

**FARKLI BİTKİ ÇEŞİTLİLİĞİNE
SAHİP YAPAY SULAK ALANLARIN BOR (B) MADEN
ATIK SULARININ BİYOREMEDİASYONU İÇİN
KULLANILMA POTANSİYELİ**

Onur Can TÜRKER
Doktora Tezi

Biyoloji Anabilim Dalı

Ağustos-2015

JURİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Onur Can TÜRKER'in “Farklı Bitki Çeşitliliğine Sahip Yapay Sulak Alanların Bor (B) Maden Atık Suları için Kullanılma Potansiyeli” başlıklı **Biyoloji** Anabilim Dalındaki Doktora Tezi, 25.08.2015 tarihinde, aşağıdaki juri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

| | Adı-Soyadı | İmza |
|----------------------|--------------------------|-------|
| Üye (Tez Danışmanı): | Prof. Dr. CENGİZ TÜRE | |
| Üye : | Prof. Dr. ARZU ÇİÇEK | |
| Üye : | Prof. Dr. LATİF KURT | |
| Üye : | Prof. Dr. NAİME ARSLAN | |
| Üye : | Doç. Dr. M. BURÇİN MUTLU | |

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET**Doktora Tezi****FARKLI BİTKİ ÇEŞİTLİLİĞİNE SAHİP
YAPAY SULAK ALANLARIN BOR MADEN ATIK SULARININ
BİYOREMEDIASYONU İÇİN KULLANILMA POTANSİYELİ****Onur Can TÜRKER****2015, 151 sayfa****Anadolu Üniversitesi****Fen Bilimleri Enstitüsü****Biyoloji Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Cengiz TÜRE****İkinci Danışman: Doç. Dr. Harun BÖCÜK**

Bu çalışmanın temel amacı, farklı bitki çeşitliğine sahip yapay sulak alanların Bor (B) maden atıkları ile kirlenmiş suların biyoremediasyonu için kullanılma potansiyelinin belirlenmesi ve bitki çeşitliğinin B giderimi üzerine olan etkilerinin ortaya çıkarılmasıdır. Çalışma için Kırka B rezerv alanı içerisinde 9 adet bitkilendirilmiş, 1 adet bitkisiz kontrol olmak üzere toplamda 10 adet yapay sulak alan kurulmuştur. Yapay sulak alanlar üzerinde 154 gün boyunca gerçekleştirilen biyoremediasyon deneyleri sonucunda yapay sulak alanların % 38 ile % 64 arasında bir arıtım performansı ile çalıştığı belirlenmiştir. En yüksek arıtım veriminin *Typha latifolia* ile bitkilendirilen mono-kültür yapay sulak alanda olduğu saptanmıştır. Bor'un yapay sulak alanlardaki temel biyoremediasyon mekanizmasının B'un sedimentte alı konulması olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yapay sulak alanlarda bitkiler arasında meydana gelebilecek rekabetin B giderim performansını azaltabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, yapay sulak alanlardaki bitkilerin hasat edilmesi durumunda elde edilebilecek tahmini biyogaz ve elektrik enerjisi teorik olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyoremediasyon, Yapay sulak alanlar, Bor arıtımı, Bitki çeşitliliği, Atık su yönetimi

ABSTRACT
PhD Dissertation

**BIOREMEDIATION POTENTIAL OF CONSTRUCTED WETLANDS
WITH DIFFERENT PLANT DIVERSITY FOR BORON MINE
EFFLUENTS**

Onur Can TÜRKER
2015, 151 pages

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Biology Program

Supervisor: Prof. Dr. Cengiz TÜRE
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Harun BÖCÜK

The main aim of the present study is to the ability bioremediation potential of the constructed wetland with different plant diversity for treatment of boron (B) mine effluent and investigates to effect of plant diversity on B removal process. For the study, one unplanted constructed wetland and nine planted constructed wetland as total of ten pilot-scale subsurface horizontal flow constructed wetlands established in the Kırka B reserve area. During the bioremediation test period of 154 days, constructed wetlands removed boron in wastewater between 38 % and 64 %. The highest B removal was achieved by mono-culture constructed wetland vegetated with *Typha latifolia*. We found that the main B removal mechanism is sediment storage in constructed wetlands. The plant competition in constructed wetlands leads to decrease of B removal efficiency in constructed wetlands. According to harvestable plant biomasses from constructed wetlands, we calculated estimated biogases and electric energy as a theoretically.

