

**T. C.
TARIM VE ORMAN BAKANLIğI**

**SU KAYNAKLARINDA
YÜZER SULAK ALAN VE SUCUL BİTKİLER İLE
NÜTRİENT GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

- UZMANLIK TEZİ -

**HAZIRLAYAN
ALİ BÜTÜNOĞLU**

ANKARA – 2018

**T.C. TARIM VE ORMAN BAKANLIĞI
SU YÖNETİMİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ**

**HAZIRLAYAN
ALİ BÜTÜNOĞLU**

**SU KAYNAKLARINDA YÜZER SULAK ALAN VE SUCUL BİTKİLER İLE
NÜTRİENT GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. AYŞEGÜL TANIK**

**BU TEZ MÜLGA ORMAN VE SU İŞLERİ UZMANLIĞI YÖNETMELİĞİ
GEREĞİ HAZIRLANMIŞ OLUP JÜRİMİZ TARAFINDAN UZMANLIK
TEZİ OLARAK KABUL EDİLMİŞTİR.**

TEZ JÜRİSİ BAŞKANI: BİLAL DİKMEN

ÜYE: DR. YAKUP KARAASLAN

ÜYE: TANER KİMENCE

ÜYE: NERMİN ANUL

ÜYE: ZAKİR TURAN

ANKARA – 2018

**T. C.
TARIM VE ORMAN BAKANLIğI**

**SU KAYNAKLARINDA YÜZER SULAK ALAN VE SUCUL BİTKİLER İLE
NÜTRİENT GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

- UZMANLIK TEZİ -

**HAZIRLAYAN:
(ALİ BÜTÜNOğLU)**

**TEZ DANIşMANI:
(PROF. DR. AYşEGÜL TANIK)**

ANKARA – 2018

T.C. TARIM VE ORMAN BAKANLIğI
SU YÖNETİMİ GENEL MÜDÜRLÜğÜNE

Bu belge ile bu uzmanlık tezinde tüm bilgileri akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak hazırlayıp sunduğumu beyan ederim. Bu kural ve ilkelerin gereği olarak, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce ve sonuçları andığımı ve kaynağını gösterdiğimi ayrıca beyan ederim. (28.12.2018)

Tezi Hazırlayan Uzman Yardımcısı

Ali BÜTÜNOğLU

28.12.2018

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | vii |
| TABLO LİSTESİ..... | viii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | ix |
| ÖZET..... | x |
| ABSTRACT..... | xii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. SU KAYNAKLARINDA ÖTROFİKASYON PROBLEMİ..... | 3 |
| 2.1. Ötrofikasyonun Önlenmesi ve Kontrolü | 8 |
| 2.1.1. Sınırlayıcı Element Kavramı ve N/P Oranı..... | 8 |
| 2.1.2. Korumaya Yönelik Olan Önlemler | 10 |
| 2.1.3. İyileştirmeye Yönelik Önlemler..... | 13 |
| 3. SULAK ALAN EKOSİSTEMLERİ..... | 17 |
| 3.1. Sulak Alan Etkisi ve Biyomimikri | 21 |
| 3.1.1. Yapay Sulak Alan | 21 |
| 3.1.2. Yüzer Sulak Alan | 24 |
| 4. YÜZER SULAK ALAN SİSTEMLERİ İLE NÜTRİYENT GİDERİMİ..... | 28 |
| 4.1. Süreçler..... | 31 |
| 4.1.1. Azot Giderimi..... | 32 |
| 4.1.2. Fosfor Giderimi..... | 34 |
| 4.2. Tasarım Faktörleri | 37 |
| 4.2.1. Bitki Türlerini Seçmek..... | 38 |
| 4.2.2. Büyüme Ortamı | 39 |
| 4.2.3. Yüzdürme | 41 |
| 4.2.4. Derinlik | 41 |
| 4.2.5. Kapsama Oranı..... | 42 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.3. | Yüzer Sulak Alanların Potansiyel Avantajları | 43 |
| 4.3.1. | Nütrient Giderim Verimi | 43 |
| 4.3.2. | Artan Alan Verimliliği..... | 43 |
| 4.3.3. | Değişken Su Derinliklerine Toleransı..... | 44 |
| 4.3.4. | Esnek Modüler Yapı | 44 |
| 4.3.5. | Su Kaynaklarının Estetik Gelişimi ve Turizm..... | 45 |
| 4.3.6. | Habitat Oluşturması | 45 |
| 4.3.7. | Bitki Biyokütlesinin Kullanılması | 47 |
| 4.3.8. | Düşük Maliyetli Olması..... | 48 |
| 4.3.9. | Buharlaşmayı Azaltarak Su Kayıplarını Önlemesi | 48 |
| 4.4. | Yüzer Sulak Alanların Potansiyel Dezavantajları | 50 |
| 4.5. | Dünyadan Yüzer Sulak Alan Uygulamaları | 51 |
| 4.5.1. | Yeni Zelanda Örneği | 51 |
| 4.5.2. | ABD Virginia Örneği..... | 53 |
| 4.5.3. | Çin Halk Cumhuriyeti Örneği | 56 |
| 4.5.4. | ABD Washington D.C. Örneği | 58 |
| 4.5.5. | Güney Asya Örneği..... | 62 |
| 5. | NÜTRİENT GİDERİMİNDE SUCUL BİTKİLER | 64 |
| 6. | NÜTRİENT GİDERİMİNDE YÜZER SULAK ALAN VE SUCUL BİTKİ UYGULAMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 72 |
| 7. | YÜZER SULAK ALAN UYGULAMA ÖRNEĞİ | 77 |
| 8. | SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 80 |
| | KAYNAKLAR | 83 |
| | EK-1: TÜRKİYE’DE YER ALAN BAZI SUCUL BİTKİLER | 89 |
| | EK-2: LİTERATÜRDE YER ALAN ÇALIŞILMIŞ BİTKİLER..... | 92 |
| | EK-3: YÜZER SULAK ALAN UYGULAMA TABLOSU | 93 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|------------------------------------|--|
| AAT | Atıksu Arıtma Tesisi |
| BOİ | Biyolojik Oksijen İhtiyacı |
| CaCO₃ | Kalsiyum Karbonat |
| CH₄ | Metan |
| CO₂ | Karbondioksit |
| ÇO | Çözünmüş Oksijen |
| FeS | Demir Sülfür |
| IUCN | Uluslararası Doğa ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği |
| KOİ | Kimyasal Oksijen İhtiyacı |
| N | Azot |
| NH₃ | Amonyak |
| NH₄⁺ | Amonyum İyonu |
| NO₂⁻ | Nitrit İyonu |
| NO₃⁻ | Nitrat İyonu |
| P | Fosfor |
| PE | Polietilen |
| PO₄³⁻ | Fosfat İyonu |
| PP | Polipropilen |
| PVC | Polivinil Klorür |
| SO₄ | Sülfat |
| sp. | Species (Cinse Ait Tür) |
| spp. | Species (Cinse Ait Türler) |
| TN | Toplam Azot |
| TP | Toplam Fosfor |

TABLO LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 1. Sınırlayıcı Besin Maddesi Oranları | 9 |
| Tablo 2. Açık Su Yüzeyinin ve Farklı Sucul Bitkilerin Kc Değerleri [65]..... | 49 |
| Tablo 3. Deneyde Elde Edilmiş Giderim Oranları..... | 53 |
| Tablo 4. Deneylerde Kullanılan Bitkiler [70] | 57 |
| Tablo 5. Sucul Bitkilerin Nütirent Giderimi | 69 |
| Tablo 6. Yüzer Sulak Alanların Nütirent Giderimi..... | 73 |
| Tablo 7. Sazlı Gölü Yüzer Sulak Maliyeti | 79 |

ŞEKİL LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1. Ötrofikasyonun Oluşum Mekanizması [5]..... | 3 |
| Şekil 2. Ötrofikasyon Oluşumuna Sebep Olan Başlıca Faktörlerin Şematik Gösterimi [6]..... | 4 |
| Şekil 3. Ötrofikasyonu Önleme ve Kontrol Yöntemleri | 10 |
| Şekil 4. Farklı Ekosistemlerin Yüzey Alanı ve Birincil Üretimi [32, 34]..... | 19 |
| Şekil 5. Ülkemizdeki Sulak Alan Ekosistemleri | 19 |
| Şekil 6. Serbest Yüzey Akımlı Sulak Alan Sistemi Şematik Gösterimi [42] | 23 |
| Şekil 7. Yüzey Altı Akımlı Sulak Alan Sistemi Şematik Gösterimi [42]..... | 24 |
| Şekil 8. Turnalar Gölü Yüzen Adaları (Solhan - Bingöl) [51]..... | 26 |
| Şekil 9. Gölbel Gölü ve Yüzen Adaları (Osmancık - Çorum) [48] | 26 |
| Şekil 10. Yüzen Sulak Alan Sistemi Şematik Gösterimi [53] | 27 |
| Şekil 11. Yüzer Sulak Alanlarda Azot Giderimi Şematik Gösterimi [56]..... | 33 |
| Şekil 12. Yüzer Sulak Alanlarda Fosfor Giderimi Şematik Gösterimi [56] | 35 |
| Şekil 13. Çeşitli Bitki Deseni ile Oluşturulmuş Yüzer Sulak Alan [60]..... | 39 |
| Şekil 14. Yüzer Sulak Alan Kurulumu ve Farklı Büyüme Ortamı Kullanımı [61, 62] | 40 |
| Şekil 15. Yüzdürme İçin Kullanılan Mat Örnekleri [62]..... | 41 |
| Şekil 16. Yüzer Sulak Alanlarda Kök Gelişimi Örneği [63] | 42 |
| Şekil 17. Su Kaynağının Yüzer Sulak Alan ile Estetik Gelişimi [60] | 45 |
| Şekil 18. Yüzer Sulak Alan ile Habitat Oluşumu [60]..... | 47 |
| Şekil 19. Deneylerde Kullanılan Tanklar [68] | 52 |
| Şekil 20. Akış Yoluyla Mezokozm Deneyi [68]..... | 53 |
| Şekil 21. Deneylerde Kullanılan Tanklar ve Düzenek [69] | 54 |
| Şekil 22. Entegre 2 Alt Sistemden Oluşturulmuş Deney[70] | 56 |
| Şekil 23. Kullanılan Beemat Yüzer Sulak Alanı [67]..... | 60 |
| Şekil 24. Yüzer Sulak Alan ile Sağlanan Giderim [67] | 62 |
| Şekil 25. Sucul Bitkiler [74]..... | 66 |
| Şekil 26. Alg, Yüzen Bitki, Batık Bitki ve Köklü Su Bitkisi Örnekleri [61]..... | 68 |

ÖZET

Noktasal ve yayılı kirletici kaynaklarından gelen azot ve fosfor bileşiklerinin su kaynaklarında aşırı miktarda birikmesi, doğada ve canlı sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu durum, suda ötrofikasyon problemine yol açmaktadır. Ötrofikasyon yalnızca su kalite parametrelerini değiştirmekle kalmayıp dip canlılarını etkilemekte, biyolojik çeşitliliği bozmakta ve alanın hassas alan haline gelmesine neden olmaktadır.

Artan su talebine karşılık kullanılabilir tatlı su kaynaklarının kısıtlı oluşu, ötrofik olan ya da ötrofik olmak üzere olan alanlarda koruma ve iyileştirme çalışmalarının yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Korumaya yönelik çalışmalar dünyada yaygın olup bu kapsamda öncelikli olarak azot ve fosfor gibi besin elementlerinin deşarj standartları aracılığıyla alıcı ortama ulaşmasını engellemeye yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Ancak bilindiği üzere korumaya yönelik çalışmalar kimi durumlarda yetersiz kalabilmekte ve iyileştirmeye yönelik uygulamaları zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple, doğrudan su kaynağındaki kirliliği azaltmaya yönelik çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Uygulanacak iyileştirme yöntemi ya da yöntemler kombinasyonundan hangilerinin en uygun ve maliyet etkin olduğuna karar verilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yüzer sulak alanlar, özellikle yayılı kaynaklı su kirliliğini azaltmak için nispeten düşük maliyetli, etkin, sürdürülebilir ve doğa dostu tasarımlarıyla yeni bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışması, yüzer sulak alanların potansiyel avantajlarına rağmen bugüne kadar ülkemizde yayınlanmış çok az çalışma bulunması dolayısıyla bu konuda literatüre katkı oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Su kalitesi iyileştirme yöntemlerinden yüzer sulak alanlar ve sucul bitkilerin dünyadaki örnekleri ve mevcut çalışmaları araştırılmış, nütrient giderim süreçleri, tasarım faktörleri, avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Düşük enerji tüketimi ile düşük maliyetli olan yüzer sulak alanların, toplam azot için yaklaşık %56 ve toplam fosfor için yaklaşık %55 ortalama giderim verimi ile oldukça etkin bir yöntem olduğu görülmüştür. Uygulama örneği kapsamında; Gediz Havzasında yer alan, özümleme kapasitesi %83 oranında aşılış durumda olan Sazlı Göl üzerinde bir yüzer sulak alan tasarlanmış olup gölün

özümleme kapasitesi aşılmamış duruma getirilmesi için yüzey alanın %1,23'ünün yüzer sulak alan ile kaplanacağı hesaplanmıştır. Bu sonuç, daha az alan ihtiyacı ve düşük maliyeti ile yüzer sulak alan sistemlerinin diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Bu çerçevede, tez çalışmasının yüzer sulak alan uygulamalarına yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ötrofikasyon, Yüzer Sulak Alan, Yüzen Ada, Sucul Bitkiler, Nutrient Giderimi, Fitoremediasyon

ABSTRACT

Increasing population growth rate has increased the demand for fresh waters. The accumulation of nutrients (i.e. nitrogen and phosphorus) in water resources coming from point and diffuse sources results in negative effects on aquatic ecosystems. This leads to eutrophication problem in water. Eutrophication not only changes water quality parameters but also influences bottom creatures, disrupts biodiversity and causes the area to become nutrient sensitive.

The limited availability of fresh water resources makes it necessary to protect and improve the water quality in eutrophic or disposed to become eutrophic areas. In the scope of conservation methods, measure are applied to prevent the excess amount of nutrients from reaching to the receiving environment through discharge standards. While conservation measures are widely carried out in the world, they might be insufficient in some cases and mitigation/improvement applications are required. For this reason, various improvement methods have been developed to reduce pollution in the water source directly. It is necessary to decide which of the treatment methods or combination of methods to be applied is the most appropriate and cost effective. In this context, floating treatment wetlands come to the forefront as a new technology being relatively cheap, effective, sustainable and eco-friendly designs to reduce water pollution especially from diffuse sources.

This thesis study was conducted in order to contribute to the literature on floating treatment wetlands as there were very few studies in our country. In this context, current studies regarding two of the water quality improvement methods, floating treatment wetlands and aquatic plants, their nutrient removal processes, design factors, advantages and disadvantages were evaluated. Having low energy consumption and low cost, floating treatment wetlands were found to be efficient with average removal efficiencies of approximately 56% and 55% for total nitrogen and total phosphorus, respectively. In Gediz River Basin, Sazlı Lake with an exceeding assimilation capacity of 83% was chosen as an application example in which the calculated area for the floating treatment wetland was 1,23% of the Lake surface area in order to lower its assimilation capacity to the required level. This result showed that floating treatment wetland systems are more advantageous than other methods by

requiring less space as well as being cheaper. Within this framework, this study is thought to be guideline for the application of floating treatment wetlands.

Keywords: Eutrophication, Floating Treatment Wetland, Floating Island, Aquatic Plants, Nutrient Removal, Phytoremediation

1. GİRİŞ

Su biyolojik yaşamın temel kaynağıdır. Mikroorganizmalardan makroorganizmalara kadar tüm canlılar için gerekli unsurların en başında su yer alır. Su biyolojik aktivitelerin en önemli bileşenidir ve aynı zamanda birçok canlı için yaşam ortamıdır. Tüm bunların yanında su, endüstriyel ve tarımsal üretimin en önemli unsuru olup ülke ekonomilerinin de temelini oluşturmaktadır. Bunun için yüksek miktarlarda tatlı suya ihtiyaç vardır.

Genel olarak Dünya erişilebilir su kaynaklarının yaklaşık %70'i tarım amaçlı kullanılmaktadır. Bunu %19 ve %11 ile sanayi ve evsel kullanım izlemektedir. Avrupa genelinde ise tarım amaçlı kullanım %40, sanayi amaçlı kullanım %46 ve evsel kullanım %14'tür. Türkiye'nin ise toplam su tüketiminin %11'i sanayide, %15'i evsel kullanımda ve %74'ü tarım sektöründe kullanılmaktadır. Su kullanımı sadece bu alanlardaki sınırlı kalmayıp, aynı zamanda içme suyunda, ısıtmada, soğutmada, turizmde ve diğer hizmet sektörlerinde kullanım için her yıl milyarlarca metreküp su kullanımı yapılmaktadır. Artan su kullanımı ve su kirliliği sanayi, tarımsal ve evsel su kullanımında rekabete neden olarak, sürdürülebilir su kaynaklarına olan ihtiyacı devam ettirmektedir. Birleşmiş Milletlere göre, 2050 yılı itibari ile yerküre genelinde temiz suya talep %40 oranında artacak ve bu durumda dünya nüfusunun en az dörtte biri "kronik veya tekrar eden" temiz su sıkıntısıyla karşı karşıya kalacaktır. Her yerde giderek artmakta olan sürdürülebilir su kaynaklarına erişimin yarattığı gerginlikler, Suriye'de 2007-2010 yıllarındaki tarihsel kuraklığın ardından yaşanan ayaklanmada olduğu gibi etkisini göstererek birçok ülkede ekonomik ve politik krizlerin çıkmasına yol açabileceği belirtilmektedir.

Bu kapsamda su kaynaklarının miktar ve kalitesi üzerindeki baskılar azaltılarak, korunması ve iyileştirilmesi hayati önem arz eder. Türkiye'de de su kaynaklarının bütüncül ve etkin yönetimini sağlamak için Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün kurulması ve Su Çerçeve Direktifi'ne uyum için yapılan çalışmalar, suyun yönetimi ile ilgili yaklaşımların önemini göstermektedir.

Türkiye 2023 yılına kadar toplam kullanılabilir su potansiyelinin tamamını kullanmayı hedeflemektedir ve bu büyüyen su ihtiyacını karşılamak için kaynaklar

üzerindeki baskı giderek artış göstermektedir. Gelecekte su kaynaklarının azalması ve su kirliliğinin artması enerji tüketimini de artıracaktır.

Ülkemizde özellikle noktasal ve yayılı kirletici kaynaklarından oluşan baskının en önemli kirlilik parametreleri azot ve fosfor gibi besin maddeleridir. Su kaynaklarının azot, fosfor gibi kirletici maddeler ile zenginleşmesi olayı olarak bilinen ötrofikasyon; su kaynaklarında kalitenin bozulması, içme ve kullanma açısından uygun olmayan su kaynağı, su ortamında yaşayan canlıların sayısında azalma, istenmeyen türlerin çoğalması, koku problemi, rekreasyon için uygun olmayan ortam gibi istenmeyen etkilere sebep olmaktadır.

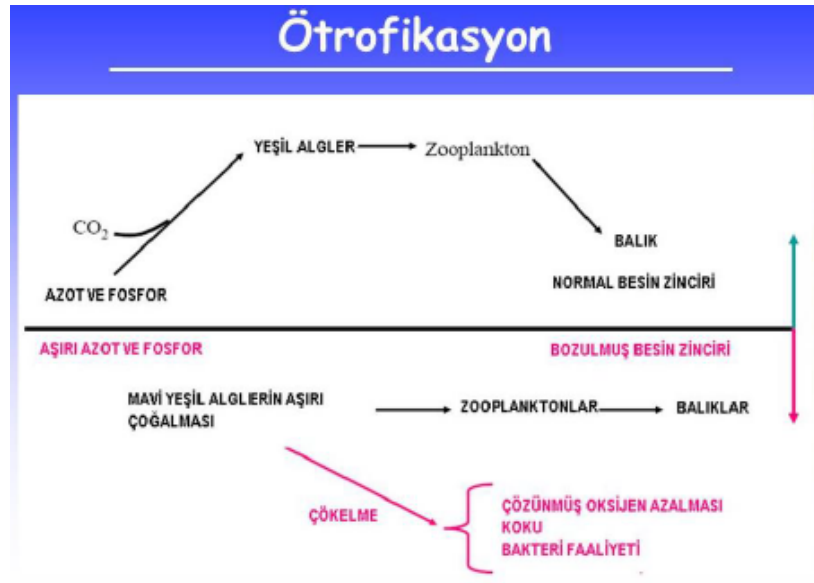
Türkiye yüzölçümünün %51'i ötrofikasyon probleminin sebep olduğu kentsel hassas alan ve yine %50'si nitrata hassas alan sınıfındadır. Bu nedenle, azot ve fosfor gibi besin maddelerinin deşarj standartları aracılığıyla özellikle hassas alanlarda alıcı ortama ulaşmaları engellenmelidir. Ancak bazı su kaynaklarında nütrientler tarafından beslenme engellense dahi bu su kaynağında istenilen trofik duruma ulaşmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle korumaya yönelik önlemlerin yanında iyileştirmeye yönelik önlemlerin de alınması gerekmektedir. Azot ve fosforun su içinden uzaklaştırılması, ötrofikasyonun iyileştirilmesi ve önlenmesi için etkili bir yaklaşımdır. Bu doğrultuda iyileştirme yöntemlerinin ya da yöntemler kombinasyonunun değerlendirilip, en uygun olanının seçimi aşamasında daha maliyet etkin uygulamalar tercih sebebi olmaktadır. Bu noktada da bitkilerle ve doğal süreçlerle azot, fosfor giderimi yapan yüzer sulak alanlar, yararlı yeşil teknolojiler olarak öne çıkmaya başlamıştır.

Bu tez çalışması, yüzer sulak alanların ve sucul bitki sistemlerinin su kalitesini iyileştirmeye yönelik potansiyel avantajlarına rağmen, tasarım, inşaat ve performansları hakkında bugüne kadar ülkemizde yayınlanmış çok az bilgi bulunması sebebiyle yapılmıştır. Bu nedenle, yüzer sulak alan uygulanmasına yönelik yol gösterici bir çalışma olacağı düşünülmektedir.

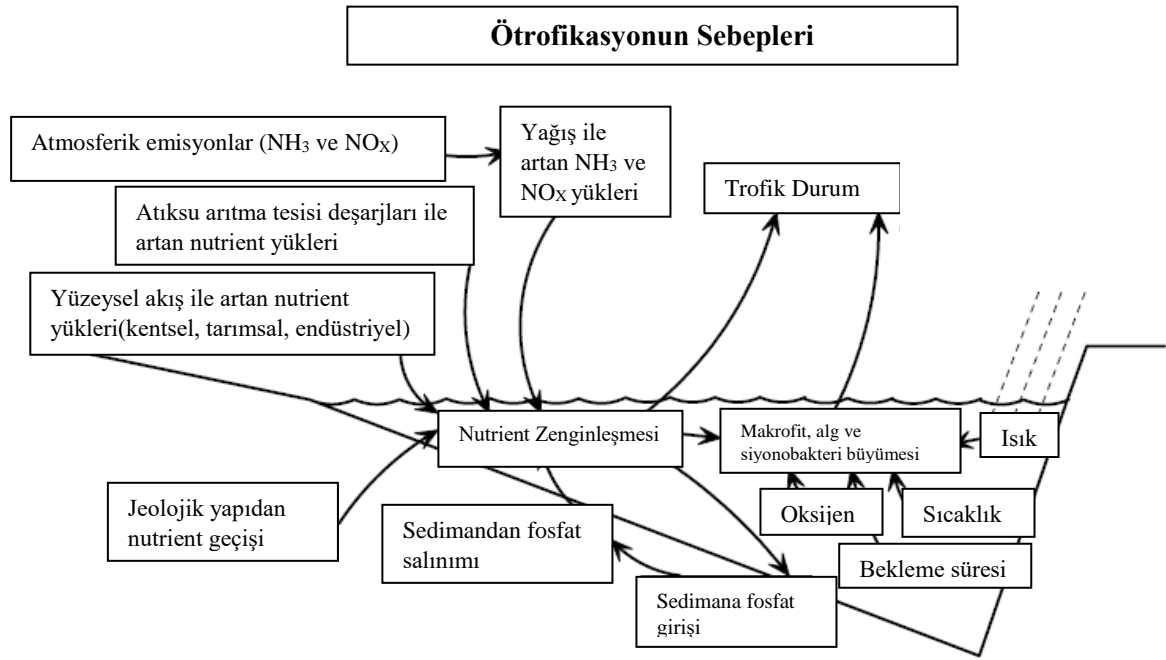
2. SU KAYNAKLARINDA ÖTROFİKASYON PROBLEMİ

Tatlı su ekosistemlerinin doğal yaşlanma sürecinin bir parçası olan ötrofikasyon olayı, son yıllarda antropojenik baskılar nedeniyle oldukça hızlanmıştır. Suların özellikle azot, fosfor gibi temel besin maddeleriyle zenginleşmesi olayı olarak bilinen ötrofikasyon; su kaynaklarında kalitenin bozulması, tat-koku problemleri, balık ölümleri gibi istenmeyen etkilere sebep olmaktadır [1].

Besin yönüyle zengin toprakların yüzyıllar boyunca göllere taşınması ile meydana gelen, yavaş ve kademeli bir süreç olan doğal ötrofikasyonun yanında, arıtılmamış atıksu deşarjları, tarımsal arazilerden süzölen drenaj suları gibi antropojenik etkiler nedeniyle besin maddelerinin su kaynaklarına girişı ile oluşarı aşırı alg ve su bitkisi çoğalması olarak bilinen “kültürel ötrofikasyon” günümüzde yüzeysel suların kalitesini etkileyen en önemli ve yaygın problemlerden biridir [2, 3]. Ötrofikasyon sürecinde; alg patlamaları, yüzey birikintileri, yüzey bitki yığımları ve bentik makrofitlerin toplanması ile organik maddelerin bozunması, toksik maddelerin serbest kalması, okside olmuş fosfatların sedimanlara bağlanması, suda çözülmüş oksijenin azalması ve sıklıkla balık ölümleri ile karşılaşölmektedir [4]. Şekil 1’ve 2’de ötrofikasyonun oluşum mekanizması ve ötrofikasyona sebep olan başölica faktörler görölmektedir.



Şekil 1. Ötrofikasyonun Oluşum Mekanizması [5]



Şekil 2. Ötrofikasyon Oluşumuna Sebep Olan Başlıca Faktörlerin Şematik Gösterimi [6]

Azot ve fosforun seviyesinin sularda fazla olması çevresel problemlerden ötrofikasyonun ortaya çıkmasına sebep olur.

Sularda Azot – Fosfor Döngüsü

Canlılar için önemli bir madde olan azot, protein ve DNA' nın bileşenlerindedir. Azot, topraktaki verimi büyük ölçüde etkiler. Azotun esas kaynağı atmosferdir. Atmosfer %78 oranında azot (N₂) içerir. Fakat atmosferde serbest bulunan azot organizmalar tarafından doğrudan kullanılmaz. Oksitlenmiş azota, nitrat (NO₃⁻) veya nitrit (NO₂⁻), ya da indirgenmiş azota, amonyak (NH₃), gereksinim duyarlar. Atmosferde bulunan azot gazı son derece durağan ve karalıdır; başka bir deyişle gaz halindeki azotu yalnızca bazı belirli bakteri ve siyanobakteri türleri bağlayabilir. Bu mikroorganizmalar gaz halindeki azotu oksitlenmiş ya da indirgenmiş azota çevirebilir. Bu nedenle azot döngüsünü büyük ölçüde bu mikroorganizmalar kontrol eder [31, 32].

Azot döngüsünde beş ana süreç vardır:

- Azotun bağlanması

- Nitrifikasyon
- Asimilasyon
- Amonifikasyon
- Denitrifikasyon

Bunlardan asimilasyon süreci tüm canlılarda görülür. Geri kalan süreçler ise bakteri ve siyanobakterilerin katılımıyla gerçekleşir. Azotun bağlanması, gaz halindeki azotun NH_3 dönüşmesidir. Yıldırımların ürettiği akımlar azotun bir kısmını NH_3 dönüştürür. Diğer taraftan insanların çeşitli endüstriyel etkinlikleri sonucu önemli oranda azot bağlanır ve bu işlem günümüzde toprağa geçen azot miktarını iki katına çıkarmıştır [31, 32].

Gaz halindeki azotu bağlayan siyanobakteri ve diğer bakteriler, moleküler azotu parçalamak ve onu hidrojenle birleştirmek için nitrogenaz enzimini kullanırlar. Fakat nitrogenaz enzimi ancak oksijen bulunmayan ortamlarda işlevsel olabilir. Bu nedenle, azot bağlayan bazı mikroorganizmalar oksijen bulunmayan ortamlarda bulunurlar. Hem fotosentez yapan hem de azot tutan siyanobakterilerin çoğu, azotu heterosist denilen kalın duvarlarıyla oksijeni dışarıda tutan hücreleri ile bağlarlar. Azot tutan siyanobakteriler özellikle suda yaşarlar. Baklagillerde bulunan *Rhizobium* gibi bazı azot bağlayan bakteriler de bitkilerle simbiyotik ilişki yaşarlar. Nitrifikasyon, aerobik bakterilerin NH_3 'ü NO_3 'e dönüştürme olayıdır. Bu dönüşme sırasında tepkime, 2 aşamalı bir oksidasyon olayıdır. İlk aşamada amonyanın nitrite (NO_2) dönüştürülmesidir. Bu işlem *Nitrosomanas* bakterileri tarafından yürütülür. İkinci aşamada *Nitrobacter* cinsinden aerobik bakteriler, nitriti oksitleyerek nitrat (NO_3) haline getirirler. Azot döngüsündeki asimilasyon sürecini bütün canlılar yerine getirir. Bitkiler özel enzim sistemleri kullanarak amonyak ve nitratı alırlar. Diğer canlılar ise bitkilerde bulunan organik azotu alarak azot ihtiyacını karşılarlar. Amonifikasyon da organik azot bileşiklerinin toprakta ve suda bulunan bakteriler tarafından amonyağa indirgenme sürecidir. Bu şekilde ortaya çıkan amonyak ya bitkilerin doğrudan asimilasyonu için ya da amonyanın nitrate dönüşüm süreci olan nitrifikasyon için kullanılır. Azot döngüsünün son aşaması olan denitrifikasyon döngüyü tamamlar. Bu süreçte nitrat gaz halindeki azota indirgenir ve azot gazı atmosfere döner. Denitrifikasyon işlemi, oksijeni olmayan ya da çok az olan ortamlarda anaerobik

bakteriler tarafından yürütülür. Böyle ortamlar genellikle su ile doymuş topraklar, lağımlar, aşırı miktarda gübrelenmiş topraklar ve taban suyu seviyesine yakın derin yer altı suları gibi oksijen miktarı düşük ortamlardır. Azot, sucul ortamlarda da havadan suyu doğru ve karada yayılı kaynaklardan suya doğru bir çevrim izler [31, 32].

