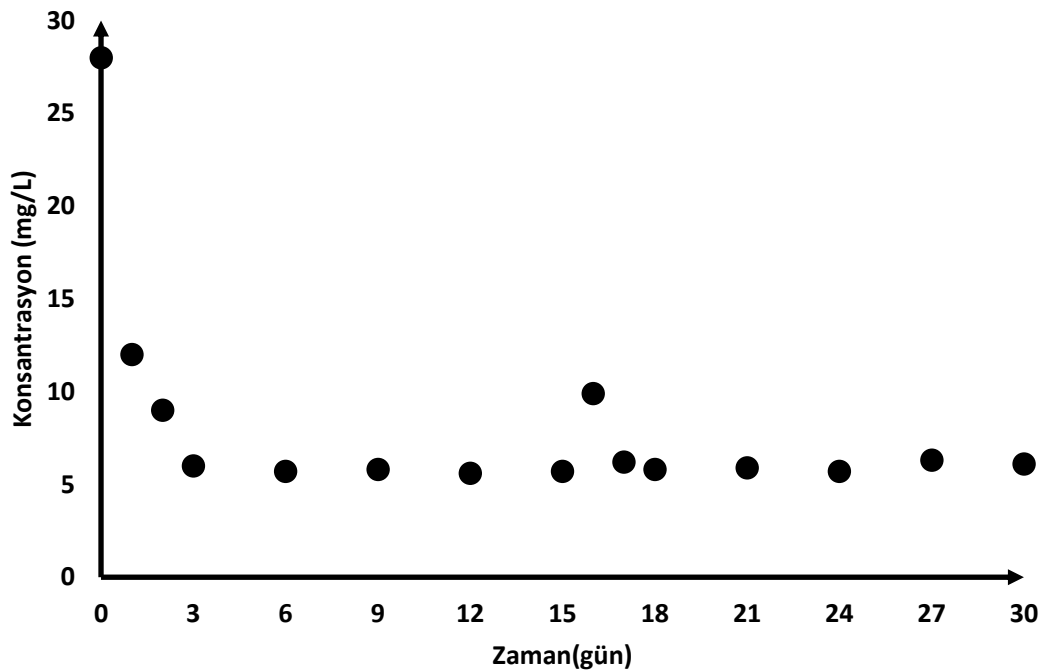
Şekil 4.2 SYS sistemlerinde KOİ yüklerine karşı çıkış KOİ konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)

Şekil 4.2’de kırmızı çizgilerin birleşim noktası, tez çalışmasında elde edilen sonucu göstermektedir. Grafik üzerindeki her bir nokta 136 farklı SYS sisteminin sonuçlarını temsil etmektedir. Giriş atık suyundaki KOİ konsantrasyonlarına göre noktalar farklı gösterimlere sahiptir. Çalışmada kullanılan otel gri suyu yaklaşık 160 mg/L KOİ konsantrasyonuna sahip olduğu için siyah içi dolu nokta ile gösterilmiştir. Grafikten de görüleceği gibi, çalışma çıkış konsantrasyonu daha düşük giriş konsantrasyonlu atık suların çıkış konsantrasyonları ile benzer sonuçlar göstermiştir. Böylece, sistemin yüksek giderim verimine sahip olduğu yorumu, 138 SYS sistemi çalışma sonuçları ile desteklenmiştir.

4.1.3.2 AKM

Şekil 4.3’de, AKM için ortalama giderim veriminin %85 olduğu görülmekte ve bazı çalışmalar ile bu değerin bitkinin yaşıyla birlikte arttığını öne sürülmektedir. Bunun sebebi olarak ise kök sistemindeki ve bitkinin vejetatif kısımlarındaki artışın, çökebilir ve yüzebilir katıların giderilmesini teşvik etmesi olarak açıklanmıştır (Zhang ve diğ., 2014).

Sistem, AKM giderimi açısından gri suyun yeniden kullanım standartlarını sağlayan etkin bir performans göstermiştir. AKM giderim verimi bu sistemlerin kullanıldığı diğer çalışmalar ile de tutarlıdır.

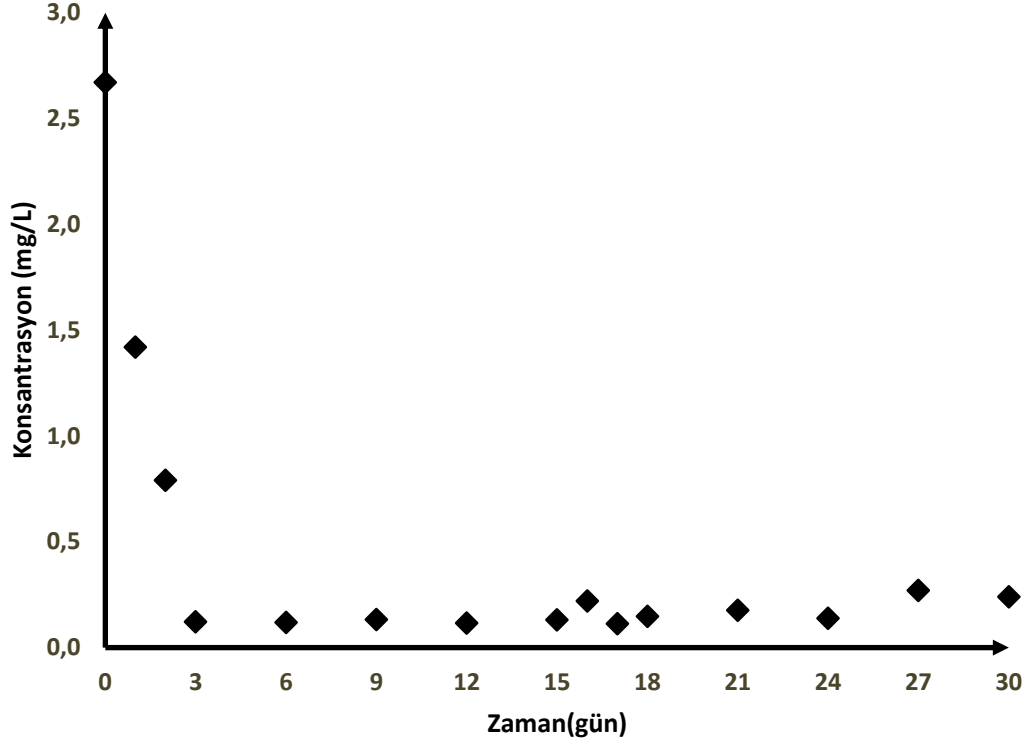


Şekil 4.3 AKM parametresinin zamana bağlı değişimi

4.1.3.3 TP

Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi TP için giderim verimi ortalama %86 olarak elde edilmiştir. Fosforu emen veya çökeltten su ve toprak partikülünün sürekli bir akış sisteminde temas süresinin düşük olması nedeniyle SYS'de fosfor giderimi genellikle düşük ve yavaştır (Vymazal, 2011). Adsorpsiyon, sulak alanlarda fosforu uzaklaştırmanın önemli yollarından biridir ve bu, Ca, Mg ve Fe gibi diğer metallerin varlığından etkilenir (Kadlec, 2005). Bu sonuç, Wallace ve Knight'ın (2006) SYS'lerin fosfor giderimi için genellikle etkili olmadığını bildirdiğini desteklemektedir. Çalışmalar, TP için %49,16'lık giderim veriminin SYS için orta düzeyde olduğunu ileri sürmüştür (Zhang ve diğ., 2014). Bu çalışmada elde edilen TP'nin yüksek giderim verimliliği çalışmada kullanılan atık suyun düşük başlangıç fosfor içeriği ve sistem işletme süresinin az olması ile ilgili olabilir. Belirli bir süre sonra, sistem başlangıcında sediment üzerinde hızla adsorplanan ve bitki bünyesine alınan fosforun sisteme geri salınması beklenmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda da, konsantrasyon-zaman grafiklerinde fosfor konsantrasyonunun belirli bir süre azalan bir eğriye sahip olduğu, sonrasında artan bir eğriye geçiş yaptığı yani giderim veriminin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni sedimentin adsorplama kapasitesinin doygunluğa ulaşması ile adsorplanan fosforun ve bitkinin hasat zamanı ile birlikte bünyesindeki kirleticilerin sisteme geri salınmasıdır.

Sonuç olarak, düşük giriş konsantrasyonu, standart limitten çok daha düşük bir TP değerine sahip bir çıkış akımının toplanmasına olanak sağlamıştır. Ancak, SYS sistemlerinde TP gideriminin konsantrasyon-zaman grafikleri yerine, giriş yüküne karşı gelen çıkış konsantrasyonu ile değerlendirilmesi daha uygun bir yaklaşımdır. Bu sistemlerde TP giderimi biyolojik olarak değil de, adsorpsiyon ve sorpsiyon yoluyla giderildiği için alansal giderim üzerinden değerlendirme yapmak gerekir. Literatürdeki çalışmalarda da zamana karşı konsantrasyon grafikleri yer aldığı için, karşılaştırma yapma konusunda fikir verme konusunda tez çalışmasında da bu tür grafiğe yer verilmiştir. Sonuçların daha uygun değerlendirilmesi için, alansal giderim grafiğine yoğunlaşmak gerekmektedir.

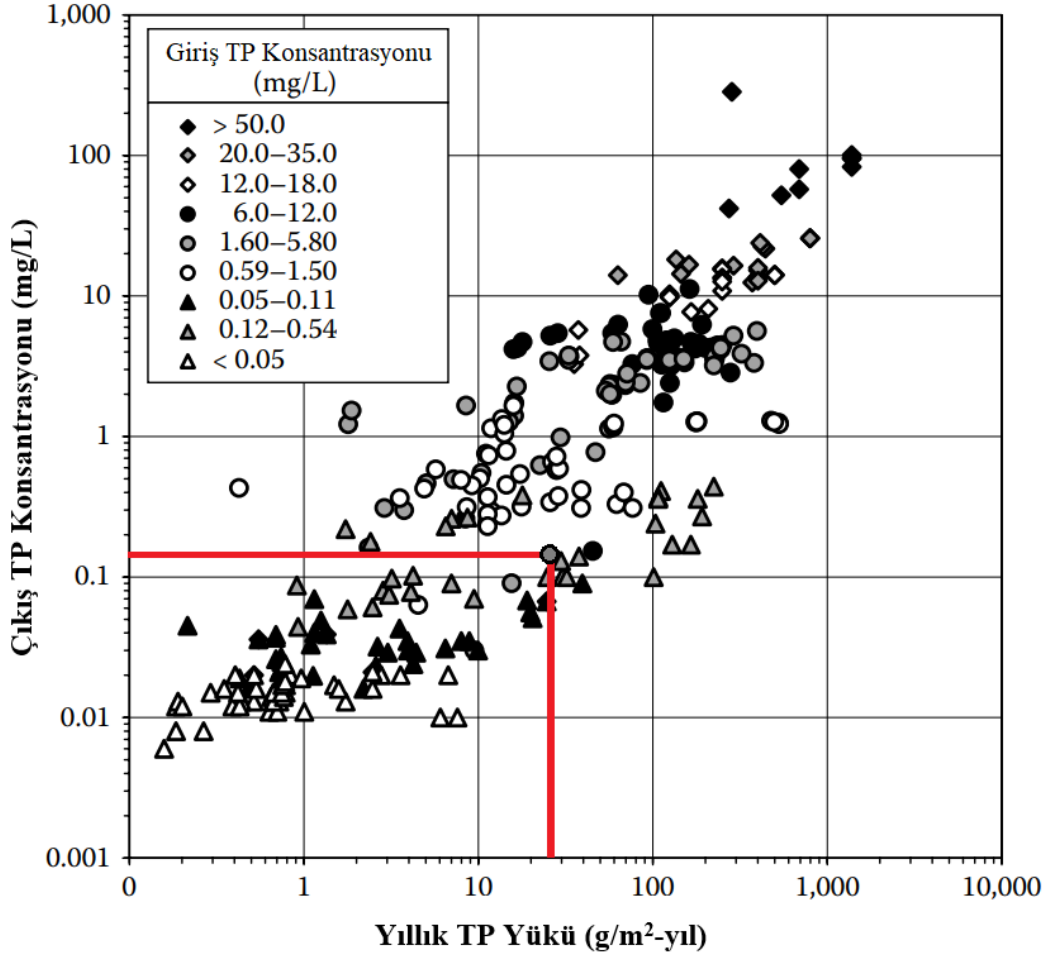


Şekil 4.4 TP parametresinin zamana bağlı değişimi

Çalışmada da görüldüğü üzere, 15 günlük periyottan sonra giderim veriminde bir azalma görülmektedir. Bu azalmayı, fosforun sisteme geri salınmaya başlaması olarak yorumlamak mümkündür.