Keywords: Bioremediation, Constructed Wetlands, Boron Removal, Plant Diversity, Wastewater Management

TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminden tezin bitimine kadar, çalışmalarımın her aşamasında deneyimlerinden ve bilgi birikiminden yararlandığım, beni yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Cengiz TÜRE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimle ilgili karşılaştığım her türlü güçlükte bana destek olan, bilgilerini benimle paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Harun BÖCÜK'e, sayın Prof. Dr. Arzu ÇİÇEK ile ekibine ve dostum Anıl YAKAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Yurt dışındaki araştırmalarım sırasında bana her konuda olanak ve destek sağlayan Prof. Dr. Jan VYMAZAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Kırka Bor Maden sahası içerisinde çalışabilmem için gerekli desteği esirgemeyen Eti Bor Madenleri Genel Müdürlüğü ve Kırka Bor işletmesinde görevli personele teşekkür ederim.

Bu Tez çalışmasının bir kısmını destekleyen Türkiye Bilimsel Araştırmalar Topluluğu (Proje No:113Y335) ve Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu Başkanlığı (Proje No:1403F098)'na teşekkürü bir borç bilirim.

Beni yetiştiren ve çalışmalarım esnasında maddi-manevi desteklerini esirgemeyen, anlayışlı, sabırlı ve fedakar aileme de, özellikle ve içtenlikle, saygı ve minnetlerimi sunarım.

Onur Can TÜRKER

Ağustos, 2015

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xi |
| KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ | xiv |
| | |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. MATERYAL VE YÖNTEM | 11 |
| 2.1. Araştırma Alanı..... | 12 |
| 2.2. Araştırma Alanının İklimsel Özellikleri..... | 13 |
| 2.2.1. Sıcaklık (⁰ C) ve yağış (mm) değerleri..... | 13 |
| 2.2.2. Biyoiklimsel sentez | 14 |
| 2.3. Yapay Sulak alanların kurulumu..... | 17 |
| 2.4 Kültür periyodu | 22 |
| 2.5 Atık suların hazırlanması ve giriş Bor dozlarının ayarlanması..... | 23 |
| 2.6. Su Analizleri..... | 24 |
| 2.6.1. Fiziko- Kimyasal Analizler | 24 |
| 2.6.2. AAS Analizleri ve Bor Giderim Oranı..... | 24 |
| 2.6.3. Nitrit- Nitrat Analizleri..... | 24 |
| 2.7. Bitki Örneklerinin Analizleri | 24 |
| 2.7.1 Bitki Biyomas Ölçümleri | 25 |
| 2.7.2. Tür İçi ve Türler Arası Bitki Rekabetinin Değerlendirilmesi | 25 |
| 2.7.3. Biyomas, Enerji Bütçesi, Tahmini Biyogaz ve Tahmini Elektrik Enerjisi Eldesini Hesaplanması | 25 |
| 2.7.4. Bitki AAS Analizi | 26 |
| 2.7.5. Bitki Azot Analizi | 26 |
| 2.7.6. Klorofil Analizleri | 26 |

| | |
|---|----|
| 2.8 Sediment Örneklerinin Analizleri | 27 |
| 2.8.1. Fiziksel Analiz..... | 27 |
| 2.8.2. Ekstrakte Edilebilir Bor Analizi | 27 |
| 2.8.3. pH (Toprak Reaksiyonu) Analizi | 28 |
| 2.8.4. Azot Analizi | 28 |
| 2.8.5. Fosfor Analizi..... | 28 |
| 2.8.6. Toplam B, Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺⁺ ve Mg ⁺⁺ Analizi..... | 29 |
| 2.8.7. Dehidrogenaz Aktivitesinin Belirlenmesi | 29 |
| 2.9. Verilerin istatistiksel analizleri, formüller ve Bor kütleli denge modeli . | 29 |
| 2.10 Araştırmalar sırasında kullanılan cihazlar..... | 32 |