Fosfor, protoplazmanın gerekli ve önemli bir birimidir. Fosfor, biyolojik sistemlerde genetik bilginin iletilmesi, DNA ve RNA makro moleküllerinin yapısına girmesi ve tüm enerji taşınımı, enerji bağlamada rol alması bakımından önemlidir. Fosforun ana kaynağı fosfat içeren kayalardır. Ayrıca fosfor yalnızca biyolojik olarak önemli olan inorganik formda, yani fosfat (PO_4^{3-}) olarak bulunur. Bitkiler fosfatı absorblar ve organik sentezde kullanır. Kayaların havanın etkisiyle değişikliğe uğratılması sayesinde fosfat yavaş yavaş toprağa katılır. Humus ve toprak partikülleri fosfatı bağlar. Onun için fosfatın döngüde tekrar dolaşımı ekosistemlerde oldukça lokal olarak gerçekleştirilme eğilimindedir. Bununla birlikte, fosfor karasal ekosistemlerden denize süzülerek yavaş yavaş su tabakasının içine de sızar. Şiddetli erozyonlar bu sızmayı hızlandırabilir. Fakat kayaların havanın etkisiyle değişikliğe uğratılması yoluyla fosfat kaybı genellikle daha azdır. Denizden karasal sisteme akış yapacak oranı ise çok az olup, bu dönüşte insanlar tarafından yapılan balıkçılık ve bazı kuşlar ile gerçekleşmektedir. Fakat insan faaliyetleri sonucu sularla denizlere taşınımı artmış, karaya dönüş ise yavaşlamıştır. Sulara ulaşan fosfat gittikçe sedimentler içerisinde birikir ve kayaların yapısına katılır. Bu kayalar belirli bölgelerde deniz seviyesinin düşmesi ya da deniz tabakasının yükselmesini sağlayan jeolojik işlemlerin sonucunda karasal ekosistemlerin içerisinde yer alabilir. Böylece çoğu fosfor ekolojik zaman ölçeği içerisinde bölgesel olarak toprak, bitkiler ve tüketiciler arasında döngüde dolaşır. Atmosferde fosfor elementi bulunmadığı için fosforun döngüsü karalardan denizlere, denizlerden karalara doğrudur [59].

Ötrofikasyonun su kaynakları üzerinde istenmeyen birçok etkisi bulunmaktadır ve bu etkiler aşağıda alt başlıklar altında sıralanmıştır [3, 6, 7].

Ekolojik Etkiler

- Makrofit, alg ve siyanobakteri popülasyonundaki artış

- Zehirli alg türlerinin algal patlama ile baskın hale gelmesi
- Jelatinimsi zooplanktonların (deniz ortamları) algal patlama ile oluşumu
- Makroalglerin artan biyokütleleri
- İstilacı türlerin varlığı
- Suyun berraklığında/ışık geçirgenliğinde azalmalar
- Çözünmüş oksijen yetersizliğine bağlı bentik hayvanların ölümü
- Makrofit bitki örtüsünün tür kompozisyonundaki değişiklikler
- Balık ölümlerindeki artışlar
- Tür çeşitliliğinde azalmalar

İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkiler

- Su sümbülü (*Eichhornia crassipes*) istilası sivrisinek larvaları için ideal bir üreme ortamı oluşması
- Siyonotoksinlerin varlığı ve maruziyeti sonucunda karaciğer kanaması veya karaciğer yetmezliği hastalıkları, alerjik deri rahatsızlığı özellikle yüzücülerde
- Toksinli suyun içilmesi durumunda mide-bağırsak hastalıkları
- Yüksek azotlu su ile “Mavi Bebek Hastalığı” riski

Ekonomik Etkiler

- Su arıtma maliyetlerinde artış
- Aşırı alg patlamaları ile filtrelerin tıkanması ve işletme-bakım maliyetlerinde artış
- Su kalitesinin iyileştirilmesi maliyetlerinde artış
- Ticari değeri olan ve et kalitesi yüksek balık türünde azalma

Estetik Etkiler

- Özellikle su kaynaklarına yakın yerleşim yerleri için, su yüzeyinde biriken alg ve siyonobakteri artışıyla istenmeyen görüntü ve koku oluşumu
- Arıtma amaçlı kullanılan sularda sağlığa zararlı olmayan tat ve koku problemleri oluşumu (kötü kalitede arıtılmış su)

Rekreasyonel Etkiler

- Su kaynaklarının rekreasyon amaçlı kullanımında azalma
- Makrofitlerin geniş alanlarının varlığı sonucunda su yollarına erişimin engellenmesi ve kayak, yatçılık ve balıkçılık gibi su sporları için suyun kullanım uygunluğunun azalması

2.1. Ötrofikasyonun Önlenmesi ve Kontrolü

Ötrofikasyonun önlenmesi ve kontrolünde uygulanması gereken ilk adım; su kütlesinde nütrient artışına yol açan veya yol açabilecek bütün kaynakların değerlendirilmesidir. Ayrıca, bekleme süresi, atmosferik birikim ve sedimandan kaynaklanan yeniden salınım gibi faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Sonraki adımda, alınan önlemin ötrofikasyon durumu üzerindeki etkisi (önlemin etkinliği) ve uygulanmasının maliyetini (en düşük maliyetlerle en etkili önlemleri seçmek) dikkate alınmalıdır. Sorunun kaynağında alınacak önlemlerin yanı sıra, etkilenen su kütlesinde veya çevresinde alınabilecek önlemler de göz önüne alınmalıdır. Alınacak önlemlerin veya önlemler kombinasyonunun hangilerinin en uygun ve maliyet etkin olduğuna karar verilmelidir.

Diğer bir adım da ötrofikasyon sürecini sınırlayan besin elementinin tespit edilmesidir. Ötrofikasyon sürecini sınırlayan besin elementinin doğru bir şekilde tespit edilmesi alınacak önlemler açısından önem arz etmektedir. Genellikle, ötrofikasyon probleminde sınırlayıcı element fitoplankton oluşumunu sağlayan azot ya da fosfordur. Aşağıdaki bölümde sınırlayıcı element kavramının önemi anlatılmaktadır [8].

2.1.1. Sınırlayıcı Element Kavramı ve N/P Oranı

Ekolojide, ortamda yeterli miktarda bulunmadığında biyolojik gelişmeyi sınırlayan maddeler sınırlayıcı element olarak tanımlanır. Ötrofikasyon probleminde sınırlayıcı element fitoplankton oluşumunu sağlayan azot, fosfor, karbon ve silisyum elementlerinden biridir. Karbon, fitoplanktonlar için kolay elde edilebilmesi ve bol miktarlarda bulunması sebebiyle, silisyum elementi ise fitoplankton oluşumunda diğer

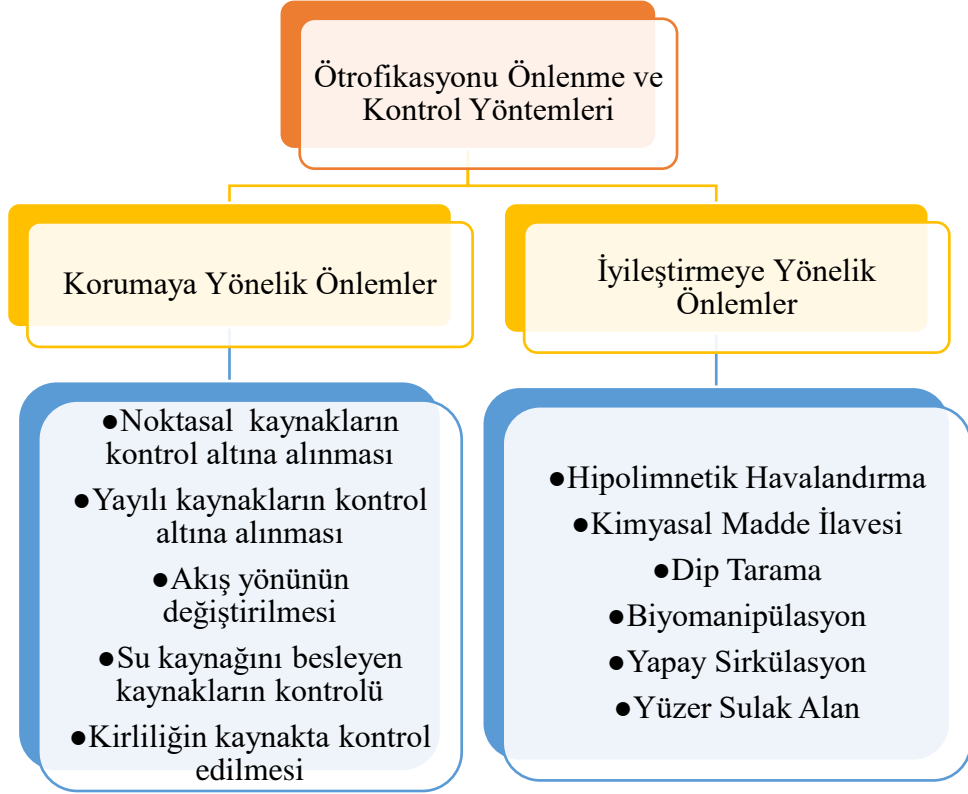
elementlere göre çok daha az kullanılması sebebiyle sınırlayıcı element olarak görülmemektedir. Bu durumda ötrofikasyon sürecini sınırlayıcı olarak azot (N) ve fosfor (P) elementleri düşünülmelidir [9].

N/P oranı: Sucul ekosistemlerde biyolojik gelişmeyi hangi elementin sınırladığının belirlenmesi için ortalama azot ve fosfor konsantrasyonları kullanılmaktadır [10]. Hangisinin sınırlayıcı faktör olduğuna ilişkin bilinmesi gereken temel faktör ötrofikasyona neden olan fitoplankton türünün stokiometrisidir. Genel olarak 1 µg Klofofil-a oluşumu için 1 µg P ve 10 µg N gerektiği şeklinde bir kabul yapılırsa N/P<10 durumunda fitoplankton büyümesi azot tarafından N/P>10 durumunda sistem fosfor tarafından sınırlandırılıyor denilebilir. N/P=10 durumunda sistem ikisi tarafından da sınırlandırılmaz. Bu oranlar tüm fitoplanktonlar için genişletilirse N/P>20 durumunda fosfor sınırlayıcı N/P<5 durumunda azot sınırlayıcı olarak kabul edilmesi daha emniyetli bir yaklaşım olur [11]. Göllerde ve nehirlerde sınırlayıcı elementin belirlenmesine yönelik kullanılacak genel yaklaşım aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1. Sınırlayıcı Besin Maddesi Oranları

| | Besin Element Kaynağı | N/P Oranı | Sınırlayıcı Besin Elementi |
|----------|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| Nehirler | Noktasal Kaynakların Baskın Olması Durumu | << 10 (fosfor giderimi yok) | Azot |
| | | >> 10 (fosfor giderimi var) | Fosfor |
| | Yayıllı Kaynakların Baskın Olması Durumu | >> 10 | Fosfor |
| Göller | Büyük Yayıllı Kaynakların Baskın Olması Durum | >> 10 | Fosfor |
| | Küçük Noktasal Kaynakların Baskın Olması Durumu | << 10 | Azot |

Su kaynaklarında ötrofikasyonun önlenmesi ve kontrolü amacıyla uygulanmakta olan pek çok yöntem bulunmaktadır. Ekolojik açıdan uygun ve nihai sonuç alınabilen bu yöntemler “Su kaynağını korumaya yönelik önlemler” ve “Su kaynağını iyileştirmeye yönelik önlemler” olmak üzere iki kademedele ele alınmış olup aşağıdaki şekilde ana başlıklar altında en yaygın yöntemler verilmiştir.



Şekil 3. Ötrofikasyonu Önleme ve Kontrol Yöntemleri

2.1.2. Korumaya Yönelik Olan Önlemler

Korumaya yönelik önlemler genelde **besin maddelerinin su ortamına girişini kontrol altına** almaya yönelik uygulamalardır. Bu uygulamalar yapılırken; su kaynakları için öncelikle gerçekçi ve uygun su kalite hedefleri belirlenmeli, istenilen hedefe yönelik olması gereken besin maddesi yükleri tespit edilmeli ve gereksiz yatırımları önlemek için öncelikler belirlenmelidir. Besin maddesi yüklerinin bütün kirlenici kaynaklarıyla belirlenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Su kalitesi hedefinin tespitinde, suyun kullanım amacı ve doğal trofik durumu göz önünde

bulundurulmalıdır. Dış kaynaklardan su ortamına gelebilecek besin maddesi yükü aşağıdaki yöntemlerle kontrol altına alınabilmektedir. Bu yöntemler;

- Noktasal kaynakların kontrol altına alınması,
- Yayılı kaynakların kontrol altına alınması,
- Akış yönünün değiştirilmesi,
- Su kaynağını besleyen kaynakların kontrolü,
- Kirliliğin kaynaktan kontrol edilmesidir [9, 11, 12, 13].

Noktasal Kaynakların Kontrol Altına Alınması

Evsel veya endüstriyel atıksular ile katı atık düzenli depolama tesisleri ve balık yetiştiriciliği tesisleri gibi noktasal kirletici kaynaklardan gelen azot ve fosfor yükünün biyolojik veya kimyasal yöntemlerle giderilmesi mümkündür. Bu amaçla uygulanan en etkili iki yöntem; “Kimyasal Arıtma ve Biyolojik Nutrient Giderimi (BNR)’dir. BNR sistemleri pahalı sistemler olmalarına karşın son zamanlarda kullanımı giderek artmaktadır. Bunların dışında membran filtrasyonu, ters osmoz gibi diğer ileri arıtma teknikleri de kullanılabilir.

Bu kapsamda yeni yapılacak Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) planlamalarında azot ve fosfor giderimine dikkat edilmesi, mevcut AAT’lerde ise bu hususta gerekli revizyonların yapılması gerekmektedir [1, 9, 11, 12, 14, 15]. Bunların yanında, endüstrilerde temiz üretim teknolojilerinin uygulanması ile de çıkış suyu denetimi sağlanarak su ortamına giren besin maddesi yükü kontrol altına alınabilir [16].

Yayılı Kaynakların Kontrol Altına Alınması

Noktasal kaynaklara kıyasla yayılı kaynaklı kirleticilerin kontrolü ve önlenmesi daha zordur. Tarımsal faaliyetler, yerleşim yerleri ve orman alanları gibi arazi kullanımından kaynaklı faaliyetler ile atmosferik birikim ve düzensiz depolama sahalarından kaynaklanan besin maddesi yüklerinin kontrolü faaliyetleri bu kapsamda değerlendirilmiştir. Bunlar arasında özellikle tarımsal faaliyetlerden gelen besin maddesi yükleri kirliliğin en önemli kaynağı olup önlemlerin belirlenmesi aşamasında öncelik teşkil etmektedir.

Sularda tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan nitrat kirliliğinin önlenmesine yönelik arazi yönetimi, bitki besin maddesi yönetimi, hayvansal gübre yönetimi, sulama yönetimi, bitki koruma ürünleri yönetimi vb. faaliyetleri içeren “İyi Tarım Uygulamaları Kodu” altında yer alan tedbirler uygulanmalıdır. İyi Tarım Uygulamaları Kodu çiftçiler tarafından uygulanması gereken kuralları ifade eder ve ağırlıklı olarak hayvansal gübre yönetimine ilişkin düzenlemeleri içermektedir. Bu tedbirlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Kimyasal ve hayvansal gübrelerin doğru uygulama miktarlarının belirlenerek, toprağa homojen bir şekilde dağılımının sağlanması, böylece topraktan yıkanarak suya karışacak miktarların kabul edilebilir düzeyde kalmasını sağlayacak uygulama yöntemlerinin belirlenmesi,
- Yağışlı dönemlerde nitratin topraktan yıkanarak su kirliliğine neden olmasını engelleyecek şekilde toprak yüzeyinde minimum miktardaki bitki örtüsünün bulundurulması,
- Gübrelerin toprağa uygulanmasının uygun olmadığı kapalı dönemlerin belirlenmesi,
- Gübrelerin eğimli arazilere; suyla doygun, sele maruz kalmış, donmuş veya karla kaplı toprağa ve su kaynağına yakın toraklara uygulama yöntem ve koşulları,
- Depolanmış hayvan gübresi ve silaj gibi bitki materyallerinden kaynaklanan sızıntı sularının, yüzey akışı ve yer altına sızma şeklinde sularda meydana getirebileceği kirliliği önlemeyi amaçlayan depolama ünitelerinin inşaa niteliklerinin ve kapasitesinin belirlenmesi,
- Sulama sistemlerinin bulunduğu bölgelerde, yüzey akışlarından ve suyun bitki kök sisteminin altına inmesinden meydana gelen su kirliliğinin önlenmesi,
- Ekim nöbeti sistemi ile çok yıllık ve tek yıllık bitkilere ayrılan alanların oranlarını dikkate alacak şekilde tarımsal alanların yönetimi,
- Gübreleme planlarının tarımsal işletme düzeyinde yapılarak kullanılan gübrelerin kaydının tutulması

gibi uygulamalardır [17].

İnsanların neden olduğu arazi kullanımını değişiklikleri de yüzey sularına olan besin maddesi girdisini arttırmaktadır Genellikle doğal orman örtüsü ile sulak alanların bulunduğu havzaya sahip su kaynaklarına ulaşan besin maddesi girdisi düşük olurken, tarım ve mera alanları ya da kent ve yolların bulunduğu havzalarda yüksektir [18, 30].

Akış Yönünün Değiştirilmesi

Besin maddesi yükünün kontrol altına alınmadığı durumlarda, bir kollektör sistemi yardımıyla suyun toplanarak besin maddesi etkisinin daha az olacağı alıcı ortamlara yönlendirilmesi ile kirlilik yükü azaltılabilmektedir. Yöntem ile arıtmanın adımları azalabilir ancak tam bir arıtma yerine geçmemektedir çünkü askıda maddenin azaltılması için en azından mekanik arıtma gereklidir [1, 9, 11, 12].

Su Kaynağını Besleyen Kaynakların Kontrolü

Sulak alanların oluşturulmasıyla besin maddesi yükü azaltılabilmektedir. Sulak alan sistemlerinde nitrat serbest azota dönüşür ve atmosfere salınır; fosfor ise bitkiler tarafından sulak alan toprağında adsorbe edilmektedir. Hipertrofik bir göl öncesinde oluşturulan sulak alan ile göle giren toplam fosfor yükü %30-67, toplam azot yükü ise %30-52 oranında azaltılabilmektedir [9, 11, 12, 19, 20, 21].

Kirliliğin Kaynakta Kontrolü

Deterjanlar ile yiyecek ve içeceklerdeki katkı maddeleri arıtma tesislerindeki fosfor yükünün başlıca sebeplerindendir. Deterjanlar ve gıda maddelerinin içerisindeki fosfor miktarının azaltılması veya fosfor içermeyen deterjanların kullanımının sağlanması gibi tedbirler ile fosfor yükünün kaynakta kontrolü yapılabilmektedir [12, 14, 15, 22, 29].

2.1.3. İyileştirmeye Yönelik Önlemler

İyileştirmeye yönelik önlemler, doğrudan su kaynağında yapılan çalışmalardır. İyileştirme çalışmalarının başarılı olabilmesi için dış kaynaklardan su ortamına gelen besin maddesi yüklerinin kontrol altına alınmış olması gerekmektedir [9, 11, 12, 23]. Dünya genelinde, son yıllarda özellikle göllerde çok çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemlerde genel olarak amaç, yüksek fitoplankton

yoğunluğu sebebiyle gölün su kalitesinin ve biyolojik çeşitliliğinin bozulmasına neden olan ötrofikasyonu önlemektir [24]. İyileştirme yöntemlerinin uygunluğunun değerlendirilmesi için, su kaynağının limnolojik analizinin yapılması ve morfolojik parametreler gereklidir. Bu yöntemler, sedimentin sınırlandırılması ve kontrol edilmesi ya da göl yaşlanması sonuçlarının yönetilmesi ile kategorize edilir [23]. İyileştirmeye yönelik yapılan en yaygın çalışmalar aşağıda verilmektedir:

- Hipolimnetik Havalandırma
- Kimyasal Madde İlavesi
- Dip Tarama
- Biyomanipülasyon
- Yapay Sirkülasyon
- Yüzer Sulak Alan

Hipolimnetik Havalandırma

Hipolimnetik havalandırma genellikle hipolimniyon tabakasına ince kabarcıklar halinde saf oksijen veya hava enjeksiyonu ile sağlanır. Böylelikle oksijen tabakalaşmayı bozmadan çözünür. Genellikle soğuk su habitatının muhafaza edilmesinin istendiği ve tam sirkülasyonun istenmediği göllerde kullanılır. Hipolimnetik havalandırmanın başlıca amaçları;

- Su kolonunu tahrip etmeden hipolimniyon tabakasının oksijen içeriğini arttırmak,
- Soğuk su balık türleri için artan yaşam alanı ve besin kaynağı sağlamak,
- Sedimentten suya Fosfor (P) geçişinin demir redoksları tarafından kontrol edilmesi halinde, çökeltinin P salınımını azaltmak için sediment-su ara yüzeyinde istenmeyen koşulların oluşturulmasıdır [23].

Kimyasal Madde İlavesi

Su kolonundaki fosfor içeriğini düşürme (çöktürme) ve sedimandan fosfor salınımını azaltma (inaktivasyon) amacıyla uygulanan kimyasal madde ilavesi ile yöntemi ile nütrient miktarı azaltıldığından alg biyokütlesinin kontrolü

sağlanabilmektedir. Çöktürme işleminde kullanılabilen kimyasallardan biri demirdir. Termal tabakalaşma döneminde hipolimniyonda anoksik koşullar oluşmaktadır ve bu koşullarda sedimandaki anaerobik bakterilerin faaliyeti ile demir indirgenir. İndirgenmiş düzeydeki demir çözülmüş hale gelir ve demire bağlanmış haldeki fosfor yapısı su kolonunda yükselir. Oksik koşullarda, pH'nın 5'den 7'ye kadar olduğu durumlarda $Fe(OH)_3$ su kolonundaki fosforu absorbe ederek sedimanda tutar. Bu kapsamda, demirin indirgenmesi ve dolayısıyla çözülmüş hale gelerek sudaki fosforu tutup sedimandan su kolonuna salınımının engellemesi için havalandırma ya da yapay sirkülasyonla oksik koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle demirin, alüminyum tuzlarının kullanılmadığı düşük pH'a sahip göllerde uygulanması daha uygundur [25].

Dip Tarama

Dip tarama ya da sediment tarama olarak bilinen bu yöntem fiziksel bir göl iyileştirme yöntemidir. Göllerin derinleştirilmesi ve balık üretimi için hacmin artırılması, besin elementlerince zengin veya zehirli madde içeren sedimentin uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilen ve maliyeti yüksek bir yöntemdir [26, 27]. Ancak uzun vadeli çözüm olarak görülmemesi gereken bir yöntemdir.

Biyomanipülasyon

Biyomanipülasyon, fosfor konsantrasyonu yaklaşık 50 ila 150 $\mu g/l$ aralığında değişirse, restorasyon yöntemi olarak kullanılabilir [23]. Bir ekosistemdeki biyolojik toplulukların veya bozulan besin ağı ilişkilerinin ayarlanması işlemine biyomanipülasyon denir. Aşırı azot ve özellikle fosfor yüklemesi sonucu artan otçul balıklar ekosistemde hayvansal-planktonu azaltarak, suya yeşil renk veren bitkisel-planktonun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu balıklar dip çamurundan beslendikleri için çamuru karıştırarak suyu bulandırmakta ve ışık geçirgenliğini azaltmaktadırlar. Azalan ışık geçirgenliği sonucu sualtı bitkileri de yok olmaktadır. Azalan ışık geçirgenliğini artırmak ve yok olan sualtı bitkilerini geri kazanmak için biyomanipülasyon 2 yolla yapılmaktadır:

Otuç Balık Çıkartılması: Sazan ve kadife gibi balıkların gölden çıkartılmasıdır. Burada amaç bu balıkların biyokütlelerini azaltarak göl içi ışık geçirgenliğini ve sualtı bitki yayılımını yeniden arttırmaktır. Genelde bu balıkların biyokütlelerinin %75'inin çıkarılması ve göl suyundaki fosforun 100 µg/l düzeylerine indirilmesiyle kalıcı iyileşme sağlanmaktadır.

Etçil Balık Eklenmesi: Ekosistemde azalan etçil balık (turna, tatlısu levreği) stoğunun arttırılmasını hedeflemektedir. Göl etçil balıkla stoklanmakta ve bu balıklar da otuç balıkları denetleyerek bitkisel plankton üremesi denetlenmektedir. Böylece su ışık geçirgenliği arttırılmaktadır. Bu iki yöntem birbirlerine alternatif değil birlikte uygulanmalıdır. Biyomanipülasyonun başarısı su kütlelerine ulaşan azot-fosfor kontrolü ile doğrudan ilgilidir [28].

Biyomanipülasyon, sonuçları konusunda genel bir yargıya varmak mümkün olamamakla beraber, besin zincirindeki değişime her göl farklı nitelikte tepki verdiği ve ekosistem üzerinde istenmeyen etkilere de sebebiyet verebileceği için biyomanipülasyonun başarısız olduğuna dair yaygın bir görüş hâkimdir. Bu yüzden detaylı bir ekosistem değerlendirmesi yapılarak yapılması gerekir.

Yapay Sirkülasyon

Termal tabakalaşmayı önlemek veya ortadan kaldırmak için kullanılan bu yöntemde sirkülasyon sayesinde çözünmüş oksijen seviyesi arttırılabilir; demir ve mangan ise azaltılabilir. Besin yüklerinin kontrol edilemediği ortamlarda algin büyümesini sınırlandırır ve mavi-yeşil alglerin hakimiyetini destekleyen faktörleri nötralize eder [23].

Yüzer Sulak Alan

Sulak alanlar, yoğun su bitki örtüsü ve geçirgen alt toprakları ile suyun biyolojik olarak filtrelenmesi için uygulanan doğal süreçlere sahip sistemlerdir. Yüzer sulak alan arıtma sistemleri, sucul bitkileri içeren yapay bir platform oluşturmak için matlardan ve hücrelerden oluşur. Besin maddesi giderimi için birincil mekanizmaları mikrobiyal dönüşüm ve alım; makrofit asimilasyonu, organik ve inorganik substrat materyallerine absorpsiyon; ve buharlaşmadır [23].

Yüzer sulak alanlar ile besin maddesi giderimi bu çalışmanın ilerleyen bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

3. SULAK ALAN EKOSİSTEMLERİ

Sulak alan ekosistemlerinin kesin ve net bir tanımını yapmak oldukça zor olmakla birlikte Ramsar Sözleşmesinde yer alan tanıma göre sulak alanlar, “doğal veya yapay sürekli veya geçici, durgun ya da hareketli, tatlı, acı veya tuzlu suya sahip, denizlerin gel-git hareketinin çekilme devresinde, altı metreyi geçmeyen derinliğe sahip kesimlerini de kapsayan bataklık, turba veya suyla kaplı alanların tümüdür” şeklindedir [31].

En basit anlamı ile ise sulak alanlar, sucul bitkileri destekleyen su ile kaplı alanlardır. Sulak alan ekosistemleri periyodik olarak su basan bölgelerden sürekli olarak doygun durumdaki topraklara kadar değişebilir.

Sulak alanlar, Su Çerçeve Direktifi'ne göre sabit ya da yavaş hareket eden sularla karakterize edilirler. Yaygın özellikleri arasında; nemli topraklar, mikroorganizmalar, sucul ve nemcil bitki örtüsü ve periyodik veya kalıcı sel ve/veya su birikintisini yansıtan kimyasal ve biyolojik işlemlere adapte olmuş fauna yer alır. Sulak alanlar hidrolojik sürekliliğin bir parçasıdır. Diğer yüzey suyu kütlelerinin parçalarından oluşurlar ve durumlarını önemli ölçüde etkileyebilirler.

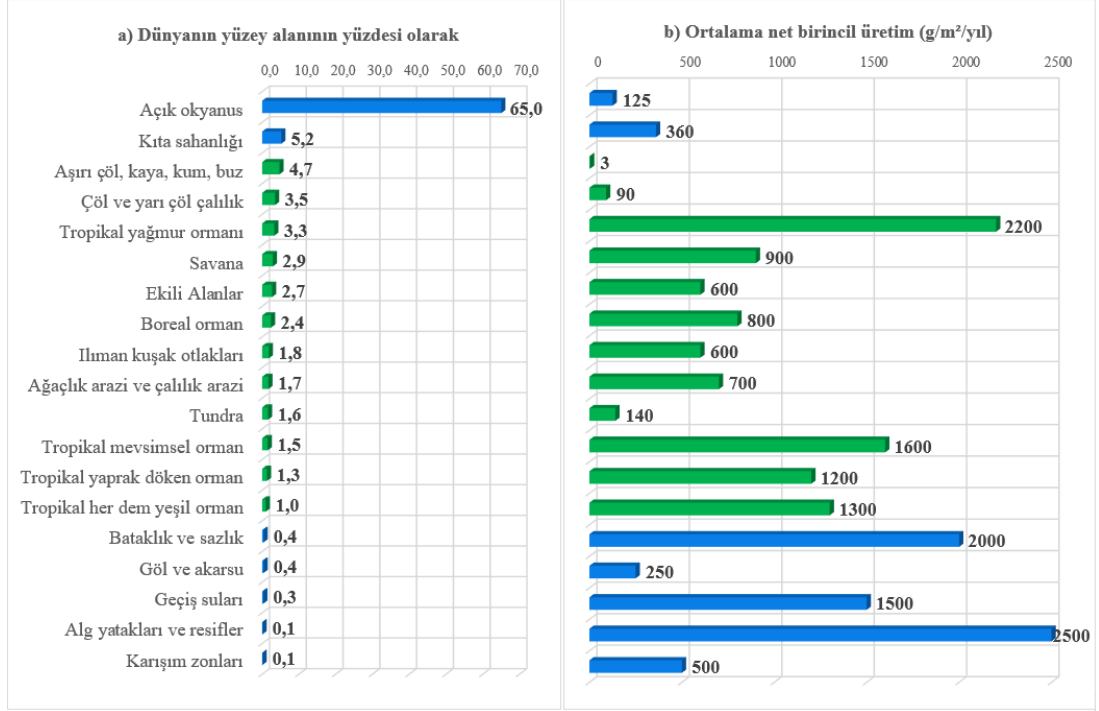
Sulak alan ekosistemleri zengin bitki, hayvan ve mikroorganizma türleri barındıran en zengin biyomlar arasında yer alır [32]. Bu ekosistemde yaşayan canlılar, sucul toprak yapısı, su hareketlerine bağlı değişen biyolojik ve kimyasal ortam koşullarına uyum sağlamış mikroorganizmalar, hidrofil ve nemli ortam seven bitki örtüsü ve faunadır.

Sulak alanların insan refahı, vahşi yaşam ve çevresel kalitenin sürdürülebilmesi için çok önemli faydaları bulunmaktadır. Sulak alanların hidrolojik rejimi düzenleme, özel bitki ve hayvan toplulukları barındırma, biyokütle biriktirme, kirleticileri süzerek

su kalitesini iyileştirme, balıklar için sezonluk yumurtlama alanları oluşturma gibi eşsiz ekolojik ve ekonomik değerleri vardır [31, 32, 36].