SYS sistemlerinde, biyolojik fosfor giderimi olmadığı için, yıllık TP yükü ile çıkış TP konsantrasyonu aracılığıyla alansal giderim üzerinden sonuçları değerlendirmek daha makul olacaktır. Sistemin hidrolik yükleme hızı $0,0427 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-gün}$ yerine $15,85 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-yıl}$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Otelden alınan gri su numunesinin ortalama TP konsantrasyonu yaklaşık $1,80 \text{ mg/L}$ olduğu için, yıllık TP yükü $28,53 \text{ g/m}^2\text{-yıl}$ olarak hesaplanmaktadır. Tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, literatür çalışmaları ile karşılaştırılmış olup, Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Söz konusu şekilde, 282 farklı SYS sisteminde TP yüklerine karşı çıkış TP konsantrasyonları yer almaktadır. Grafikte kırmızı çizgilerin kesiştiği, giriş konsantrasyon değerine göre içi gri dolgulu yuvarlak, tez çalışması sonucunu temsil etmektedir. Çıkış TP konsantrasyonları, giriş TP yüklerine göre şekillense de, aynı tipteki yuvarlak noktalara bakıldığında sistemin çıkış TP konsantrasyonunun iyi bir seviyede olduğunu söylemek mümkündür. Bu sonuç, çalışmada kullanılan sedimentin

adsorpsiyon kapasitesinin ve seçilen bitkinin bünyesine besin alımının iyi olduğunu göstermektedir.



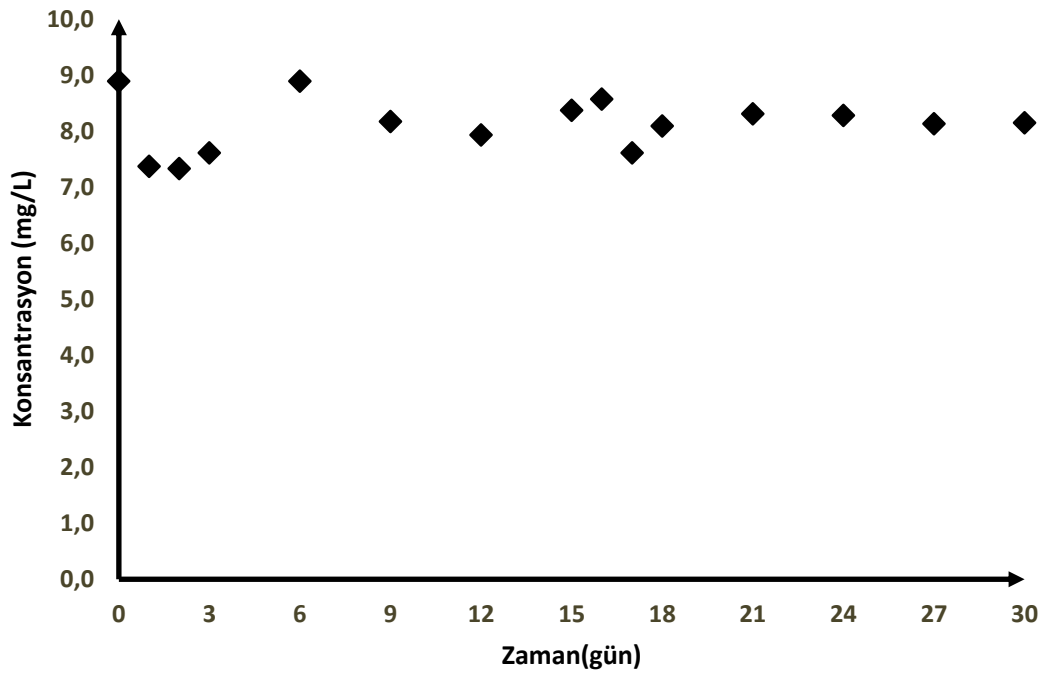
Şekil 4.5 SYS sistemlerinde TP yüklerine karşı çıkış TP konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)

4.1.3.4 TN

Azot giderimi öncelikle su sütununda nitrifikasyon ve toprak yüzeyinin altındaki su yüzeyinde denitrifikasyon yoluyla iki ana fizikokimyasal ve biyolojik arıtma tekniği ile olmaktadır. Bitki büyümesi ve bunun sonucunda bitki yoğunluğundaki artış, özellikle azot olmak üzere arıtma sisteminden besinlerin uzaklaştırılmasına da yol açar (Raphael ve diğ., 2019). Sistemde genel olarak TN parametresinde belirgin bir giderim sağlanamamıştır. Grafikten de görüldüğü üzere TN konsantrasyonunda dalgalanma söz konusudur. Sistemin sürekli olarak işletilmesi, açık bir sistem olması gibi koşullar ile girişte düşük konsantrasyona sahip atık su kullanımı sistemdeki oksijenin tüketilmesi ve sonucunda anoksik/anaerobik koşulların oluşabilmesi açısından

olumsuz bir etkidir. Amonyak azotu giderimine bakıldığında, sistemde nitrifikasyonun gerçekleştiği denitrifikasyon adımının ise gerçekleşmediği yorumunu yapmak mümkündür. Ancak düşük giriş konsantrasyonu sayesinde çıkış standartlarına bakıldığında limitlerin altında yer almaktadır.

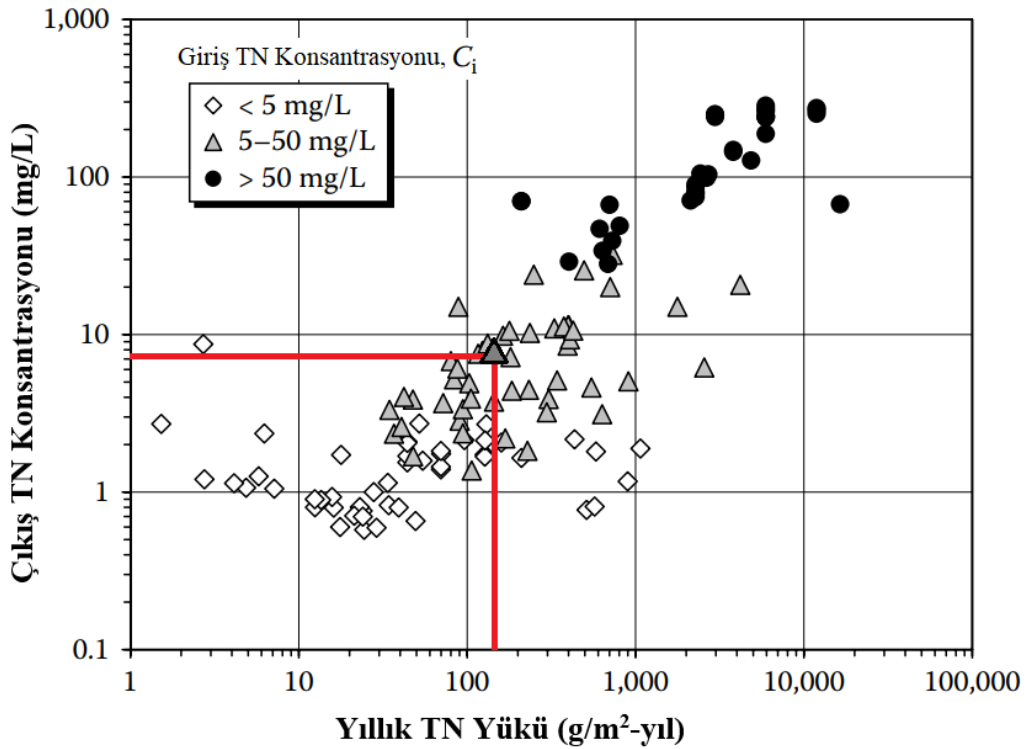
Literatürdeki çalışmalara bakıldığında benzer doğal proses sistemlerine kıyasla beklenen, TN için giderim verimliliği %39 mertebelerindedir. Ancak, Şekil 4.6’da da görüldüğü üzere, sistemdeki giderim verimliliği yaklaşık %10 seviyelerinde kalmıştır. Bunun olası bir nedeni, sulak alanlardaki azot dönüşüm süreçlerinin karmaşıklığı olabilir (Vymazal, 2013). Bu çalışmada da görüldüğü üzere amonyak azotunda beklenen giderim sağlanabilmişken, denitrifikasyon prosesinin gerçekleşmemesinden dolayı toplam azot giderimi istenen düzeyde sağlanamamıştır. Bu durumu bertaraf edebilmek adına, SYS ardına yatay yüzeyaltı akışlı bir sistem eklenip, hibrit yapılı sulak alan sistemine dönüşümü sağlanırsa, beklenen giderimin sağlanabileceği düşünülmektedir. Ancak, TP parametresinde olduğu gibi, TN parametresi için de alansal giderim üzerinden yük hesabı yaparak sistemi değerlendirmek daha anlamlı olacaktır.



Şekil 4.6 TN parametresinin zamana bağlı değişimi

TN parametresinin zamana bağlı değişime bakıldığında, literatüre kıyasla yetersiz bir giderim görülse de, yıllık TN yüküne karşı çıkış TN konsantrasyonu ile çıkış amonyak

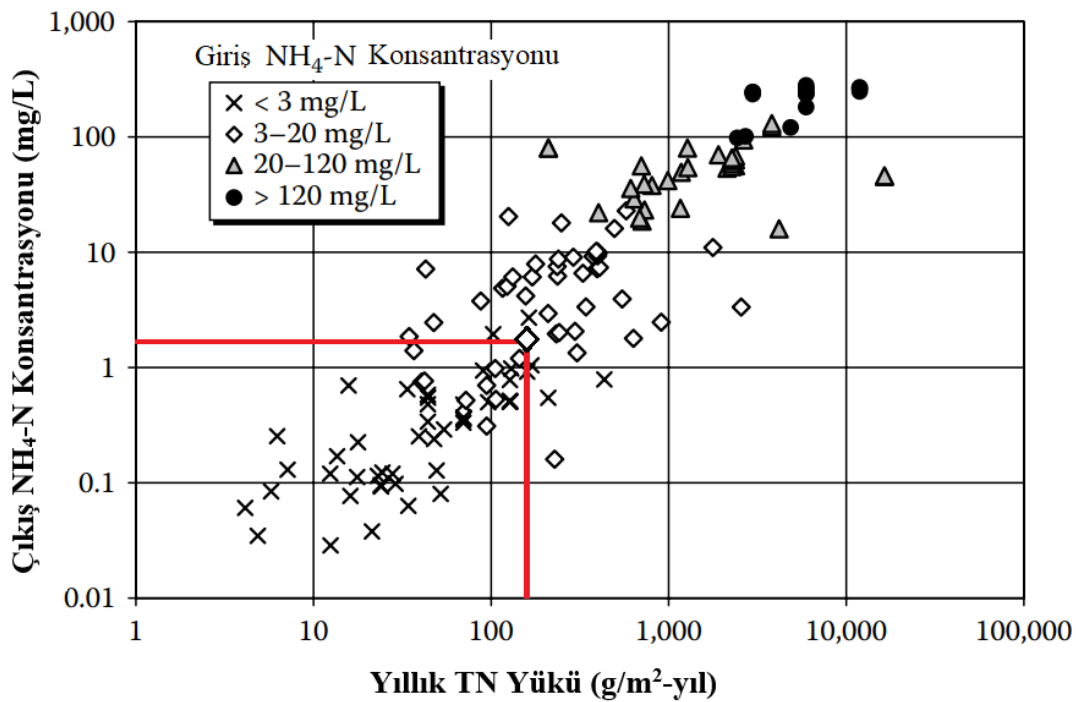
azotu konsantrasyonu çalışmalarını incelemek faydalı olacaktır. Bunun için, yıllık TN yükünün hesaplanması gerekmektedir. Giriş gri suyunda yaklaşık 9 mg/L TN bulunduğu için, bu değerin hidrolik yükleme hızı olan $15,85 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-yıl}$ ile çarpılması sonucu yıllık TN yükü $141,1 \text{ g}/\text{m}^2\text{-yıl}$ olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.7’de 141 farklı SYS sisteminin yıllık giriş TN yüklerine karşı çıkış TN konsantrasyonları gösterilmiştir. Giriş konsantrasyonlarına göre 3 farklı notasyon kullanılmış olup, her nokta farklı bir çalışmayı temsil etmektedir. Garifik üzerinde kırmızı çizgilerin kesiştiği, gri dolgulu üçgen şekil tez çalışmasında elde edilen sonucu göstermektedir. Sadece konsantrasyon-zaman grafiğine bakıldığında yetersiz bir performans görüle de, SYS sisteminin kullanıldığı, benzer TN giriş konsantrasyonuna sahip çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. TN çıkış konsantrasyonu açısından, diğer çalışmalar ile kıyaslandığında, tez çalışmasının da ortalama bir sonuç verdiğini söylemek mümkündür.