3. BULGULAR **34**

| | |
|--|----|
| 3.1. Fiziko-Kimyasal Ölçümler..... | 35 |
| 3.1.1. pH..... | 35 |
| 3.1.2. Elektriksel İletkenlik (EC) | 38 |
| 3.1.3. Sıcaklık (°C) | 40 |
| 3.1.3. Redoks | 42 |
| 3.1.4. Çözünmüş Oksijen | 44 |
| 3.1.5. Nitrat ve Nitrit giderimi..... | 46 |
| 3.2. Yapay sulak alanların bor (B) giderim performansları | 47 |
| 3.3. Bitki Analizleri..... | 53 |
| 3.3.1. Bitki Biyomas Ölçümleri | 53 |
| 3.3.2. Bitki Rekabet Analizlerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi | 58 |
| 3.3.2.1 Yapay Sulak Alan 1'deki bitki rekabeti..... | 58 |
| 3.3.2.2 Yapay Sulak Alan 2'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 60 |
| 3.3.2.3 Yapay Sulak Alan 3'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 62 |
| 3.3.2.4 Yapay Sulak Alan 4'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 64 |
| 3.3.2.5 Yapay Sulak Alan 5'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 66 |
| 3.3.2.6 Yapay Sulak Alan 7'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 68 |
| 3.3.2.7 Yapay Sulak Alan 8'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 70 |
| 3.3.2.8 Yapay Sulak Alan 9'daki bitki rekabetinin değerlendirilmesi..... | 72 |
| 3.3.2.9 Yapay Sulak Alan 10'daki bitki rekabetinin değerlendirilmesi.... | 74 |