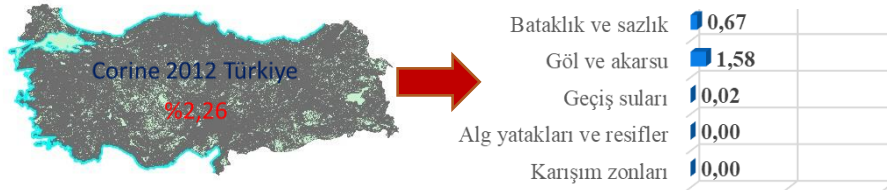
Sulak alanların işlev ve değerleri, doğrudan kullanım değerleri, dolaylı kullanım değerleri ve sosyal ve kültürel değerleri olmak üzere üç ana başlık altında değerlendirilerek biyokıymetlendirmeleri yapılabilir. Doğrudan kullanım değerleri, tuz üretimi, su ürünleri, saz, kereste, otlatma, içme, kullanma ve sulama suyu, ulaşım, turizm olanakları gibi pazar değeri olan doğal ürünleridir. Dolaylı kullanım değerleri ise yeraltı sularının besleyerek ve boşalmasını sağlayarak su rejimini düzenleme, fırtına ve sellerin etkisini azaltma, bulunduğu bölgenin iklim koşullarını düzenleme, tortu ve zehirli maddeleri tutarak/kullanarak suyun kalitesini iyileştirme, sediment ve besin maddeleri depolama, biyolojik çeşitliliği barındırma gibi dolaylı yollardan ekonomiye büyük katkılarda bulunan işlevleridir. Ayrıca, birçok sulak alan, kültürel mirasında bir parçası olması itibariyle de özel niteliklere sahiptir. Birçok yerde önemli yerel geleneklerin temelini oluştururlar. Sosyal aktivitelere olanak sağlarlar. Yaban hayatı, güzel manzarası ve peyzaj değerleriyle estetik esinlerin kaynağını oluştururlar [31].

Sulak alan ekosistemlerinin pek çok fonksiyonunun olmasının yanı sıra çevre sağlığı açısından da karbon, azot, fosfor ve kükürt döngülerinin bir parçası olarak önemli bir yer tutmaktadır. Bu önemini tropikal yağmur ormanlarından, çayırlıklardan, çam ormanlarından ve kültüre alınmış tarım alanlarından daha çok birincil üretime sahip olması ile kazanmaktadır [32, 34]. Şekil 4'te farklı ekosistemlerin yüzey alanları yüzdesi ve ortalama net birincil üretimleri ($g/m^2/yıl$) görülmektedir.



Şekil 4. Farklı Ekosistemlerin Yüzey Alanı ve Birincil Üretimi [32, 34]

Ülkemizde de farklı ekosistemleri CORINE 2012 arazi örtüleri verisi kapsamında değerlendirdiğimizde Türkiye'nin %2,26'sı sulak alan ekosistemleri içerisinde değerlendirebiliriz.



Şekil 5. Ülkemizdeki Sulak Alan Ekosistemleri

Birincil üretimin aktif olması sebebi ile bu alanlar büyük miktarda organik karbon oluştururlar. Bu karbon turba diye bilinen ve toprakta tam ayrılmamış durumda bulunan bataklık bitkilerinde depo edilmiştir. Turbalık ise, asidik torf toprağından oluşan, ölmüş bitkilerden meydana gelmiş sulak alanların genel adıdır. Sulak alanlardaki bitki artıklarının binlerce yıl boyunca üst üste yığılmasıyla oluşur

turbalıklar. Böyle alanlar organik karbonun büyük bir havuzunu/deposunu oluştururlar. Rusya 162,5 milyar tonluk turba rezervi ile başı çekmektedir. Orta Avrupa ve Baltık ülkeleri de bu yönden zengindir. Türkiye’de ise özellikle iklim koşullarına bağlı olarak çok kısıtlı turbalık alan bulunuyor [33].

Sulak alanlar azot ve fosfor için de bir depolama alanıdır ve sedimentte tutunmasını sağlarlar. Azot ve fosfor sedimentte tutularak depolanır böylece taşkın alanlarında nütrient bakımından zengin verimli topraklar oluşur. Membada bulunan nehirlerden ve kollarından gelen besin elementleri (nütrientler) yağmur suyu akışıyla taşınır. Taşınımdan ve beşeri faaliyetler sonucu atıklardan gelen azot ve fosfor gibi nütrientler sulak alan bitkileri tarafından alınarak gövde yaprak ve benzeri bölümlerinde besin maddesi olarak kullanılır. Böylece su kolonundan çekilerek birikimleri azaltılır, su kalitesinin de iyileşmesi sağlanır. Sulak alanlar sulardan organik maddeleri, askıda katı maddeleri, besin elementlerini, toksik maddeleri, ağır metalleri ve biyolojik unsurları giderebilmelerinden dolayı yüksek miktarda arıtım kapasitesine sahiptirler [35]. Bu arıtma yeteneği ile bazı sulak alanlarda bitkilerin beklenenin üzerindeki artışı sayesinde sulardan fazla nütrientin uzaklaştırılması sağlanabilir. Örneğin tropikal iklimlerde papirüs üretimi yıllık 140 ton civarında olabilmektedir. Bu sayede ciddi miktarda papirüs üretilmiş olurken sudaki fazla miktardaki nütrient, papirüs (*Cyperus papyrus*) çoğalıp büyürken kullanılmakta ve su kalitesini iyileştirmektedir [36].

Burada da anlatıldığı üzere sulak alanlar kirleticilerin bitkide, sedimentte ve toprakta tutulmasını sağlayarak evsel atıklardan veya tarımsal gübrelemeden gelen yüksek miktardaki nütrient konsantrasyonunun düşürülmesinde etkin rol oynayabilirler. Bu sayede gerekli tedbirler alınmazsa yakın gelecekte ötrofik hale gelebilecek sularda veya içme suyu amacıyla kullanılan ve yeraltı suyuyla bağlantılı olan sulak alanlarda nütrient konsantrasyonu toksik seviyelere çıkmadan önce sucul ortamdan uzaklaştırılmasını sağlarlar. Bu şekilde ötrofikasyonu engelleyerek alg patlaması oluşumlarını engellerler. Böylece sucul ortamdaki bitki ve hayvanlar yaşam için ihtiyaç duydukları oksijene ulaşabilirler ve sağlıklı bir ekosistem sürdürülebilir [36].

3.1. Sulak Alan Etkisi ve Biyomimikri

Sulak alanların çoğu ekosistemden daha yüksek birincil aktivite oranına sahip olmasından dolayı, atık sularda meydana gelen kirletici maddelerin çoğunu, ek biyolojik verimlilik için kullanılacak zararsız yan ürünlere veya temel besin maddelerine dönüştürebilir. Bu dönüşümler, güneşin, rüzgârın, toprağın, bitkilerin ve hayvanların doğal enerjileriyle sulak alanın arazi alanı sayesinde gerçekleştirilir. Sulak alanlar doğaya, besin ağı üzerinden, besin maddelerini biyofilm ve perifiton yoluyla biyokütleyle çevirerek yön verirler. Doğadaki besin maddelerini, besin ve madde döngülerinde biyolojik olarak dönüştüren sulak alanların bu aktif fonksiyonuna “sulak alan etkisi” denir [37, 38, 39, 40].

Biyomimikri, doğadan ilham alarak ya da doğayı taklit ederek insan problemleri ve ihtiyaçları için çözüm üreten bir disiplindir. Bu disiplin sadece elde edilen somut ürünün ya da çözümün değil kullanılan sistemi ve aşamaların tamamını içermektedir. Sürdürülebilir ekosistemlerin tasarlanması ve inşasında yeni bir ekolojik mühendislik alanıdır. Biyomimikri doğayı kullanmaktan ziyade onun gibi davranmayı amaçlamıştır [41].

Doğayı biyomimikri ile taklit eden yapay sulak alanlar ve yüzer sulak alanlar atık sulardan veya ötrofik hale gelmiş su kaynaklarından besin maddelerinin giderimini artırarak konsantre sulak alan etkisi oluştururlar.

3.1.1. Yapay Sulak Alan

Doğal sulak alanları taklit eden insan yapımı ekosistemlerdir. Yapay sulak alanlar doğal sulak alan sistemlerine benzer şekilde özel olarak inşa edilmiş, atık sulardan kirletici unsurları gidermek için doğal alanlarda rastlanan bitki, toprak ve ilgili mikroorganizmaları içeren sistemlerdir. Yapay sulak alan sistemleri ile su seviyesi ve akım kontrol altında tutularak arıtma performansı yüksek su arıtma sistemleri inşa edilebilir. Yapay sulak alanlar için, doğal ekosistem için getirilen kısıtlamalar olmadığı gibi doğal sulak alanların sahip olduğu arıtma kapasitesinin tamamına sahiptir [42].

Konvansiyonel arıtma teknolojileriyle kıyaslandığında daha düşük ilk yatırım, işletme ve bakım masraflarına sahip olması, doğal olarak çalışıp enerjiye bağımlı olmaması gibi özellikleriyle ve azot, fosfor, iz organikler, iz elementler ve fekal koliformların gideriminde de oldukça iyi sonuçların elde edilmesinden dolayı yapay sulak alanlar son 20 yıl içerisinde tüm dünyada atıksu arıtımında çok geniş bir kullanım sahası bulmuştur. Bu tür sistemler küçük ve orta ölçekli yerleşim bölgeleri, ticari ve endüstri atıksuları için oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Uygun koşullar sağlandığı takdirde düşük enerji tüketimi ve düşük maliyetle nütrient, organik madde ve ağır metallerde yüksek giderim elde edilebilmektedir. Bu tür sistemler kullanılarak pek çok yerleşimin veya endüstriyel tesisin atıksu arıtma sorunu oldukça ekonomik bir biçimde çözülebilir. Özellikle arazinin bol ve ucuz olduğu yerlerde yapay sulak alan sistemlerinin uygulanması ekonomiktir [42].

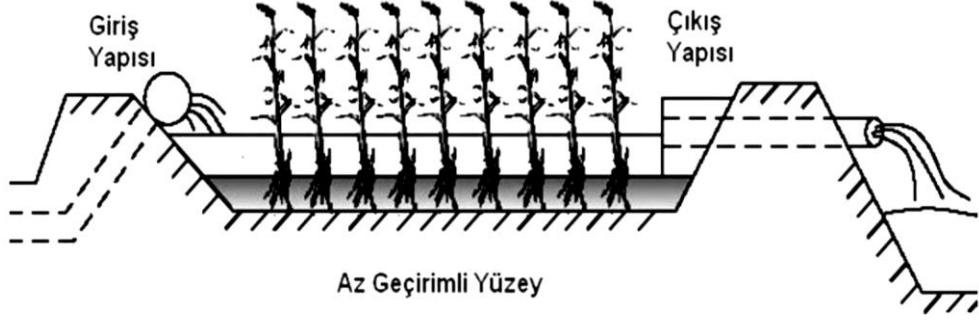
Günümüzde doğal arıtma sistemleri olarak da adlandırılan yapay sulak alanlar, konvansiyonel sistemlere oranla daha geniş alan gerektirip sistem performansı konvansiyonel sistemlerden daha az tutarlılık arz eder ve performansı değişen iklim koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Atıksu arıtımı ve su kalitesinin iyileştirilmesi için yapay sulak alanların üç türü geliştirilmiştir:

1. Serbest yüzey akımlı sulak alan sistemleri,
2. Yüzey altı akımlı sulak alan sistemleri ve
3. Hibrit sulak alan sistemleri [35, 42, 43, 44].

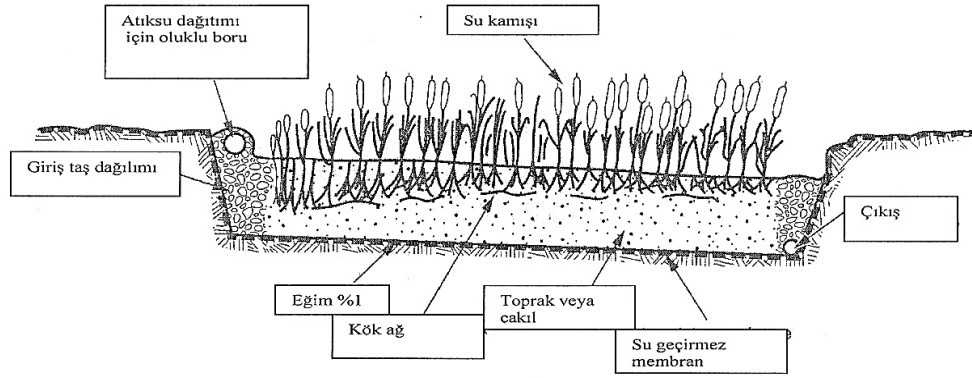
Serbest yüzey akımlı sistemler, sığ bir yatak veya kanal içinde uygun bir sucul vejetasyon içeren ve yüzeyinde çok derin olmayan bir su akışına sahip olan sistemlerdir (Şekil 5). Bu özelliği ile daha çok doğal sulak alanları andırırlar [35]. Bitkilerin sap, gövde ve kökleri ile su akımı yavaş ve düzenlidir. Serbest yüzey akışlı sistemlere bataklıklar örnek verilebilir. Hidrolojik rejimi doğal sulak alanlara benzemektedir. Bu sulak alanlar içerisinde tüm bitki türleri yaşayabilmektedir. Ön arıtmadan geçmiş atıksular bu sistemlere normal olarak sürekli olarak verilmekte, sucul bitkilerin sap, gövde ve köklerinden dolayı atıksu yavaşça akarken arıtma meydana gelmektedir. Serbest yüzey akımlı sulak alan sistemleri ikinci veya ileri

kademe arıtma için kullanıldığında, izafi olarak geçirimsiz tabana veya yüzey altı bariyerine sahip, sucul bitkili ve 0,1 – 0,6 m derinlikli paralel havuzlar veya kanallardan ibarettir [42].



Şekil 6. Serbest Yüzey Akımlı Sulak Alan Sistemi Şematik Gösterimi [42]

Yüzey altı akımlı sulak alan sistemlerinde ise su dolgu malzemeleri arasında akmakta olup atmosfer ile temas halinde değildir (Şekil 6). Bu sistemler, “kök bölgesi” veya “çakıl – su kamışı filtreleri” olarak da adlandırılmaktadır. Yüzey altı akımlı sulak alanlar, sucul bitkileri desteklemek için kum veya kaya ile doldurulmuş izafi olarak geçirimsiz tabanlı kanallardan veya hendeklerden ibarettir. Yüzey altı akımlı sistemlerde atıksu yüzey altından aktığı için çakılı ile temas halindedir. Bu nedenle bakterilerin büyümesi yüksek yüzey alanı ve daha yüksek organik yük ile artış gösterir. Temel giderim mekanizmaları; filtrasyon, çökelme ve mikrobiyolojik ayrışma serbest yüzey akımlılarla benzerdir. Serbest yüzey akımlı yapay sulak alanlara kıyasla daha hızlı arıtma gerçekleştirirler [42, 43].



Şekil 7. Yüzeysel Akımlı Sulak Alan Sistemi Şematik Gösterimi [42]

Hibrit sulak alan sistemleri, farklı tip yapay sulak alanların özel avantajlarından yararlanabilmek için entegre sistemler olarak birlikte kullanıldığı halidir. Hibrit sistemler daha çok serbest yüzeysel akımlı ve yüzeysel altı akımlı sistemlerin bir araya getirilerek, tek adımda giderilemeyen kirleticilerin birleştirilmiş sistemlerde giderilebilmesi için tasarlanırlar. Hibrit sistemlerde diğer sistemlerin avantajları birbirini tamamlamaktadır. Sularının temizlenmesinde amaca yönelik tasarımlarla entegre yapay sulak alan sistemleri başarı ile uygulanabilmektedir [44].

3.1.2. Yüzeysel Sulak Alan

Sulak alanlar, pek çok organizmaya yaşam alanı sağlaması, kirleticiler için filtre özelliği görmesi vb. özellikleri barındıran oldukça değerli su kaynaklarıdır. Ancak yeterli alanın bulunamaması, su kaynakları için yapay sulak alan tasarımı ve inşasını zorlaştırmaktadır. Bu noktada da klasik yapay sulak alanlara bir alternatif olarak yüzeysel sulak alanlar inşa edilebilmektedir [45, 46].

Yüzeysel sulak alanlar yine doğal sulak alanları ve bunlarda bulunan yüzen adaları taklit eden insan yapımı ekosistemlerdir. Yüzen ada coğrafyanın yeni bir araştırma konusu ve terimidir. Genel bir ifade ile yüzen adalar, göller içerisinde muhtelif boyutlarda bir veya birçok parçadan oluşan yüzeysel kara/toprak parçası kütleleridir. Kütleler bitki köklerinin sıkıca örülmesinden ve torf oluşumundan oluşur. Bitki köklerinin sıkıca sarılması sonucu örülen bu yapı toprak oluşumu ile beraber suyun kaldırma kuvveti etkisi ile yüzeysel hale gelerek ilgi çekici bir yapı olan bu oluşumları

meydana getirir. Yüzme toprak arasında hapsedilmiş gazların (aerobik koşullarda; azot-N ve karbondioksit-CO₂, anoksik koşullarda; metan-CH₄) ve bitki köklerindeki (havalandırma parankimasi) havanın sunucudur [37, 47, 48].

Yüzen adalar, göl kenarlarındaki bitki ve köklerin aralarına aldıkları diğer materyallerle (kil, kum, humus) birlikte su yüzeyinde bir kıyı ilerlemesi şeklinde gelişen yaklaşık bir metrelik kütlelerin birazda dış etkiler sayesinde kopmasıyla ilgilidir. Gelişen yüzer adalarda kütlelerin kalınlığı artarken, adayı oluşturan yapıda kil, kum ve toprak oranı yükselmektedir. Yüzer ada, gelişimin son safhasına doğru göl yüzeyini kaplayacak şekilde yüzen kütlelerin büyümesi ve örtü kalınlığının artması şeklinde turbalık oluşturabilir [47, 48]

Sulak alanlar ve yüzen ada araştırmaları ekosistem analizi ve biyocoğrafya çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadır. 2000’li yıllardan itibaren yoğunlaşan çalışmalarda Türkiye’de de yerel olarak bilinmesine karşın ilan edilmemiş olan çok sayıda ilimizde doğal yüzen adalar keşfedilmiştir. Ülkemizin en çok tanınan ve karakteristik yüzen adaları;

1. Turnalar Gölü yüzen adaları (Solhan - Bingöl) (Şekil 7),
2. Gölbel Gölü yüzen adaları (Osmancık - Çorum) (Şekil 8),
3. Ladik Gölü yüzen adaları (Samsun),
4. Çat Barajı yüzen adaları (Çelikhan - Adıyaman),
5. Mezra Gölü yüzen adaları (Yusufeli - Artvin),
6. Karakuyu Gölü yüzen adaları (Dinar - Afyon),
7. Saklıgöl yüzen adaları (Honaz - Denizli),
8. Büyük Göl yüzen adaları (Çamlıhemşin - Rize),
9. Zök Gölü yüzen adalarıdır (Tortum - Erzurum) [47, 48, 49, 50].



Şekil 8. Turnalar Gölü Yüzen Adaları (Solhan - Bingöl) [51]

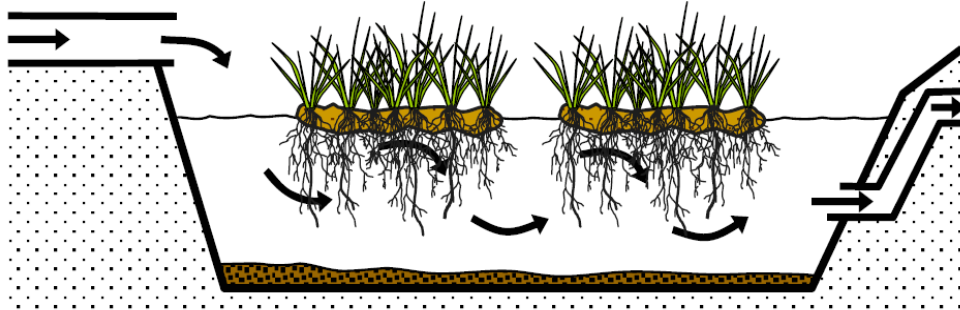


Şekil 9. Gölbel Gölü ve Yüzen Adaları (Osmancık - Çorum) [48]

Yüzen adalara yöre sakinleri yerel olarak kopak, hopak, hopal, gezen ada, saz ada, sazak gibi isimler vermektedir. Yüzen adaların gölün dip kısmıyla bağlantısı olmadığından rüzgar ve akıntıyla sürekli yer değiştirdikleri bilinmektedir. Yüzen

adaların gölde kuş yaşamı, balıkların habitatları oldukları gibi bilgilere de sahip olan yöre sakinleri yüzen adalardan önemli ölçüde yararlanmaktadır. Özellikle yüzen adaların otlak alanı olarak değerlendirilmesi, yüzen adalardan kamış elde edilmesi bunlardan birkaçı olarak sıralanabilir. Ancak ilginç doğal oluşum oldukları ve doğal güzelliklerinden dolayı da estetik ve turistik önemleri olduğu için korunmaları gerekmektedir [48, 49].

Yüzen sulak alanlarda, yüzen adalara benzer şekilde bitkileri hidroponik (toprak kullanmadan su içinde mineral besin çözeltileri kullanılarak yapılan bitki yetiştirme yöntemi) olarak yetiştiren yüzen alanlar/sallar kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sallar, ıslak su yüzeyinde yüzer ve sudaki kirleticileri örneğin, besin maddeleri, tortu ve metalleri filtreleyerek, tüketerek veya parçalayarak su kalitesini iyileştirmek için kullanılabilirler (Şekil 9). Yüzen sulak alanlar, yayılı kirliliğin sebep olduğu sudaki besin kirliliğini azaltmak için nispeten düşük maliyetli ve sürdürülebilir şekilde tasarlanmış iyi yönetim uygulaması (best management practice) olarak tercih edilebilirler. İyi yönetim uygulamaları, yerüstü ve yeraltı su kaynaklarını havzalarda arazi kullanım faaliyetleri sonucu meydana gelen yayılı kaynaklı kirlilikten korumak veya su kaynaklarına gelen yayılı kirliliği azaltmak amacı ile kullanılan yöntemler, yapılar ve uygulamalardır. Yüzer sulak alanların bir iyi yönetim uygulaması olarak etkinliklerinin değerlendirilmesi, devam eden araştırmalara konu olmaktadır. Doğal yüzen ada sistemlerinden, yüzer sulak alanların olası uzun vadeli yapısına ve dinamiklerine dair pek çok bilgi sahibi olunabilir [52].



Şekil 10. Yüzen Sulak Alan Sistemi Şematik Gösterimi [53]

Yüzen sulak alanlar ile su kalitesini iyileştirmede üç kirletici azaltma mekanizması tespit edilmiştir:

1. Bitkiler, biyolojik olarak sudan doğrudan kirleticileri, özellikle besin maddelerini alırlar.
2. Yüzen sallar ve bitki kök sistemleri üzerinde büyüyen mikroorganizmalar mikrobiyal ayrışma yoluyla suda organik maddeleri parçalayıp tüketirler.
3. Kök sistemleri, tortuları ve ilgili kirleticileri filtreler.

Bu kirletici temizleme mekanizmaları, kirleticilerin su kaynaklarından arındırılması için düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir yöntem olabilecek bir sistem oluşturur [52].

4. YÜZER SULAK ALAN SİSTEMLERİ İLE NÜTRİYENT GİDERİMİ

Yüzer sulak alan, bir su kaynağının yüzeyinde yer alan üzerinde hidroponik olarak büyüyen sulak alan bitkilerinden oluşan yeni bir sulak alan teknolojisidir. Yüzer sulak alanlar, sığ su derinliği gereksinimi tarafından kısıtlanmadan sucul bitkilerin faydalı yönlerini entegre ederek geleneksel arıtma sistemlerinin performansını potansiyel olarak geliştirmenin bir yolunu temsil etmektedir. Doğal süreçleri taklit ettikleri için, su kalitesinin iyileştirilmesi, minimum teknik bakım gerektirerek nispeten pasif olarak sağlanmaktadır [53].

Bitki, su seviyesinin üzerinde kalırken, kökleri yüzer yapıdan ve su sütunundan aşağı doğru büyür. Bu şekilde, bitkiler topraksız olarak besinlerini doğrudan su kolonundan alarak büyürler. Yüzen yapının altında, asılı kökler ağı, rizomlar (köksap) ve ekli mikrobiyal biyofilmler oluşur. Bu asılı kök biyofilm ağı, biyokimyasal süreçlerin yanı sıra, filtreleme ve yakalama gibi fiziksel süreçler için biyolojik olarak aktif bir yüzey alanı sağlar. Böylece, genel bir yüzer sulak alan tasarım hedefi kök biyofilm ağı ile sistemden geçen kirli su arasındaki teması en üst düzeye çıkarmaktır [53].

Yüzer sulak alanlar, dokuma, geri dönüşümlü maddeler, kum, bitki lifleri gibi biyomalzemeler ve plastik materyalden oluşmaktadır. Bitki örtüsü, yüzer alan üzerine ya doğrudan ya da bir miktar torf ve malç (toprak örtücü her türlü malzeme) ile dikilir. Yüzer alan oluşturulduktan sonra su kütesinin üzerine bırakılır. Suda uygun yere getirildiğinde bir dizi hat ve çapayla yerine sabitlenir. Bitkilerin gövdesi su seviyesinin üzerindeyken kökleri plastik malzemedan geçerek, çeşitli mikroorganizmalar için mükemmel habitat yaratarak yüzer yapının altına doğru su kolonunda büyür. Tutunacakları toprağın olmaması nedeniyle kökler bitki için gereken nütrienti doğrudan sudan alırlar [45, 46, 54].

Yüzer sulak alan göl içerisinde yerleştirildiğinde özellikle fosfor olmak üzere nütrientler için bir “yutak-filtre” vazifesi görür. Su kolonunda yüzer vaziyetteki bitki kökleri tarafından tutulan nütrientler rizofiltrasyon yoluyla (kök bölgesi filtrasyonu), kökteki biyokütleyle katılır ya da gövde ve yapraklara taşınırlar veya çökelirler. Köklerdeki tüysü yapılar aerobik mikroorganizmaların faaliyetleri için gerekli ortamı oluşturur. Biyosentez (ya da biyokütleyle katılım) azot ve fosforun her ikisi için de geçerliyen fosforun uzaklaştırılmasındaki temel proses çökeldir. Bu çökeldir de rizosferdeki demir, alüminyum ve kalsiyum bileşikleri yoluyla gerçekleşir. Amonyum azotunun uzaklaştırılmasında bitkiler tarafından alınım, anaerobik amonyum oksidasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon rol oynar [46, 54, 55].

Yüzer alanın içindeki ve dibindeki mikrobiyal canlılar tarafından biyosentez için özümlenen azot ve fosfor biyokütleyle dâhil olur. Bu biyokütlenin bir kısmı yüzer alandaki vejetasyon, bir kısmı diğer mikroorganizmalar, bir kısmı ise yüzer alan üzerinde bulunabilecek omurgasızlar gibi daha büyük canlılardır. Bu nütrientlerin bir bölümü balıklar, kuşlar gibi daha yüksek yapıllı canlılara dâhil olarak sulak alandan uzaklaşabilir [45, 46, 53].

Değişken şartlar dikkate alınarak uygun şekilde kurulmaları halinde, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyetlerle yüzer sulak alanlar su kolonundan nütrient gideriminde oldukça etkin bir yöntemdir. Yüzer sulak alandaki plastik materyal bitkilerin köklerini donmaktan koruduğundan kışın da göl yüzeyinde kalabilir. Ülkemiz durgun su kaynaklarının soğuk kış şartlarında sıklıkla donduğu da göze alınırsa sürekli kullanım sağlayabilmesi önemli bir avantajdır. Kurulum, işletme ve

bakım maliyeti düşük bir yöntemdir. Yüzer alan üzerindeki bitkiler ekildikten sonra üzerinde biyokütlenin oluşumunun sağlanması ve yüzer alan üzerine iyi şekilde entegre olması için en az 2-3 büyüme mevsimi süresince hasat edilmemesi gerekmektedir. Ancak yüzer alan üzerindeki vejetasyon aşırı düzeyde artarsa su kolonundaki oksijen seviyesi düşer ve sediment üzerinde anaerobik koşullar oluşur. Nihayetinde, aşırı büyümeyi engellemek, ek büyümeyi teşvik etmek ve tutulan nütrientin uzaklaştırılması için bitkiler birkaç yıl sonra hasat edilmelidir. Ancak, hasat sadece ada materyalinin üzerindeki bitki biyokütlesine odaklanmalıdır. Mikrobiyal habitatı korumak için kök kompleksi sağlam kalmalıdır. Bu açıdan değerlendirildiğinde sürekli işçilikten çok periyodik işgücü gerektirir [45, 46].

Yüzer sulak alanlar, yayılı kirliliğin sebep olduğu sudaki besin kirliliğini azaltmak için alandaki veya diğer çevresel faktörlerdeki sınırlamalar nedeniyle mümkün olmayan havza bazlı iyi yönetim uygulamaları için de etkili bir alternatiftir. Besin giderimine ek olarak, yüzer sulak alanlar ayrıca yem ve av balıkları gibi istenen organizmalar için habitat oluşturabilir ve aynı zamanda da biyoçeşitliliği ve göl ekosisteminin genel estetiğini de arttırabilir [45].

Besin maddelerinin ve metallerin atık sudan uzaklaştırılması, yüzer sulak alanlarda geleneksel yapay sulak alanlara göre %20-40 daha yüksektir. Özellikle azottan arındırma verimliliği, su kimyası üzerinde daha sıkı kontrol ile daha da artırılabilir (havalandırma, CaCO₃ eklenmesi, karbon kaynağı eklenmesi gibi) [56]. Aerobik havzalar için yüzer sulak alanlar %20 kapsama alanı ile planlanabilir. Suni havalandırma bulunan anaerobik havzalar veya aerobik havzalar için %100 kapsamada pekala yapılabilir. Ama su yüzeyini kapsama alanı için bir genelleme yapmak, bitki çeşidi, iklim şartları, kirlenme türü ve özellikleri gibi çok fazla değişken parametre olduğu için mümkün değildir. Yüzer sulak alanın tasarımı ve havza suyu kimyasının kontrolü, tedavi veriminin optimize edilmesi için önemlidir.

Yüzer sulak alanlarla ilgili olarak bazı kısıtlamalar da mevcuttur. Yüzer sulak alanların yaklaşık ömrü 15-20 yıl olarak tahmin edilmektedir. Amerika'daki bazı göllerde yapılan izlemelerde bu sürenin daha da az olabileceği görülmüştür. Genel olarak uygun maliyetli bir uygulama olmakla birlikte, su kolonundaki fosfor konsantrasyonu 0,1 mg/l ve üzeri durgun sularda (yani hipertrofik durum) çok daha

maliyet etkin bir yöntem olduğu belirtilmektedir. Mmkunse yzer sulak alanlar, ntrient aasından zengin suyun gkle giriş noktalarının önüne ya da bitişine yerleştirilir [49]. Yzer sulak alanlar için gereken su derinliği değişmekle beraber, sucul bitki köklerinin göl dibindeki bentik yapıya ulaşmaması için 0,8-1 m derinliğin sağlanması gerekmektedir. Aksi takdirde bitki kökleri sedimente tutunarak yzer yapının batmasına neden olabilir [46, 53].

4.1. Süreçler

Yzer sulak alanlar, diğer sulak alanlardaki arıtma sistemlerinde olduğu gibi, kirleticileri dört ana süreç ile giderirler: fiziksel, biyokimyasal, mikrobiyal ve bitkiler. Bu süreçler ile yzer sulak alanlarda, bitki köklerinin oluşturduğu daha geniş yüzey alanı sayesinde çökeltme (filtreleme yoluyla), mikrobiyolojik ayrıştırma, nitrifikasyon ve denitrifikasyon hızlarında artma sağlanır ve pH ve çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonunda değişime sebebiyet verir [56].

Su kolonundaki askıda kalan kökler, besinleri biyosentez yoluyla dokularına dahil ederek veya rizofiltrasyonun neden olduğu çökeltme yoluyla fiziksel olarak çıkarabilirler. Bitki alım kapasitesi bitki türlerine, büyüme hızına, suyun altındaki dokulardan su üstü dokulara transfer faktörüne, fotosentez oranlarına ve kök tipleri gibi anatomik ve fizyolojik özelliklere bağlıdır [45, 56].