Şekil 4.7 SYS sistemlerinde TN yüklerine karşı çıkış TN konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçları Şekil 4.8’te gösterilen 149 farklı SYS sistemi sonuçlarının yer aldığı yıllık TN yüküne karşı gelen çıkış amonyak azotu konsantrasyonları grafiği içerisinde de kıyaslamak mümkündür. Tez kapsamında yapılan sistemin, grafikte yer alan çalışmalar ile kıyaslanması, sistemin nitrifikasyon

kabiliyeti hakkında da bilgi verecektir. Amonyak azotu konsantrasyonunun giriş değerine göre azalması, azot döngüsünün ilk adımının gerçekleştiğine dair bilgi vermektedir. Grafikte, kırmızı çizgilerin kesiştiği nokta tez çalışması kapsamında elde edilen sonucu temsil etmektedir. Aynı notasyona sahip çalışmalara bakıldığında, yapılan çalışmanın göreceli olarak düşük bir çıkış $\text{NH}_4\text{-N}$ konsantrasyonuna sahip olduğu ve makul bir değerde olduğu yorumunu yapmak mümkündür. Ancak bu notasyona sahip çalışmalar için giriş konsantrasyon değeri 3 ila 20 mg/L arasında değiştiği için, çalışmalardaki giriş $\text{NH}_4\text{-N}$ konsantrasyonlarını bilmeden, giderim verimlerinin karşılaştırmasını kesin olarak yapmak mümkün değildir.

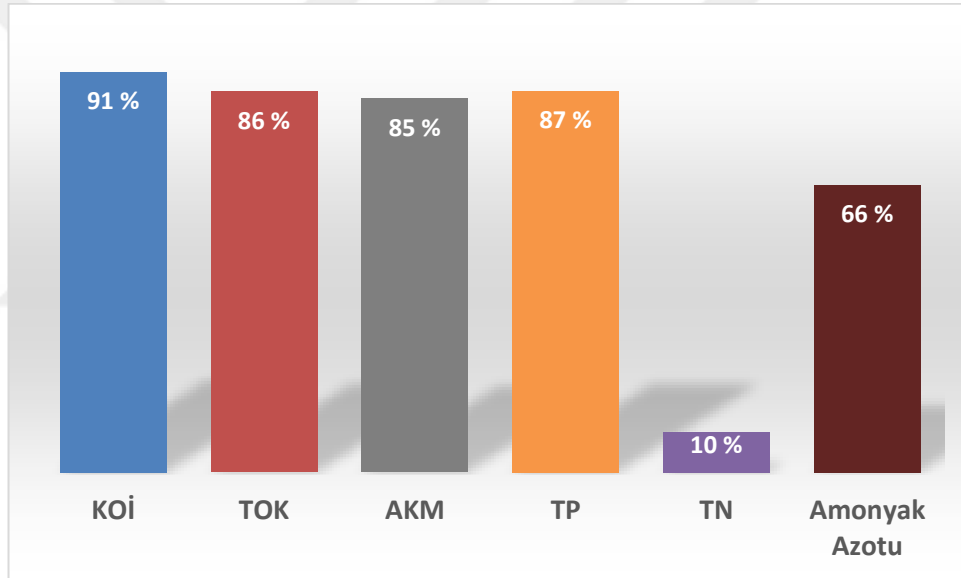


Şekil 4.8 SYS sistemlerinde TN yüklerine karşı çıkış $\text{NH}_4\text{-N}$ konsantrasyonları (Kadlec ve Wallace, 2009)

4.1.4 Serbest yüzeyli sulak alan reaktöründe kirletici giderim verimleri

Serbest yüzey akışlı sulak alan reaktörünün 30 gün işletilmesi sonucu ortalama kirletici konsantrasyonlarına göre giderim verimleri aşağıdaki Şekil 4.9’da özet olarak belirtilmiştir. KOİ, TOK ve AKM parametrelerinin giderim verimleri literatüre benzer yüksek giderim verimlerine sahip olmuştur. TP gideriminde literatüre kıyasla çok yüksek bir giderim görülmüştür. Ham gri suyun TP değerleri iki karakterizasyon çalışmasında da büyük farklılıklar göstermiştir. Bunun nedeni, numune alınan zamanlarda deterjanların yoğun kullanılıp kullanılmamasından kaynaklanabilir.

Ayrıca, TP gideriminin işletme süresi arttıkça belirli bir zaman sonra giderimin azalmaya başladığı literatür çalışmalarında da gösterilmektedir. Bu çalışmada işletme süresinin uzaması halinde giderim veriminde de bir azalma gözlenmesi muhtemeldir. TN parametresine bakıldığında, oldukça düşük bir giderim verimi sağlanmıştır. Azot döngüsü kapsamında TN parametresinin amonyak azotu ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu döngü kapsamında uygun koşullar oluşması durumunda, amonyak azotunun nitrit ve nitrata dönüşmesi, sonrasında denitrifikasyon prosesi ile birlikte azot gazına dönüşüp ortamdan uzaklaştırılması beklenmektedir. Ancak, çalışma kapsamında görülen sonuçlar, amonyak azotunun aerobik koşullar ile birlikte nitrifikasyon prosesine tabi tutulduğunu ancak anoksik koşullar meydana gelmediği için denitrifikasyon prosesinin gerçekleşmediği bu nedenle toplam azot konsantrasyonunda istenen düzeyde bir giderim yapılamadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4.9 SYS sisteminde kirleticilerin ortalama giderim verimleri

Ayrıca, çalışma başlangıcında ve sonunda bitkilerin durumu da aşağıdaki Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bitkilerin de gün geçtikçe olgunlaştığı ve çalışmanın devam ettirilmesi ile birlikte hasat zamanlarının yakın olduğunu da görseller ile söylemek mümkündür.



Şekil 4.10 Sistemin işletmeye alındığı ilk gün(sol taraf) ve sistemin işletildiği 30. gün(sağ taraf)

4.2 Tartışma

4.2.1 Laboratuvar ölçekli çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

Bu bölüm kapsamında laboratuvar sonucu elde edilen çalışma sonuçları ile gri su arıtımında serbest yüzey akışlı sulak alan ve hibrit yapılı sulak alan çalışmalarının arıtım performansları ile otele mevcut halde bulunan MBR sisteminin arıtım performansı karşılaştırılıp, değerlendirilecektir.

2019 yılında yapılmış olan serbest yüzey akışlı sulak alanda kampüs gri sularının arıtımı çalışmasında sistem kesikli olarak işletilmiştir. Gri su numunelerinin karakterizasyonu çok farklı olsa da genel olarak giderim verilerine bakılarak yorum yapmak mümkündür. Kampüs gri suları içerisinde el yıkama, duş sularının yanı sıra mutfak suları da dahil olduğu için kirletici parametrelerinin konsantrasyon değerleri oldukça yüksektir. Çizelge 4.4'te ham gri suların konsantrasyonlarının karşılaştırılması yer almaktadır.

Çizelge 4.4 Otel ham gri su ve kampüs gri suyu karakterizasyonları

Parametreler	Giriş	Giriş
	Konsantrasyonu (Otel)	Konsantrasyonu (Kampüs)
KOİ (mg/L)	159	848
TN (mg/L)	9,05	17
NH4-N (mg/L)	5,45	5,6
TP (mg/L)	1,81	60,6
AKM (mg/L)	41	377,5

Çizelge 4.4'te görüleceği üzere, kampüsten toplanan ham gri su karakterizasyonu evsel atık su karakterizasyonundan dahi yüksek değerlere sahiptir. Bunun sebebi ise mutfak atık suyunun da dahil olduğu güçlü karakterli gri su numuneleriyle çalışılmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, çıkış konsantrasyonları yerine giderim verimleri üzerine odaklanmak daha makul olmaktadır. KOİ ve AKM giriş konsantrasyonları büyük oranda farklı olsa da giderim verimlerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buradan da bu parametreler için sistemin kesikli veya sürekli işletilmesinin giderim verimini büyük ölçüde ekmediği çıkarımı yapılabilir. TN ve TP parametrelerine bakıldığında ise giderim anlamında çok farklı değerler ortaya çıkmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmada toplam azot kapsamında anlamlı bir giderim sağlanamamışken, toplam fosfor büyük ölçüde azaltılmıştır. TP konusundaki yorumlar önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi girişte de çok düşük bir konsantrasyon ile karşılaşılmamasından kaynaklanabilmektedir. Çünkü, bu denli yüksek bir giderim, literatürdeki diğer çalışmalar ile de uyumamaktadır. Kampüs gri suundaki TP giderim verimi literatür ile uyumlu bir veri sağlarken, buradaki TN giderimi de göreceli yüksek bulunmuştur. Tez çalışması aksine kampüs gri suyu çalışmasında, azot döngüsünün gerçekleştiği ve giderimin sağlandığı yorumu yapılabilir. Bunun nedeni için giriş atık suyunun yüksek karakterizasyona sahip olması en önemli etken iken su yüksekliği, kesikli işletme koşulu ve bitki türünün farklılığı da diğer etkenler olabilir.

Su sümbülü ekilmiş serbest yüzey akışlı sulak alan reaktöründe gri su arıtımını araştıran başka bir çalışmada ise yapay sulak alanda çok benzer karakterde gri su kullanılmış olup, 30 gün boyunca sürekli olarak işletilmiştir. Giriş kirletici konsantrasyonları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Giderim verimlerine bakıldığında ise,

su sümbülü kullanılan çalışmada %63 TN giderimi, %62 TP giderimi ve %52 KOİ giderimi elde edilmiştir. Benzer karakterizasyon ve işletme koşullarına sahip olduğu için buradaki giderim verimleri arasındaki fark su derinliği ve kullanılan bitki türüne bağlanabilir. Düşük KOİ giderimi su yüksekliğinin az olmasından kaynaklanmakta olabilir.

Çizelge 4.5 Farklı bitki türleri ekilmiş SYS'lerde ham gri su konsantrasyonlarının karşılaştırılması

Parametreler	Giriş Konsantrasyonu (Bulrush)	Giriş Konsantrasyonu (Su Sümbülü)
Bulanıklık (NTU)	30	29,75
KOİ (mg/L)	159	114
TN (mg/L)	9,05	4,52
NH4-N (mg/L)	5,45	3,36
TP (mg/L)	1,81	0,96
AKM (mg/L)	41	285,47