| | |
|--|------------|
| 3.3.3. Tahmini Biyogaz, Elektrik Enerjisi Eldesi ve Enerji Bütçelerinin Hesaplanması | 79 |
| 3.3.4. Bitki örneklerindeki Bor ve diğer elementlerin konsantrasyonları . | 81 |
| 3.3.4. Bitkilerin Klorofil a+b miktarları | 86 |
| 3.3.5. Sediment örneklerinin analiz sonuçları | 88 |
| 3.3.6. Dehidrogenaz enzim aktivitesi | 90 |
| 3.3.5. Kütleli denge değerleri ve B'un yapay sulak alanlardaki davranışı | 91 |
| 3.3.6. Pearson Korelasyon Analiz sonuçları | 96 |
| 4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER | 108 |
| KAYNAKLAR | 131 |
| Ek-1 Sıcaklık ve Basınç Faktörleri Verileri | 149 |
| Ek-2 Toprak Fiziki Üçgeni | 151 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1. Kırka Bor Maden Rezerv Alanı (a) ve çalışmaların yapıldığı alan (b). | 13 |
| Şekil 2.2. Çalışma Alanına (Kırka, Eskişehir) ait iklim diyagramı | 14 |
| Şekil 2.3. Yapay sulak alanların kurulacağı polyster düzenekler..... | 17 |
| Şekil 2.4. Yapay sulak alanlara atık suyun girişini sağlayacak dağıtıcı tesisatın yerleştirilmesi (a) ve toplayıcı borular (b)..... | 18 |
| Şekil 2.5. Kontrol ve çıkış suyu deşarj vanaları (a), atık su toplama tankının yerleştirilmesi (b, c) ve atık suyun toplama tankında biriktirilmesi (d) | 19 |
| Şekil 2.6. Yapay sulak alanlarda kullanılan filtrasyon ve dolgu malzemeleri: Çakıl (a), kum (b) ve torf (c) | 20 |
| Şekil 2.7. Yapay sulak alanların giriş ve çıkış bölümlerinde sineklik ve çakıl taşlarının yerleştirilmesi | 20 |
| Şekil 2.8. Araştırma alanı içerisinde kurulan yapay sulak alanlar | 21 |
| Şekil 2.9. Yapay sulak alanlarda dikilen bitki rizomları (a) ve bitkilendirme (b) | 21 |
| Şekil 2.10. Kontrol mikrokozmlar | 22 |
| Şekil 2.11. Kurulan yapay sulak alanların ayrıntılı diyagramları | 22 |
| Şekil 2.12. Ölü bitki rizomlarının sağlıklı bitki rizomları ile değiştirilmesi..... | 23 |
| Şekil 3.1. Kültür periyodu sonunda yapay sulak alanlarda bulunan <i>Typha latifolia</i> (a), <i>Typha angustifolia</i> (b), <i>Phragmites australis</i> (c) ve <i>Juncus gerardii</i> (d) bitki türlerinin durumları..... | 35 |
| Şekil 3.2. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre pH değişimleri | 38 |
| Şekil 3.3. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre EC değişimleri..... | 40 |
| Şekil 3.4. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre sıcaklık değişimleri..... | 42 |
| Şekil 3.5. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre redoks değişimleri | 44 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.6. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre çözünmüş oksijen değişimleri | 45 |
| Şekil 3.7. Yapay sulak alanların araştırma periyodu içerisindeki ortalama Nitrat giderim oranları | 46 |
| Şekil 3.8. Yapay sulak alanların araştırma periyodu içerisindeki ortalama Nitrit giderim oranları | 46 |
| Şekil 3.9. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanların ve kontrol grubunu oluşturan yapay sulak alanının giriş ve çıkış sularının B konsantrasyonları..... | 49 |
| Şekil 3.10. Araştırma periyodu içerisindeki Giriş suyu B konsantrasyonu ve yapay sulak alanların Bor giderim oranları (BGO)..... | 51 |
| Şekil 3.11. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanlara yüklenen bor yükleme oranları ve yapay sulak alanların kontrol grubuna göre kütlelesel giderim oranları (KGO)..... | 53 |
| Şekil 3.12. Yapay sulak alanlardan araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki biyomasları..... | 55 |
| Şekil 3.13. <i>Typha latifolia</i> bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları..... | 56 |
| Şekil 3.14. <i>Typha angustifolia</i> bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları..... | 56 |
| Şekil 3.15. <i>Phragmites australis</i> bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları | 57 |
| Şekil 3.16. <i>Juncus gerardii</i> bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları..... | 57 |
| Şekil 3.17. YSA 1'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 58 |
| Şekil 3.18. Yapay sulak alan 1'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 59 |
| Şekil 3.19. YSA 2'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 60 |
| Şekil 3.20. Yapay sulak alan 2'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.21. Yapay sulak alan 2'deki <i>Juncus gerardii</i> türünün gelişmesi, <i>Typha latifolia</i> bitkisi (a) ve <i>Typha angustifolia</i> (b) bitkisi tarafından baskılanması | 62 |
| Şekil 3.22. YSA 3'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 63 |
| Şekil 3.23. Yapay sulak alan 3'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 64 |
| Şekil 3.24. YSA 4'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 65 |
| Şekil 3.25. Yapay sulak alan 4'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 66 |
| Şekil 3.26. YSA 5'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 67 |
| Şekil 3.27. Yapay sulak alan 5'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 68 |
| Şekil 3.28. YSA 7'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 69 |
| Şekil 3.29. Yapay sulak alan 7'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 70 |
| Şekil 3.30. YSA 8'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 71 |
| Şekil 3.31. Yapay sulak alan 8'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 72 |
| Şekil 3.32. YSA 9'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı | 73 |
| Şekil 3.33. Yapay sulak alan 9'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 74 |
| Şekil 3.34. YSA 10'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları ve tür baskınlıkları | 75 |
| Şekil 3.35. Yapay sulak alan 10'deki bitkilerin 98.gündeki genel durumları..... | 76 |
| Şekil 3.36. <i>Typha latifolia</i> bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları..... | 77 |
| Şekil 3.37. <i>Typha angustifolia</i> bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları | 77 |
| Şekil 3.38. <i>Phragmites australis</i> bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları | 78 |
| Şekil 3.39. <i>Juncus gerardii</i> bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları ... | 78 |
| Şekil 3.40. Araştırma periyodu boyunca kullanılan bitki türlerinin ayrı yapay sulak alanlardaki ortalama klorofil (a+b) miktarları | 87 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 3.41. Araştırma periyodu içerisinde Eylül ve Ekim aylarında iki haftalık periyotlar halinde toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesi | 90 |
| Şekil 3.42. Araştırma periyodu sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesi..... | 91 |
| Şekil 3.43. Çalışma periyodu içerisinde sistemlere verilen B'un yüzdesel dağılımı | 95 |
| Şekil 4.1. Bor rezerv alanı içerisinde oluşturulan dekabaj alanları etrafında biriken sızıntı suları ve yapay sulak alanların kurulabileceği potansiyel bir alan. | 129 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| Çizelge 1.1. Konvansiyonel arıtım teknolojilerin ortalama Bor giderim performansları | 6 |
| Çizelge 2.1. Araştırma alanının biyoiklim katı | 18 |
| Çizelge 2.2. Çalışma alanının ayrıntılı rasat verileri (1990-2008)..... | 19 |
| Çizelge 3.1. Yapay sulak alanlarda hayatta kalan bitki birey sayısı (H), ölü birey sayısı (Ö) ve hayatta kalma oranı | 37 |
| Çizelge 3.2. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularının ortalama, pH, EC, Sıcaklık, çözünmüş oksijen, redoks potansiyeli, nitrat ve nitrit değerleri..... | 39 |
| Çizelge 3.3. Yapay sulak alan sistemlerinden hasat edilen bitki biyomaslarından ve modelleme sonucu elde edilebilecek biyogaz (m ³), metan (m ³), elektrik (kWh) ve enerji (MJ) potansiyelleri. | 83 |
| Çizelge 3.4. Yapay sulak alan 1’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 84 |
| Çizelge 3.5. Yapay sulak alan 2’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 85 |
| Çizelge 3.6. Yapay sulak alan 3’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 85 |
| Çizelge 3.7. Yapay sulak alan 4’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 86 |
| Çizelge 3.8. Yapay sulak alan 5’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 86 |
| Çizelge 3.9. Yapay sulak alan 7’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 87 |
| Çizelge 3.10. Yapay sulak alan 8’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerin element içerikleri..... | 87 |
| Çizelge 3.11. Yapay sulak alan 9’da bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| Çizelge 3.12. Yapay sulak alan 10’da bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri..... | 87 |
| Çizelge 3.13. Yapay sulak alanlardan toplanan bitkilerin ortalama klorofil a+b miktarları..... | 89 |
| Çizelge 3.14. Yapay sulak alanlardan ve kontrol grubu örneklerinden araştırma periyodu sonunda toplanan sediment örneklerine ait fiziksel ve kimyasal analizleri | 92 |
| Çizelge 3.15. Bor kütleli denge modeli (BKDM) kullanarak yapay sulak alanlar için elde edilen kütleli denge değerleri..... | 95 |
| Çizelge 3.16. YSA 1’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 101 |
| Çizelge 3.17. YSA 2’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 102 |
| Çizelge 3.18. YSA 3’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 103 |
| Çizelge 3.19. YSA 4’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 104 |
| Çizelge 3.20. YSA 5’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 105 |
| Çizelge 3.21. YSA 6’dan elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 106 |
| Çizelge 3.22. YSA7’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| Çizelge 3.23. YSA 8'den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 108 |
| Çizelge 3.24. YSA 9'dan elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 109 |
| Çizelge 3.25. YSA 10'dan elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)..... | 110 |