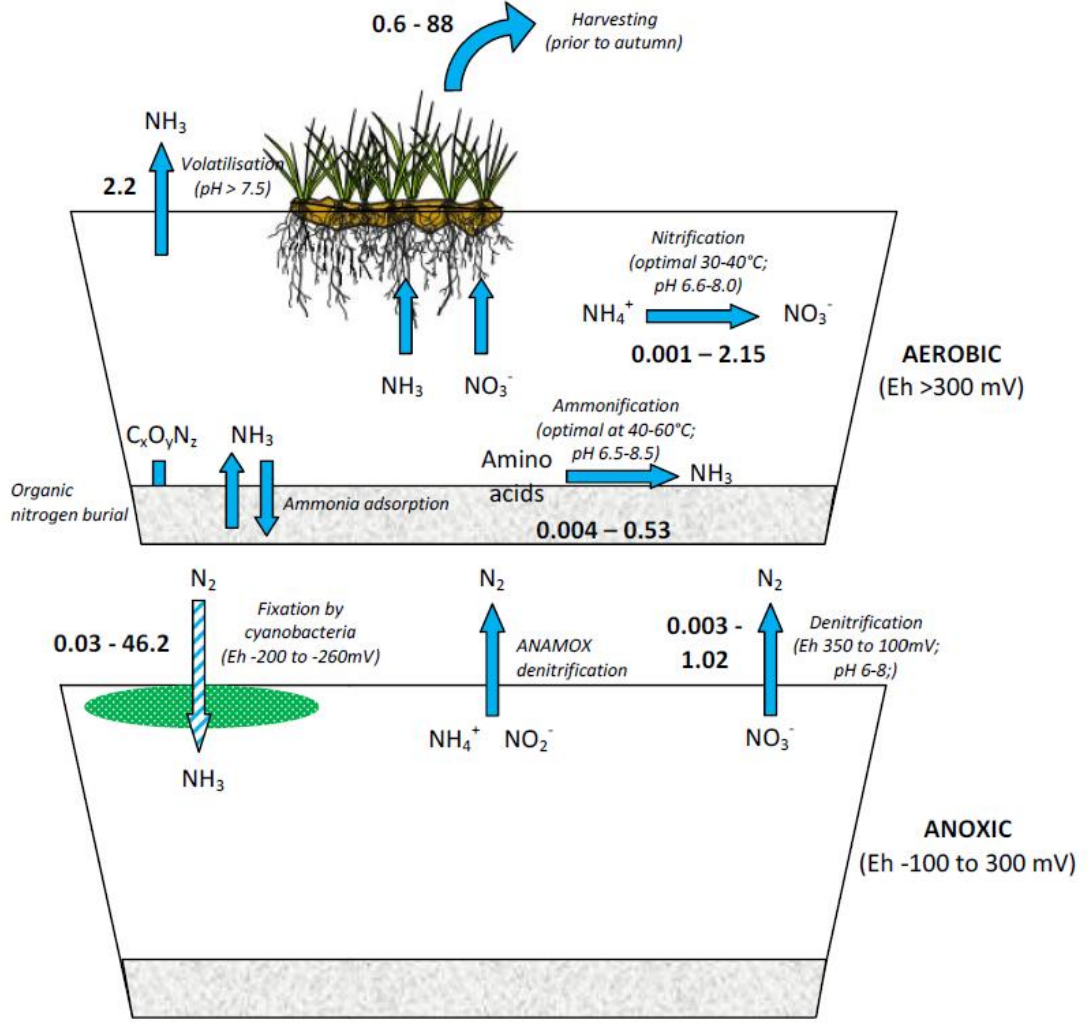
Rizosfer etkisi, su kaynaklarında yer alan bazı mikroorganizmaların, kemotaksis (kimyasal yönelim hareketi) tarafından etkilenen kök veya rizom yüzeyine yapışmasını ve tekrar eden bir proliferasyon prosesi (hücre çoğalması) yoluyla biyofilmin oluşturulmasını gerektirir. Bitkilerin üst biyokütlesinden rizom ve kök yüzeyine aktarılan oksijen ve çeşitli kimyasallar, yzer sulak alan altında mutualist bir konsorsiyum için substrat oluştururlar. Bu nedenle, uzaklaştırma verimliliği büyük ölçüde, mantarların, bakterilerin ve asılı kökler boyunca yer alan yararlı alglerin oluşturduğu biyofilm metabolizmasına bağlıdır. Dolayısıyla, besin giderim verimliliğini artırmak için, besin degradasyonunu arttıran çeşitli bakteri kolonileri ile bir bitki simbiyozu kurmak çok önemlidir [45].

Doğal arıtım sistemlerinde, kirleticilerin aerobik ayrışmasına bağlı olarak BOİ veya KOİ gideriminin oksijen transfer hızı ile yüksek oranda ilişkili olduğu bilinmektedir. Bitkilerin havalandırma parankiması (aerenkima) köklere oksijen taşınması ve kök sisteminden sızıntı yoluyla rizosferde aerobik koşullar yaratmasıyla bilinir. Bununla birlikte bazı çalışmalarda, yüzer sulak alanlarla ekili birimlerin kontrol guruplarına göre daha düşük ÇO konsantrasyonları içerdikleri de bulunmuştur. Bu farklılığın hem bitki kökleri hem de biyofilm açısından daha yüksek solunum hızlarına dayandığı ve solunumdaki oksijen ihtiyacının köklere taşınan oksijen salınımdan önemli ölçüde daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır [45].

4.1.1. Azot Giderimi

Su kaynaklarında azot; partiküler, çözülmüş, organik ve inorganik azot formları halinde bulunur. Yüzer sulak alanlarda önemli parametrelerden biri olan azotun giderimi, bitkilerce ve diğer yaşayan organizmalarca alım, nitrifikasyon, denitrifikasyon, çökeltme, NH_3 buharlaşması ve NH_4^+ için katyon değişimi yolu ile olmaktadır.

Nitrosomonas'lar aracılığıyla amonyum aerobik reaksiyonlarla nitrite oksitlenir. Nitrit ise daha sonra Nitrobakteriler aracılığıyla yine aerobik olarak nitrate oksitlenir. Nitratlar ise denitrifikasyon bakterileri olan Pseudomonas spp. vb. diğer bakteriler aracılığıyla gaz ürünlere (N_2 gibi) dönüştürülür. Bazı bakteriler (Rhizobium ve Cyanobacteria) atmosferdeki azot molekülündeki güçlü üçlü bağları kırarak amonyumu bünyelerine alırlar. Bitkiler biyofilmin oluşmasını sağladıklarından ve bu bölgelere oksijen temin ettiklerinden kök bölgesindeki nitrifikasyonla azot gideriminde önemli bir rol oynarlar. Bitkiler aynı zamanda azotun yalnızca küçük bir kısmını da bünyelerine alarak gidermektedirler. Bitkilerin azot alımı, mikrobiyal denitrifikasyona (%61-63'e kadar) kıyasla düşüktür (%6-8'e kadar). Bitkiler tarafından kullanılabilen azot formları NH_4^+ ve NO_3^- 'dir. Bitkilerce alınan NO_3^- önce nitrit (NO_2^-)'e, daha sonra amonyak (NH_3)'a dönüştürülür. İlk aşamada Nitrat Redüktaz ve ikinci aşamada Nitrit Redüktaz enzimleri görev yapar. Sudan alınan NH_4^+ ve NO_3^- amino asitler ve proteinlerin yapımında kullanılırlar [57, 58]. Aşağıda yüzer sulak alanların azot giderim döngüsü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 11. Yüzer Sulak Alanlarda Azot Giderimi Şematik Gösterimi [56]

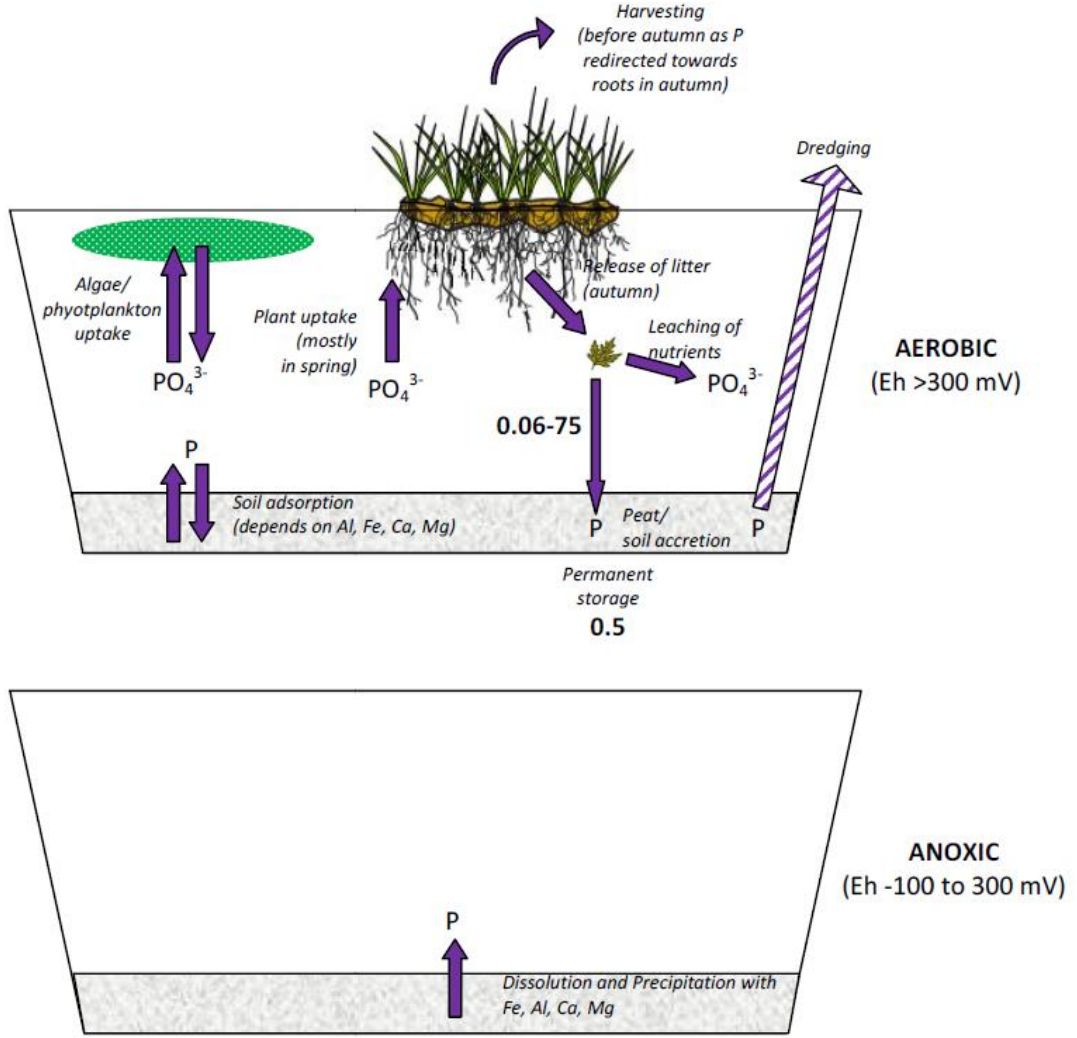
Sulak alanlarda azot dönüşümleri çok karmaşık ve dinamik bir süreçtir ve birçok faktör dolaylı ya da dolaysız yoldan performanslar üzerine etkili olabilir. Sulak alanlarda azot giderim verimi genellikle diğer parametrelere göre düşüktür. Çünkü aerobik ortamda gerçekleşen nitrifikasyon süreci, bitkiler suyu çok fazla havalandıramadıkları için yavaştır. Yüzer sulak alanlar ise bitkilerin çok daha geniş biyofilm alanı oluşturmasını sağladıklarından ve bu bölgelere oksijen temin ettiklerinden, kök bölgesindeki nitrifikasyonla azot gideriminde önemli bir rol oynarlar. Geleneksel sulak alanlarda NH₄ giderim oranları Avrupa'da %35 ile %50 arasında değişmektedir. Yüzer sulak alanlarda ise NH₄ için %-45 ile %75 ve toplam azot için %36 ile %40 arasında değişen giderim oranları bildirilmiştir [57, 58].

4.1.2. Fosfor Giderimi

Yüzer sulak alanlarda diğer önemli parametre olan fosforun en temel giderimi; adsorpsiyon, filtrasyon, yerçekimiyle fiziksel çökeltme, kompleks oluşumuyla kimyasal çökeltme, mikrobiyal ve bitki bünyesine alınma yöntemleri ile yapılmaktadır. Su kaynaklarında fosfor genellikle çözülmüş ortofosfat (PO_4^{3-}) veya organik fosfor olarak bulunur. Durgun sularda bulunan fosforun büyük bir kısmı (%90) organik fosfor olarak, canlıların hücre yapısında ve ölü organik maddeler içerisinde mevcuttur [56].

Fosfor, bitkinin gelişimi için gerekli bir makro bitki besin elementidir. Su ekosisteminde sınırlayıcı bir faktördür. Bu sebeple eser miktarlarda bile karışımı su ekosistemi üzerinde önemli etkiler yapar. Fosforun en hızlı bünyeye alınımı bakteri, alg, mantar gibi mikroskobik canlılarla olmaktadır. Çünkü bu canlılar çok hızlı büyür ve gelişir [56].

Çeşitli çalışmalar göstermektedir ki 23 m²'lik bir yüzer sulak alandan yıllık yaklaşık 4,5 kg fosfor uzaklaştırılmaktadır. Yaklaşık 0,45 kg fosforun 500 kg ıslak hacimde alg biyokütlesi oluşturduğu hesaba katılırsa, 23 m²'lik bir yüzer sulak alan, 5 tona yakın ıslak hacimde alg biyokütlesi oluşumunu engeller. Esasen, yüzer sulak alanlar fosforu uyararak tersine alg oluşumunu yüzer alanın üzerindeki daha arzu edilen doğal sulak alan bitki örtüsüne yönlendirir [45, 53]. Sulak alanlarda; tüm fosfor formlarının birbirine dönüşümü için uygun bir ortam sağlanabilir. Aşağıda yüzer sulak alanların fosfor giderim döngüsü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 12. Yüzer Sulak Alanlarda Fosfor Giderimi Şematik Gösterimi [56]

- **P Çöktürülmesi ve Turba Oluşumu**

Sulak alanlarda başlıca fosfor giderim mekanizması; birikim (toprakta/turbalıkta) ve toprak yüzeyine tutunmadır (adsorpsiyon). Killi topraklarda fosfor adsorpsiyon kapasitesi yüksek olup, düşük pH'larda giderim artmaktadır. Asidik topraklarda alüminyum (Al) ve demir (Fe); alkali topraklarda kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) fosforu bağlamaya yardımcı olur. Diğer taraftan, adsorpsiyon oksijenli (aerobik) ortamda gerçekleşen tersinebilir bir mekanizma (desorpsiyon) olup, yüzer sulak alan bitkilerinde hasat veya dip tarama yapılmadığında bir süre sonra fosfor giderimi durabilir. Anoksik koşullarda toprakta bulunan metaller çözülmüş

forma geçerek toprakta bağlı formda olan fosforun salınımına neden olur. Anaerobik (oksijensiz) koşullarda, topraktaki sülfat (SO_4) indirgenir (demir sülfür-FeS oluşumuna) ve bu durum fosforun demir ile mineralizasyonunu engelleyerek su formunda kalmasına sebep olur. Dolayısıyla, anaerobik ortamda fosfor adsorpsiyonu/giderimi azalır [56, 58].

Yüzer sulak alanlar, bitki köklerinin ek filtre işlevi görmesi ve parçacıkları dibe çöktürmesinin yanısıra; rüzgardan oluşan akımı ve suyun hareketini azaltarak çöktürme işlevini arttırmaktadır. Hareketin azalması, su kolonuna tortu bağlı fosforun yeniden süspansiyonunun önlenmesi için gereklidir, ancak akımlardaki bu azalma suyun anoksik hale gelme riskine de sebep olabilir. Literatürde konvansiyonel sulak alanlar için ortalama fosfor giderim oranları %40-60 ($45-75 \text{ g/m}^2/\text{yıl}$) arasında değişmektedir. Yüzer sulak alanlarda P'nin uzaklaştırılması genellikle %81'e ulaşan köklerin ek filtreleme özelliklerinden dolayı daha yüksektir [56].

- **Bitki Alımı**

Bitkiler büyük miktarda P iyonuna ihtiyaç duyarlar. Buna karşın P'nin bitki alımı sadece %6'ya ulaşmaktadır. Eğer bir yüzer sulak alanın %80'e varan bir P giderimi varsa, bu yaklaşık %74'nün baskın olarak diğer proseslerle giderildiği veya depolanmasıyla kaldırıldığı anlamına gelir. Fosfor, demir ve alüminyum oksit gibi mineraller ile güçlü kimyasal bağlar oluşturur ve bu nedenle bitki kökleri tarafından kolayca alınması engellenir. Buna karşı bitki kökleri, organik asitler ve hidrojen iyonları üretip salarak, demir ve alüminyum iyonlarını bağlar. Böylece onlar tarafından tutulan fosfatın serbest kalmasına yardımcı olurlar. Ayrıca kök dallanmasını da artırarak kökün emme yüzeyinin en üst seviyeye çıkması sağlanır. Bunun yanısıra kökler yine organik bileşiklerden fosfatı ayırıp serbest hale getiren enzimleri de salgırlar. Daha da önemlisi bitki köklerinin hücre zarları taşıyıcı proteinler içerirler. Bu taşıyıcı proteinler sudaki çok az miktardaki fosfatı bile bağlayıp hücre içine alabilen bir yapıya sahiptir. Fosfor miktarı düşük seviyede olunca, köklerdeki hücre zarlarında fosfat taşıyıcı proteinlerin miktarında bir artış olur. Köklerdeki bu proteinler özelleşmiş ve ileri derecede etkin proteinlerdir [56, 59].

Bitki alımındaki P değerinin büyük bir kısmının sistematik olarak sulak alan sisteminden kalıcı olarak uzaklaştırılması da zordur. Çünkü P bitkide çoğunlukla köklerde depolanır veya su kaynağına tekrar girebilir. Konvansiyonel sulak alanlardaki bitkilerin hasat edilmesinin yaklaşık olarak 10-20 g/m²/yıl ile yararlı olduğu ve bu alımın büyüme oranıyla sınırlı olmadığı düşünölmektedir. Yüzer sulak alanlar, kökleri doğrudan su kaynağı içinde askıya alındığından dolayı daha fazla P emebilir ve bitki kökleri hasat için daha erişilebilirdir. Ancak kökleri de içine alan bir hasat, oluşun biyofilm tabakasına da zarar verebileceğinden sistemi geriye götürebilmektedir [55, 56].

- **Mikrobiyal ve Algal Alım**

P döngüsünde toprakta, rizosferde ve su kolonunda bulunan bakteri ve algler önemlidir. Doğal sulak alanlarda mikroorganizmaların P tutması çok hızlıdır, fakat çok az depolarlar. Yüzer sulak alanların daha yüksek yüzey alanına ve sonuç olarak daha yüksek mikrobiyal kütleyle sahip olması ile geleneksel sulak alanlara göre daha büyük bir P giderimi sağlamaktadır. Küçük bir kısmı ise bakterilerin meydana getirdiğı yapışkan biyofilm tabakasının yüzeyine tutunmaktadır [56].

- **Balık Alımı**

Sulak alanlarda balıklar genellikle düşük oksijen seviyelerine uyum sağlamaları için seçilirler, örneğın; *Gambusia affinis* (sivrisinek balıkları) veya *Umbra limi* gibi. Yüzer sulak alanlar balık türleri için artun yaşam alanı ve besin kaynağı sağlamaktadır. Bu da besin zincirinin ortalarında yer alan balıklar için daha fazla fosfor depolanması demektir. Balıklar, yosun, protozoa, fitoplankton, zooplankton, omurgasız ve omurgasız larvalarının yanısıra perifiton (yosun, siyanobakteri, heterotrofik mikroorganizmalar, detritus gibi) tüketirler ve bazı türleri de balıkçıl olabilmektedir. Kalıcı fosfor giderimi için balıkların biyokütlelerinin sistemden çıkarılması gerekmektedir [56].

4.2. Tasarım Faktörleri

Yüzer sulak alanların temel amacı, su kalitesinin artırılmasıdır. Ancak, yerinde yapılan (in situ) uygulamalar, balıklar ve kuşlar için yaşam alanı oluşturma, litoral

bölge koruma, peyzaj iyileştirme ve turizm güçlendirme gibi ek hedeflere de hizmet edebilir.

Yüzer sulak alanlar özel olarak tasarlanabilirler ya da şu anda çalışan açık su arıtma alanlarında güçlendirme işlemlerine yerleştirilebilirler. Yapılan çalışmaların çoğunluğu mikrokozim/mezokozim (sınırlı sayıda değişkene odaklanmak için kullanılan bir biyolojik sistem modeli) gibi simüle ortamlar ölçeğinde tasarlanmıştır. Pilot ölçekte bazı çalışmalar yapılmış ama tam ölçekli saha uygulamalarına ise daha az ilgi gösterilmiştir. En önemli tasarım faktörleri arasında bitki örtüsü, bitki örtüsünün yüzdesi, büyüme ortamı, derinlik ve yüzdürme elde etmek için yöntemler yer alır [55, 56].

4.2.1. Bitki Türlerini Seçmek

Uygun bitki seçimi uygulamanın başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle uygulanacak bitkilerin alanın iklim ve coğrafik koşullarına uyum sağlaması, bu uyumu sağlarken de nütrient gideriminde etkin olması önem taşımaktadır [46, 55].

Yüzer sulak alanlarda tipik olarak sadece yerli ve güçlü bitki örtüsü ekilir. Ancak, mümkün olduğunda çekici türde çiçeklerde kullanılabilir. Yüzer sulak alanlarda en sık kullanılan bitki farklı koşullara adaptasyon gösterebilen *Canna genus*'dur. *Eutrochium purpurem*, *Hibiscus moscheutos*, *Juncus effuses*, *Lobelia siphilitica*, *Rudbeckia laciniata*, *Sagattaria latifolia*, *Symphyotrichum novaeangliae*, *Vernonia noveboracensis*, *Asclepias syriaca*, *Asclepias tuberosa*, *Typha genus*, *Cyperus sp.*, *Lolium sp.*, *Zizania sp.* ve *Chrysopogon sp.* türleri de literatürde sıklıkla uygulanmıştır. Buna ek olarak zamanla, yüzer sulak alanda eğrelti otları ve yosunlar gibi başka arzu edilen türlerin de aşılandığı ve büyüdüğü görülmüştür. Nadiren de olsa, kanarya otları (*Senecio spp.*) gibi istenmeyen türlerde görülecektir, ancak bu tür türler gözlemlendiği anda çıkarılırsa, adayı ele geçirme konusunda büyük bir tehdit oluşturmazlar. Birçok istilacı türün yüksek besin alım oranlarına sahip olmasına rağmen, ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri veya habitat restorasyonunun maliyetleri diğer faydalarından daha önemli olabilir [53, 55, 56] Aşağıda çeşitli bitki türleri ile oluşturulmuş bir yüzer sulak alan görülmektedir.



Şekil 13. Çeşitli Bitki Deseni ile Oluşturulmuş Yüzer Sulak Alan [60]

Makrofit türü seçimi sadece kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında değil, aynı zamanda yerel ekosistem bütünlüğünde de kritik öneme sahiptir. Genel olarak belirlenen öncelikli seçim kriterleri:

- 1) Yerli ve yayılım yapmayan/istilacı olmayan türler,
- 2) Çok yıllık bitkiler,
- 3) Hidroponik bir ortamda gelişebilme yeteneğine sahip sulak alan bitkileri,
- 4) Aerenkima dokusuna (havalandırma parankiması) sahip bitkiler ve
- 5) Karasal bitki türleridir [55].

Yüzer sulak alanlarda bitki seçiminde peyzaj, botanik, ziraat gibi disiplinlere başvurularak yerli ve güçlü bitki örtüsü uzman görüşü ile belirlenerek ekilir. Su kaynağı özelinde yapılan makrofit izleme sonuçları değerlendirilebilir.

4.2.2. Büyüme Ortamı

Bazı araştırmalar substratta köklenmeyen bitkilerin, besin maddelerini doğrudan su kolonundan almaları ve böylece besin alımında daha iyi performans göstermeleri için zorlandığını, bunun kök gelişimini pozitif olarak artırdığını savunur. Bitkiler topraksız oldukları için besinlerini doğrudan su kolonundan alarak büyürler. Ancak ilk büyümeyi teşvik etmek ve biyofilm için yüzey oluşturmak için yüzer sulak

alan sistem kurulumunda toprak, hindistan cevizi lifi, pomza, perlit, bambu kömürü, kum, pirinç samanı ve kompost gibi büyüme ortamları kullanılmıştır. Pirinç samanı ortamı ile büyüme ortamı yokluğunun karşılaştırıldığı bir çalışmada TN giderimi açısından pirinç samanının daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Pirinç samanı, diğer biyo-materyaller gibi, nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemleri için gerekli olan oksijen ve karbon kaynağı olarak işlev gören kalın bir biyofilm oluşturabilir. Ayrıca büyüme ortamına ek olarak, konvansiyonel sulak alanlarda olduğu gibi büyüme ortamı substratına zeolit benzeri adsorptif materyallerin eklenmesi de potansiyeli olan bir araştırma konusudur [55]. Aşağıda farklı yüzer sulak alan kurulumu ve bunlarda kullanılan farklı büyüme ortamları görülmektedir.



Şekil 14. Yüzer Sulak Alan Kurulumu ve Farklı Büyüme Ortamı Kullanımı [61, 62]

4.2.3. Yüzdürme

Doğal yüzer sulak alanlarda, kendiliğinden kaldırma özelliği, iç içe geçmiş köklerin, rizomların, bitki kökleri arasındaki hava boşluklarının ve organik maddenin kendiliğinden yerleşen endojen oluşumu ile gerçekleşir. Yüzer sulak alanlarda da çerçevenin yüzdürülmesini sağlamak için çok sayıda alternatif yöntem test edilmiş ve patentli matlar Avrupa ve ABD'de ticari olarak satışa sunulmuştur. Bu matlar, yüzen dayanıklı malzemelerden oluşur ve ekim için gerekli deliklere sahiptir. Yüzen çerçevelerin veya sallarin yapımında en yaygın teknik, sızdırmaz plastik borular (PVC, PE ve PP'den yapılmış) veya polistiren köpük dubalar ile yapılır. Bununla birlikte, çerçeve konstrüksiyonu için ucuz ve etkili bir alternatif olarak bambu gibi doğal biyomalzemeler ile geri dönüşümlü malzemeler yüzen alan için kullanılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus yüzdürücü madde veya substrat materyalinin hidrofobik olması gerekmektedir. Çünkü bu tür maddeler hızlı bakteriyel yapışmayı arttırırken ve besinleri emerken, desorpsiyon neredeyse göz ardı edilebilir [55]. Aşağıda yüzdürme için farklı mat örnekleri görülmektedir.



Şekil 15. Yüzdürme için kullanılan Mat Örnekleri [62]

4.2.4. Derinlik

Göz önüne alınması gereken bir konuda, kök gelişimi ile ilgili uygun derinliğin seçilmesidir. Uygun su derinliklerinin seçimi ve bakımı hem bitkilerin sabitlenmesini önlemek hem de su dalgalanma esnekliğini kaybetmemek ve su sütunu üzerinde yeterli

bir kök örtüsü sağlamak için hayati öneme sahiptir. Kök derinliği, bitki türlerine ve su özelliklerine göre büyük ölçüde değişir. Ancak sucul bitki köklerinin göl dibindeki bentik yapıya ulaşmaması için minimum 0,8-1 m derinliğin sağlanması gerektiği bildirmiştir [53, 55].



Şekil 16. Yüzer Sulak Alanlarda Kök Gelişimi Örneği [63]

4.2.5. Kapsama Oranı

Su kaynağının üzerinin vejetasyon ile kaplanması sonucu gölgelenme yüzdesi artar ve bu çözülmüş oksijen konsantrasyonunu büyük ölçüde etkiler. Atmosferik difüzyon, bitki örtüsüyle örtülür. Ayrıca, bitki örtüsünün büyümesi su kolonuna ışığın girmesini önleyerek fotosentetik alglerin oluşumunu da önler. Yüzer sulak alan kurulumunda su sütunu tam gölgelenmeden oluşturulmalıdır. Çoğu çalışma göstermiştir ki tamamını kapsayarak yerleştirilmiş yüzer sulak alanlı tanklar, su üzerinde boşluk bırakılardan daha düşük ÇO içeriyordu. Bu nedenle kapsama alanı minimumda tutulmalıdır. Kapsama oranı, gözden geçirilen çalışmalar boyunca büyük ölçüde değişen bir parametredir. Birçok çalışma aerobik havzalar için %100 kapsama oranını kullanırken, diğerleri %50, hatta %20'den daha azını kullanmıştır. Ticari olarak yüzen sulak alanlar sağlayan bir şirket olan Floating Islands International, su kalitesini artırmak için %5-8'lik bir kapsama oranının yeterli olduğunu göstermektedir [55]. Ama su yüzeyini kapsama alanı için bir genelleme yapmak, bitki çeşidi, iklim şartları, kirlenme türü ve özellikleri gibi çok fazla değişken parametre olduğu için mümkün değildir.

4.3. Yüzer Sulak Alanların Potansiyel Avantajları

Yüzer sulak alanların çeşitli potansiyel avantajları aşağıda alt başlıklar altında sıralanmaktadır. Bahsedilecek, bu ek ekosistem fonksiyonları kesinlikle faydalı olsa da nütrient giderimi yüzer sulak alanların birincil kullanım amacıdır.

4.3.1. Nütrient Giderim Verimi

Besin maddelerinin ve metallerin atık sudan uzaklaştırılması, yüzer sulak alanlarda geleneksel yapay sulak alanlara göre %20-40 daha yüksektir. Yüzer yapının altında asılı köklerin, su ile doğrudan temas halinde olması nedeniyle, besin elementlerinin ve metaller gibi diğer elementlerin yüzer bir sulak alan sisteminde, yapay sulak alanlarla karşılaştırıldığında kayda değer miktarda daha yüksek olabileceği görülmektedir. Dahası, bitki kökleri alt çökeltilelerle veya toprakla temas halinde değildir ve yüzer yapının su sütununda bulunan besinlere yalnızca hidroponik bir ekim sistemi gibi erişebilir [53].

4.3.2. Artan Alan Verimliliği

Yüzer alan üzerindeki bitkiler büyürken altta da çok çeşitli mikroorganizmaların büyümesi için geniş bir yüzey alanı oluştururlar. Öyle ki 23 m²'lik bir yüzer sulak alanın yüzey alanı yaklaşık 1.000 m²'lik bir doğal sulak alanın yüzey alanına denk gelmektedir. Su kaynağının derinleşmesi de sisteminin etkin hacmini (geleneksel sulak alan sistemlerine kıyasla) artırır. Böylece su kaynağının alanı zorunlu olarak çok fazla artmadan sistem içinde harcadığı zaman miktarı (yani, hidrolik tutma süresi) uzar. Birçok kirletici, özellikle zamana bağlı kimyasal veya biyolojik reaksiyonları içerenler için hidrolik tutma süresi, tedavi seviyesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Yüzer sulak alanların geleneksel yapay sulak alanlardan daha büyük su derinliklerinde çalışabilmeleri, bazı kirleticiler için birim yüzey alanı başına daha yüksek bir arıtma seviyesi (daha yüksek alan verimliliği) sağlayabilecekleri anlamına gelir. Bu da istenen su kalitesi hedeflerine ulaşmak için ilave alan ihtiyacı ve ek kamulaştırma maliyeti gibi gereksinimlerin önüne geçecektir [45, 53].