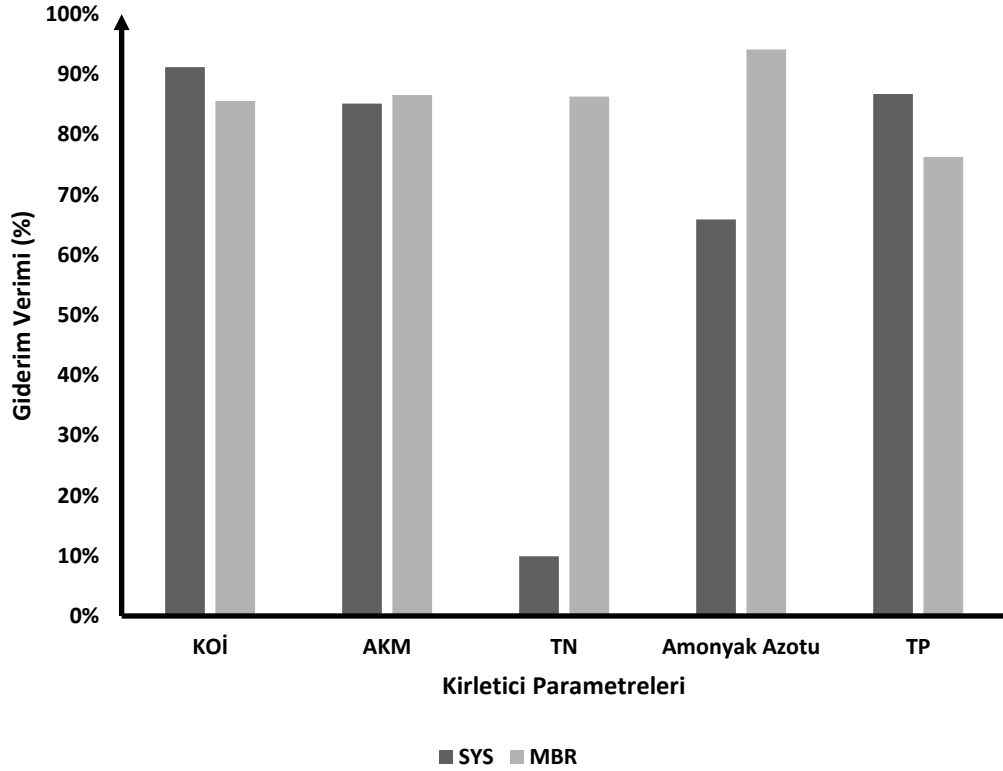
Hibrit yapılı bir sulak alan ile tez çalışmasındaki gri su arıtma performansı karşılaştırıldığında daha anlamlı sonuçlar yorumlamak mümkün olacaktır. 2009 yılında yapılmış olan 9 kişilik bir evin güçlü karakterdeki(mutfak atık suyu dahil) gri suyunu arıtmak için önce Y-YAS sistemi ardından D-YAS sistemine sahip hibrit bir reaktör kullanılmıştır. İki sistemde farklı bitki türleri kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılan çalışmalarda gri su karakterizasyonları farklı olsa da sonuçları yorumlama da katkı sağlaması açısından aşağıda yer alan Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

İki farklı sistemin giderim verimlerinin karşılaştırıldığında sonuçlar içerisindeki en çarpıcı nokta TN giderimi konusundadır. Hibrit yapılı sistemler toplam azot giderimi konusunda önemli bir arıtma performansı sergilemişlerdir. Diğer kirletici parametrelerine bakıldığında belirgin farklılıklar bulunmamakla birlikte, SYS sistemi ile YAS sisteminin hibrit yapılı bir sistem olarak işletilmesinin gri suyun yeniden kullanımı açısından arzu edilen çıkış konsantrasyonlarını elde edebileceğini söylemek mümkündür. İleride yapılacak çalışmalarda böyle bir sistemin oluşturulup, işletilmesi bu konuya daha fazla ışık tutacaktır.

Çizelge 4.6 SYS ve hibrit YSA sistemlerinde ham gri su konsantrasyonlarının karşılaştırılması

Parametreler	Giriş	Giriş
	Konsantrasyonu (SYS)	Konsantrasyonu (Hibrit)
Bulanıklık (NTU)	30	254
KOİ (mg/L)	159	646
TN (mg/L)	9,05	8,8
NH4-N (mg/L)	5,45	2,4
TP (mg/L)	1,81	5,6
AKM (mg/L)	41	120

Son olarak otel içerisinde halihazırda kullanılan MBR sisteminin kirletici giderim verimleri ile SYS sistemini karşılaştırmak, aynı karakterdeki gri suyun iki ayrı arıtma teknolojisi ile arıtım performansının değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. MBR sistemi kompakt ve yüksek giderim verimleri sayesinde son zamanlarda çok popüler hale gelse de maliyet ve sürdürülebilirlik açısından doğal bir arıtma teknolojisi olan yapay sulak alanların kirletici giderim verimlerinin kıyaslanması faydalı olacaktır.



Şekil 4.11 Otel gri su arıtımında mevcut haldeki MBR sistemi ile SYS sisteminin karşılaştırılması

Genel olarak Şekil 4.11’de yer alan sonuçlara bakıldığında toplam azot parametresinde belirgin bir fark olduğu gözükmemekte olup, diğer çalışmalardan da yapılan çıkarım ile SYS sisteminin hibrit yapılı bir modifikasyonu ile bu farkın azaltılabileceğini söylemek mümkündür. Grafikte yer almayan önemli bir husus ise mikrobiyolojik indikatörler olmakla birlikte MBR sisteminin en önemli farkı bu noktada olmaktadır. Bu konuda da önemli bir giderim verimine sahip olsa da, modifiye edilmiş sulak alan sistemi de literatür çalışmalarında belirtildiği gibi dezenfeksiyon sistemi ile birleştirilirse bu indikatörlerin giderimi konusunda da önemli bir yol katedilecektir. Alan ihtiyacı en büyük zorluk olarak sulak alanlar için öne çıksa da, otel gibi büyük ölçekte alanlara kurulu yerlerde rekreasyonel bir amaç güdülerek de kullanımının yaygınlaşması konusunda giderim verimlerine de bakıldığında bir engel bulunmamaktadır. Halihazırda arıtma sistemleri kullanılan yerlerde ise giriş debisinin bölünerek hem sulak alan hem de arıtma sistemi içerisinde giderim gerçekleştirilmesi de mevcut arıtma sisteminin içerisindeki yükü azaltıp, bakım süresinin uzamasına ve enerji ihtiyacının azalmasına olanak sağlayacaktır.

4.2.2 Çıktıların yeniden kullanım standartları kapsamında irdelenmesi

Literatür çalışmaları kapsamında ele alınan arıtılmış gri suyun yeniden kullanım standartları ile serbest yüzey akışlı sulak alan reaktöründe arıtılmış gri suyun kirletici konsantrasyonları incelendiğinde, mikrobiyolojik indikatörler belirlenip, dezenfeksiyon işlemine tabi tutulursa yeniden kullanım standartlarının sağlandığı kanısına varılabilir. Yeniden kullanım alanlarına bakıldığında rezervuar suyu olarak ve peyzaj sulama öne çıkan yeniden kullanım alternatifleri olsa da genel olarak insan teması olmayan ve şebeke suyu kullanılan her alanda arıtılmış gri suyun kullanılabileceği söylenebilir.

Türkiye için gri suyun yeniden kullanımına dair özel bir standart olmasa da atık suların yeniden kullanımına dair standartlar bulunmaktadır. Bu kapsamda, pişirilmeden ve pişirilerek tüketilen sebze ve meyvelerin sulaması olmak üzere iki yeniden kullanım alanı öne çıkmaktadır. Açıklamadan da anlaşılacağı üzere, pişirilmeden tüketilen gıdalar için daha düşük konsantrasyonlar belirtilmiştir. Dikkat edilen parametreler ise BOİ, AKM, pH, bulanıklık ve fekal koliform miktarıdır. Bu konu hakkında çalışmaların genişletilip, parametrelerin arttırılması ve bu sayede kullanım alanlarının genişletilip, özelleştirilmesi gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar ile standartlar

kıyaslandığında, BOİ, AKM, pH ve bulanıklık parametrelerinde istenilen çıkış konsantrasyonlarının elde edildiği söylenebilir. BOİ ölçümü ayrı olarak yapılmamış olsa da hiçbir zaman BOİ değerinin KOİ değerinden büyük olamayacağı bilindiği için, çalışmada çıkan 14 mg/L değeri, standart olarak verilen minimum değer olan 20 mg/L değerinden küçük olması standardın sağlandığının göstergesidir. Fekal koliform için bir ölçüm yapılmamıştır, ancak literatür araştırmaları sonucu yapay sulak alanlarda mikrobiyolojik indikatörlerin anlamlı olarak giderilmediği bilinmektedir. Bu nedenle, yapay sulak alan ile dezenfeksiyon ünitesinin birlikte kullanılması ile bu standardın sağlanması mümkün olacaktır.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında gri suların doğal bir arıtım teknolojisi olan yapay sulak alanlarda arıtılma performansının değerlendirilmesi ve yeniden kullanım alanlarının belirlenmesi irdelenmiştir. Su kıtlığı sorunu günümüzde önemli bir sorun olarak bulunmakta ve gün geçtikçe daha da kötüye doğru gitmektedir. Dünya nüfusunun zamanla artmasına karşılık, temiz su kısıtlı bir kaynak olarak talepleri karşılayamamaktadır. Bu nedenle, kısıtlı doğal kaynakların kullanımının azaltılması, kullanılan kaynakların da yeniden kullanımının sağlanması, bu bağlamda bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Yeniden kullanım sırasında olabildiğince doğal yöntemlerin kullanılması, sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Yüksek teknolojik alternatiflerin kullanılması, doğal yöntemlerle kıyaslandığında daha yüksek arıtma performansına sahip olsa da bu sefer de enerji ve ekonomi konusunda sorunlar ortaya çıkaracaktır. Tez kapsamında da üzerinde durulduğu gibi doğal arıtma yöntemleri daha teknolojik arıtma yöntemleriyle kıyaslandığında, arıtma açısından çok büyük farklar da ortaya konmamıştır. Bu nedenle, özellikle bu çalışma kapsamında çalışılan gri su gibi kirlilik yükü az olan bir atık suyun arıtımı konusunda yapay sulak alanlar öne çıkarılması ve üzerine daha çok araştırmalar yapılması gerekli bir konudur. Bu çalışma, geri dönüşüm amaçlı gri suyun arıtma teknolojisi gereksinimlerine katkıda bulunur. Gri suyun yeniden kullanımı için optimum sonuçların elde edilmesi için yapay sulak alan teknolojisine yönelik tasarım ve işletme hususlarının daha iyi anlaşılması da sağlanmıştır.

Ayrıca, günümüzde üzerinde durulması gereken diğer bir konu da yapılan çalışmaların döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilmesidir. Döngüsel ekonomi kapsamı, adından da anlaşılacağı gibi kullanılan malzemelerin bir döngü içinde olması gerektiğini, kısıtlı kaynakların kullanımının azaltılması ve atık olarak görülen materyallerin farklı proseslerde ham madde olarak kullanılmasını ön plana çıkarmaktadır. Bu bölümde bu kapsam detaylandırılmış ve yapılan çalışmaya öneriler sunularak gelecekte yapılacak çalışmalar için ışık tutulmaya çalışılmıştır.

5.1 Suyun Yeniden Kullanımı ve Döngüsel Ekonomiye Katkı

Tatlı su kaynaklarının kıtlığı ve suyun yeniden kullanım potansiyeli nedeniyle ve çevresel etkileri azaltmak için, yaşam döngüsü değerlendirmeleri yoluyla suyun yeniden kullanılmasının olanaklarını ve yararlarını değerlendirmek esastır. Çeşitli teknolojileri ve çeşitli coğrafi ve iklim koşullarını dikkate alarak çevresel etkiyi değerlendirir (Mo ve Zhang, 2013). Döngüsel ekonomi yaklaşımı, sınırlı kaynaklar üzerindeki stresi azaltmak, sürdürülebilirliklerini iyileştirmek ve çevreyi korumak için kaynakların geri dönüşümünü amaçlamaktadır (Corona ve diğ., 2019). Burada da amaç, yeterli miktarda ve yeterli kalitede arıtılmış su sağlamaktır (Alharbi ve diğ., 2019a).

Geri kazanılan gri atık su, genellikle kentsel, tarımsal, endüstriyel ve çevresel yeniden kullanım uygulamaları olarak kategorize edilebilen çeşitli amaçlar için kullanılır. İçilebilir olmayan kentsel yeniden kullanım uygulamaları arasında peyzaj sulama (halka açık parklar, spor tesisleri, golf sahaları, özel bahçeler vb.), sokak temizliği, yangın koruma sistemleri, araç yıkama, tuvalet sifonu, klimalar ve toz kontrolü yer almaktadır. Mahsul sulama (gıda ve gıda dışı ürünler) ve meralar tarımsal uygulamalardır. Arıtılmış atık su tekstil, kağıt hamuru ve kağıt sektörü, kimya sanayi, çelik, demir, metalurji ve gıda sanayilerinde yıkama ve durulama faaliyetleri için kullanılabilir. Çevresel uygulamalar, rekreasyonel faydalar ve yeraltı suyu şarjı için bataklıklar, sulak alanlar veya bataklıklar gibi habitatların restorasyonunu içerir (Corona ve diğ., 2019).