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

KISALTMALAR

- KOİ** : Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TN : Toplam Azot
TP : Toplam Fosfor
AKM : Askıda Katı Madde
RO : Reverse Osmosis(Ters Ozmoz)
IDM : İyon Exchange Membrane (İyon değiştirici Membran)

SİMGELER

- | | |
|--|------------------------------|
| m : metre | l : litre |
| mg : miligram | ml : mililitre |
| mm : milimetre | °C : santigrad derece |
| ppm : part per million (milyonda bir) | % : yüzde |
| kg : kilogram | mV : milivolt |

1. GİRİŞ

Ekolojik sürdürülebilirlik ilkesi, dünya üzerinde yaşayan diğer canlı türleri gibi insanlığın da türünün devamlılığını sağlayabilmesi için gerek duyduğu en önemli araçlardan biridir (Korhonen, 2004; Greaver ve ark. 2013; Figge ve ark. 2014; Gombert-Courvoisier ve ark. 2014). Bu nedenle son yıllarda toplumların, işletmelerin ve devletlerin ekolojik sürdürülebilirlik kavramına olan ilgisi artmış ve ekolojik mantık çerçevesinde sürdürülebilirlik ilkesi üzerine yeni stratejiler ve politikalar tartışılmaya başlanmıştır (O'hara, 2009; Greaver ve ark. 2013; Jansson, 2013; Pickett ve ark. 2013; Hearn ve ark. 2014; Kopnina, 2014; Weinstein ve Day, 2014; Klein ve ark. 2015). Tüm bu tartışmalar gerek ekonomistler ile ekologlar, gerekse de politikacılar ile ekologlar arasında daha etkin ve yararlı diyalogların başlamasına ve sonucunda ekonomist-ekolojist perspektifinin kesişme noktasında olan “*Ekolojik Ekonomi*” ya da “*Yeşil Ekonomi*” denilen yeni bir küresel disiplin dalının doğmasına neden olmuştur (Anderson ve M'Gonigle, 2012; Spash, 2012; Ingebrigtsen ve Jakobsen 2012; Gendron, 2014; Ghisetti ve Rennigs, 2014).