4.3.3. Değişken Su Derinliklerine Toleransı

Yüzer sulak alanların başlıca avantajlarından biri de değişken su derinlikleri ile başa çıkma yetenekleridir. Su yüzeyinde yüzdüğünden, mat üzerindeki bitkiler, su seviyesindeki dalgalanmalardan etkilenmezler. Fırtına olayına bağlı su seviyesi dalgalanmalarını tolere edip dip noktasına demirlendikleri için veya su kaynağının çıkış yapısından geçerek zarar görmeyecekleri ya da kaybolmayacakları şekilde kıyı şeridinde bağlanabilirler. Bu ayrıca yüzer sulak alanın genişletilmiş bir havza çalışmasına olanak sağlayacak şekilde tasarlanmasına izin verir. Bu sayede büyük akış olayları izlenebilir ve birkaç gün için serbest bırakılabilir [53].

Yüzer sulak alanlar, derin ve dalgalı su seviyelerini tolere edebileceğinden geleneksel yüzeysel sulak alanların kullanımının önlenebileceği durumlarda da kullanılabilirler. Su derinliği değişebilir, ancak makrofid köklerinin bentik substrata yapışmasını önlemek için minimum 0,8-1 m su derinliğinin korunması önerilir.

4.3.4. Esnek Modüler Yapı

Yüzer sulak alanlar hemen hemen her su kaynağına, göl, gölet veya barajlara sığabilecek şekilde boyutlandırılabilirler. Tasarım esnekliği sağlayarak mevcut atıksu arıtma havuzlarının kirletici kaldırma etkinliğini arttırmak için eklenerek hibrit yapı oluşturabilirler.

Kullanılan malzeme ve yapıya bağlı olarak, yüzen sulak alanlar, performansın iyileştirilmesi için yüzer sulak alanların sayısının (ve % kaplamasının) kolayca arttırılabildiği modüler uygulamalar için özellikle uygundur. Suda oluşan fizikokimyasal koşullara, kaplanan su yüzeyinin yüzdesini değiştirerek etki etmek mümkündür. Örneğin, açık su bölgeleri hava difüzyonu ve fitoplanktonik fotosentez için daha büyük bir fırsat sağlar. Her ikisi de su konsantrasyonunun ÇO konsantrasyonunu ve pH değerini etkiler ve belirli tedavi süreçlerini teşvik etmek veya inhibe etmek için kullanılabilir [53].

4.3.5. Su Kaynaklarının Estetik Gelişimi ve Turizm

Yüzer sulak alanlar, nehirler, göletler ve göller gibi yüzey sularının kullanılan şekil, yapı ve bitki örtüsüne bağlı olarak görsel cazibesini/ilgisini arttırmak için kullanılabilir [52].

Yüzer sulak alanlar insanlara iyi doğal yaşam alanları sağlamak için etkin bir şekilde pazarlanmaktadır. Bu turizm ya da rekreasyonel amaçlı işletiliyorsa tasarım ve operasyonun yürüyüş yolları, kuş gözlem alanları ve eğitim merkezlerini içermesi muhtemeldir. Turizm alanı sağlanması ve su arıtımı için düzenlenmesi arasında çelişen amaçlar da olabilir [56]. Aşağıda bir su kaynağının yüzer sulak alan ile estetik gelişimi görülmektedir.



Şekil 17. Su Kaynağının Yüzer Sulak Alan ile Estetik Gelişimi [60]

4.3.6. Habitat Oluşturması

Besin maddeleri giderimlerinin yanı sıra, yüzer sulak alanlar küçük omurgasızlar için mükemmel sığınma alanı sağlar ve bu da yem ve av balıkları gibi arzu edilen diğer organizmaları çeker. Aynı zamanda arzu edilen su kuşları için yaşam alanı sağlarlar ve kıyı korumaya katkıda bulunurlar [52, 56].

Bazı durumlarda kuşlar gibi yaban hayatı için yaşam alanı sağlanması açısından yüzen sulak alanlar, özellikle habitatlar yaratmak amacıyla özel olarak inşa edilmişlerdir. Kuşların yuvalamak için bir habitat ve karada yaşayan yırtıcı hayvanlardan korumak için alan ihtiyacını karşılamıştır (Şekil 17). Yüzer sulak alan sucul bitkiler, çimenler, tohumlar, yuvalama malzemesi, yuva örtüsü ve mevcut su nedeniyle su kuşlarını ve karasal kuşları çekmektedir. Bazılarına balıklar sokulmuştur, ancak dipte beslenen veya yuvalananların çökeltileri yerlerinden kaldırarak askıda katı maddeleri arttırdığı bulunmuştur. Bununla birlikte, yaban hayatının cazibesi, dışkı malzemesi, besinler ve rahatsızlıkların ortaya çıkmasıyla su kalitesi üzerinde de zararlı etkilere sahip olabilir. Genellikle büyük kuş topluluklarının açık su arıtma sulak alanlarını dışkı (ama sudan da beslenirler) ile kirlettikleri veya bulanıklığı artırdığı olmuştur. Aşırı kuş sayıları, aşırı otlatma ve çiğneme nedeniyle bitki örtüsünün azalmasına da yol açabilir ve başlangıçta bitkileri yüzen yapı üzerinde kurmak zorlaşabilir. Kazlar ve herbivor kuşlar, özellikle ilkbahar veya sonbahar göçü döneminde sulak alan bitkilerinin kurulmasına zarar verebilir. Bununla birlikte yüzen adalara tavşan gibi diğer otçullar genellikle erişemez. Ancak tüm bunların yanında yüzer sulak alanlar ikincil bir işlev olarak habitatları temin etmektedir [53, 56]. Aşağıda canlıların yüzer sulak alanı yaşam alanı olarak kullandığı örnekler görülmektedir.



Şekil 18. Yüzer Sulak Alan ile Habitat Oluşumu [60]

4.3.7. Bitki Biyokütlesinin Kullanılması

Arıtma verimliliğini korumak için bitki biyokütlesi periyodik olarak su kütlelerinden çıkarılmalıdır. Hasat edilmezse, bitki dokusuna dahil edilen besinler, ayrışma işlemleri ile suya geri verilebilir ya da suda besin giderimi durabilir. Bitki biyokütlesinin kullanımı için birçok potansiyel ekonomik kullanım alanı vardır. Yapılmış sulak alanlarda veya yüzen adalarda üretilen bitkiler hasat edilebilir ve daha

sonra hayvan yemleri, hatta insan gıdası olarak kullanılabilir veya biyogaz, biyo-gübre ve biyo-materyaller halinde işlenebilir. Kurutulmuş ve evcil hayvanlar için bir besin kaynağı olarak kullanılabilirler ve kullanım değeri hasat maliyetini kısmen dengeleyebilir [64]. Potansiyel ekonomik getirileri değerlendirilerek teknolojinin bu pratik uygulaması ile hidroponik tarım yapılabilir. Satılabilir bir nihai ürünle eşleştirilebiliyorsa yüzer sulak alan, üretici karlılığını artırarak çevresel etkileri azaltabilir.

4.3.8. Düşük Maliyetli Olması

Düşük enerji tüketimi ve düşük maliyetle yüzer sulak alanlar su kolonundan nütrient gideriminde oldukça etkin bir yöntemdir. Yüzer sulak alanlar, polistiren köpük, PVC boru, strafor, plastik ağ ve geri dönüşümlü malzemeler gibi yaygın olarak temin edilebilen malzemeler kullanılarak yapılabilir veya Biohaven, Beemat ve Biomatrix Water gibi ilgili firmaların amaca yönelik hazır yüzer sulak alan sistemleri kullanılarak oluşturulabilir. Mevcut yapı malzemelerinin çeşitliliği, yüzer sulak alanların boyut ve biçiminde esneklik sağlayarak estetik tasarımların dahil edilebilmesini sağlar.

Yüzer sulak alanlar için yüzer alanın başlangıç maliyeti, metrekare başına 51,11\$'dan satılmaktadır (2018 Aralık ayı Beemats LLC, New Smyrna Beach, FL, ABD firmasından alınan fiyat). Daha düşük değer, geri dönüştürülmüş malzemelerden veya PVC borulardan yapılmış ev yapımı yüzer alanlar için geçerli olabilir. Su bitkileri için fiyatlar bulunulan yere göre değişebilir. Yapı onarımı gerekli değilse, yıllık maliyetlerin inşa edilen sulak alanlardan daha düşük olması beklenir (inşaat maliyetinin %3-5'i). [52]

4.3.9. Buharlaşmayı Azaltarak Su Kayıplarını Önlemesi

Su kaynağı üzerine yüzer sulak alan inşası bitkilerin evotranspirasyonu (ET) ile su kaybını gündeme getirmektedir. Su üzerindeki sucul bitkilerin ET kaynaklanan su kaybı, açık su yüzeyinin buharlaşması (Eo) ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma Penman-Monteith yöntemi kullanılarak kıyas bitki tüketimi hesaplarına dayanmaktadır. Hesaplama yapabilmek için nem, solar radyasyon, hava sıcaklığı ve

rüzgar hızı verileri gibi meteorolojik veriler ile lizimetre deneyleriyle belirlenmiş bitki su tüketim katsayısının (Kc) biliniyor olması gerekmektedir. Türkiye’de Penman-Monteith yönteminde kullanılmak üzere sucul bitkilerin Kc katsayıları belirlenmemiş olduğu için kıyas bitki tüketimi Doorenbos ve Pruitt, 1977 çalışmasından alınmıştır (Tablo 2) [65, 66].

Doğal koşullar altında yürütülen çalışmalar, su yüzeyinin sucul bitkiler ile kaplanması durumunda, atmosfere su kaybının, serbest su yüzeyinden daha düşük olacağını göstermektedir. Bu, su yüzeyinin sucul bitkiler ile kaplanmasıyla ve yeşil bitkilerin daha yüksek bir solar yansıması ve terlemeye iç direnci ile birleşiminden kaynaklanır. Bazı karasal bitkilerin aksine sucul bitkiler, su kaybına karşı korunmak için farklılaşmış dokular (örneğin kalın kütikula tabakası) oluşturmazlar, buna rağmen transpirasyon (terleme ile su kaybetme) oranları düşüktür. Suyun dışarı verilmesi genellikle gutasyon (damlama) ile sağlanır. Yüzen ve düz yapraklı sucul bitkilerin su tüketimi, otlarinkine çok benzemektedir. Yüzeyi daha geniş olan bitkiler, özellikle kuru ve rüzgarlı koşullarda, ET oranı biraz daha yüksektir. Papirüs ve hasır otu gibi sazlar, özellikle ET karşı geliştirdikleri yapıdan dolayı daha düşük ET değerlerine sahiptir. Tablo 2’de farklı iklim koşulları için farklı sucul bitkilerin Kc değerleri verilmiştir. Tabloda verilen açık su yüzeyi buharlaşması sığ baraj ve göller için geçerlidir. Ekvatorial bölgelerdeki barajlara ve göllere uygulanabilir [65, 66]. Tabloda da görüldüğü üzere su yüzeyinin sucul bitkiler ile kaplanması durumunda, atmosfere su kaybı, serbest su yüzeyinden daha düşük olacaktır.

Tablo 2. Açık Su Yüzeyinin ve Farklı Sucul Bitkilerin Kc Değerleri [65]

| Bitki Örtüsü | Nemli Hava | | Kuru Hava | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| | Hafif ve Orta Şiddetli Rüzgar | Şiddetli Rüzgar | Hafif ve Orta Şiddetli Rüzgar | Şiddetli Rüzgar |
| Batık Bitkiler (Submerged) | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,2 |
| Yüzen Bitkiler (Su Mercimeği) | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Düz Yapraklı Bitkiler (Nilüferler) | 1,05 | 1,1 | 1,05 | 1,1 |
| Geniş Yüzeyli Bitkiler (Su Sümbülü) | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,2 |

| Bitki Örtüsü | Nemli Hava | | Kuru Hava | |
|---|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| | Hafif ve Orta Şiddetli Rüzgar | Şiddetli Rüzgar | Hafif ve Orta Şiddetli Rüzgar | Şiddetli Rüzgar |
| Bataklık Bitkileri (papyrus, hasır otu) | 0,85 | 0,85 | 0,9 | 0,95 |
| Açık su yüzeyi | 1,1 | 1.15 | 1,45 | 1,2 |

4.4. Yüzer Sulak Alanların Potansiyel Dezavantajları

Aşağıda yüzer sulak alanların çeşitli potansiyel dezavantajları sıralanmıştır.

- Maksimum besin çıkartma verimliliği için, yüzer sulak alanların mevsimsel olarak hasat edilmesi veya çıkarılması gerekir. Bu, potansiyel olarak bir işgücü gerektirir. Bununla birlikte, yetiştirilen bitkilerin biyokütlesi içindeki besinlerin dağılımının hem türler hem de hedef besinler tarafından geçici olarak değiştiği bildirmiştir. Yüzer sulak alan sistemleri için hasat stratejilerini optimize etmek amacıyla besin dağıtımı ve mobilizasyonun daha fazla araştırılması gerekmektedir [67].
- Nütrient giderim verimi, bitki çeşidine, iklim şartlarına, kirlenme türüne ve özelliklerine, tasarım tipine gibi çok fazla değişken parametreye bağlı olduğu için standardize etmek mümkün değildir.
- Yüzer sulak alanlar açık su yüzeyini işgal ederek ve su kaynağının eğlence ya da balık tutma amaçlı kullanımı için erişimi engelleyebilir veya azaltabilir.
- Yüzer sulak alanların üzerindeki bitkiler sığ sularda sedimana dönüşebilir ve şiddetli fırtına olaylarına karşı korumak için bağlamak zor olabilir.
- Seçilecek bitkilerin iklim koşullarına uyum sağlaması ve giderim açısından etkin olması gerekmektedir. Yerel olmayan ve istilacı türler yüzer sulak alana dikilmemelidir. Buna karşın yerel ekosistemlere olumsuz etkilerden kaçınmak

ve sistemi korumak için istilacı türlerin yüzer sulak alandan ayıklanmaları gerekebilir [52].

- Yüzer sulak alan üzerindeki vejetasyonun aşırı artması halinde su kolonundaki oksijen seviyesinde azalma yaşanabilir.

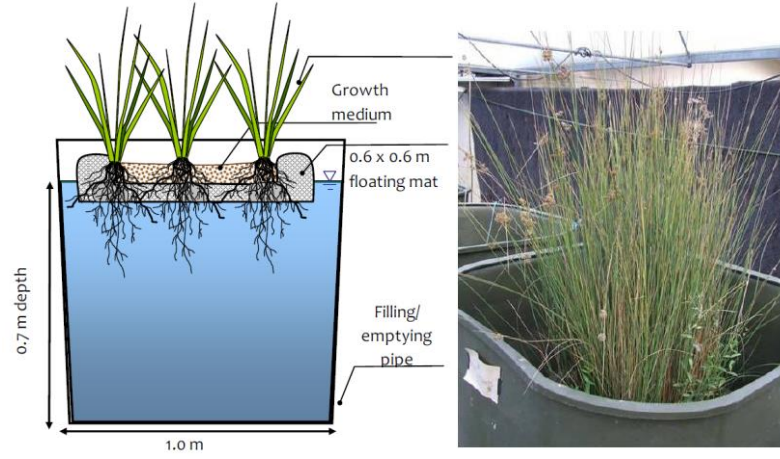
4.5. Dünyadan Yüzer Sulak Alan Uygulamaları

Yüzer sulak alanlar ile ilgili çalışmaları toplamak için genel bir literatür araştırması yapılmış olup, dünyada yapılan uygulama örnekleri incelenmiştir. Su kalitesini artırmak amaçlı çeşitli başarılarla kullanılan, bazı yüzer sulak alan uygulamaları hakkındaki bilgiler aşağıda sunulmuş olup, bu ve benzeri sistemlerin genel karşılaştırılması, işletme parametreleri ve giderim verimleriyle birlikte Tablo 6'da gösterilmiştir.

4.5.1. Yeni Zelanda Örneği

Yeni Zelanda'da yüzer sulak alan çalışmalarına öncülük etmek için 2 farklı mezokozm deneyi yapılmıştır. Küçük ölçekli basit doğal ortamlar olan mezokozmlar, yüzer sulak alan performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [52]. 2 farklı deneyden biri durgun suları diğeri nehirleri örnekleyen mezokozm deneyidir.

Şubat 2007'den Aralık 2008'e kadar Ruakura Tarımsal Araştırma Merkezi, Hamilton, Yeni Zelanda'da 0.7m³ tanklarda bir seri mezokozm deneyi yapılmıştır. Tanklar, ötrofik göllerde bulunanlara benzer besin konsantrasyonları olan yapay göl suyuyla beslenmiştir. Deneyde yüzer sulak alan, yüzdürme sağlamak için genişmiş poliüretan ile enjekte edilen bir lifli polyester matın karelerinden oluşuyordu (0,6 m × 0,6 m). Matların ortası, kum, turba ve komposttan (1: 2: 1) oluşan bir büyüme ortamı (8 cm derinliğinde) ile dolduruldu ve üç doğal çıkan sulak alan makrofitinden biriyle ekildi (*Cyperus ustulatus*, *Juncus edgariae* ve *Schoenoplectus tabernaemontani*). Bu ekili matlarda geçen 20 aylık bir süre zarfında bitkiler, 0,5-0,8 m boyuna ve matların altından ~ 0,5 m uzayan iyi gelişmiş kök sistemlerine sahip oldular. Kontrol işlemi, bir başka mezokozmda su yüzeyi üzerinde asılı boş bir 0.6 x 0.6 m plastik tabakadan oluşmakta ve bu da benzer bir gölgeleme alanı temin etmektedir [68].



Şekil 19. Deneylerde Kullanılan Tanklar [68]

Diğer deneyde Rotorua yakınındaki Rotoehu Gölü'nün güney kıyılarında, göle giren Maero Çayı'ndan pompalanan düşük bir akış hızına (110 mm/gün) sahip, akış yoluyla mezokozm denemeleri gerçekleştirilmiştir. Mezokozm, toksik olmayan epoksi bir kaplama ile kaplanmış ve modifiye edilmiş iki paralel çelik nakliye konteynirından meydana gelmiştir. Bir tank, göl içine girmeden önce Maero Çayı'ndan pompalanan düşük bir akış hızına (110 mm/gün) ve bir yüksek giriş hızına (270 mm/gün) ulaşmıştır. Bu hidrolik yükleme oranları, sırasıyla 9,4 ve 3,6 günlük nominal hidrolik tutma sürelerine karşılık gelmektedir. Gölden toplanan tortular, tankların dibine yerleştirilmiş ve su yüzeyine doğal sedimanlarla *Carex virgata* ve *Cyperus ustulatus* bitkileri dikilmiş matlar yerleştirilmiştir. Kullanılan matlar, poliüretan köpükleri enjekte edilmiş 150 mm kalınlığındaki lifli polyester yapıdan oluşmaktadır. Bu durumda bitkiler, başka herhangi bir büyüme ortamı olmaksızın doğrudan mat matris içine kurulmuştur. Deneyde, Ağustos 2009 Mayıs 2010'da dokuz aylık süre zarfında aylık su kalitesi örnekleme yapıldı [68].



Şekil 20. Akış Yoluyla Mezokozm Deneyi [68]

Hem durgun su hem de nehir suyu deneylerinin sonuçları, yüzer sulak alanların, sudan gelen yüksek ve düşük besin yüklemelerini önemli miktarda benzer besin seviyeleri ile kaldırabildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, bu çalışmada yüzer sulak alanların, benzer koşullar altında geleneksel inşa edilmiş sulak alan arıtma sistemleri için beklenen azot giderme oranlarını aştığını göstermiştir (Tablo 3) [68].

Tablo 3. Deneyde Elde Edilmiş Giderim Oranları

| | Yüksek Besin Yükleme Giderimi | Düşük Besin Yükleme Giderimi |
|-------------------------|--|---|
| TP | %32 | %35 |
| TN | %45 | %77 |
| NH₄-N | Artış yaşanmış | Artış yaşanmış |
| NO₃-N | %57 | %92 |

4.5.2. ABD Virginia Örneği

Çalışma ABD Virginia’da 2013 yılında ortalama hava sıcaklığı 24,3°C olan yaklaşık 5 aylık bir periyotta gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, bir su tutma göletinde toplanan besleyici-kirli suyu kullanarak ticari olarak mevcut iki yüzer sulak alan teknolojisini değerlendirmek, matların ve bitkilerin performansını karşılaştırarak,

TN ve TP iyileştirmesini değerlendirmek olmuştur (toplamda 18 hafta, kuruluş aşaması 1-8 ve büyüme fazı 9–18 hafta) [69].

Yüzer sulak alan teknolojisinin TN ve TP iyileştirme kapasitesini araştırmak için 7 günlük bir bekleme süresi olan, toplu beslemeli mezokozmlar kullanılmıştır. Yüzer sulak alan teknolojileri, 5cm çapında köklü *Juncus effusus* ile dikilen Beemats (Beemats LLC, New Smyrna Beach, FL, ABD) ve BioHaven yüzen adalarını (Floating Island International, Inc. Shepard, MT, ABD) içermektedir. Beemats sistemi, 1,3 cm kalınlıktaki kapalı hücreli köpük matlardan oluşmakta olup, önceden kesilmiş deliklere sahip, özel olarak tasarlanmış, koro lifi sarılı bitki kök toplarını tutan plastik havalandırıcı kaplardan oluşmuştur. BioHaven yüzen adaları, önceden delinmiş dikim delikleri ile yüzdürme için genişletilmiş poliüretan ile enjekte edilmiş olup, 16 cm kalınlığında, geri dönüşümlü plastik elyafı bir matristen yapılmıştır. Her biri 27bitki/m² eşdeğer yoğunlukta 9 eşit aralıklı dikim deliği bulunan 45,7cm X 68,6cm yüzer matlardan oluşmuştur. Matlar su yüzeyinin %65'ini kaplayacak şekilde uygulanmıştır [69].



Şekil 21. Deneylerde Kullanılan Tanklar ve Düzenek [69]

Yüzer sulak alan tedavileri sürekli olarak kontrol işlemlerinden daha yüksek ortalama su sıcaklığına sahip olmuştur. Bu da güneş ışınlarını emen koyu renkli matların, ısınma ve daha sonra mezokozm suyuna ısı aktarımı nedeniyle oluşmuştur. Bu, mezokozm tankı üzerinde asılı olan daha açık renkli panolara sahip kontrol gurubunda meydana gelmemiştir. Yüzer sulak alan deneyinde ortalama ÇO ve pH değeri, muhtemelen bitki köklerinden ve mikrobiyal topluluklardan kaynaklanan solunuma bağlı olarak, kontrol tedavisinden daha düşük seyretmiştir. BioHaven uygulamasında, Beemat ve kontrol uygulamalarından daha büyük evapotranspiratif kayıplara sahip olduğu gözlenmiştir [69].

Genel kütle çıkarılması açısından, BioHaven yüzer sulak alanında, TN ve TP'nin %25 ve %4'ünü giderirken, Beemat sırasıyla TN ve TP'nin %40 ve %48'ini gidermiştir. BioHaven matlarında TN ve TP seviyeleri, bitki kurma aşamasında (1-8 hafta) artmıştır ve bu, deney süresi boyunca genel BioHaven besin maddesi çıkarma oranını düşürmüştür. Bitkilerin varlığı olmadan havuz içinde besin maddelerini uzaklaştırmayı amaçlayan bir kontrol gurubu ise, sırasıyla %28 ve %31'lik TN ve TP giderimi sağlamıştır. Bitki büyüme mevsimi boyunca (çalışmanın 9–18 haftası), iki uygulama benzer besin çıkarma oranları göstermiştir, sırasıyla Beemat ve Biohaven için: TN: $0,0026 \pm 0,0032$ ve $0,025 \pm 0,0018$ g/m²/gün; TP: $0,0074 \pm 0,00049$ ve $0,0076 \pm 0,00065$ g/m²/gün'dür [69].

Hasat zamanında, BioHaven matlarındaki bitkiler, Beemat matlarındakilere göre önemli ölçüde daha uzun olduğu gözlenmiş ama kök uzunluğu benzer seyretmiştir. Bu başlangıçta mevcut olan ekstra besinlerden dolayı kaynaklanmıştır. Kök biyokütlesi, BioHaven matının kalınlığı ve lifli yapısı, hasat için erişilemeyen kısımlar meydana getirdiğinden, gözlemlenenden daha büyük olmuştur. Her iki uygulamada da filiz gelişiminden çok kök biyokütle gelişimi görülmüştür [69].

Her iki yüzer sulak alan teknolojisi de tamamen farklı amaç ve tasarımlara sahip olup, her ikisi de avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Beemat daha az pahalı (38 \$/m²) ve bir ya da iki sezon sonra kolayca değiştirilebilecek şekilde tasarlanmış bir üründür. Buna karşın, Biohaven daha pahalı (377 \$/m²) ve daha dayanıklı bir üründür ve birkaç mevsimden fazla suda bırakılmak üzere tasarlanmıştır. 2 uygulamada aynı suyu aldıklarından, aynı hacimlere, aynı bitkilere sahip olduklarından ve aynı şekilde

muamele edildiklerinden, iki uygulama arasındaki besin giderimindeki farklılık büyük olasılıkla mat materyali ve substrattan kaynaklanır. Tabii bu farkın kaynağını belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. BioHaven matları ile ortaya çıkan besin artışını, dilüsyonun etkilerini göz önüne aldığımızda uzun vadede su kaynaklarına tam ölçekli bir uygulamada ihmal edilebilir [69].

4.5.3. Çin Halk Cumhuriyeti Örneği

Bu çalışma bir nehir gibi açık su ortamında farklı mevsimlerde yüzer sulak alan sisteminin performansını belirlemek için yapılmıştır. Çalışma 2008 yılının Haziran ayında başlayıp, 2009 yılının Kasım ayında tamamlanmıştır. Ortalama 2,5m derinliğe ve 22,1m ortalama genişliğe sahip olan nehir, Çin Halk Cumhuriyeti, Zhejiang Eyaleti, Jiaying şehrinin banliyösünde yer almaktadır. Nehir, kış ve yaz aylarında 1169mm yıllık yağış ve yıllık ortalama hava sıcaklığı 15,9 °C ile karakterize olan bir iklimdedir [70].



Şekil 22. Entegre 2 Alt Sistemden Oluşturulmuş Deney [70]

Nehir kıyısındaki su bitkileri, alt sistem I ve alt sistem II olan entegre 2 alt sistemden oluşturulmuştur. Sistem I'in yatak yapısı 4 adet bambu (çap olarak 100 - 150mm) ve plastik ağ (20mm x 20mm) ile kaplanmıştır. Yüzer bitkiler ağlara entegre edilmiştir. Sistem II'nin yatak yapısı PVC borulardan oluşmuş (110mm çapında) ve iki adsorptif biyofilm malzemesi plastik ağların altına yerleştirilmiştir. Ortaya çıkan bitkiler, alttaki ağa yerleştirilen toprak ve bambu kömürü (v:v = 1:1) ile doldurulmuş olup, 20 gözlü naylon rhizo-torbalara entegre edilmiştir. İki alt sistemde 9 su bitkisi yetiştirilmiştir. Bunlar aşağıdaki ekotiplerden oluşturulmuştur (Tablo 1) [70].

Tablo 4. Deneylerde Kullanılan Bitkiler [70]

| Yerel Ad | Bilimsel Ad | Ekotip |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|
| Su sümbülü | <i>Eichhirnia crassipes</i> | Yüzücü (Floating) |
| Su marul | <i>Pistia stratiotes</i> | Yüzücü (Floating) |
| Su ejderi | <i>Jussiaea repens</i> | Yüzücü (Floating) |
| Pennywort | <i>Hydrocotyle verticillata</i> | Yüzücü (Floating) |
| Frogbit | <i>Hydrocharis dubia</i> | Yüzücü (Floating) |
| Parrot weather | <i>Myriophyllum aquaticum</i> | Batık (Submergend) |
| Turnabalığı otu | <i>Pontederia cordata</i> | Su üstü (Emergent) |
| Canna | <i>Canna indica</i> | Su üstü (Emergent) |
| Su haznesi | <i>Calla palustris</i> | Su üstü (Emergent) |

Yaz ve sonbahar mevsiminde TN için giderim oranı %34,3'ten %45,1'e, ortalama %36,9 olarak gerçekleşmiştir. Bu, kış mevsiminin 1,8 katı olmuştur. Yaz mevsimi sezonunda NH₄ için ortalama giderim oranı %44,8 iken, kış mevsiminin 1,7 katı olmuştur. Yaz sonbahar mevsiminde NO₃ için giderim oranı %16,5'ten %37,0'a, ortalama %25,6'ydı ve bu oran kış mevsiminin 2 katı olmuştur. Yaz sonbahar sezonunda NO₂ için ortalama giderim oranı %53,2, ortalama %27,3 oranında, ki bu da kış mevsiminin 1,9 katı olmuştur. Nehirdeki yüksek NH₄ ve NO₃ konsantrasyonları, evsel atıksuların ve yayılı kaynaklı kirliliğin akarsu suyuna atılmasına bağlanmaktadır. Yaz ve sonbahar mevsiminde TN, NH₄, NO₃ ve NO₂ ortalama giderim oranları, ilkbahar-kış mevsimlerinde ilgili değerlerden %16, %18, %13 ve %26 daha yüksek bulunmuştur. Bu, sıcaklıktaki mevsimsel değişimin bir sonucu olarak bitki alımı ve mikrobiyal faaliyetlerdeki farklılıklara bağlanmaktadır [70].

TP konsantrasyonu, su sıcaklığındaki artışla birlikte Şubat'tan Ağustos'a kadar hızlı bir şekilde artmış ve daha sonra su sıcaklığındaki düşüşlerle azalmıştır. Yaz sonbahar sezonunda ortalama TP giderim oranı %43,3'tü, bu oran kış mevsiminde ortalama %17,0 oranında kalmıştır. Bu, yaz-sonbahar sezonunda yüzen adada ortaya çıkan bitkilerin hızlı büyüme potansiyeli ile fosfatın hızla alınmasından kaynaklanmıştır [70].

Klorofil-a konsantrasyonu Mayıs ayında (45,2 g/l) ve Ağustos'ta (38,3 g/l) zirveye çıkmıştır. Yüzer sulak alanın su kolonuna ışık girmesine karşı bir bariyer olması ve hidrofitler tarafından rekabete bağlı olarak beslenmedeki yetersizlik, alg oluşumunu engellemektedir [70].

Bu çalışmadaki, dokuz bitki türü ötrofik nehirde iyi gelişmiştir ve verimli bir şekilde biyofilm için özel alan oluşturmuştur. Su sütunundaki N ve P'yi uzaklaştırmak için, bitki köklerinin mikrobik büyüme ve biyofilm oluşumu için geniş bir yüzey alanı sağlaması önemlidir. *Pistia stratiotes*, en büyük kök uzunluğunu, kök ortalama çapını ve yanal kök sayısını üretmiştir. *Eichhirnia crassipes*, kök yüzey alanı için ikinci sırada yer almıştır. *Pontederia cordata* ve *Canna indica* daha fazla yan köklere ve daha büyük bir kök hacmine sahip olmasına rağmen, kök yüzey alanı *Eichhirnia crassipes* veya *Pistia stratiotes*'ten önemli ölçüde daha az olduğu gözlenmiştir. Dokuz sucul bitkinin, özellikle *Eichhirnia crassipes*, *Pistia stratiotes* ve *Jussiaea repens* canlı büyümesi, yaz - sonbahar mevsiminde gözlemlenmiş ve Kasım 2009'da bozulmaya başlamıştır [70].