Gri suyun evsel atık sudan ayrılması, daha düşük konsantrasyonlarda besin maddeleri, dışkı patojenleri ve tehlikeli endüstriyel kimyasallar içerdiğinden gri suyu belediye atık sularından daha uygun bir yeniden kullanım kaynağı haline getirir. Hedeflenen kaliteye ulaşmak için gerekli arıtım metodunu değerlendirirken gri su karakteristiği önemli olacaktır (Eriksson ve diğ., 2002). Uygun şekilde arıtılan gri su, birçok ülkede tuvalet sifonu için kullanılan su içme suyu kalitesinde olduğundan, tuvalet sifonu için yeniden kullanılabilir. Evsel atık su kullanımının %25'ini yıkama suyu tüketimi oluşturmaktadır (Baykal 2019). Taemthong (2018), suyu binalarda daha verimli dağıtmak için lavabolardan gelen gri suyun arıtılmasını ve yıkama sistemlerinde yeniden kullanılmasını tavsiye etmiştir. Nolde (2000), Masi ve diğ., (2010), Mourad ve diğ., (2011), Fountoulakis ve diğ., (2016), ile Ren ve diğ., (2020), batık membran

biyoreaktör ve döner biyolojik diskten yapay bir sulak alana kadar farklı yöntemlerle yıkama için yeniden kullanmak üzere gri suyun arıtılmasını incelemiştir. Yeniden kullanım seçiminin, kullanıcının gri suyun yeniden kullanımına ilişkin algısı ile ilgili olduğu vurgulanmaktadır. İnsanlar, kişisel temas içeren faaliyetler için geri kazanılan suyu yeniden kullanma konusunda olumlu yaklaşımda bulunmamışlardır (Oteng-Peprah ve diğ., 2018).

Kaynak geri kazanım stratejisi, geleneksel atık su arıtımının çevresel etkilerini azaltır. Gerekli enerjinin bir kısmını üreterek ve değerli ürünlerin geri kazanılmasını sağlayarak arıtma maliyetini düşürür. Bu strateji, atık su arıtma sürecinin nihai hedeflerine katkıda bulunur. Bunlar, KOİ giderimini en üst düzeye çıkarmak, enerji tüketimini en aza indirmek ve çamur üretimini azaltmak olarak sıralanabilir. Genel olarak kaynak geri kazanımı, endüstriyel atık su arıtımı ile ilgili maliyetin dengelenmesine yardımcı olur. Çevre kirliliğini azaltırken daha fazla gıda, enerji ve su üretmek için döngüsel ekonominin temelini sağlar.

5.2 Suyun Yeniden Kullanımının Özellikleri

Arıtılmış gri su dört ilkeye uygun olmalıdır: hijyenik güvenlik, estetik, çevresel tolerans ve yeniden kullanım için ekonomik fizibilite (Nolde 2000). Suyun yeniden kullanımı yönetmeliği veya yönergesi ülkeden ülkeye ve bazı durumlarda eyaletten eyalete değişir. Ayrıca kullanım amacına göre farklılık gösterir. Bu nedenle, geri kazanılmış atık suyun yeniden kullanımı için tek tip bir standart yoktur. Gri suyun miktarı ve özelliği nedeniyle, bazı ülkeler arıtmaya odaklanmış ve çeşitli kriterlerde yeniden kullanım için arıtılmış gri suyun kalitesine ilişkin düzenlemeler getirmiştir.

Geri kazanılan suyun kalitesini kontrol etmek için tüm yönetmelik ve kılavuzlarda ortak olan üç temel parametre organik madde (BOİ₅ veya KOİ), toplam askıda katı madde (AKM) ve mikrobiyal popülasyondur. 20 mg/L'in altındaki AKM, berrak bir çıkış suyu sağlamaktadır. Mikrobiyal aktiviteleri sınırlamak için BOİ₅ konsantrasyonunun 20 mg/L'den az olması tavsiye edilmiştir. Sonuç olarak, tüm standartlara göre tespit limitlerinin altındaki kirleticiler kabul edilebilir seviyede sayılmıştır.

Belirtilen standartlara ulaşmanın, geri kazanılan suyun yeniden kullanımının güvenli olduğu anlamına gelmediğini belirtmekte fayda vardır. Bir düzenlemede seçilen

parametreler genellikle üç ila altı özellik ile sınırlıdır. Bu nedenle, bu parametreler gri sudaki tüm kirleticileri temsil etmeyebilir. Ksenobiyotik organik bileşikler gibi bazı kirleticilerin varlığı çok daha tehlikeli etkilere sahip olabilir. Sonuç olarak, bu düzenlemelerde etkin olan parametrelerin sayısı artırılmalıdır.

5.3 Döngüsel Ekonomide Suyun Yeniden Kullanımının Katkısı

Konvansiyonel atık su arıtma, ön arıtma, birincil ve ikincil arıtmadan oluşur. Bu yöntemde önemli miktarda ağır metallerin yanı sıra BOİ ve askıda katı maddelerin yüzde 95'e kadarı giderilebilir. Geleneksel arıtma, kalıcı organik kirleticiler (POP) gibi tüm farklı bileşikler verimli bir şekilde ortadan kaldıramamıştır. Son bir arıtma işlemi olarak, geleneksel doğrusal ekonomiden döngüsel ekonomiye geçiş için üçüncül ve gelişmiş atık su arıtımı gerekmektedir. Genellikle önceki arıtma ile elde edilmeyen, ortaya çıkan kirleticiler ve mikrobiyal patojenler içeren belirli atık su bileşenlerini azaltmak için üçüncül bir yöntem kullanılır. Atık su, kalite gereksinimlerine bağlı olarak içilebilir veya içilemez bir uygulama olarak yeniden kullanılabilir (Benami ve diğ., 2016; Voulvoulis 2018). Döngüsel bir ekonomiye geçiş, su arzı ve talebi arasındaki dengesizliğin üstesinden gelinmesine yol açar.

Atık su arıtma sektöründe, farklı atık önleme kurallarına dayalı olarak döngüsel bir ekonomi modeli gerçekleştirilebilir: 2R (azaltma ve yeniden kullanım), 3R (azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm) ve 4R (azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım). Söz konusu dört parametre, iyileştirme ve yeniden düşünme ile birlikte döngüsel ekonomide uygulanan altı eylemdir. Söz konusu eylemlerin tanımları aşağıdaki gibidir:

- ✓ Azaltma: su tüketimini azaltarak ve kirli su üretimini azaltarak atık su oluşumunu önleyin
- ✓ Yeniden Kullanım: Arıtılmış atık suyun içilebilir olmayan amaçlar için yeniden kullanımı
- ✓ Geri Dönüşüm: İçilebilir uygulama için suyun geri kazanılması
- ✓ Kurtarma: besin ve enerji olarak kaynakların geri kazanılması
- ✓ Islah: kirleticilerin giderilmesi için etkili teknolojilerin kullanılması

- ✓ Yeniden Düşün: çevreye atık emisyonlarını azaltmak için kaynakların nasıl kullanılacağına yeniden değerlendirilmesi (Smol ve diğ. 2020).

Suyun yeniden kullanımı, kamu algısı, teknolojik ve ekonomik yönler, güvenlik ve düzenleyici zorluklar gibi birçok engelle karşılaşmaktadır (Voulvoulis, 2018). Kamuoyunda kabul görmemesi nedeniyle su geri kazanım ve yeniden kullanım sistemi yavaş ilerlemektedir. İnsanlar şu anda yenilebilir olmayan mahsul sulama amaçları, kentsel uygulamalar ve endüstriyel kullanımlar için arıtılmış suyun yeniden kullanılması konusunda daha iyimser bir tavır sergilemektedirler (Baawain ve diğ., 2020). Ekonomik açıdan bakıldığında, arıtma altyapısı, enerji gereksinimi, giriş suyu özellikleri, çıkış suyu kalite gereksinimleri ve geri kazanılan suyun gerekli miktarı gibi çeşitli faktörler temeldir (Voulvoulis 2018). Arıtılan atık su, potansiyel olarak tehlikeli birkaç kirletici içerir. Mikro kirleticiler, antibiyotiğe dirençli genler, mikro veya nano plastikler, kişisel bakım ürünleri ve ilaçlar bu kirleticilerden bazılarıdır (Guerra-Rodríguez ve diğ., 2020). Yukarıdaki engeller göz önüne alındığında, geri kazanılan suyun yeniden kullanılması tamamen mümkün değildir. Bu engellerin üstesinden gelmek için halk kültürünün teşvik edilmesi, daha verimli teknolojiler geliştirilmesi ve arıtma öncesi ve sonrası gri suların daha detaylı analizlerinin yapılması tavsiye edilmektedir.

5.4 Öneriler

Bu başlık altında, gelecekte yapılması önerilen çalışmalar ve gri su arıtımı ile ilgili çözüm önerileri ile birlikte son kullanım alan alternatifleri yer almaktadır. Ayrıca, gri su arıtımı için sulak alan sistemlerinin diğer sistemlerle entegre olarak kullanımının faydalı çıktılarından bahsedilecektir.

5.4.1 Sistem seçimi önerisi

Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemlerinde, sonuçlardan da görüldüğü üzere denitrifikasyon adımı eksiklikler ortaya çıkmış ve istenilen düzeyde N giderimi sağlanamamıştır. Bu konuda, hibrit sistemlerin öne çıkması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca hibrit sistemlerin dezenfeksiyon ünitesiyle birleştirilmesi son kullanım açısından önemli bir adım olmaktadır. Son ürünün yanında arıtılacak suyun kalitesine göre literatürde yer alan anaerobik sistemlerle sulak alanların birleştirilmesi enerji konusunda da yeni yollar arayan ülkeler için alternatif çözüm önerilerinden biri olacaktır.

5.4.2 Döngüsel ekonomi kapsamında öneri

Türkiye’de çok fazla çalışılmamış, dünya literatüründe de son zamanlarda popüler hale gelmiş bir konu olarak sulak alan sistemlerinde yatak malzemesi olarak Al içerikli içme suyu çamurunun kullanılması döngüsel ekonomi kapsamında da önemli katkı sağlayacak bir çalışma olacaktır. İçme suyu arıtma sistemlerinde atık olarak ortaya çıkan ve bertarafı arıtma tesisleri açısından en çok uğraşılan çamurun sulak alan sistemlerinde yatak malzemesi olarak kullanılması atık su içerisinde yer alan P’nin büyük ölçüde giderilmesi konusunda fayda sağlamaktadır. Sulak alan sistemlerinde kullanılan bitkilerin hasat edilip, ticari amaçlı insan kullanımına uygun olan materyallere dönüştürülmesi ve yatak malzemesi olarak kullanılan P içerikli çamurun ilgili geri kazanım işlemleri neticesinde P geri kazanımı sağlaması ve arta kalan çamurun yol inşaatlarında dolgu malzemesi olarak kullanılması ile sulak alan sistemleri sıfır atık kapsamında olmakla birlikte, başka bir prosesin atığı da faydalı bir ürün olarak kullanıldığı için döngüsel ekonomi anlamında önemli bir çalışma olarak literatürde yerini alacaktır. Bundan sonra yapılan çalışmalarda bu konulara da ışık tutulması gerekliliği bulunmaktadır.

5.4.3 Tasarım önerisi

Yapılan çalışma ve literatür araştırmalarında da görüldüğü üzere gri su arıtımı ve yeniden kullanımı açısından sulak alan sistemleri çoğu kirletici parametresi üzerinden yüksek verimli, düşük maliyetli ve sürdürülebilir doğal arıtım teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu konuda karşılaşılan en büyük sorun arazi gereksinimidir. Ancak, günümüzde yapılan büyük ölçekli yapılarda doğal yaşama dönüş cezbedici bir satış tekniği olarak öne çıkmaktadır. Yapılan ve yapılacak sitelerde yeşillik içerisinde konutların değeri vurgulanmaktadır. Böyle bir alanda süs havuzları da doğal yaşam çağrısı olarak projelerde yer almaktadır. Süs havuzlarında şebeke suyu kullanılmakta olup, çalışmada bahsedilen kısıtlı kaynakların azaltılması söz konusudur. Bu alanlarda yapay sulak alan sistemlerinin kurulup, site sakinlerinin gri suyu bu sistemlerde arıtılıp, miktarına göre peyzaj sulama, rezervuar amaçlı kullanım ve yangın söndürme sistemlerinin proses suyu olarak değerlendirilebilir. Böylelikle, rekreasyonel alan korunmuş olup, faydalı bir kullanım amacına dönüştürülmüş olacaktır. En büyük tehlike, gri suların insan temasına yakın olması olarak düşünülebilir. Özellikle, çocuklar için bir tehlike olarak tanımlanabilmektedir. Ancak, bu tehlikenin de önüne geçilebilmektedir. Yapay sulak alan sistemi çift katmanlı olacak şekilde tasarlanabilir. İnsan temasına yakın olan 1,5 metrelik alanda arıtılmış ve dezenfekte edilmiş gri su veya şebeke suyu devir daim olacak şekilde bulunurken, iç tarafta şeffaf plastik ile ayrılmış sulak alan reaktörü yer alabilir.