Ekolojik ekonomi, üretim ile sürdürülebilirlik çerçevesinde oluşturulan ya da kullanılan materyallerin yenilenebilir olmasını, daha az sera gazı salınımı yapılarak üretilebilmesini ve ekonomik bileşenler içerisinde yeniden atık üretmeyecek şekilde dönüşümlerinin tamamlanmasını kapsayan bir ekonomik modeldir (Freitas ve Batabyal, 2007; Kariminia ve ark. 2012; Anderson ve M'Gonigle, 2012; Lo, 2013; Wicker ve Becken, 2013). Bu modelin ilgilendiği konular arasında, ekosistem sağlığı, restorasyon ekolojisi, ekotoksikoloji, tarımsal ekoloji ve ekolojik mühendislik gibi geniş ekolojik ve ekonomik kitlelere hitap edecek çevresel olgularda bulunmaktadır (Nobre ve ark. 2009; Wagner, 2011; Rezai ve ark. 2013; Hiremath ve ark. 2014; Pelenc ve Ballet, 2015).

Ekoloji ve mühendislik bilimlerinin bütüncül bir modeli olarak ortaya çıkan ve dünya genelindeki çevresel problemlerin çözümü için, etkili alternatifler sunan “*Ekolojik Mühendislik*” yaklaşımı son yıllarda çığır açan ekolojik ekonomi stratejilerinin başında gelmektedir (Bergen ve ark. 2001; Day ve ark. 2003; Mitsch ve Jorgensen, 2003; Gattie ve ark. 2007; Goesslin ve ark. 2008; Brüll ve ark. 2011; Barot ve ark. 2012; Coombes ve ark. 2015). Bu yaklaşımın temel

amacını, çevresel sorunlarının etkili, az maliyetli ve sürdürülebilir olarak çözülmesi için ekolojik süreçlerin mühendislik prensipleri ile harmanlanarak çevre dostu doğal sistem uygulamaları ve eko-teknolojik tasarımlar oluşturmaktır (Pei ve ark. 2009; Yang ve Li, 2010; Jaunatre ve ark. 2014; Palmer ve ark. 2014; Pandey ve Singh, 2014; Gette-Bouvarot ve ark. 2015; Mi ve ark. 2015). Bu yaklaşım sayesinde hem doğal kapitalin beslendiği ekosistemlerin korunması ve onarılmasının sağlanabileceği hem de uzun vadede ekolojik ve ekonomik yönden insan yaşamını ve dolayısıyla ekonomik sistemlerin sürdürülebilirliğinin sağlanabileceği düşünülmektedir (Wagner, 2011; Rezai ve ark. 2013; Laurant ve ark. 2015; Pelenc ve Ballet, 2015).

Ekoloji bilgisi ile mühendislik uygulamalarının bir arada değerlendirildiği “*atık suların sulak alanlar tarafından temizlenmesi*” fikri ekolojik mühendislik tasarımlarının en değerli örnekleri arasında gösterilmektedir (Pedescoll ve ark. 2011; Bialowiec ve ark. 2014; Chen ve ark. 2014; Vymazal, 2014; Jing ve ark. 2015; Laurant ve ark. 2015; Lynvh ve ark. 2015; Wu ve ark. 2015). Kısaca “*Yapay sulak alanlar*” olarak adlandırılan bu sistemler atık suların, doğal sulak alanlarda süre gelen fiziksel, kimyasal ve biyolojik mekanizmaların taklit edilerek uygulaması kolay, ucuz ve herhangi bir ikincil atık meydana getirmeden etkili bir şekilde arındırılmasını sağlamak fikri üzerine temellenmiştir (Vymazal ve Kröpfelova, 2008; Kadlec ve Wallace, 2009; Garcia ve ark. 2012; Vymazal, 2013; Wu ve ark. 2014; Coban ve ark. 2015; Fang ve ark. 2015; Fernandes ve ark. 2015). Dünyanın birçok noktasında (Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa, Çin ve Avustralya) kurulan 100.000’den fazla yapay sulak alan, günde milyarlarca m³’ün üzerinde evsel, kentsel ve endüstriyel atık suyun arıtılmasında görev alarak insanlara ekolojik mühendislik yaklaşımının eşsiz hizmetini sunmaktadırlar (Kadlec ve Wallace, 2009; Türker ve ark. 2014). Sağladığı birçok yararlı hizmetler nedeniyle yapay sulak alanlara olan ilgi gün geçtikçe artmış ve araştırmacılar tarafından çeşitli tipteki kirletici maddelerin yapay sulak alanlar sayesinde atık sulardan uzaklaştırılmasını konu alan birçok araştırma yapılmıştır. Yapay sulak alanların, evsel, kentsel ve sızıntı atık sularının ikincil ve üçüncül arıtımı için (Brix ve Arias, 2005; Davison ve ark. 2006; Fountoulakis ve ark. 2009; Ong ve ark. 2009; Adrados ve ark. 2014; Bilgin ve ark. 2014; He ve ark.