Myriophyllum aquaticum, *Hydrocotyle verticillata*, *Pistia stratiotes* ve *Hydrocharis dubia*'in her biri, diğer hidrofitlere göre önemli ölçüde daha yüksek bir N giderimine sahiptir. Ancak, *Calla palustris* daha büyük biyokütle nedeniyle en büyük N giderimini göstermiştir. İkincisi ise *Myriophyllum aquaticum* olmuştur. *Eichhirnia crassipes*, *Canna indica*, *Calla palustris* ve *Myriophyllum aquaticum* daha fazla P alımı göstermiştir [70].

Entegre yüzer sulak alan sistemi, nehir kenarındaki su bitki örtüsünden ve adsorptif biyofilmleri olan mozaik yüzen adalardan oluşmuş olup, kış - ilkbahar mevsimine göre yaz - sonbahar mevsiminde azot, fosfor, metal elementleri, *E. coli* ve Klorofil-a üzerinde daha iyi temizleme etkileri olmuştur [70].

4.5.4. ABD Washington D.C. Örneği

Yüzer sulak alan, Mason Göleti George Mason Üniversitesi, Fairfax kampüsünde (Washington, D.C.) bulunan 1,1m ortalama derinliği ve 7100m² büyüklüğünde su tutma alanı olan gölet üzerinde konuşlandırılmıştır. Mason Göleti

için drenaj alanı, büyük bir banliyö nüfusu olan yaklaşık 35.000 öğrencinin katıldığı bir üniversitenin kampüsündeki yaklaşık 0,55 km²'lik bir alanı kapsamaktadır. Çalışma Mayıs-Eylül 2015 (137 gün) döneminde yapılmıştır. Yüzer sulak alan tasarımı, disiplinler arası bir grup lisans öğrencisi tarafından geliştirilen fikirler ile birleştirilmiş ve insan böbreklerinin yeteneklerini taklit için böbrek şeklinde tasarlanmıştır [67].

Yüzer sulak alan, Beemat (BeeMats LLC, New Smyrna Beach, FL, ABD) olarak pazarlanan bir sistem kullanılarak yapılmıştır. Bu sistem, bazal olarak 10cm aralıklı önceden kesilmiş dairesel delikler ile kaplanmış 1,3cm kalınlıkta vinil asetat köpük matıdır. Önceden kesilmiş delikler, sistemle birlikte sağlanan delikli plastik kaplara yerleştirilen bitkilere, sürgünlerin su hattının üzerinde bir hidroponik sistemde olduğu gibi kalmasına izin vermektedir. Her böbrek tasarımındaki matlar suyun dibine iki adet kama bloğu ile tutturulmuştur. Bu sayede yüzer sulak alan sistemi havuz suyu seviyesindeki herhangi bir değişiklik ile dikey olarak hareket etmekte serbesttir, ancak rüzgar hareketi veya su akımı nedeniyle önemli ölçüde hareket etmesi sınırlandırılmıştır. Ayrıca su kuşlarının yüzer sulak alan sistemine zarar vermemesi için her matın çevresine ahşap dübeller ile yerleştirilmiş basit bir çit inşa edilmiştir. Bu, su kuşlarını yüzer sulak alanlara inişten ve/veya bitkilerde otlamaktan caydırmak için alınabilecek bir önlemdir [67].



Şekil 23. Kullanılan Beemat Yüzer Sulak Alanı [67]

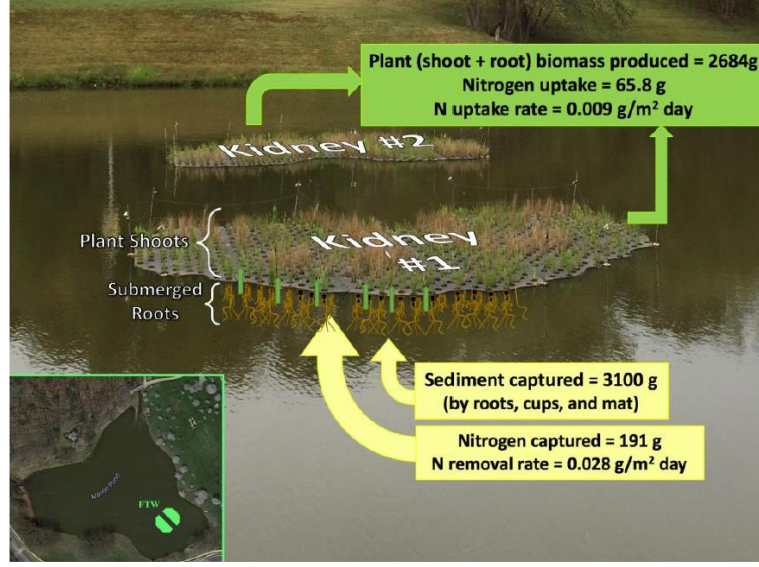
Yüzer sulak alan, *Alisma subcordatum* (Amerikan su muzusu), *Carex stricta* (dik saz), *Iris versicolor* (mavi renkli iris), *Juncus effusus* (hasır otu) ve *Pontederia cordata* (pickerelweed) türleri ile kurulmuştur. Bu türler kök sistemi sayesinde sürekli su baskınlarını tolere eden yaygın Kuzey Amerika sulak alan yerel bitkileri oldukları için seçilmiştir. Bu beş tür daha önce iyileştirme amaçlı çalışmalarda kullanılsada, *Juncus* sp. ve *Carex* sp.'nin son derece etkili besin çıkarıcıları oldukları gösterilmiş ve bu

nedenle diğer türlere göre daha yüksek sayılarda ekilmiştir. Bitkiler yüzer matın üzerinde konuşlandırılmadan önce, köklerdeki tortu ve besin maddelerinin gölet içine alınmasını sınırlamak amacıyla suda iyice yıkanmıştır. Yıkanmış kökler daha sonra bir yaprak hindistan cevizi lifi ile yavaşça sarılarak, delikli bir plastik kap içine yerleştirilmiş ve bir plastik tutturucuyla da yerine sabitlenmiştir [67].

Çalışma sonuçlarında, tüm bitki biyokütle üretimi $53,7\text{g/m}^2$ kalarak, diğer yüzer sulak alan çalışmalarına kıyasla dikkat çekmemiştir. Ayrıca matın yukarısında ve altında biyokütle üretimi arasında kayda değer farklar gözlemlenmiştir. Yönelim *Juncus sp.* ve *Pontederia sp.* dışındaki tüm türlerde kök kütlesinin gelişimi yönünde olmuştur. Orantısız kök büyümesi, besin değeri düşüklüğüne verilen fizyolojik bir tepki olarak gözlemlenirken, Mason Göleti'nde besin düzeylerinin böyle bir yanıtı tetikleyecek kadar düşük olmadığı düşünülmektedir. Biyokütle üretimi nispeten dikkat çekmesede bitki biyokütlesinin azot alım oranı diğer yüzer sulak alan çalışmalarında bildirilen oranlarla karşılaştırılabilir aralıkta olmuştur. Giderim $0,009\text{g/m}^2/\text{gün}$ hızında toplam $65,8\text{g N}$ olmuştur. (Yüzer sulak alan ve benzeri teknolojilerle ilgili 16 çalışmanın bir incelemesinde; $0,0015 - 2,8\text{ g/m}^2/\text{gün}$ arasında; ortalama $0,64\text{ g/m}^2/\text{gün}$.) Bazı türlerin azot alımında diğerlerinden daha verimli olduğu görülmüştür; *Carex sp.* ve *Juncus sp.* [67].

Yüzer sulak alan matında 1313g tortu, köklerde tutulan 1787g tortu, toplam bir bütün olarak ise göletten 3100g tortu üretilerek, 191g azotu $0,028\text{g/m}^2/\text{gün}$ oranında çıkarmıştır. Bitki kökleri ve mat yapısının kendisi tarafından yakalanan tortularda bulunan bu azotun, tüm yüzer sulak alan sisteminin çıkarılmasını gerektiren emek yoğun bir süreç olduğu için pratikte hasat edilme olasılığı düşüktür [67].

Belli bir giderimin sağlanmasına rağmen gölette su kalitesi ölçümlerinde parametreler üzerinde ölçülebilir bir etkinin olmadığı görülmüştür. Bunun da yüzer sulak alanın küçük boyutundan (gölet yüzey alanının $\sim\% 1$ 'inden az) kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu çalışma yüzer sulak alanın su kalitesini önemli ölçüde iyileştirmek için $\%10 - \%25$ 'lik yüzey alanını kapsaması gerektiğini öne sürmektedir. Düşük maliyetli, az bakım gerektiren bir sistemle az miktarlarda da olsa azot ve tortu giderimi yapılmıştır [67].



Şekil 24. Yüzer Sulak Alan ile Sağlanan Giderim [67]

4.5.5. Güney Asya Örneği

Çalışmanın ihtiyacı giderek bozulmuş Kandy Gölü'nün artan su kalitesi problemlerinden doğmuştur. AAT tesislerinin, gölün içine girmeden önce atık suları arıtmak için kullanılması teknik olarak mümkün olmakla birlikte, kentsel peyzajdaki alan kısıtlamaları nedeniyle yüzer sulak alan tedavi yöntemine yönelmiştir [71].

Bu çalışmada Sri Lanka'nın tropikal ikliminde iki pilot tipte hem sabit hem sürekli akış koşulu altında 2 makrofiti (*Typha angustifolia* ve *Canna iridiflora*) içeren yüzer sulak alanların arıtım etkinlikleri araştırılmıştır. Deneysel Peradeniya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi'nde gerçekleştirilmiştir. Her bir yüzer sulak alan modülü (100cm x 50cm x 65cm), yüzdürme için bir şamandıra, hedef bitki örtüsünü desteklemek için bir çerçeve (PVC borulardan imal edilmiş), vejetasyonu büyütmek için ortam (hindistan cevizi özünü içeren karışım), çapalar (çimento ağırlıkları içeren) ve başlangıç bitkilerinden oluşmuştur. Her bir modül 15,6 kg olmuş ve batmadan önce modül tarafından taşınabilecek maksimum ağırlık 25,4 kg olarak hesaplanmıştır. Bu sayede, büyüme sonrası taşınabilecek maksimum bitki ağırlığı (7,1kg) belirlenmiştir [71].

Yaklaşık 20cm sürgün yüksekliğine sahip makrofitler, başlangıç bitkileri olarak seçilmiş ve 10 bitki/m²'lik bir yoğunluğa sahip olan yüzer sulak alanlara ekilmiştir. Deneysel, biyofilmin kurulmasını sağlamak için dikimden iki ay sonra başlatılmıştır [71].

Hem sabit hem de sürekli akış koşulu altında iki yüzer sulak alan tanklara (1m × 3m boyutlarında) yerleştirilmiş. Bunlar, Peradeniya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ndeki ikamet salonundan alınan atık su ile doldurulmuştur. Sürekli akış koşulu modunda; 2,4 l/saat hidrolik tutma süresi ile, sabit koşul altında; 12-14 gün hidrolik tutma süresi ile muhafaza edilerek yüzer sulak alan sistemleri araştırılmıştır [71].

Araştırma sonucunda; BOI'nin uzaklaştırılma verimliliği her iki sistemde 50 günden sonra %90'ın üzerinde olduğu görülmüş, % 80'nin üzerinde NH₄ giderme verimi 11 gün boyunca gözlenmiştir ve *C. iridiflora* ile dikilen yüzer sulak alanlara kıyasla *T. angustifolia* ile ekilen yüzer sulak alanlarda biraz daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, *C. iridiflora* ile ekilen yüzer sulak alanlar 15 gün boyunca yaklaşık %50'lik bir çıkarma değerleri gösterirken, her iki bitki türü için de temizleme verimi 48. günde neredeyse aynı olmuştur. PO₄-P'nin giderim verimi, 50 gün sonunda her iki sucül bitki sistemi için %90'ın üzerinde gerçekleşmiş ve iki sucül bitki sistemi arasında her bir parametre için çıkarma veriminde anlamlı bir fark olmamıştır [71].

Sonuçlar, aralıklı olarak beslenen sulak alanların daha fazla oksitlenmiş koşullar altında çalıştırılmasına rağmen akımlı beslenen sulak alan sistemine kıyasla, KOİ gideriminde hiçbir performans farkının bulunmadığını gösteren benzer çalışmalar ile uyumlu olmuştur. Bu çalışmada, NH₄ giderme verimi her iki operasyonel modda da %80'in üzerinde olmuş ve NO₃ çıkarılması ise %40'a ulaşmıştır. *Typha angustifolia*, *Canna iridiflora*'dan biraz daha yüksek BOI₅, NH₄ ve NO₃ giderimi göstermiştir. Daha uzun ve istikrarlı kök büyümesi nedeniyle *Typha angustifolia*, köklerinin kalın ve daha kompakt olduğu *Canna iridiflora*'dan atık sudan besin elde etmek ve su-bitki etkileşimlerine olanak sağlamak için daha büyük bir potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir. İki operasyonel modda da çoğu zaman *Typha angustifolia* ile daha iyi performans elde edilmiştir. *Typha angustifolia*'lı yüzer sulak alanlar, alan ve maliyet kısıtlamalarının olduğu göl restorasyonu için olası bir çözüm

olarak düşünülebilir. İlk dönemde *C. iridiflora*'nın büyüme hızı *T. angustifoli*'den daha yüksek olmasına rağmen, bu çalışmadaki gözlemler *T. angustifolia*'nın ortalama sürgün yüksekliğinde kademeli bir artış gösterdiğini ve deney süresi boyunca daha yüksek kök alım oranının ortaya çıkarttığını göstermiştir [71].

5. NÜTRİYENT GİDERİMİNDE SUCUL BİTKİLER

Su ekosistemindeki artan besin konsantrasyonu, ötrofikasyonun önemli nedenlerinden biridir. Ötrofik su kütlelerindeki sucul yüksek bitkiler, P ve N'yi bir besin olarak kullanarak veya dönüştürerek nütriyent giderimi sağlayabilirler. Kökleşmiş sucul yüksek bitkiler, mikrobiyal aktiviteyi artırarak su sütununa NO₃ sağlayan mikroorganizmalara oksijen taşıyabilir [26]. Su bitkileri ile arıtma prosesleri esas itibarıyla serbest yüzey akımlı atıksu arıtma sistemlerine benzemektedir. Arıtma esas olarak bitki köklerine yapışık olarak yaşayan aerobik mikroorganizmaların çözünmüş organikleri ayrıştırmasıyla veya bitkilerin kökleri vasıtasıyla inorganik formdaki kirleticileri kullanmasıyla sağlanmaktadır [42].

Sulak alan arıtma sistemlerinde zemin veya granüler destekli ortamda köklenerek zemin yüzeyine çıkan veya su yüzeyine penetre olan, hızlı büyüyen köklü sucul (emergent) bitkiler kullanılabilir. Doğal sulak alanlarda görülen ve yapay sulak alanlarda kullanılan başlıca bitki türleri büyük su kamışı (cattail), saz otu (bulrush), kamışlar (reeds) ve ayak otları (sedges) gibi hızla gelişen bitkilerdir. Bu bitkilerin kök derinliklerinin fazla olması sulak alan sistemlerinde avantaj yaratmaktadır. Sulak alanlardaki bitkilerin su kalitesini artırmadaki görevleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

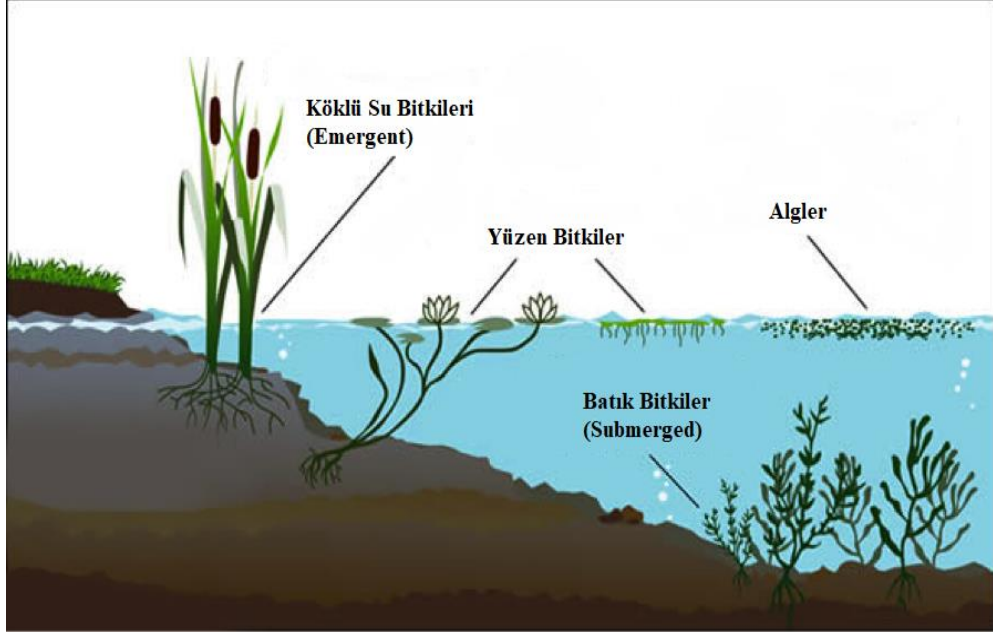
- 1) Bakteri filmlerinin tutunması için yüzey teşkil etmek,
- 2) Atık sudaki kirletici bileşenlerin filtrasyonuna ve adsorbsiyonuna katkıda bulunmak,
- 3) Fotosentezle su ortamının oksijenlenmesini sağlamak,
- 4) Güneş ışığının suya nüfuz etmesini sınırlayarak alg büyümesini kontrol etmek,

5) Nütrient giderimi sağlamak [42].

Yüzer sulak alanlar ve yapay sulak alanlar kirli suyun arıtılmasında akümülatör bitkiler kullanılarak fitoremediasyonun gerçekleştirildiği alanlardır. Fitoremediasyon terimi kelime anlamı olarak; bitki anlamındaki “fito” ile ıslah anlamındaki “remediasyon” kelimelerinden türetilmiştir. Fitoremediasyon; sucul ve karasal ortamlarda ağır metallere dahil olmak üzere istenmeyen elementlerin bitki bünyesinde biriktirilmesi işlemidir. Bu işlem gerçekleştirilirken çevredeki kirletici etmenlerin içerikleri ve bu elementleri bünyelerine hapsedmeyi başarabilecek bitki türleri çok iyi bilinmelidir [72]. Bu konuda botanikçiler ve peyzaj mimarlarından uzman desteği alınmalıdır.

Bitki sistemleri doğal olmayan hiçbir proses içermediğinden atıksuyu arıtırken ortama zarar vermezler. Sucul bitkiler tarafından nütrient uzaklaştırma etkinliğini etkileyen faktörler arasında hidrolik yükleme, ışık, sıcaklık, pH, mevsim, bitki hasadı ve diğer besin maddelerinin mevcudiyeti yer alır. Bu faktörler farklı bitki türlerine göre farklılık gösterir, bu nedenle, belirli bir atık su arıtımı için bitki seçimi entegre bir yaklaşımla düşünülmelidir [26].

Sucul bitkiler, makroskobik algler, sucul karayosunları, sucul eğreltiler ve tohumlu bitkileri de içine alacak şekilde sınıflandırılarak genellikle dört gruba ayrılır; algler, yüzen bitkiler (floating plants), batık bitkiler (submerged) ve köklü su bitkileri (emergent). Tüm su bitkileri suda yaşamaya uyarlanmıştır ve balıklar, suda yaşayan kuşlar ve omurgasızlar için değerli yaşam alanları sağlamaktadırlar. Su bitkileri hem sualtı hem de yüzeyde habitat oluşturur. Kök yapıları sağlıklı mikrobiyal biyofilmler içerir ve birçok yerli tür ve diğer hassas balıklar için kritik sığınak alanı sağladığı bulunmuştur. Yüzer sulak alanlar su bitkilerinin yarattığı benzer koşullara uyarlanmıştır. Birçok su bitkisi doğal olarak suyu filtreler ve kirletici maddeleri giderir [61, 73].



Şekil 25. Sucul Bitkiler [74]

Sucul bitkiler:

- **Algler:** Algler, tipik kara kökenli bitkilerden farklı bir fotosentetik organizmalar grubudur. Boyutları, mikroskobik formlardan daha büyük bitki benzeri formlara kadar değişir. Alglerin gerçek sapları, kökleri ve yaprakları eksiktir ve yeryüzünde hemen hemen her yerde bulunur. Sağlıklı su kütleleri algin mevcudiyetinden yararlanırken, deşarjdan kaynaklanan artan besin yükleri, insanlara ve hayvanlara zararlı bir miktarda alg üretebilir. Algler biyolojik arıtmada rol oynayan diğer canlılara oksijen temin ettikleri gibi alg-karbonat reaksiyonlarıyla etkili bir azot giderimi de sağlarlar [42, 61].
- **Yüzen Bitkiler:** Yüzen bitkiler dipte değil, suya tutunan köklere sahiptir. Birçok yüzer bitki, saplarını ve köklerini su üstünde tutar ve onları havada tutar. Gerçek yüzer bitkilerin örnekleri, *Lemnaceae* (su mercimeği) ve *Utricularia* ailesinde yer alır. En fazla kullanılan yüzücü su bitkileri su sümbülü (*Eichhornia crassipes*), su mercimeği (*Lemna minor*), su marulu (*Pistia sp.*) ve su eğreltisi (*Azolla sp.*) 'dir. Yüzücü bitkilerin yaprakları su üzerinde kökleri ise su içerisinde. Yaprakları ile fotosentez yaparak havadan CO₂'yi ve kökleri ile gerekli besin maddelerini almaktadırlar. Üretilen oksijen, kökleri

vasıtasıyla atıksu ortamına verildiğinden kök bölgesinde aerobik bakteriler yaşamaktadırlar. Yüzücü su bitkilerinin tamamına yakını Türkiye'de bulunmaktadır. Bunlardan su mercimeği su sümbülüne göre sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanıklıdır. Su sümbülü 10°C'nin, su mercimeği ise 5°C'nin üzerinde canlılıklarını sürdürebilmektedirler, ancak su sıcaklığının 10°C'nin altına düşmesi arzu edilmez. Su eğreltisinin de dayanıklılığı fazla değildir. Bunlardan dolayı en fazla su mercimeği kullanılmaktadır [42, 61, 73].

- Batık Bitkiler (Submerged): Batık bitkiler, su yüzeyinin üzerinde bazı kısımlar görülebilmesine rağmen, çoğu vejetatif kısımları su yüzeyinin içinde kalmaktadır. Batık bitkilerin örnekleri, erişte otu (*Zostera sp.*) ve su sümbülügilleri (*Potamogeton spp.*) içerir. Batık su bitkileri arasında özellikle yelpaze otu, boynuz otu ve binyaprak ile çok karşılaşılır. Bunlar su içinde batık olarak yaşarlar, ya da suyun içinde askıda köksüz olarak bulunurlar veya köklü olarak dip çökeltilerine tutunurlar. Genel olarak yeşil olan kısımları su içindedir. Genelde soğuk ancak iyi ışık alan sularda yaşarlar. Alglerin su yüzeyini kaplaması durumunda gelişme hızları yavaşlamaktadır. Su mercimeği ile kıyaslandığında nütrient giderme kapasiteleri çok düşüktür. Atıksu arıtımında kullanımları sınırlıdır. En yaygın kullanılan tür *Eledoa sp.*'dir [42, 61].
- Köklü Su Bitkileri (Emergent): Bu bitkiler, genellikle su yüzeyinin üzerinde kıyı şeridinde yakın litoral bölgede bulunan köklü bitkilerdir. Emergent bitkilerin gövdeleri ve kökleri, dalga hareketine dayanmak için biraz serttir. Örnekler arasında nilüferler (*Nymphaea sp.*) bulunur [61]. Köklü su bitkilerinin en popülerleri kedikuyruğugiller, sığırsazıgiller, hasırsazıgiller ve köpeksazıgillerdir. Bunlara genel bir isim olarak su kamışı denilmektedir. Türkiye'de bataklık ve su birikintilerinde bol miktarda rastlanılmaktadır. Köklü su bitkileri ile arıtmada en önemli proses bakteri dönüşümüdür. Köklü bitkilerin nütrient giderme verimleri oldukça yüksektir [42].



Şekil 26. Alg, Yüzen Bitki, Batık Bitki ve Köklü Su Bitkisi Örnekleri [61]

Tüm sucul bitkilerde temel arıtım mikroorganizmalarla bitkiler arasındaki ilişkilere yani mikrobiyolojik arıtmaya dayanmaktadır. Su kaynaklarının nütrient gideriminde günümüze kadar birçok sucul bitki kullanılmıştır. Bunlardan bazıları; *Lemnaceae* familyası türleri, *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Hydrocotyle umbellata*, *Azolla caroliniana*, *Egeria densa*, türleridir. Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan sucul bitkilerin bazıları *Lemna gibba*, *Lemna minor*, *Wolffia arrhiza*, *Spirodela pollyrriza* gibi sucul bitkilerdir. Bu bitkilerin atık sulardan besi maddesi giderim etkinliği; iklime, türüne, çalışma koşullarına, besleme suyuna ve istenen çıkış suyu kalitesine bağlıdır. Bunlardan en yüksek ve en ekonomik arıtım potansiyeline sahip bitki türleri ise su mercimeği türleridir [58].

Yüzer sulak alanlarda kullanılan köklü sucul bitkilerle yapılan tedavi ile *Eichhornia crassipes* (Su sümbülü), *Pistia stratiotes* (su marul), *Lemna sp.* (ördek otu) veya *Azolla sp.* (su eğrelti) gibi yüzen bitkilerin kullanıldığı besin giderimi yöntemi karıştırılmamalıdır. Tablo 5'te yapılan çeşitli çalışmalardan elde edilmiş bazı sucul

bitkilerin nütrient giderim yüzdeleri ve bitkinin birim zamanda birim metrekarede giderdiği nütrient giderim miktarları verilmiştir.

Tablo 5. Sucul Bitkilerin Nütirent Giderimi

| Bitki Türleri | Bitki N Alm miktarı (g/m ² /gün) | Bitki N Alm Yüzdesi (%) | Bitki P Alm miktarı (g/m ² /gün) | Bitki P Alm Yüzdesi (%) | Referans |
|---|---|-------------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|
| <i>Ipomoea aquatica</i> | 0,18 – 0,51 | 15 - 44 | | | S. Karnchanawong, J. Sanjitt, 1995 |
| <i>Phragmites mauritianus</i> | 0,015 | 19 | 0,04 | 37 | S.B.K. Sekiranda, S. Kiwanuka, 1997 |
| <i>Lemna gibba</i> | | 30 - 47 | | | Korner ve Vermaat, 1998 |
| <i>Scirpus cyperinus</i> | | 31- 45 | | | Huang ve ark., 2000 |
| <i>T. latifolia</i> | | 44 - 73 | | | |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | | | 0,243 | | L. Wen, F. Recknagel, 2002 |
| <i>Duckweed</i> | | | 0,087 | | |
| <i>Azolla sp.</i> | | | 0,033 | | |
| <i>Myriophyllum aquaticum, Paspalum paspalodes ve Ranunculus repens</i> | | | 0,043 - 0,086 | | L. Wen, F. Recknagel, 2002 |
| <i>Lemna minor</i> | 3,36 | | | | Cheng ve ark., 2002 |
| <i>Cyperus papyrus</i> | | 69,5 | | | J. Kyambadde ve ark., 2004 |
| <i>Miscanthidium violaceum</i> | | 15,8 | | 30,7 | |
| <i>Lemna gibba</i> | | 10 - 20 | | | Ran et al, 2004 |
| <i>Cyperus papyrus</i> | | 28,5 | | 11,2 | J. Kyambadde, 2005 |
| <i>Myscanthidium violaceum</i> | | 15 | | 9,3 | |
| <i>P. australis</i> | | 96 | | | Huett ve ark., 2005 |
| <i>Vetiveria zizanioides</i> | | 78 | | | Yang ve ark., 2007 |
| <i>Pennisetum purpureum</i> | | 85 | | | |
| <i>Canna indica</i> | | 92 | | | |
| <i>T. latifolia</i> | | 79 | | | |
| <i>Lemna minor</i> | | 83 - 87 | | | Ozengin ve Elmaci 2007 |
| <i>Duckweed</i> | | 38,8 | | | Peng et al, 2007 |
| <i>Phragmites communis</i> | | 92,42 | | | Yang ve ark., 2007 |

| Bitki Türleri | Bitki N Alm miktarı (g/m2/gün) | Bitki N Alm Yüzdesi (%) | Bitki P Alm miktarı (g/m2/gün) | Bitki P Alm Yüzdesi (%) | Referans |
|---|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| <i>Vetiveria zizanioides</i> | 0,0015 - 0,0059 | | 0,0057 - 0,026 | | K. Boonsong, M. Chansiri, 2008 |
| <i>Canna sp.</i> | 0,64 - 0,44 | | | | L. Sun, Y. Liu, H. Jin, 2009 |
| <i>Phragmites spp, ve T. Latifolia</i> | | 38 | | | Kouki ve ark., 2009 |
| <i>Carex sp.</i> | 0,55 | | 0,02 | | Van De Moortel ve ark., 2010 |
| <i>Oenanthe javanica 'Blume'</i> | 0,0465 | | 0,0021 | | X. Zhou, G. Wang, 2010 |
| <i>Carex virgata</i> | | | 0,0005 | | C.C. Tanner, T.R. Headley, 2011 |
| <i>Cyperus ustulatus</i> | | | 0,0085 | | |
| <i>Juncus edgariae</i> | | | 0,0052 | | |
| <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> | | | 0,0009 | | |
| <i>Typha orientalis</i> | 0,0440 | 21 | 0,0140 | 14,31 | H. Wu ve ark., 2011 |
| <i>Phragmites australis</i> | 0,0271 | 14,29 | 0,0107 | 10,76 | |
| <i>Scripus validus</i> | 0,0950 | 45,52 | 0,0119 | 32,27 | |
| <i>Iris pseudacorus</i> | 0,1100 | 51,89 | 0,0115 | 34,17 | |
| <i>Carex virgata ve Cyperus ustulatus</i> | 0,239 - 0,157 | 45 - 77 | 0,0054 - 0,0023 | 32- 35 | C.C. Tanner ve ark., 2011 |
| <i>Oenanthe javanica</i> | 0,0167 | | 0,0013 | | L. Zhu, Z. Li, T. Ketola, 2011 |
| <i>Gypsophila sp.</i> | 0,0302 | | 0,0019 | | |
| <i>Rohdea japonica</i> | 0,0039 | | 0,0005 | | |
| <i>Dracaena sanderiana</i> | 0,0132 | | 0,0006 | | |
| <i>Gardenia jasminoides var. Grandiflora,</i> | 0,0047 | | 0,0006 | | |
| <i>Gardenia jasminoides var. Prostrate</i> | 0,0049 | | 0,0005 | | |
| <i>Salix babylonica</i> | 0,0345 | | 0,0025 | | |
| <i>Lolium perenne var.</i> | 0,011 - 0,014 | | 0,004 | | H. Li ve ark., 2011 |
| <i>Canna flaccida ve Juncus effuses</i> | 0,036 | | 0,0015 | | Chang ve ark., 2012 |
| <i>Rumex acetosa</i> | 0,060 - 0,057 | | | | Zhou ve ark., 2012 |

| Bitki Türleri | Bitki N Alım miktarı (g/m2/gün) | Bitki N Alım Yüzdesi (%) | Bitki P Alım miktarı (g/m2/gün) | Bitki P Alım Yüzdesi (%) | Referans |
|---|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|---|
| <i>Triarrhena lutarioriparia</i> | 0,01 | | | | Zhou ve ark., 2012 |
| <i>Vetiveria zizanioides</i> | 0,01 | | | | |
| <i>Miscanthus sinensis Anderss sp.</i> | 0,02 | | | | |
| <i>Acorus calamus</i> | 0,04 | | | | |
| <i>Typha angustifolia</i> | 0,0162 | | 0,0016 | | L.H.C. Chua ve ark., 2012 |
| <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 0,0017 | | 0,0002 | | |
| <i>Polygonum barbatum</i> | 0,0028 | | 0,0004 | | |
| <i>Thalia dealbata</i> | 0.1668 | | 0.022 | | F. Zhao ve ark., 2012 |
| <i>Geophila herbacea</i> | 0,057 | 2,8 | 0,002 | 10,9 | H. Li ve ark., 2012 |
| <i>Lolium peren 'Caddieshack'</i> | 0,06 | 4,5 | 0,002 | 12,3 | |
| <i>Lolium perenne</i> | 0,067 - 0,061 | 3,3 - 6,1 | 0,003 | 9,3 - 19,6 | |
| <i>Scripus californicus ve Potendaria cordata</i> | 0,036 | | | 0,00015 | N.B. Chang ve ark., 2012 |
| <i>Canna flaccida</i> | 0,22 | | 0,014 | | White ve Cousins, 2013 |
| <i>Juncus effusus</i> | 0,39 | | 0,024 | | |
| <i>Canna flaccida</i> | 0,22 | 16,4 | 0,014 | 25,5 | S,A, White, M,M, Cousins, 2013 |
| <i>Juncus effusus</i> | 0,39 | 28,3 | 0,024 | 41,6 | |
| <i>Festuca arundinacea</i> | 0,0558 | 55,8 | 0,0025 | 2,5 | F. Zhao ve ark., 2013 |
| <i>Lolium perenne</i> | | 18,17 | | | C. Chen ve ark., 2013 |
| <i>Ipomonea aquatica</i> | | 7,5 | | 8,8 | H. Song ve ark., 2014 |
| <i>Pontederia cordata</i> | | | 0,0012 | | C.Y. Wang, D.J. Sample, 2014 |
| <i>Schoenoplectus sp.</i> | | | 0,0003 | | |
| <i>Typha angustifolia</i> | 0,0132 | 48 | 0,0005 | 73 | H.E. Keizer-Vlek ve Ark., 2014 |
| <i>Iris pseudacorus</i> | 0,2044 | 74 | 0,0056 | 60 | |
| <i>Alisma subcordatum, Carex stricta, Iris versicolor, Juncus effusus ve Pontederia cordata</i> | 0.009 | 34,4 | | | McAndrew, B., Ahn, C. ve Spooner, J. 2016 |

6. NÜTRİENT GİDERİMİNDE YÜZER SULAK ALAN VE SUCUL BİTKİ UYGULAMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Doğal süreçler suyun nehir, kanal, göl boyunca akışı sırasında suyun kendi kendini arıtmasında her zaman önemi bir rol oynamıştır. Son yıllarda bu doğal arıtma süreçlerinin yüzer sulak alanlar inşa edilerek hızlandırılması ve daha etkili bir hale getirilmesi önemli ve avantajlı bir uygulama olarak dikkat çekmektedir. Doğal olarak meydana gelen süreçleri taklit eden yüzer sulak alanlar, yayılı ve noktasal kaynaklı kirleticilerle kirlenmiş durgun suların, akarsuların, taşkın sularının, evsel ve tarım kaynaklı atık suların arıtılmasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüzer sulak alanlar dünya çapında yararlı yeşil teknolojiler olarak kullanılsa da uygulamaları henüz ülkemizde yapılmamıştır.