KAYNAKLAR

- Abdalrahman, A., Hamoda, M. F., Al-Jarallah, R., & Alrukaibi, D.** (2017). Treatment and potential reuse of greywater from schools: A pilot study. *Water Science and Technology*, 75(9), 2119–2129. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.088>
- Abdul Aziz, N.I.H.; Mohd Hanafiah, M.; Halim, N.H.; Fidri, P.A.S.** Phytoremediation of TSS, NH₃-N and COD from Sewage Wastewater by *Lemna minor* L., *Salvinia minima*, *Ipomea aquatica* and *Centella asiatica*. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 5397. <https://doi.org/10.3390/app10165397>
- Abu-Ghunmi, L. N. A.** (2009). *Characterization and treatment of grey water : option for (re)use*. [publisher not identified].
- Adonadaga, M-G, Takramah, Bks; Ampadu, B; Sackey** (2020) Performance Evaluation of Three Different Grasses for Use as Willows in Greywater Treatment in Semi-arid Ghana, *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* Electronic ISSN 1119-8362, Vol. 24 (1) 179-185.
- Ahalya, N., Ramachandra, T. v, & Kanamadi, R. D.** (2003). *Biosorption of Heavy Metals Research Journal Of Chemistry And Environment*. <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/water/paper/biosorption/biosorption.htm>
- Ahmad, J. and El-Dessouky, H.** (2008). Design of a modified low cost treatment system for the recycling and reuse of laundry waste water. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(7), p. 973-978.
- Akinbile CO, Yusoff MS, Zuki AZ** (2012) Landfill leachate treatment using subsurface flow constructed wetland by *Cyperus haspan*. *Waste Manag* 32:1387–1393
- Al-Gheethi, A. A., Radin Mohamed, R. M. S., Efaq, A. N., & Amir Hashim, M. K.** (2016). Reduction of microbial risk associated with greywater by disinfection processes for irrigation. *Journal of Water and Health*, 14(3), 379–398. <https://doi.org/10.2166/wh.2015.220>
- Al-Jayyousi, O. R.** (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156(1), 181–192. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00340-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0)
- Al-Omari, A., & Fayyad, M.** (2003). Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan. *Desalination*, 155(1), 27–39. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00236-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00236-4)
- Ali, M., Rousseau, D. P. L., & Ahmed, S.** (2018). A full-scale comparison of two hybrid constructed wetlands treating domestic wastewater in Pakistan. *Journal of Environmental Management*, 210, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.040>
- Alharbi SK, Shafiquzzaman M, Haider H, AlSaleem SS, Ghumman AR** (2019) Treatment of ablution greywater for recycling by alum coagulation and activated carbon adsorption. *Arab J Sci Eng* 44(10): 8389–8399

- Allen, Lucy., & Pacific Institute.** (2010). *Overview of greywater reuse*. Pacific Institute.
- APHA** (2017). Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington
- Arden, S., & Ma, X.** (2018). Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 630, pp. 587–599). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>
- Ayaz, S. T., Aktaş, Ö., Akça, L., & Findik, N.** (2015). Effluent quality and reuse potential of domestic wastewater treated in a pilot-scale hybrid constructed wetland system. *Journal of Environmental Management*, 156, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.042>
- Ayaz, S. Ç.** (2008). Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands. *Desalination*, 226(1), 249–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.110>
- Bani-Melhem, K., & Smith, E.** (2012). Grey water treatment by a continuous process of an electrocoagulation unit and a submerged membrane bioreactor system. *Chemical Engineering Journal*, 198–199, 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.065>
- Baawain MS, Al-Mamun A, Omidvarborna H, Al-Sabti A, Choudri B** (2020) Public perceptions of reusing treated wastewater for urban and industrial applications: challenges and opportunities. *Environ Dev Sustain* 22(3):1859–1871
- Barbera, A. C., Cirelli, G. L., Cavallaro, V., di Silvestro, I., Pacifici, P., Castiglione, V., Toscano, A., & Milani, M.** (2009). Growth and biomass production of different plant species in two different constructed wetland systems in Sicily. *Desalination*, 246(1), 129–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.046>
- Baykal, B. B.** (2019). Recycling/reusing grey water and yellow water (Human urine): Motivations, perspectives and reflections into the future. *Desalination and Water Treatment*, 172, 212–223. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24667>
- Beck, S., Rodríguez, R., Andrew, S., Nitin, G., Sarah, R., Paula, K., & Linden, K.** (2013). Disinfection Methods for Treating Low TOC, Light Graywater to California Title 22 Water Reuse Standards. *Journal of Environmental Engineering*, 139(9), 1137–1145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000738](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000738)
- Belér Baykal, B.** 2014. “Stream segregation in household use: A review of grey water as an alternative source of water and yellow water as an alternative source of fertilizers”, *Water Quality Exposure and Health*, January, 1-11.
- Benami, M., Busgang, A., Gillor, O., & Gross, A.** (2016). Quantification and risks associated with bacterial aerosols near domestic greywater-treatment systems. *Science of the Total Environment*, 562, 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.200>
- Bieker, S., Cornel, P. and Wagner, M.** (2009). Semicentralised Supply and Treatment Systems - Integrated Infrastructure Solutions for Fast Growing Urban areas. In: *The 6th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies*, Singapore, June 22-26 2009.
- Birks, R., & Hills, S.** (2007). Characterisation of indicator organisms and pathogens in domestic greywater for Recyclin. *Environmental Monitoring and*

- Assessment*, 129(1–3), 61–69. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9427-y>
- Blazejewski, R., & Murat-Blazejewska, S.** (1997). Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow. *Water Science and Technology*, 35(5), 183–188. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00067-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00067-X)
- Brix, H.** (1994). Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4), 71–78. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0160>
- Bob Boulware, E.W.** 2013 “Alternative Water Resources and Wastewater Management”, McGraw-Hill
- Bolton, C. R., & Randall, D. G.** (2019). Development of an integrated wetland microbial fuel cell and sand filtration system for greywater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103249>
- Burgoon, P. S., Kadlec, R. H., & Henderson, M.** (1999). Treatment of potato processing wastewater with engineered natural systems. *Water Science and Technology*, 40(3), 211–215. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00412-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00412-6)
- Calheiros, C. S. C., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L.** (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, 41(8), 1790–1798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.012>
- Carey, R. O., & Migliaccio, K. W.** (2009). Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems. In *Environmental Management* (Vol. 44, Issue 2, pp. 205–217). <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9309-5>
- Chavan, V. P. Dhulap** (2012) Optimization of pollutant concentration in sewage treatment using constructed wetland through phytoremediation. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*. ISSN: 2278-6252.
- Chen, S., Zhang, X., Singh, D., Yu, H., & Yang, X.** (2010). Biological pretreatment of lignocellulosics: Potential, progress and challenges. In *Biofuels* (Vol. 1, Issue 1, pp. 177–199). <https://doi.org/10.4155/bfs.09.13>
- Chernicharo, C. A. L., Almeida, P. G. S., Lobato, L. C. S., Couto, T. C., Borges, J. M., & Lacerda, Y. S.** (2009). Experience with the design and start up of two full-scale UASB plants in Brazil: enhancements and drawbacks. *Water Science and Technology*, 60(2), 507–515. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.383>
- Chintakovidah, W., Visoottiviseth, P., Khokiattiwong, S., & Lauengsuchonkul, S.** (2008). Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. *Chemosphere*, 70, 1532–1537. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.08.031>
- Chong, M. N., Cho, Y. J., Poh, P. E., & Jin, B.** (2015). Evaluation of Titanium dioxide photocatalytic technology for the treatment of reactive Black 5 dye in synthetic and real greywater effluents. *Journal of Cleaner Production*, 89, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.014>
- Christova-Boal, D., Eden, R. E., & McFarlane, S.** (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106(1),

- 391–397. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00134-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00134-8)
- Coetzee JA, Jones RW, Hill MP** (2014) Water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae), reduces benthic macroinvertebrate diversity in a protected subtropical lake in South Africa. *Biodivers Conserv* 23:1319–1330
- Collivignarelli, M. C., Miino, M. C., Gomez, F. H., Torretta, V., Rada, E. C., & Sorlini, S.** (2020). Horizontal flow constructed wetland for greywater treatment and reuse: An experimental case. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072317>
- Cooper, P.** (1999). A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Science and Technology*, 40(3), 1–9. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00414-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00414-X)
- Corona B, Shen L, Reike D, Carreón JR, Worrell E** (2019) Towards sustainable development through the circular economy—a review and critical assessment on current circularity metrics. *Resour Conserv Recycl* 151:104498
- Crites, R. and Tchobanoglous, G.** 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw-Hill, Singapore.
- DBT.** (2019). *Print_Version_of_CW_Manual-23_May-2019. Constructed Wetland as an Alternative Technology for Sewage Management in India.*
- Davis, L., DuPoldt, C., Edwards, R., Isaacs, B., Murphy, T., Rider, G., Sayers, M., & Takite, C.** (1995). *A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS* (Vol. 1).
- Dominguez, S., Laso, J., Margallo, M., Aldaco, R., Rivero, M. J., Irabien, Á., & Ortiz, I.** (2018). LCA of greywater management within a water circular economy restorative thinking framework. *Science of The Total Environment*, 621, 1047–1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.122>
- Dotro, G., Fort, R.P., Barak, J., Jones, M., Vale, P., Jefferson, B.** (2015). Long-Term Performance of Constructed Wetlands with Chemical Dosing for Phosphorus Removal. In: Vymazal, J. (eds) *The Role of Natural and Constructed Wetlands in Nutrient Cycling and Retention on the Landscape*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08177-9_19
- Drechsel, P., Qadir, M., & Wichelns, D.** (2015). Wastewater: Economic asset in an urbanizing world. In *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6>
- Driscoll, C. T., Bletre, V., Yan, C., Schoheld, C. L., Munson, R., & Holsapple, J.** (1995). *THE ROLE OF DISSOLVED ORGANIC CARBON IN THE CHEMISTRY AND BIOAVAILABILITY OF MERCURY IN REMOTE ADIRONDACK LAKES*.
- Edward Todd Urbensky.** “Total Organic Carbon Analyzers as tools for measuring carbonaceous matter in natural waters”, *Journal of Environmental Monitoring* 2001; 3(1):102-112.
- EPA.** (2004). *Constructed Treatment Wetlands*.

- Eriksson, E., & Donner, E.** (2009). Metals in greywater: Sources, presence and removal efficiencies. *Desalination*, 248(1), 271–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.065>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A.** (2001). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*. www.elsevier.com/locate/urbwat
- Eriksson, E., Baun, A., Henze, M., & Ledin, A.** (2006). Phytotoxicity of grey wastewater evaluated by toxicity tests. *Urban Water Journal*, 3(1), 13–20. <https://doi.org/10.1080/15730620600578645>
- Ernst, W. H. O.** (2005). Phytoextraction of mine wastes. *Chemie Der Erde*, 65(SUPPL. 1), 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2005.06.001>
- Fatta-Kassinos, D., Meric, S., & Nikolaou, A.** (2011). Pharmaceutical residues in environmental waters and wastewater: Current state of knowledge and future research. In *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (Vol. 399, Issue 1, pp. 251–275). <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4300-9>
- Fountoulakis M, Markakis N, Petousi I, Manios T** (2016) Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. *Sci Total Environ* 551:706–711
- Fox LJ, Struik PC, Appleton BL, Rule JH** (2008) Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Water Air Soil Pollut* 194:199–207
- Frazer-Williams, R., Avery, L., Winward, G., Jeffrey, P., Shirley-Smith, C., Liu, S., Memon, F., & Jefferson, B.** (2008). Constructed wetlands for urban grey water recycling. *International Journal of Environment and Pollution*, 33(1), 93–109. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2008.01847>
- Friedler, E., Kovalio, R., & Galil, N. I.** (2005). On-site greywater treatment and reuse in multi-storey buildings. *Water Science and Technology*, 51(10), 187–194. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0366>
- Friedler, E., Yardeni, A., Gilboa, Y., & Alfiya, Y.** (2011). Disinfection of greywater effluent and regrowth potential of selected bacteria. *Water Science and Technology*, 63(5), 931–940. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.272>
- Friedler, E., & Hadari, M.** (2006). Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings. *Desalination*, 190(1), 221–234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.007>
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D.** (2013). Characteristics and treatment of greywater-a review. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 20, Issue 5, pp. 2795–2809). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>
- Ghosh, D., Gopal, B.,** 2010. Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecol. Eng.* 36 (8), 1044–1051. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.017>.
- Giresunlu E, Beler Baykal B** (2014) A preliminary investigation on pathogenic indicators in segregated domestic wastewater streams. Paper presented at IWA 12th specialized conference on small water and wastewater systems & 4th specialized conference on resources oriented sanitation, Muscat, Sultanate of Oman, 2–4 Nov 2014
- Gnanadipathy, A., & Polprasert, C.** (1993). Treatment of a Domestic Wastewater with UASB Reactors. *Water Science and Technology*, 27(1), 195–203. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0047>