Yüzer sulak alanlar havza bazlı tüm tedbirlerin alınmasıyla, su kaynağına giren besin elementlerinin kontrol altına alınmasından sonra, ilave olarak tamamlayıcı bir tedbir olarak yapılmalıdır.

İnşa edilmiş yüzen sulak alanlar ile su kalitesi iyileştirilmesi düşük maliyetli, çok düşük enerji harcayan ve işletme zorluğu olmayan bir prosestir. Ancak bu umut verici restorasyon araçları sistemlerin verimli bir şekilde işleyebilmesi için dikkatlice tasarlanmalı ve inşa edilmelidir.

Yüzer sulak alan ile ilgili birçok çalışma, su kalitesi iyileştirmede ya da atık su arıtımında kullanımı için güçlü bir potansiyel olduğunu öne sürmektedir. Ancak yapılan çalışmaların çoğu mezokozm gibi simüle ortamlarda gerçekleştirilmiş olup, dünyadaki yerleşik uygulama sayısı çalışmaları nispeten az sayıda kalmıştır. Bu nedenle, su kalitesi iyileştirmede ya da atık su arıtımında tasarımın yanı sıra yüzer sulak alanın kendi (yüzey alanı kapsamı ve bitki yoğunluğu) özelliklerinin, gerçek uygulamadaki performansını araştırmak önemlidir [67].

Aşağıda verilen Tablo 6'da, yapılan çeşitli çalışmalardan elde edilmiş ortalama yüzer sulak alan azot ve fosfor giderim yüzdeleri verilmiştir. Bu tabloda yer alan çalışma sonuçlarına bakıldığında toplam azot (TN) için ortalama %55,5 ve toplam fosfor (TP) için ortalama %54,5 giderim sağlandığı görülmektedir. Verilen giderim

verimi ortalama sonuçları yalnızca aşağıdaki tabloda verilen çalışmaları kapsamakta olup, bazı pik değerler ihmal edilmiş ve aralık verilen çalışmalarda da düşük değer baz alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Yüzer Sulak Alanların Nütrent Giderimi

| Uygulama Yeri | Uygulama Ölçeği | Bitki Türleri | TN Giderim Yüzdesi (%) | TP Giderim Yüzdesi (%) | Referans | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Çin | | <i>Lolium perenne</i> | 45,3–57,9 | | C. Chen ve ark., 2013 | |
| | İn situ uygulama | <i>Equisetum sp, Ipomoea aquatic</i> | | 87,5 | Y. Sheng ve ark., 2013 | |
| | Mezokozm | <i>Ipomoea aquatica</i> | 66,4–76,5 | 45,7–61,7 | X.N. Li ve ark., 2010 | |
| | Mikrokoz m | <i>Festuca arundinacea</i> | 90,1 | 72,1 | F. Zhao ve ark., 2013 | |
| | Mezokozm | <i>Lolium perenne Caddieshack</i> | 62,2 | 63,1 | H. Li ve ark., 2012 | |
| | Mezokozm | <i>Lolium multiflorum</i> | 84 | 90,4 | Q. Xian ve ark., 2010 | |
| | | | 80,3 | 89,9 | | |
| | | | 79,6 | 88,3 | | |
| | Mezokozm | <i>Canna sp,</i> | 50,4 | | L. Sun, Y. Liu, H. Jin, 2009 | |
| | Mezokozm | <i>Canna sp, Calamus sp.</i> | 76,94 | | W. Cao, Y. Zhang, 2014 | |
| | Mezokozm | <i>Ipomoea aquatica</i> | 30,7 | 38,2 | H. Song ve ark., 2014 | |
| | Mezokozm | <i>Oenanthe javanica</i> | 90,8 | 76,5 | X. Zhou, G. Wang, 2010 | |
| | Mikrokoz m | <i>Lolium perenne var</i> | 55,6 | 87,1 | H. Li ve ark., 2011 | |
| | Mikrokoz m | <i>Oenanthe javanica</i> | 91,3 | 58 | Z.J. Xin ve ark., 2012 | |
| | Mikrokoz m | | <i>Canna generalis</i> | 76,3 | 81,4 | C.B. Zhang ve ark., 2014 |
| | | | <i>Scirpus validus</i> | 90,5 | 80,8 | |
| <i>Alternanthera philoxeroides</i> | | | 86 | 85,7 | | |
| <i>Thalia geniculata</i> | | | 54,5 | 78,9 | | |
| <i>Cyperus alternifolius</i> | | | 72,7 | 82,3 | | |
| Pilot Uygulama | <i>Ipomoea aquatica</i> | 30,6 | 18,2 | W. Li, Z. Li, 2009 | | |

| Uygulama Yeri | Uygulama Ölçeği | Bitki Türleri | TN Giderim Yüzdesi (%) | TP Giderim Yüzdesi (%) | Referans |
|------------------------------|--------------------------------|--|------------------------|------------------------|---------------------------------|
| | Mikrokozmm ve in situ uygulama | <i>Triarrhena lutarioriparia,</i> <i>Miscanthus sinensis,</i> <i>Anderss sp,</i> | 50,3 | 86,5 | F. Zhao ve ark., 2012 |
| | | <i>Zizania caduciflora,</i> <i>Thalia dealbata, Vetiveria zizanoide, Acorus calamus</i> | | | |
| | İn situ uygulama | <i>Eichhria crassipes,</i> <i>Pisitia stratiotes, Jussiae reppens,</i> | 36,9 | 43,3 | F. Zhao ve ark., 2011 |
| | | <i>Hydrocotyle verticillata,</i> <i>Hydrocharis dubia,</i> <i>Myriophyllum</i> | | | |
| | | <i>Potendaria cordata,</i> <i>Canna indica, Calla oalustris</i> | | | |
| | Mezokozm | <i>Oenanthe javanica</i> | 31–64 | 8–15 | Z. Yang ve ark., 2008 |
| | Mezokozm | <i>Rumex acetosa Linn</i> | 92,4–94,6 | | X.-H. Zhou ve ark., 2012 |
| | Mezokozm | <i>Canna indica</i> | 42,3 | 32,7 | F. Bu, X. Xu, 2013 |
| | | <i>Acorus calamus</i> | 38,4 | 28,9 | |
| | | <i>Cyperus alternifolius</i> | 33,2 | 24,9 | |
| <i>Vetiveria zizanioides</i> | | 28,3 | 20,7 | | |
| ABD | Mezokozm | <i>Canna flaccida, Juncus effuses</i> | 58–83,5 | 45,5–75 | S.A. White, M.M. Cousins, 2013 |
| | Mezokozm | <i>Eichhornia crassipes</i> | 84,5–91,7 | 82–98,5 | R.D. Sooknah, A.C. Wilkie, 2004 |
| | Mezokozm | <i>Juncus effusus and Pontederia cordata</i> | 15,7 | 47,7 | N. Bin Chang ve ark., 2013 |
| | Mezokozm | <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> | 49,8 | 67,5 | C.Y. Wang, D.J. Sample, 2014 |

| Uygulama Yeri | Uygulama Ölçeği | Bitki Türleri | TN Giderim Yüzdesi (%) | TP Giderim Yüzdesi (%) | Referans |
|---------------|------------------|---|------------------------|------------------------|---|
| | Mezokozm | <i>Potendaria cordata</i> | 49,1 | 68,6 | McAndrew, B., Ahn, C. ve Spooner, J. 2016 |
| | Pilot Uygulama | <i>Alisma subcordatum, Carex stricta, Iris versicolor, Juncus effusus ve Pontederia cordata</i> | 34,4 | | |
| İtalya | İn situ uygulama | <i>Chrysopogon zizanioides, Typha latifolia, Sparganium erectum</i> | | 65 | G. de Stefani ve ark., 2011 |
| Belçika | Mezokozm | <i>Carex</i> >95% | 42,3 | 22,1 | Van De Moortel ve ark., 2010 |
| Hollanda | Mezokozm | <i>Iris pseudacorus</i> | 98 | 92 | H.E. Keizer-Vlek ve ark. 2014 |
| | Mezokozm | <i>Typha angustifolia</i> | 57 | 23 | |
| Yeni Zelanda | İn situ uygulama | <i>Carex Virgata</i> | | 50 | K.E. Borne ve ark., 2013 |
| | Mezokozm | <i>Glyceria maxima</i> | 46-49 | | A. Van Oostrom, 1995 |
| | Mezokozm | <i>Carex virgata ve Cyperus ustulatus</i> | 45 - 77 | 32- 35 | C.C. Tanner ve ark., 2011 |
| Tayland | Mezokozm | <i>Vetiveria zizanioides</i> | 21,9-57,6 | 13,5-31,3 | K. Boonsong, M. Chansiri, 2008 |
| Singapur | Mezokozm | <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 67,5 | 39,2 | L.H.C. Chua ve ark., 2012 |
| | Mezokozm | <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 40,8 | 19,1 | |
| | | <i>Polygonum barbatum</i> | 7,8 | 46 | |
| Uganda | Mikrokoz m | <i>Cyperus papyrus</i> | 90,4 | 84,5 | F. Kansime ve ark., 2005 |
| | | <i>Colocasia esculenta</i> | 67,8 | 63,8 | |
| | Mezokozm | <i>Phragmites mauritianus</i> | | 75,1 | S.B.K. Sekiranda, S. Kiwanuka, 1997 |
| | Pilot | <i>Cyperus papyrus</i> | 66,8 | 61,8 | J. Kyambadde, 2005 |
| | | <i>Miscanthidium violaceum</i> | 56 | 40,8 | |

| Uygulama Yeri | Uygulama Ölçeği | Bitki Türleri | TN Giderim Yüzdesi (%) | TP Giderim Yüzdesi (%) | Referans |
|---------------|-----------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|
| | Pilot | <i>Cyperus papyrus</i> | 72,5 | | J. Kyambadde ve ark., 2004 |
| | | <i>Miscanthidium violaceum</i> | 69,4 | | |
| | Pilot | <i>Ipomonea aquatica</i> | 25,4 | | S. Karnchanawong, J. Sanjitt, 1995 |

Tablo 5 ve Tablo 6’da verilen çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar görüldüğü üzere çok değişken olup, bu yüzer sulak alan sistemlerinde; bitki çeşidi, iklim şartları, kirlenme türü ve özellikleri, kirlenme yoğunluğu gibi çok fazla değişken parametre olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda nütrient giderimi hesaplamalarında da farklılıklar olup, bazı çalışmalarda nütrient giderimi hesaplanırken sadece bitkinin biyokütlesine dahil ettiği azot ve fosfor miktarı hesaba katılmıştır. Diğer fiziksel ve kimyasal giderim süreçleri hesaplamaya dahil edilmemiştir. Bu da aslında yüzer sulak alan uygulamalarının mevcut potansiyelinin daha fazla olabileceğini göstermektedir.

Yüzer sulak alan sistemlerinde uygun bitki seçimi uygulamanın başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle uygulanacak bitkilerin alanın iklim ve coğrafik koşullarına uyum sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle öncelikle yerel türler tercih edilmektedir. Bu kapsamda ülkemizde yer alan sucül bitki türlerini tespit etmek amacıyla, Türkiye sınırları (± 20 km) içerisindeki sucül habitatlarda yaşayan bitki ve su yosunları IUCN (Uluslararası Doğa ve Doğal Kaynakları Koruma Birliği) 2018-2 verileri doğrultusunda belirlenerek Ek-1’de sunulmuştur.

Tablo 5 ve Tablo 6’daki çalışmalarda kullanılan çeşitli bitki türleri ile IUCN verileri doğrultusunda Türkiye’de yer alan sucül bitki türleri karşılaştırılmış olup, karşılaştırma sonucu ülkemizde de yer alan tür ve cins düzeyindeki bitkiler aşağıda verilmiştir.

Tür: *Iris pseudacorus*, *Juncus effusus*, *Lemna gibba*, *Lemna minör*, *Phragmites australis*, *Schoenoplectus tabernaemontani*, *Sparganium erectum* ve *Typha latifolia*

Cins: *Alisma sp.*, *Carex sp.*, *Colocasia sp.*, *Cyperus sp.*, *Equisetum sp.*, *Glyceria sp.*, *Hydrocharis sp.*, *Hydrocotyle sp.*, *Iris sp.*, *Juncus sp.*, *Lemna sp.*, *Myriophyllum sp.*, *Oenanthe sp.*, *Phragmites sp.*, *Ranunculus sp.*, *Salix sp.*, *Schoenoplectus sp.*, *Scirpus sp.*, *Sparganium sp.* ve *Typha sp.*

7. YÜZER SULAK ALAN UYGULAMA ÖRNEĞİ

Bir yüzer sulak alan tasarımında öncelikli olarak dikkate alınması gereken temel faktörler; uygun bitki türleri seçimi, bitki örtüsünün yüzdesi, büyüme ortamı, derinlik ve yüzer alan materyalidir. Bu faktörler arasında özellikle uygulanacak bitkinin seçimi nütrient gideriminde en etkin faktördür. Tasarım yapılırken bitkilerin uygulama alanının iklim ve coğrafik koşullarına uyum sağlamasına dikkat edilmelidir.

Aşağıdaki uygulama örneği bitkinin birim zamanda birim metrekarede giderdiği fosfor miktarı dikkate alınarak tasarlanmıştır.

Yapılan Kabuller ve Tasarım Adımları

Seçilen uygulama alanına ilişkin veriler, Bakanlığımız tarafından 2016-2018 yılları arasında yürütülen “Durgun Sularda Özümleme Kapasitesinin Belirlenmesi ve Su Kalitesinin İyileştirilmesi Projesi” sonuçlarından alınmıştır. Projede 11 öncelikli havzadaki durgun sularda besin elementleri açısından özümleme kapasiteleri hesaplanmış ve özümleme kapasitesini aşan durgun sularda mevcut durum ve gerekli yük azaltımına ilişkin kapasite hesapları yapılmıştır. Proje çıktılarından elde edilen sonuçlarla oluşturulmuş Ek-3’de verilen tabloda, 3 havzadaki özümleme kapasitesini aşan durgun sularda gerekli yük azaltımı ve bu yükü ne kadar yüzer sulak alan kurulumu ile giderebileceğini gösteren hesaplar sunulmuştur.

Ek-3’de verilen uygulama örneği tablosunda bazı durgun suların özümleme kapasitesini aşmaması için mevcut durumdaki yıllık toplam fosfor yükünün

giderilmesi sağlanarak, özümleme kapasitesi sınırlarına getirilmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle su kaynağına giren noktasal ve yayılı kirletici kaynaklar kontrol altına alınarak, havza bazlı tedbirler alınmalıdır. Sonrasında da model çalışması ile tüm tedbirler ortaya konularak bir değerlendirme yapılmalı ve karar verilerek tamamlayıcı tedbirler uygulanmalıdır. Alınan önlemin/önlemlerin ötrofikasyon durumu üzerindeki etkinliği ve maliyeti değerlendirilmelidir.

Ek-3’de verilen yüzer sulak alan uygulama tablosu mevcut durumdaki yükleri baz almış olup, olması gereken havza bazlı tedbirlerden sonra tamamlayıcı olarak yüzer sulak alan yöntemini uygulamaktır. Zaten tablo sonuçlarına bakıldığında bazı durgun sularda çok fazla alanda yüzer sulak alan kurulumu gerektirdiği için yüzer sulak alan yöntemi bu su kaynakları için uygun değildir. Çünkü su kaynağının yüzey alanının tamamına yakını ya da çok fazla miktarının yüzer alan ile kaplanması maliyet etkin bir yöntem değildir. Bu sebeple öncelikle kaynağında kontrol edilecek kirletici azot ve fosfor yükü, su kaynağı içinde de tamamlayıcı önlemlerle ele alınarak iyileştirme maliyet etkin bir yöntemle değerlendirmelidir.

Yüzer sulak alan uygulama alanı olarak Ek-3’den hipertrofik durumda olan ve özümleme kapasitesi %83 oranında aşılmış durumda olan Sazlı Gölü seçilmiştir.

Sazlı Gölü, Gediz Havzası içerisinde yer almakta olup, Gediz Havzası’nda doğal göl sayısı yok denecek kadar azdır. Havzada yer alan en önemli doğal göl, Akhisar’ın Marmara beldesi yakınlarındaki Marmara’dır. Marmara’nın dışında doğal göl olarak Gölcük ve Sazlı Gölü vardır. Sazlı Göl’ün alanı 21 ha olup, İzmir il sınırları içerisinde yer almaktadır. Durgun suyun yapısı sazlık ve bataklıktır.

Sazlı Gölü’nde yayılı baskılar tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Gölün hidrolojik sınırına giren 24,037 ha tarım alanına denk gelen yaklaşık 22,202 ton/yıl gübre kullanılmaktadır. Bununda alıcı ortama ulaşan TN değeri 0,598 ton/yıl, TP değeri 0,0178 ton/yıl’dır. Gölün hidrolojik sınırında 1 ha alanı kaplayan kırsal yerleşim alanlarında, yüzeysel akış sonucu gelen alıcı ortama ulaşan TN miktarı 0,009 ton/yıl, TP miktarı ise 0,001 ton/yıl’dır. Bunun dışında Sazlı Gölü doğal, yoğun yüzey alanı değişimi bulunmayan ve su çekimi baskısında bulunmayan bir göldür.

Uygulama Alanı: Gediz Havzası, Sazlı Gölü (Hipertrofik ve özümleme kapasitesi %83 oranında aşılış durumda)

Bitki P Alım miktarı (g/m²/gün): Tablo 6’da verilen değerler arasından pik değerler ihmal edilerek ortalama alınmış ve tasarım değeri 0,018 olarak kabul edilmiştir.

Göl Yüzey Alanı: 19,03 ha

Maksimum Su Kotu: 4 m

Göldeki Mevcut Fosfor (P) Yüğü: 18700 gr/yıl

Göl Özümleme Kapasitesi: 3300 gr/yıl (P yüğü ağısından)

Giderilmesi Gereken P Yüğü: 15400 gr/yıl

Yüzer Alan Maliyeti: 51.11 \$ / m² (Beemats LLC, ABD firmasından alınan 2018 Aralık fiyatı)

Tablo 7. Sazlı Gölü Yüzer Sulak Maliyeti

| Gölün Adı | Giderilmesi Gereken P Yüğü (gr/gün) | Kullanılması Gereken Yüzer Alan Miktarı (m²) | Maliyet (\$) |
|------------------|--|--|---------------------|
| Sazlı Gölü | 42,19 | 2344 | 119.801 |

Yapılan bu tasarım sonucunda, özümleme kapasitesi %83 oranında aşılış durumda olan Sazlı Gölün özümleme kapasitesi aşılmamış duruma getirilmesi için yüzey alanın %1,23’ünün yüzer sulak alan ile kaplanacağı hesaplanmıştır. Bu uygulama örneğinde, nütrient giderimi sadece bitkinin biyokütlesine dahil ettiği fosfor miktarı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Mevcut tasarımda diğer fiziksel ve kimyasal giderim süreçleri dikkate alınmadığından kullanılması gereken yüzer alan hesaplanandan daha az olacaktır. Bu sebeple yüzer sulak alan uygulamalarında tüm giderim süreçlerinin hesaplanması zor olduğundan, kullanılması gereken yüzer alanı minimumda tutmak gerekmektedir. Ayrıca verilen maliyet hazır sistem tasarlayan

yurt dışı kaynaklı bir firmadan alınmış olup, yüzer alan materyali çok daha ucuza yerel kaynaklardan da elde edilebilecektir.

Yüzer sulak alan tedavisi Sazlı Gölü'ndeki tüm tedbirler alındıktan sonra tamamlayıcı olarak önerilmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, su kaynaklarında ötrofikasyonun önlenmesi ve kontrolüne yönelik yöntemler hakkında bilgi verilmiş ve nütrient gideriminde doğayı biyomimkri ile taklit eden yüzer sulak alanların konsantre sulak alan etkisi incelenmiştir. Yüzer sulak alan uygulamalarının, dünyadaki örnekleri ve mevcut çalışmaları araştırılmış, nütrient giderim süreçleri, tasarım faktörleri, avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Elde edilen literatür sonuçları listelenmiş ve bu sonuçlar doğrultusunda bir yüzer sulak alan uygulama örneği yapılmıştır. IUCN verilerine göre ülkemizde yer alan sucul bitkiler verilmiş ve dünyadaki yüzer sulak alanlarda kullanım durumları sunulmuştur. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler şunlardır;

- Ötrofikasyonun önlenmesi ve kontrolünde uygulanması gereken ilk adım; su kaynağına nütrient akışına yol açan veya yol açabilecek bütün antropojenik kaynakların önlenmesidir ki bu zaten olması gerektir. Sonraki adımda, alınan önlemin/önlemlerin ötrofikasyon durumu üzerindeki etkinliği ve maliyeti değerlendirilmelidir. Alınacak önlemler yeterli olmadığında iyileştirme yöntemlerinden hangilerinin en uygun ve maliyet etkin olduğuna karar verilmelidir.
- Su kaynağına giren noktasal ve yayılı kirletici kaynaklar kontrol altına alınarak, öncelikle havza bazlı tedbirler alınmalıdır. Sonrasında da model çalışması ile tüm tedbirler ortaya konularak bir değerlendirme yapılmalı ve karar verilerek iyileştirici tedbirler uygulanmalıdır.
- Sulak alan ekosistemleri birçok habitattan daha çok birincil üretime sahiptir. Birincil üretimin aktif olması sebebi ile bu alanlar organik maddeleri, askıda katı

maddeleri, besin elementlerini, toksik maddeleri, ağır metalleri ve biyolojik unsurları giderebilmelerinden dolayı yüksek miktarda arıtım kapasitesine sahiptirler. Doğal sulak alanları taklit eden yüzer sulak alan gibi benzer yapılar da yüksek miktardaki nütrient konsantrasyonunun düşürülmesinde etkin rol oynamaktadır.

- Yüzer sulak alanların tasarımında izlenecek yol; su kaynağının fiziksel ve kimyasal koşulunu değerlendirmek, uygun bitki türlerini seçmek, gelişimi teşvik için büyüme ortamı eklemek, yüzer alanı tasarlamak ve kirlilik yüküne göre kapsama oranını belirlemek şeklinde sıralanabilir.
- Yüzer sulak alanlar, koşullar dikkate alınarak uygun şekilde kurulmaları halinde, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyetlerle su kolonundan nütrient gideriminde oldukça etkin bir yöntemdir. Ek toprak işleri veya arazi alımı gerektirmediği için, diğer tedavi seçeneklerinden çok daha düşük maliyetlerde kirlilik giderme sağlamakta, doğallıktan sapmayan ve çevresel zararları minimize eden bir yaklaşım ortaya koymaktadırlar. Yüzer sulak alanlar, mevcut arıtma sistemlerine ek, tedavi bileşenleri olarak eklenerek de arıtma performansını geliştirebilmektedir.
- Yüzer sulak alanlar, yayılı kirliliğin sebep olduğu sudaki besin kirliliğini azaltmak için alandaki veya diğer çevresel faktörlerdeki sınırlamalar nedeniyle mümkün olmayan havza bazlı iyi yönetim uygulamaları için de etkili bir alternatiftir.
- Yüzer sulak alan bitki sistemlerinin sudaki artan besin maddelerini gidermedeki etkinliği öncelikle, bitki biyokütle üretimine, mikrobiyal biyofilm aktivitesine ve sudaki besin konsantrasyonlarına bağlıdır.
- Yüzer sulak alanlar, tüm iklimlere uygun olmakla birlikte sistem performansı, değişen iklim koşullarına bağlı olarak farklılık gösterir. Kışın buz oluşumunu engelleyebilir ama özellikle azot giderim verimi daha düşüktür. En yüksek giderim sıcaklığın yüksek olduğu yaz aylarında olur. Sistem performansı konvansiyonel sistemlerden daha az tutarlılık arz eder.
- Yüzer sulak alan, yeni bir teknolojiyi temsil etmekle birlikte sistemlerin kirlilik giderme performansını araştıran ülkemizde henüz bir çalışma bulunmamaktadır. Dünyada da yapılan çalışmaların çoğunluğu mikrokozma/mezokozma gibi simüle

ortamlar ölçeğinde kalmıştır. Yapılacak çalışmalardan daha fazla sonuç alınacağı için yüzer sulak alanların etkili kirlilik giderme performansının gelecekte çok daha açıkça gösterilmesi beklenmektedir.

- Yüzer sulak alan uygulamalarından başarılı sonuçlar elde edilmesi, özellikle ülkemiz gibi enerji ihtiyacı yüksek ülkelerde gereksiz enerji sarfiyatını engelleyerek, tasarruf edilen enerjinin günlük hayata katılımını sağlayacaktır. Ayrıca uygulama performanslarının artması için; ek dinamik ortam eklenmesi (biyofilm yüzeyini artıracak), zeolit benzeri adsorptif materyallerin eklenmesi, suyun havalandırılması gibi sistem tasarımı geliştirilebilir.
- Potansiyel ekonomik getirileri olan bitkisel ürünler değerlendirilerek yüzer sulak alanlar ile hidroponik tarım yapılabilir. Satılabilir bir nihai ürünle eşleştirilebiliyorsa yüzer sulak alan, üretici karlılığını artırarak çevresel etkileri azaltabilmekte ve ek tarım alanı yaratmaktadır.
- Yüzer sulak alanlar ek ekosistem faaliyeti olarak da tehdit altındaki türlerin korunmasına yönelik, kuşlar gibi, yaban hayatı için, yaşam alanı sağlanması amacıyla özel olarak inşa edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- 1) Ghosh, T., Mondal, D. (2012). "Eutrophication: Causative factors and remedial measures". *Journal of Today's Biological Sciences: Research & Review*, 1(1), 153-178.
- 2) Leng, R. (2009). "The impacts of cultural eutrophication on lakes: A review of damages and nutrient control measures". *Writing*, 20, 33-39.
- 3) Smith, V.H., Schindler, D.W. (2009). "Eutrophication science: where do we go from here?". *Trends in ecology & evolution*, 24(4), 201-207.
- 4) Doğan-Sağlamtimur, N., & Sağlamtimur, B. (2018). Sucul Ortamlarda Ötrofikasyon Durumu ve Senaryoları. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 75-82.
- 5) Yetiş, Ü., Su (Kirliliği) Kimyası, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) sunum, 2016.
- 6) URL 1
<http://www.dwa.gov.za/iwqs/eutrophication/NEMP/02Eutrophication.pdf>.
- 7) Sibel Yiğit, 2004. Göllerde Ötrofikasyon Problemleri ve Çözüm Yolları, Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi, Sayı 09, 32-36.
- 8) European Communities, 2009. WFD CIS Guidance Document No. 23. Guidance Document on Eutrophication Assessment in the Context of European Water Policies.
- 9) Karpuzcu, M., Koçali, M., 2007. Göllerde Ötrofikasyon ve Çözüm Önerileri, Göller Kongresi Göller Yöresi, İç Anadolu Gölleri ve Sorunları, 09-10 Haziran, 86-92.
- 10) Ekholm, P., 2008. N:P Ratios in Estimating Nutrient Limitation in Aquatic Systems, Finnish Environment Institute.
- 11) Muslu, Y. 2001. Göl ve Haznelerde Su Kalitesi Yönetimi, İSKİ.
- 12) Karakaya, N., Öngen, A., ve Kınacı, C., 2002. Ötrofikasyon Kontrol Tekniklerinin Değerlendirilmesi. Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi, Cilt:12, Sayı:3, Sayfa 35-42.
- 13) URL 2 <http://www.cevremuhendisleri.net.otrofikasyon-sonucu-kirlenmis-bir-gol-nasil-iyilestirilir-pdf.-> Erişim Tarihi:15.09.2014.

- 14) Environment Agency, 2012. Freshwater eutrophication. A nationally significant water management issue. Briefing note for 10.12.2012 workshop.
- 15) Helsinki Commission, 2009. Eutrophication in the Baltic Sea, An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region, Baltic Marine Environment Protection Commission.
- 16) Ansari, A. A., Gill, S. S., & Khan, F. A. (2010). Eutrophication: threat to aquatic ecosystems. In *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer, Dordrecht.
- 17) Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018. Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğinin Kontrolü ve Yönetimi Çalışmaları Broşürü.
- 18) Dodds W.K. ve Oakes R.M., 2006. Controls on Nutrients Across a Prairie Stream Watershed: Land Use and Riparian Cover Effects. *Environmental Management* 37(5): 634–646.,
- 19) URL 3 <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/techpublications/TechPub-11/5-3-1.asp>.
- 20) Zheng, L., Paul M. J., Effects Of Eutrophication On Stream Ecosystems, Tetra Tech, Inc..
- 21) Li L., Li Y., Biswas D.K., Nian Y., Jiang G., 2008. Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China, *Bioresource Technology*, 99 (1656-1663).
- 22) Postolachi , L., Rusu, V., Lupascu, T., 2014. Managing Phosphorus Loads to Water Bodies. The Case of the Hydrographical Basin of the Prut River (Republic Of Moldova). Workshop on Managing Nitrogen and Phosphorus Loads to Water Bodies: Characterisation and solutions, Ispra, Italy.
- 23) Lewtas K., Paterson M., Venema H.D., Roy D., 2015. Manitoba Prairie Lakes: Eutrophication and In-Lake Remediation Treatments Literature Review.
- 24) Sondergaard, M., E. Jeppesen, J.P. Jensen, T. Lauridsen. 2000. Lake restoration in Denmark. *Lakes&Reservoirs: Research and Management*.
- 25) Cooke G.D., Welch E.B., Peterson S.A. ve Nichols S. A., 2005. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, Taylor & Francis Group, LLC).

- 26) Ansari A. A., Gill S. S., Lanza G.R. ve Rast W., 2011. Eutrophication: Causes, Consequences and Control, Springer.
- 27) Pulatsu S., Topçu A., Yılmaz E., 2015. Göllerde Ötrofikasyonun Kontrolü: Sediment Tarama Uygulamaları, Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der., 5(1): 51-56).
- 28) Beklioğlu, M. 2000. Göller, Besin Zinciri Yıkımı ve Biyomanipulasyon, Eymir ve Mogan Gölleri, Bilim ve Teknik Dergisi.
- 29) Schoumans, O.F. (Ed.), W.J. Chardon (Ed.), M. Bechmann, C. Gascuel-Oudou, G. Hofman, B. Kronvang, M.I. Litaor, A. Lo Porto, P. Newell-Price and G. Rubæk, 2011. Mitigation options for reducing nutrient emissions from agriculture. A study amongst European member states of Cost action 869., Wageningen, Alterra, Alterra-Report 2141.
- 30) Riseng, C. M., M. J. Wiley, Black R. W., A and Munn, M. D., 2011. Impacts of agricultural land use on biological integrity: a causal analysis. Ecological Applications, 21(8), 2011, 3128–3146.
- 31) Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü, Hassas Alanlar Dairesi Başkanlığı, (2013). Sulak Alanlar, Ankara, Türkiye.
- 32) Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2008). Biyoloji (Çeviri Editörleri: Ertunç Gündüz, Ali Demirsoy, İsmail Türkan). Ankara: Palme Yayıncılık.
- 33) URL 4 <https://www.atlasdergisi.com/kesfet/doga-cografya/5439.html>.
- 34) URL 5 <https://docplayer.biz.tr/4134630-Ekosistem-ve-ozellikleri.html>.
- 35) Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Amasya Yapay Sulak Alan Projesi Nihai Rapor, 2017.
- 36) Güney B., 2014. Havza Yönetim Planları İçerisinde Sulak Alanların Yeri, Kuş ve Habitat Direktifleriyle Olan İlişkisi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı Uzmanlık Tezi.
- 37) Nichols, P., Lucke, T., Drapper, D., & Walker, C. (2016). Performance evaluation of a floating treatment wetland in an urban catchment. Water, 8(6), 244.
- 38) URL 6 <http://midwestfloatingisland.com/wp-content/uploads/2015/05/Fish-Fry-Lake-Case-Study-2014-Update.pdf>.

- 39) URL 7 <http://midwestfloatingisland.com/wp-content/uploads/2015/05/Floating-Treatment-Wetlands-Remove-Nutrient-Loads-from-Eutrophied-Lake.pdf>.
- 40) URL 8 <http://www.floatingislandinternational.com/wp-content/uploads/2018/07/21.pdf>.
- 41) URL 9 <http://www.webmasto.com/dogadan-ilham-alan-inovasyon-biyomimikri>.
- 42) TÜBİTAK, MAM Çevre Enstitüsü, Yapay Sulak Alanlar El Kitabı.
- 43) Şener G., (2007). Ankara İli Kırsal Alanlardan Kaynaklanan Atıksuların Doğal Arıtma (Yapay Sulak Alan) İle Arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 44) Erkan S., (2012). Hibrit yapay sulak alan ve Adsorbant kolon sistemiyle alabalık yetiştiricilik tesisi atık sularının arıtılmasında bazı akvaryum bitkileri üretim denemesi, (Doctoral dissertation, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- 45) Lubnow F. S., 2014. Using Floating Wetland Islands to Reduce Nutrient Concentrations in Lake Ecosystems, National Wetlands Newsletter, Vol. 36, No. 6, Environmental Law Institute.
- 46) Aksu C., 2017. Hassas Alanlarda Analitik Hiyerarşi Metodu İle En Uygun İyileştirme Önlemlerinin Belirlenmesi: Manyas Gölü Örneği, Orman ve Su İşleri Bakanlığı Uzmanlık Tezi.
- 47) Bulut, I. (2011). Floating islands of Turkey. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 19, 526-531.
- 48) Danışman, H., Han, E., 2015. Yıldırım, D. D. Ü., & Fakültesi, F. E. Türkiye'nin Yüzen Adaları Ve Yapay Yüzen Ada Sistemleri.
- 49) Bulut, İ. (2012). Türkiye'nin yüzen adaları. Erzurum: Megaoffset Matbacılık.
- 50) Bulut, İ., Karapınar, B., & Özoğul, B. (2016). Karakuyu Gölü (Afyonkarahisar-Dinar) ve Yüzen Adaları. TÜCAUM Uluslararası Coğrafya Sempozyumu Ankara.
- 51) URL 10 <http://gezilecekyerler.com/bingol-yuzen-ada/>.

- 52) Sample, D., Wang, C. Y., & Fox, L. (2013). Innovative Best Management Fact Sheet. No. 1, Floating Treatment Wetlands.
- 53) Headley, T. R., & Tanner, C. C. (2008). Floating treatment wetlands: an innovative option for stormwater quality applications. In 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, November (Vol. 1, No. 7).
- 54) Mthembu S. M., 2012. Nitrogen and Phosphorus Removal from Agricultural Wastewater Using Constructed Rhizofiltration in Durban, South Africa, Journal of Agricultural Science and Technology A 2, 1142-1148.
- 55) Pavlineri N., Skoulikidis N. Th. ve Tsihrintzis V.A., 2016. Constructed Floating Wetlands: A Review of Research, Design, Operation and Management Aspects, and Data Meta-Analysis, Chemical Engineering Journal.
- 56) Dodkins, I., Mendzil, A. F. (2014). Enterprise Assist: Floating Treatment Wetlands (FTWs) İn Wastewater Treatment: Treatment Efficiency and Potential Benefits of Activated Carbon.
- 57) Yinanç, A., Adiloğlu, S. (2017). Arıtmada Doğal Bitkilerin Kullanımı, Modeller ve Pilot Çalışma Örneği: Kozan İlçesi.
- 58) Topal, M. ve ark., (2011). Bazı su mercimeklerinin nutrient gideriminde kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(2), 12-28.
- 59) Türkan, İ. (2008). Bitki fizyolojisi. Palme Yayınları, 455.
- 60) URL 10 <http://www.biomatrixwater.com/>
- 61) University of Washington, 2013, Volume I Floating Wetlands Research.
- 62) Hunt III, W. F., Winston, R. J., & Kennedy, S. G. (2012). Evaluation of Floating Wetland Islands (FWIs) as a Retrofit to Existing Stormwater Detention Basins. Biological and Agricultural Engineering Departement, North Carolina State University.
- 63) URL 11 <http://www.beemats.com/>

- 64) Zhao, F., Xi, S., Yang, X., Yang, W., Li, J., Gu, B., & He, Z. (2012). Purifying eutrophic river waters with integrated floating island systems. *Ecological Engineering*, 40, 53-60.
- 65) Doorenbos, J. (1977). Crop water requirements. Irrigation and drainage paper, 24.
- 66) Yıldız, F., & Gurer, İ. Sultansazlığı Sulak Alanı İçin Buharlaştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2(3), 247-254.
- 67) McAndrew, B., Ahn, C., & Spooner, J. (2016). Nitrogen and sediment capture of a floating treatment wetland on an urban stormwater retention pond the case of the rain project. *Sustainability*, 8(10), 972.
- 68) Tanner, C. C., Sukias, J., Park, J., Yates, C., & Headley, T. (2011). Floating Treatment Wetlands: A new tool for nutrient management in lakes and waterways. *Methods*, 2008(2011).
- 69) Lynch, J., Fox, L. J., Owen Jr, J. S., & Sample, D. J. (2015). Evaluation of commercial floating treatment wetland technologies for nutrient remediation of stormwater. *Ecological Engineering*, 75, 61-69.
- 70) Zhao, F., Xi, S., Yang, X., Yang, W., Li, J., Gu, B., & He, Z. (2012). Purifying eutrophic river waters with integrated floating island systems. *Ecological Engineering*, 40, 53-60.
- 71) Weragoda, S. K., Jinadasa, K. B. S. N., Zhang, D. Q., Gersberg, R. M., Tan, S. K., Tanaka, N., & Jern, N. W. (2012). Tropical application of floating treatment wetlands. *Wetlands*, 32(5), 955-961.
- 72) Güneş, A., Kumar, R., Pek, T., Yüksel, M., & Kabay, N. Yapay sulak alanlarda atık su rehabilitasyonunda kullanılan *Salvinia natans* ve *Lemna minor* bitki türlerinin su kalitesine olan etkileri. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 79.
- 73) Yılmaz, Z. (2004). SÜ Kampüs atıksularından su mercimeği (*Lemna minor* L.) ile nütrient giderimi (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- 74) URL 12 <http://carwiringdiagram.herokuapp.com/post/submerged-aquatic-plants-and-algae-management-for-lakes>

EK-1: TÜRKİYE’DE YER ALAN BAZI SUCUL BİTKİLER

| Sayı | Bitki Türü | Sayı | Bitki Türü |
|------|---------------------------------|------|-----------------------------------|
| 1 | <i>Agrostis canina</i> | 96 | <i>Lythrum junceum</i> |
| 2 | <i>Agrostis stolonifera</i> | 97 | <i>Lythrum portula</i> |
| 3 | <i>Aldrovanda vesiculosa</i> | 98 | <i>Lythrum salicaria</i> |
| 4 | <i>Alisma gramineum</i> | 99 | <i>Lythrum thymifolia</i> |
| 5 | <i>Alisma lanceolatum</i> | 100 | <i>Lythrum tribracteatum</i> |
| 6 | <i>Alisma plantago-aquatica</i> | 101 | <i>Marsilea quadrifolia</i> |
| 7 | <i>Apium graveolens</i> | 102 | <i>Mentha aquatica</i> |
| 8 | <i>Arundo donax</i> | 103 | <i>Mentha pulegium</i> |
| 9 | <i>Baldellia ranunculoides</i> | 104 | <i>Mentha spicata</i> |
| 10 | <i>Beckmannia eruciformis</i> | 105 | <i>Montia fontana</i> |
| 11 | <i>Berula erecta</i> | 106 | <i>Myosotis laxa</i> |
| 12 | <i>Bidens cernua</i> | 107 | <i>Myriophyllum spicatum</i> |
| 13 | <i>Bidens tripartita</i> | 108 | <i>Myriophyllum verticillatum</i> |
| 14 | <i>Bolboschoenus glaucus</i> | 109 | <i>Najas graminea</i> |
| 15 | <i>Bolboschoenus laticarpus</i> | 110 | <i>Najas marina</i> |
| 16 | <i>Bolboschoenus maritimus</i> | 111 | <i>Najas minor</i> |
| 17 | <i>Brachiaria eruciformis</i> | 112 | <i>Nasturtium officinale</i> |
| 18 | <i>Butomus umbellatus</i> | 113 | <i>Neottia cordata</i> |
| 19 | <i>Calamagrostis parsana</i> | 114 | <i>Nuphar lutea</i> |
| 20 | <i>Callitriche brutia</i> | 115 | <i>Nymphaea alba</i> |
| 21 | <i>Callitriche brutia</i> | 116 | <i>Nymphoides peltata</i> |
| 22 | <i>Callitriche stagnalis</i> | 117 | <i>Oenanthe aquatica</i> |
| 23 | <i>Callitriche truncata</i> | 118 | <i>Oenanthe fistulosa</i> |
| 24 | <i>Carex acutiformis</i> | 119 | <i>Panicum repens</i> |
| 25 | <i>Carex appropinquata</i> | 120 | <i>Persicaria amphibia</i> |
| 26 | <i>Carex cretica</i> | 121 | <i>Persicaria hydropiper</i> |
| 27 | <i>Carex lasiocarpa</i> | 122 | <i>Persicaria lapathifolia</i> |
| 28 | <i>Carex limosa</i> | 123 | <i>Persicaria maculosa</i> |
| 29 | <i>Carex paniculata</i> | 124 | <i>Persicaria salicifolia</i> |
| 30 | <i>Carex pseudocyperus</i> | 125 | <i>Phalaris arundinacea</i> |
| 31 | <i>Carex riparia</i> | 126 | <i>Phalaris truncata</i> |
| 32 | <i>Carex rostrata</i> | 127 | <i>Phragmites australis</i> |
| 33 | <i>Carex vesicaria</i> | 128 | <i>Pilularia minuta</i> |
| 34 | <i>Catabrosa aquatica</i> | 129 | <i>Potamogeton berchtoldii</i> |
| 35 | <i>Centella asiatica</i> | 130 | <i>Potamogeton coloratus</i> |

| Sayı | Bitki Türü | Sayı | Bitki Türü |
|------|----------------------------------|------|---------------------------------------|
| 36 | <i>Ceratophyllum muricatum</i> | 131 | <i>Potamogeton crispus</i> |
| 37 | <i>Ceratophyllum submersum</i> | 132 | <i>Potamogeton gramineus</i> |
| 38 | <i>Cicuta virosa</i> | 133 | <i>Potamogeton lucens</i> |
| 39 | <i>Cladium mariscus</i> | 134 | <i>Potamogeton natans</i> |
| 40 | <i>Corrigiola litoralis</i> | 135 | <i>Potamogeton nodosus</i> |
| 41 | <i>Cyperus difformis</i> | 136 | <i>Potamogeton obtusifolius</i> |
| 42 | <i>Cyperus flavescens</i> | 137 | <i>Potamogeton perfoliatus</i> |
| 43 | <i>Cyperus fuscus</i> | 138 | <i>Potamogeton pusillus</i> |
| 44 | <i>Cyperus glomeratus</i> | 139 | <i>Potamogeton trichoides</i> |
| 45 | <i>Cyperus longus</i> | 140 | <i>Ranunculus aquatilis</i> |
| 46 | <i>Cyperus michelianus</i> | 141 | <i>Ranunculus baudotii</i> |
| 47 | <i>Dactylorhiza baumanniana</i> | 142 | <i>Ranunculus flammula</i> |
| 48 | <i>Dactylorhiza cordigera</i> | 143 | <i>Ranunculus lateriflorus</i> |
| 49 | <i>Dactylorhiza sambucina</i> | 144 | <i>Ranunculus lingua</i> |
| 50 | <i>Damasonium polyspermum</i> | 145 | <i>Ranunculus peltatus</i> |
| 51 | <i>Elatine alsinastrum</i> | 146 | <i>Ranunculus rionii</i> |
| 52 | <i>Elatine macropoda</i> | 147 | <i>Ranunculus saniculifolius</i> |
| 53 | <i>Eleocharis carniolica</i> | 148 | <i>Ranunculus sphaerospermus</i> |
| 54 | <i>Eleocharis palustris</i> | 149 | <i>Ranunculus trichophyllus</i> |
| 55 | <i>Eleocharis quinqueflora</i> | 150 | <i>Rorippa amphibia</i> |
| 56 | <i>Eleocharis uniglumis</i> | 151 | <i>Saccharum ravennae</i> |
| 57 | <i>Equisetum fluviatile</i> | 152 | <i>Sagittaria sagittifolia</i> |
| 58 | <i>Equisetum palustre</i> | 153 | <i>Sagittaria trifolia</i> |
| 59 | <i>Eriophorum angustifolium</i> | 154 | <i>Salix excelsa</i> |
| 60 | <i>Fimbristylis bisumbellata</i> | 155 | <i>Salix libani</i> |
| 61 | <i>Fuirena pubescens</i> | 156 | <i>Salix purpurea</i> |
| 62 | <i>Glyceria fluitans</i> | 157 | <i>Salix xanthicola</i> |
| 63 | <i>Glyceria maxima</i> | 158 | <i>Samolus valerandi</i> |
| 64 | <i>Glyceria nemoralis</i> | 159 | <i>Schoenoplectus lacustris</i> |
| 65 | <i>Glyceria notata</i> | 160 | <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> |
| 66 | <i>Glyceria spicata</i> | 161 | <i>Schoenoplectus triqueter</i> |
| 67 | <i>Gratiola officinalis</i> | 162 | <i>Scirpus sylvaticus</i> |
| 68 | <i>Groenlandia densa</i> | 163 | <i>Selaginella denticulata</i> |
| 69 | <i>Hemarthria altissima</i> | 164 | <i>Sparganium emersum</i> |
| 70 | <i>Hippuris vulgaris</i> | 165 | <i>Sparganium erectum</i> |
| 71 | <i>Hydrilla verticillata</i> | 166 | <i>Sparganium natans</i> |

| Sayı | Bitki Türü | Sayı | Bitki Türü |
|------|---------------------------------|------|------------------------------------|
| 72 | <i>Hydrocharis morsus-ranae</i> | 167 | <i>Spirodela polyrhiza</i> |
| 73 | <i>Hydrocotyle vulgaris</i> | 168 | <i>Stratiotes aloides</i> |
| 74 | <i>Iris pseudacorus</i> | 169 | <i>Stuckenia pectinata</i> |
| 75 | <i>Isoetes haussknechtii</i> | 170 | <i>Tamarix smyrnensis</i> |
| 76 | <i>Juncus acutus</i> | 171 | <i>Trapa colchica</i> |
| 77 | <i>Juncus articulatus</i> | 172 | <i>Trapa natans</i> |
| 78 | <i>Juncus bufonius</i> | 173 | <i>Triglochin bulbosa</i> |
| 79 | <i>Juncus effusus</i> | 174 | <i>Typha angustifolia</i> |
| 80 | <i>Juncus subnodulosus</i> | 175 | <i>Typha domingensis</i> |
| 81 | <i>Juncus tenageia</i> | 176 | <i>Typha latifolia</i> |
| 82 | <i>Lemna gibba</i> | 177 | <i>Urtica kioviensis</i> |
| 83 | <i>Lemna minor</i> | 178 | <i>Utricularia australis</i> |
| 84 | <i>Lemna perpusilla</i> | 179 | <i>Utricularia minor</i> |
| 85 | <i>Lemna trisulca</i> | 180 | <i>Utricularia vulgaris</i> |
| 86 | <i>Limosella aquatica</i> | 181 | <i>Vallisneria natans</i> |
| 87 | <i>Lindernia procumbens</i> | 182 | <i>Vallisneria spiralis</i> |
| 88 | <i>Liquidambar orientalis</i> | 183 | <i>Veronica anagallis-aquatica</i> |
| 89 | <i>Ludwigia palustris</i> | 184 | <i>Veronica anagalloides</i> |
| 90 | <i>Lycopus europaeus</i> | 185 | <i>Veronica beccabunga</i> |
| 91 | <i>Lysimachia dubia</i> | 186 | <i>Veronica catenata</i> |
| 92 | <i>Lysimachia nummularia</i> | 187 | <i>Veronica scutellata</i> |
| 93 | <i>Lysimachia vulgaris</i> | 188 | <i>Wolffia arrhiza</i> |
| 94 | <i>Lythrum borysthenticum</i> | 189 | <i>Zannichellia palustris</i> |
| 95 | <i>Lythrum hyssopifolia</i> | 190 | <i>Zannichellia peltata</i> |

*IUCN 2018-2 verileri

EK-2: LİTERATÜRDE YER ALAN ÇALIŞILMIŞ BİTKİLER

| Sayı | Bitki Türü | Sayı | Bitki Türü |
|------|--|------|---------------------------------------|
| 1 | <i>Acorus calamus</i> | 36 | <i>Lolium multiflorum</i> |
| 2 | <i>Alisma subcordatum</i> | 37 | <i>Lolium perenne</i> |
| 3 | <i>Alternanthera philoxeroides</i> | 38 | <i>Lolium perenne</i> var. |
| 4 | <i>Anderss sp.</i> | 39 | <i>Miscanthidium violaceum</i> |
| 5 | <i>Azolla sp.</i> | 40 | <i>Miscanthus sinensis</i> |
| 6 | <i>Calla oalustris</i> | 41 | <i>Myriophyllum aquaticum</i> |
| 7 | <i>Canna flaccida</i> | 42 | <i>Myscanthidium violaceum</i> |
| 8 | <i>Canna sp.</i> | 43 | <i>Oenanthe javanica</i> |
| 9 | <i>Carex sp.</i> | 44 | <i>Paspalum paspalodes</i> |
| 10 | <i>Carex stricta</i> | 45 | <i>Pennisetum purpureum</i> |
| 11 | <i>Carex virgata</i> | 46 | <i>Phragmites australis</i> |
| 12 | <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 47 | <i>Phragmites communis</i> |
| 13 | <i>Colocasia esculenta</i> | 48 | <i>Phragmites mauritianus</i> |
| 14 | <i>Cyperus alternifolius</i> | 49 | <i>Pisitia stratiotes</i> |
| 15 | <i>Cyperus papyrus</i> | 50 | <i>Polygonum barbatum</i> |
| 16 | <i>Cyperus ustulatus</i> | 51 | <i>Pontederia cordata</i> |
| 17 | <i>Dracaena sanderiana</i> | 52 | <i>Ranunculus repens</i> |
| 18 | <i>Eichhria crassipes</i> | 53 | <i>Rohdea japonica</i> |
| 19 | <i>Equisetum sp.</i> | 54 | <i>Rumex acetosa</i> |
| 20 | <i>Festuca arundinacea</i> | 55 | <i>Salix babylonica</i> |
| 21 | <i>Gardenia jasminoides</i> var. <i>Grandiflora</i> , | 56 | <i>Schoenoplectus sp.</i> |
| 22 | <i>Gardenia jasminoides</i> var. <i>Prostrate</i> | 57 | <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> |
| 23 | <i>Geophila herbacea</i> | 58 | <i>Scirpus cyperinus</i> |
| 24 | <i>Glyceria maxima</i> | 59 | <i>Scirpus validus</i> |
| 25 | <i>Gypsophila sp.</i> | 60 | <i>Scirpus californicus</i> |
| 26 | <i>Hydrocharis dubia</i> | 61 | <i>Sparganium erectum</i> |
| 27 | <i>Hydrocotyle verticillata</i> | 62 | <i>T. latifolia</i> |
| 28 | <i>Ipomoea aquatica</i> | 63 | <i>Thalia dealbata</i> |
| 29 | <i>Iris pseudacorus</i> | 64 | <i>Thalia geniculata</i> |
| 30 | <i>Iris versicolor</i> | 65 | <i>Triarrhena lutarioriparia</i> |
| 31 | <i>Juncus edgariae</i> | 66 | <i>Typha angustifolia</i> |
| 32 | <i>Juncus effusus</i> | 67 | <i>Typha orientalis</i> |
| 33 | <i>Jussiae repens</i> | 68 | <i>Vetiveria zizanioides</i> |
| 34 | <i>Lemna gibba</i> | 69 | <i>Zizania caduciflora</i> |
| 35 | <i>Lemna minor</i> | | |

*Tablo 5 ve Tablo 6'da yer alan çalışmalar

EK-3: YÜZER SULAK ALAN UYGULAMA TABLOSU

| Havza Adı | Durgun Su Kütlesi Adı | Trofik Durum | Özümleme Kapasitesi (ton/yıl) | Mevcut Toplam Fosfor Yüğü (ton/yıl) | Mevcut Durum ve Gerekli Yüğü Azaltımı (%) | Bahk Yetiştiriciliği Tesis Kapasitesi (ton/yıl) | Ne kadar P yüğü giderimi g/gün | m ² | Yüzer Alan Maliyeti (\$) |
|----------------|---|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| Büyük Menderes | Adıgüzel Barajı | Hipertrofik | 63,31 | 271,77 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%77) | - | 571.116 | 31.728.676 | \$ 1.621.652.620 |
| Büyük Menderes | Ahmetler Göleti | Hipertrofik | 0,03 | 0,17 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%85) | - | 390 | 21.689 | \$ 1.108.550 |
| Büyük Menderes | Azap Gölü | Hipertrofik | 0,23 | 0,53 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%56) | - | 821 | 45.616 | \$ 2.331.456 |
| Büyük Menderes | Cindere Barajı | Ötrofik | 49,91 | 168,12 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%70) | - | 323.853 | 17.991.857 | \$ 919.563.807 |
| Büyük Menderes | Çatak Göleti (Kavşit Göleti) | Ötrofik | 1,72 | 2,04 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%16) | - | 869 | 48.265 | \$ 2.466.816 |
| Büyük Menderes | Çine Barajı | Ötrofik | 17,82 | 23,26 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%23) | - | 14.892 | 827.306 | \$ 42.283.606 |
| Büyük Menderes | Gökınar Barajı (Vali Recep Yazıcıoğlu Barajı) | Ötrofik | 2,00 | 2,10 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%5) | - | 259 | 14.414 | \$ 736.700 |
| Büyük Menderes | Kemer Barajı | Ötrofik | 79,55 | 85,66 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%7) | - | 16.764 | 931.339 | \$ 47.600.758 |
| Büyük Menderes | Koçgazi Göleti | Ötrofik | 0,01 | 0,02 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%15) | - | 7 | 365 | \$ 18.670 |
| Büyük Menderes | Örenler Barajı | Hipertrofik | 2,08 | 6,36 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%67) | - | 11.732 | 651.796 | \$ 33.313.296 |
| Büyük Menderes | Serban Göleti (Savran Göleti) | Hipertrofik | 0,09 | 0,12 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%30) | - | 99 | 5.479 | \$ 280.055 |
| Büyük Menderes | Takmak Göleti | Hipertrofik | 0,14 | 0,43 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%69) | - | 811 | 45.038 | \$ 2.301.895 |
| Büyük Menderes | Tavas Göleti (Akyar Göleti) | Hipertrofik | 0,73 | 1,63 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%55) | - | 2.462 | 136.788 | \$ 6.991.257 |

| Havza Adı | Durgun Su Kütlesi Adı | Trofik Durum | Özümleme Kapasitesi (ton/yıl) | Mevcut Toplam Fosfor Yüğü (ton/yıl) | Mevcut Durum ve Gerekli Yüğü Azaltımı (%) | Balık Yetiştiriciliğı Tesis Kapasitesi (ton/yıl) | Ne kadar P yüğü giderimi g/gün | m ² | Yüzer Alan Maliyeti (\$) |
|----------------|----------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|--|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| Büyük Menderes | Tavas-Yenidere Barajı | Hipertrofik | 32,98 | 54,21 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%39) | - | 58.168 | 3.231.537 | \$ 165.163.871 |
| Büyük Menderes | Yayalar Göleti | Hipertrofik | 0,13 | 2,77 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%95) | - | 7.241 | 402.283 | \$ 20.560.689 |
| Büyük Menderes | Yaylakavak-Karpuzlu Barajı | Ötrofik | 10,24 | 11,49 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%11) | - | 3.435 | 190.807 | \$ 9.752.130 |
| Gediz | Afşar 2 İçmesuyu Barajı | Ötrofik | 16,73 | 27,49 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%39) | - | 29.475 | 1.637.504 | \$ 83.692.819 |
| Gediz | Buldan Barajı | Ötrofik | 3,34 | 5,14 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%34) | - | 4.925 | 273.638 | \$ 13.985.625 |
| Gediz | Demirköprü Barajı | Hipertrofik | 46,35 | 127,37 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%63) | - | 221.957 | 12.330.944 | \$ 630.234.532 |
| Gediz | Gölcük Gölü | Hipertrofik | 0,19 | 1,06 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%82) | - | 2.366 | 131.461 | \$ 6.718.981 |
| Gediz | Gördes İçmesuyu Barajı | Hipertrofik | 5,86 | 13,06 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%55) | - | 19.708 | 1.094.901 | \$ 55.960.393 |
| Gediz | Küçükler İçmesuyu Barajı | Ötrofik | 0,48 | 0,53 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%9) | - | 128 | 7.139 | \$ 364.849 |
| Gediz | Sazlı Gölü | Hipertrofik | 0,003 | 0,02 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%83) | - | 42 | 2.344 | \$ 119.801 |
| Gediz | Üçpınar Göleti | Hipertrofik | 0,66 | 1,86 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%65) | - | 3.300 | 183.349 | \$ 9.370.945 |
| Küçük Menderes | Alaçatı Barajı | Hipertrofik | 0,53 | 1,17 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%55) | - | 1.753 | 97.412 | \$ 4.978.752 |
| Küçük Menderes | Belevi Gölü | Hipertrofik | 0,80 | 13,53 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%94) | - | 34.877 | 1.937.595 | \$ 99.030.487 |
| Küçük Menderes | Beydağ-I Barajı | Hipertrofik | 10,44 | 36,18 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%71) | - | 70.521 | 3.917.808 | \$ 200.239.178 |
| Küçük Menderes | Çakal Gölü | Hipertrofik | 0,03 | 0,30 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%91) | - | 740 | 41.096 | \$ 2.100.411 |
| Küçük Menderes | Gebekirse Gölü | Ötrofik | 0,03 | 0,04 | Özümleme kapasitesi aşılmış (%19) | - | 27 | 1.522 | \$ 77.793 |

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Doğum Tarihi: 01.01.1989

Doğum Yeri: Çorum

e-posta: ali.butunoglu@tarimorman.gov.tr

Eğitim

2010-2012 Gazi Üniversitesi – Eğitim Fakültesi Biyoloji Öğretmenliği

2008-2012 Gazi Üniversitesi – Fen Fakültesi Biyoloji

2003-2006 Çorum Fen Lisesi

İş Denevimi

(26/10/2015 -) Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü,
Su Kalitesi Daire Başkanlığı, Hassas Alanlar Çalışma Gurubu - Uzman Yardımcısı

(15/11/2014 - 11/08/2015) Türk Silahlı Kuvvetleri, 57 'nci Topçu Tugay Menemen
Komutan Yardımcılığı, İzmir – Yedek Subay

(19/12/2013 - 23/12/2013) Milli Eğitim Bakanlığı – Ücretli Öğretmen

(08/2012 - 12/2012) SYN Biyoteknoloji ve Dış Tic. Ltd. Şti. Ankara – Aplikasyon
Uzmanı