- Gopal, B.** (1999). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. *Water Science and Technology*, 40(3), 27–35. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00468-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00468-0)
- Gross, F., Ring, M. W., Perlova, O., Fu, J., Schneider, S., Gerth, K., Kuhlmann, S., Stewart, A. F., Zhang, Y., & Müller, R.** (2006). Metabolic Engineering of *Pseudomonas putida* for Methylmalonyl-CoA Biosynthesis to Enable Complex Heterologous Secondary Metabolite Formation. *Chemistry and Biology*, 13(12), 1253–1264. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2006.09.014>
- Guerra-Rodríguez S, Oulego P, Rodríguez E, Singh DN, Rodríguez- Chueca J** (2020) Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: challenges and opportunities. *Water* 12(5): 1431
- Gupta, A., & Nath, J. R.** (2018). *Kitchen Greywater Treatment in a Constructed Wetland Microcosm Using Aquatic Macrophytes* (pp. 141–149). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5795-3_13
- Hanson, P. C., Bade, D. L., Carpenter, S. R., & Kratz, T. K.** (2003). Lake metabolism: Relationships with dissolved organic carbon and phosphorus. *Limnology and Oceanography*, 48(3), 1112–1119. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1112>
- Hee-Jeong C, Seung-Mok L** (2012) Effects of microalgae on the removal of nutrients from wastewater: various concentrations of *Chlorella vulgaris*. *Environ Eng Res* 17(S1):S3–S8
- Heistad, A., Paruch, A. M., Vråle, L., Ádám, K., & Jenssen, P. D.** (2006). A high-performance compact filter system treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 28(4), 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.011>
- Hong, M. S., Farmayan, W. F., Dortch, I. J., Chiang, C. Y., McMillan, S. K., & Schnoor, J. L.** (2001). Phytoremediation of MTBE from a Groundwater Plume. *Environmental Science & Technology*, 35(6), 1231–1239. <https://doi.org/10.1021/es001911b>
- Huelgas, M. Nakajima, H. Nagata & N. Funamizu** (2009) Comparison between treatment of kitchen-sink wastewater and a mixture of kitchen-sink and washing-machine wastewaters, *Environmental Technology*, 30:1, 111–117, DOI: 10.1080/09593330802445549
- Hypes, W. D., Batten, C. E., & Wilkins, J. R.** (1975). Processing of combined domestic bath and laundry wastewater for reuse as comode flushing water. NASA technical note TN D-7937. National Aeronautics and Space Administration. Washington, DC.
- Imfeld, G., Braeckevelt, M., Kuschik, P., & Richnow, H. H.** (2009). Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands. In *Chemosphere* (Vol. 74, Issue 3, pp. 349–362). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.062>
- IWA.** (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control*.
- IWMI.** (2007). *Annual Report 2007-2008*.
- Jefferson, B., Laine, A. L., Judd, S. J., & Stephenson, T.** (2000). Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse. *Water Science and Technology*, 41(1), 197–204. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0029>
- Jefferson, B., Laine, A., Parsons, S., Stephenson, T., & Judd, S.** (2000). Technologies for domestic wastewater recycling. *Urban Water*. www.elsevier.com/locate/urbwat

- Kadam, A., Oza, G., Nemade, P., Dutta, S., & Shankar, H.** (2008). Municipal wastewater treatment using novel constructed soil filter system. *Chemosphere*, 71(5), 975–981. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.048>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D.** (2009). *Treatment wetlands*. CRC Press.
- Kadlec, R. H.** (1999). Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands. *Water Science and Technology*, 40(3), 37–44. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00417-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00417-5)
- Khazaleh, M., & Gopalan, B.** (2018). Constructed Wetland for Wastewater Treatment. In *Journal of Modern Science and Technology* (Vol. 6, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/331859459>
- Khosravanipour Mostafazadeh, A., Benguit, A. T., Carabin, A., Drogui, P., & Brien, E.** (2019). Development of combined membrane filtration, electrochemical technologies, and adsorption processes for treatment and reuse of laundry wastewater and removal of nonylphenol ethoxylates as surfactants. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.014>
- Kim Y, Kim WJ** (2000) Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds. *Water Res* 34:3285–3294
- Kim, S. H., Cho, J. S., Park, J. H., Heo, J. S., Ok, Y. S., Delaune, R. D., & Seo, D. C.** (2016). Long-term performance of vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands as affected by season, N load, and operating stage for treating nitrogen from domestic sewage. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 1108–1119. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5214-z>
- Knight, R. L., Payne, V. W. E. B., Borer, R. E., Clarke, R. A. D., & Pries, J. H.** (2000). Constructed wetlands for livestock wastewater management. In *Ecological Engineering* (Vol. 15). www.elsevier.com/locate/ecoleng
- Knops, G., Pidou, M., Kadewa, W., Soares, A., Jeffrey, P. and Jefferson, B.** (2007). "Reuse of urban water: Impact of product choice", *NATO Advanced Research workshop on Dangerous Pollutants (Xenobiotics) in Urban Water Cycle*, 3-7 May 2007, Lednice, Czech Republic.
- Kuhnt, G.** (1993), Behavior and fate of surfactants in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 12: 1813-1820. <https://doi.org/10.1002/etc.5620121007>
- Kummu, M., Ward, P. J., de Moel, H., & Varis, O.** (2010). Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia. *Environmental Research Letters*, 5(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/3/034006>
- Langergraber, G., Rousseau, D. P. L., García, J., & Mena, J.** (2009). CWM1: a general model to describe biokinetic processes in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 59(9), 1687–1697. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.131>
- Lasat, M.** (2000). The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil; American Association for the Advancement of Science: Environmental Science and Engineering Fellow.
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R.** (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. In *Science of the Total*

- Environment* (Vol. 407, Issue 11, pp. 3439–3449).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Lim, P.-E., Tee, H.-C., 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/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.032>
- Liu, R., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., & Hao, X.** (2015). A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chemical Engineering Journal*, 279, 220–230.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.023>
- Ma, X., & Burken, J. G.** (2003). TCE Diffusion to the Atmosphere in Phytoremediation Applications. *Environmental Science & Technology*, 37(11), 2534–2539. <https://doi.org/10.1021/es026055d>
- Madungwe, E. and Sakuringwa, S.** (2007). Greywater reuse: A strategy for water demand management in Harare? *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15-18), p. 1231-1236.
- Masi, F., el Hamouri, B., Abdel Shafi, H., Baban, A., Ghrabi, A., & Regelsberger, M.** (2010). Treatment of segregated black/grey domestic wastewater using constructed wetlands in the Mediterranean basin: The zero-m experience. *Water Science and Technology*, 61(1), 97–105.
<https://doi.org/10.2166/wst.2010.780>
- Matamoros, V., Arias, C., Brix, H., & Bayona, J. M.** (2007). Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) from Urban Wastewater in a Pilot Vertical Flow Constructed Wetland and a Sand Filter. *Environmental Science & Technology*, 41(23), 8171–8177.
<https://doi.org/10.1021/es071594+>
- Melbourne Water.** (2013). *Water Sensitive Urban Design Guidelines South Eastern Councils 2 Water Sensitive Urban Design Guidelines*.
- Mishra S, Maiti A** (2017) The efficiency of *Eichhornia crassipes* in the removal of organic and inorganic pollutants from wastewater: a review. *Environ Sci Pollut Res* 24:7921–7937
- Mo W, Zhang Q** (2013) Energy–nutrients–water nexus: integrated re- source recovery in municipal wastewater treatment plants. *J Environ Manag* 127:255–267
- Morel, A. and Diener, S.** (2006). *Environmental management in low and middle income countries: Review of different treatment systems for households or neighbourhoods*, 14/06, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland.
- Mourad KA, Berndtsson JC, Berndtsson R** (2011) Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria. *J Environ Manag* 92(10):2447–2453
- Nahlik AM, Mitsch WJ** (2006) Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica. *Ecol Eng* 28:246–257
- Nelson, M.** (2014). Wastewater Garden Information Sheet. IS20120105
- Neralla, S., Weaver, R. W., Lesikar, B. J., & Persyn, R. A.** (2000). Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands. *Biosource Technology*.

- Newman, D., Kennedy, E., Coates, J., Ahmann, D., Ellis, D., Lovley, D., & Morel, F. (1997). Dissimilatory arsenate and sulfate reduction in *Desulfotomaculum auripigmentum* sp. *Arch Microbiology*.
- Nolde, E. (2000). Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings ± over ten years experience in Berlin. *Urban Water*. www.elsevier.com/locate/urbwat
- Okun, D. A. (1997). Distributing reclaimed water through dual systems. *Journal AWWA*, 89(11), 52–64. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1997.tb08321.x](https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1997.tb08321.x)
- Olanrewaju OO, Ilemobade AA (2015) Greywater reuse review and framework for assessing greywater treatment technologies for toilet flushing. *Adv Res* 5(4):1–25
- Oron, G., Adel, M., Agmon, V., Friedler, E., Halperin, R., Leshem, E., & Weinberg, D. (2014). Greywater use in Israel and worldwide: Standards and prospects. *Water Research*, 58, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.032>
- Oruçtut, N. 2013. “Gri Su Yönetimi ve Kentsel Ağırlıklı Uygulamalarının Değerlendirilmesi”, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Oteng-Pepurah, M., Acheampong, M. A., & deVries, N. K. (2018). Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3909-8>
- Otterpohl, R., Braun, U., Oldenburg, M. 2003. “Innovative technologies for decentralized water wastewater and biowaste management in urban and peri-urban areas”, *Water Science and Technology* 48(11), 23-31.
- Ottoson, J., & Axel Stenstrom, T. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. In *Water Research* (Vol. 37).
- Palmquist, H., & Hanæus, J. (2005). Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater from ordinary Swedish households. *Science of the Total Environment*, 348(1–3), 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.052>
- Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Pidou, M., Ali, F., Williams, R. F., Jeffrey, P., Stephenson, T., & Jefferson, B. (2008). Technologies for urban water recycling. *Water Practice and Technology*, 3(2), wpt2008046. <https://doi.org/10.2166/wpt.2008.046>
- Prasad, R., Sharma, D., Yadav, K. D., & Ibrahim, H. (2021). Preliminary study on greywater treatment using water hyacinth. *Applied Water Science*, 11(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01422-4>
- Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S. and Al Harassi, A. (2005). Overcoming constraints in treated grey water reuse in Oman. *Desalination*, 186(1-3), p. 177-186.
- Qin H, Zhang Z, Liu M, Liu H, Wang Y, Wen X, Zhang Y, Yan S (2016) Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. *Ecol Eng* 95:753–762
- Qomariyah, S., Ramelan, A. H., Sobriyah, & Setyono, P. (2017). Use of macrophyte plants, sand & gravel materials in constructed wetlands for

- greywater treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 176(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/176/1/012018>
- Rakesh, S., Ramesh, Dr. P., Murugaragavan, Dr. R., Avudainayagam, Dr. S., & Karthikeyan, Dr. S.** (2020). Characterization and treatment of grey water: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 34–40. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1a.8316>
- Rameshkumar S, Radhakrishnan K, Aanand S, Rajaram R** (2019) Influence of physicochemical water quality on aquatic macrophyte diversity in seasonal wetlands. *Appl Water Sci* 9:1–8
- Ramprasad, C., Smith, C. S., Memon, F. A., & Philip, L.** (2017). Removal of chemical and microbial contaminants from greywater using a novel constructed wetland: GROW. *Ecological Engineering*, 106, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.022>
- Rangel-Peraza JG, Mendivil-García K, Cedillo-Herrera CIG, Rochín- Medina JJ, Rodríguez-Mata AE, Bustos-Terrones YA** (2019) Optimization of organic matter degradation kinetics and nutrient removal on artificial wetlands using *Eichhornia crassipes* and *Typha domingensis*. *Environ Technol (United Kingdom)* 40:631–641
- Raphael, D. O., Okunade, D. A., Ogedengbe, K., & Adekunle, O. A.** (2020). Assessment of a batch-flow free water surface constructed wetland planted with *Rhynchospora corymbosa* (L.) Britton for campus greywater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(4), 4275–4283. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07095-6>
- Reddy, K. R., & D'Angelo, E. M.** (1997). Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 35(5), 1–10. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00046-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00046-2)
- Reed, S. C., & Brown, D.** (1995). Subsurface flow wetlands—A performance evaluation. *Water Environment Research*, 67(2), 244–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.2175/106143095X131420>
- Ren X, Zhang Y, Chen H** (2020) Graywater treatment technologies and reuse of reclaimed water for toilet flushing. *Environ Sci Pollut Res* 27(28):34653–34663
- Rgen Kern, J., & Idler, C.** (1999). Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems. In *J. Kern, C. Idler / Ecological Engineering* (Vol. 12).
- Royal Society of Chemistry** (2008), *British the guiltiest in survey of Western European shower habits*, available at: <http://www.rsc.org/AboutUs/News/PressReleases/2008/EuropeanShowerHabits.asp> (accessed 14/09/2008).
- Russo, N., Marzo, A., Randazzo, C., Caggia, C., Toscano, A., & Cirelli, G. L.** (2019). Constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants. *Science of the Total Environment*, 656, 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.417>
- Saeed, T., & Sun, G.** (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 112, pp. 429–448). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>

- Santasmasas, C., Rovira, M., Clarens, F., & Valderrama, C.** (2013). Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.004>
- Sato, N., Okubo, T., Onodera, T., Agrawal, L. K., Ohashi, A., & Harada, H.** (2007). Economic evaluation of sewage treatment processes in India. *Journal of Environmental Management*, 84(4), 447–460. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.06.019>
- Sawajneh, Z., Al-Omari, A., & Halalsheh, M.** (2010). Anaerobic treatment of strong sewage by a two stage system of AF and UASB reactors. *Water Science and Technology*, 61(9), 2399–2406. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.051>
- Schneider, T., Gries, K., Josten, M., Wiedemann, I., Pelzer, S., Labischinski, H., & H.-G., S.** (2009). The Lipopeptide Antibiotic Friulimicin B Inhibits Cell Wall Biosynthesis through Complex Formation with Bactoprenol Phosphate. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 53(4), 1610–1618. <https://doi.org/10.1128/AAC.01040-08>
- Sebastiani, L., Scebba, F., & Tognetti, R.** (2004). Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* x *maximowiczii*) and I-214 (*P. x euramericana*) exposed to industrial waste. *Environmental and Experimental Botany*, 52(1), 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.01.003>
- Shafran, A. W., Gross, A., Ronen, Z., Weisbrod, N., & Adar, E.** (2005). Effects of surfactants originating from reuse of greywater on capillary rise in the soil. *Water Science and Technology*, 52(10–11), 157–166. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0690>
- Shaikh, I. N., & Ahammed, M. M.** (2020). Quantity and quality characteristics of greywater: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 261). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110266>
- Shah, M., Hashmi, H.N., Ali, A. et al.** Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *J Environ Health Sci Engineer* 12, 106 (2014). <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-106>
- Siggins, A., Burton, V., Ross, C., Lowe, H., & Horswell, J.** (2016). Effects of long-term greywater disposal on soil: A case study. *Science of the Total Environment*, 557–558, 627–635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.084>
- Sklarz, M., Gross, A., Yakirevich, A., & Soares, M.** (2009). A Recirculating Vertical Flow Constructed Wetland for the Treatment of Domestic Wastewater. *Desalination*, 246, 617–624. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.09.002>
- Sleytr, K., Tietz, A., Langergraber, G., Haberl, R., & Sessitsch, A.** (2009). Diversity of abundant bacteria in subsurface vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(6), 1021–1025. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.11.005>
- Solano, M. L., Soriano, P., & Ciria, M. P.** (2004). Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. *Biosystems Engineering*, 87(1), 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.005>

- Sonavane, P., Munavalli, G., & Ranade, S.** (2008). Nutrient removal. *Journal of Environmental Science&Engineering*, 50, 241–248.
- Sooknah R** (2000) A review of the mechanisms of pollutant removal in water hyacinth systems. *Univ Mauritius Res J* 6:49–57
- Steer, D., Fraser, L., Boddy, J., & Seibert, B.** (2002). Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. In *Ecological Engineering* (Vol. 18). www.elsevier.com/locate/ecoleng
- Stefanakakis, A. I.** (2019). The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management. *Sustainability (Switzerland)*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/su11246981>
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R. A., & Moormann, H.** (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22(1–2), 93–117. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>
- Sudarsan, J. S., Annadurai, R., Mukhopadhyay, M., Chakraborty, P., & Nithiyantham, S.** (2018). Domestic wastewater treatment using constructed wetland: an efficient and alternative way. *Sustainable Water Resources Management*, 4(4), 781–787. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0164-x>
- Sudarshan, P., Mahesh, M., & Ramachandra, T.** (2019). Bioremediation Potential of Macrophytes in Jakkur Wetland. *Indian J. Environmental Protection*, 39.
- Sundaresan, N., & Philip, L.** (2008). Performance evaluation of various aerobic biological systems for the treatment of domestic wastewater at low temperatures. *Water Science and Technology*, 58(4), 819–830. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.340>
- Surendran, S., & Wheatley, A. D.** (1998). Grey-Water Reclamation for Non-Potable Re-Use. *Water and Environment Journal*, 12(6), 406–413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1998.tb00209.x>
- Susarla, S., Medina, V. F., & Mccutcheon, S. C.** (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. In *Ecological Engineering* (Vol. 18). www.elsevier.com/locate/ecoleng
- Taemthong W** (2018) Grey water recycling for reuse in toilet flushing: a case study in Thailand. *Journal of Green Building* 13(1):73–82
- Tilak, A. S., Wani, S. P., & Datta, A.** (2016). *Evaluating wastewater treatment efficiency of two field scale subsurface flow constructed wetlands* (Vol. 110, Issue 9). <https://www.jstor.org/stable/24908064>
- Ting WHT, Tan IAW, Salleh SF, Wahab NA** (2018) Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: a review. *J Water Process Eng* 22:239–249
- Toscano, A., Hellio, C., Marzo, A., Milani, M., Lebre, K., Cirelli, G. L., & Langergraber, G.** (2013). Removal efficiency of a constructed wetland combined with ultrasound and UV devices for wastewater reuse in agriculture. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(15), 2327–2336. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.767284>
- Trang NTD, Konnerup D, Schierup HH, Chiem NH, Tuan LA, Brix H** (2010) Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate. *Ecol Eng* 36:527–535

- Travis MJ, Wiel-Shafran A, Weisbrod N, Adar E, Gross A** (2010) Greywater reuse for irrigation: effect on soil properties. *Sci Total Environ* 408(12):2501–2508
- Tuncsiper, B., Ayaz, S., Akca, L., & Gunes, K.** (2009). Performance of a pilot-scale, three-stage constructed wetland system for domestic wastewater treatment. *Environmental Technology*, 30(11), 1187–1194. <https://doi.org/10.1080/09593330903144066>
- TÜBİTAK.** (2011). *Yapay Sulak Alanlar El Kitabı*. <http://www.mam.gov.tr>
- TÜBİTAK.** (2015). *Turizmde Çevre Dostu Atıksu Yönetim Modelinin Oluşturulması - Fizibilite Raporu*.
- Von Sperling, M., de Lemos Chernicharo, CA.,** 2005. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. IWA Publishing, London.
- Voulvoulis N** (2018) Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2:32–45
- Vymazal, J.** (2005). Horizontal Sub-Surface Flow and Hybrid Constructed Wetlands Systems for Wastewater Treatment. *Ecological Engineering*, 25, 478–490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- Vymazal, J.** (2009). The Use Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow for Various Types of Wastewater. *Ecological Engineering*, 35, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L.** (2015). Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen. *Ecological Engineering*, 84, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.017>
- Vymazal Editor, J.** (2015). *The Role of Natural and Constructed Wetlands in Nutrient Cycling and Retention on the Landscape*.
- Wallace, B., Purcell, M., & Furlong, J.** (2002). Total organic carbon analysis as a precursor to disinfection byproducts in potable water: Oxidation technique considerations. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(1), 35–42. <https://doi.org/10.1039/B106049J>
- Wallace S, Knight R** (2006) Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements. IWA publishing, London
- Wenlin, Ma; Jianwei, Liu; Junzhi, Zhang; Shuiwen, Dai; Qi, Zhang** 2012. “Sustainable ecological sanitation system”, *Green Communications & Networks*, 497-502.
- WHO.** 2006(a). “Overview of greywater management health considerations”.
- WHO.** 2006(b). Regional Office for the Eastern Mediterranean Centre for Environmental Health Activities Amman, Jordan 2006. Overview of Greywater Management Health Considerations – WHO-EM/CEH/125/E.
- WHO.** (2017). *Monitoring Health for the Sustainable Development Goals*.
- Widiastuti, N., Wu, H., Ang, M., & Zhang, D.** (2008). The potential application of natural zeolite for greywater treatment. *Desalination*, 218(1), 271–280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.022>
- William Kadewa, W., Jeffrey, P., & Jefferson, B.** (2010). *SMALL-SCALE CONSTRUCTED WETLAND FOR ONSITE LIGHT GREY WATER TREATMENT AND RECYCLING*.
- Yazdani, V., & Golestani, H. A.** (2019). Advanced treatment of dairy industrial wastewater using vertical flow constructed wetlands. *Desalination and*

Water Treatment, 162, 149–155.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24335>

Yulistyorini, A., Puspasari, A., Mujiyono, & Sari, A. (2019). Removal of BOD and TSS of Student Dormitory Greywater using Vertical Sub-Surface Flow Constructed Wetland of *Ipomoea Aquatica*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 515, 012056.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/515/1/012056>

Zhang D, Gersberg RM, Ng WJ, Tan SK (2014) Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: a review. *Environ Pollut* 184:620–639



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ali TamerÇETİNKAYA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü & İnşaat Mühendisliği Bölümü (ÇAP)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi (Ocak, 2020 – Devam ediyor)
İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- Teklif ve Planlama Mühendisi (Ocak, 2020 – Ekim, 2020)
Tek Yapı İnşaat ve Ticaret Ltd.
- Saha Mühendisi (Haziran, 2019 – Aralık, 2019)
Tek Yapı– Koroza Hijyen Üretim Tesisi
İş Açıklaması: Şantiye şefi pozisyonunda çalıştım. Projenin başlangıcından, işverene teslim etme aşamasına kadar sahadaki tüm inşai, altyapı, mimari işlerin takibi, uygulanması ve kontrolü yapılarak, yapılan işler müşavir firmaya teslim edilmiştir. 11800 metrekare inşaat alanına sahip hijyen üretim tesisi 5,5 ay içerisinde tamamlandı.
- İnşaat Kontrol Mühendisi (Mart, 2019 – Mayıs, 2019)
BHS Mimarlık – Dunapack Nidakule Merkez Ofis Dekorasyon İnşaatı
İş Açıklaması: Kaba inşaat halinde olan bir ofis katının dekorasyon inşaatında müşavir firma adına kontrollör görevinde çalıştım. İnce işlerin kontrol edilmesinin

yanı sıra elektrik ve mekanik işlerin projelerinin incelenip, yapılan işlerin projeye uygunluğunu sağlamak görevlerini üstlendim.

- Saha Mühendisi (Nisan, 2018 – Şubat, 2019)

Tek Yapı– Akbank Veri Merkezi & Akbank Yaşam ve Konferans Merkezi

İş Açıklaması: Anahtar teslimi Akbank Veri Merkezi ile Akbank Yaşam ve Konferans Merkezi projelerinin tamamlanmasına kadar saha mühendisi olarak çalıştım. İş tanımım içerisinde kaba işler, kaplama işleri, çelik konstrüksiyon, çelik yangın boya uygulaması, izolasyon, altyapı, istinat duvarları, saha betonu ve eğimli beton kalemalarının projelere uygun olarak imalatının yaptırılması ve yapılan işlerin kontrol edilerek müşavir firmaya teslim edilmesi bulunmaktadır.