2014), tarımsal deşarj sularının arıtılması için (Koskiaho ve ark. 2003; Dunne ve ark. 2005, Blankenberg ve ark. 2008; Harrington ve ark. 2009; Lee ve ark. 2010; Bonanno ve ark. 2013; Tuttolomondo ve ark. 2015), endüstriyel atık suların arıtılması için (Davisson ve ark. 2005; Sohsalam ve ark. 2008; Comino ve ark. 2011; Fibbi ve ark. 2012; Saeed ve ark. 2012; Kato ve ark. 2013), maden deşarj ve sızıntı sularının arıtımı için (Mays and Edwards, 2001; Overall and Parry, 2004; Nyquist ve Greger, 2009; Younger ve Henderson, 2014) kurulmuş birçok başarılı örnek modeli bulunmaktadır. Ancak bu eko-teknolojik sistemlerin Bor (B) içeren atık suların temizlenmesi için kullanılabilirliğini gösteren çalışmalar son derece sınırlıdır. Ayrıca, B elementinin kimyasının diğer eser elementlerden farklı olması ve sucul ortamlardaki kimyasal karakterinin karmaşık ilişkiler göstermesi, B elementinin yapay sulak alanlardaki hangi dinamik giderim mekanizmaları ile sulardan uzaklaştırılabileceğinin ortaya çıkarılmasını zorlaştırmaktadır (Türker ve ark., 2014). Bu nedenle yapay sulak alanlar ile B içeren suların arıtılması literatür açısından nispeten yeni konudur ve üzerine çok yönlü araştırmalar yapılması gereklidir.

Türkiye dünyada bilinen Bor (B) rezerv alanlarının yaklaşık % 72'ine (90 milyon ton) bulundurması nedeniyle, B madenciliği açısından dünyada önde gelen ülkelerden biridir (Bentli ve ark. 2001; Yılmaz ve ark. 2007; Scialli ve ark. 2010; Böcük 2010). Bununla birlikte, son yıllarda B madeninin günümüz endüstrisinin önemli girdi maddelerinden biri haline gelmesi ve dünyada alternatif sahalarının kısıtlılığı nedeniyle rezerv alanlarında madencilik faaliyetleri giderek artmaktadır. Türkiye'de her yıl açık ocak B madenciliğinin aktiviteleri sonrasında B içeren 600.000 tondan fazla atık ortaya çıkmaktadır (Bentli ve ark. 2001; Batar ve ark. 2009). Bu atıkların, miktarlarının giderek artması, depolanma gereksinimini veya uygun geri dönüşüm mekanizmalarıyla geri kazanımını gerektirmektedir. Ayrıca üretilen atıkların kontrollü ya da kontrolsüz bir şekilde sucul habitatlara karışması sonucu ortaya çıkan kirlilik madencilik faaliyetleri üzerinde bir baskı unsuru oluşturarak madenciliğinin gelişmesi ve büyümesini engelleyebilmektedir (Bentli ve ark. 2001). Bu nedenle madencilik faaliyetlerinin neden olabileceği kirliliğin, kirlilik basamakları oluşmadan yerinde giderilmesine ve kontrolüne yönelik çalışmalara gereksinim duyulmaktadır.

Madencilik faaliyetleri sonucunda oluşan katı atıklar ile teması sonucunda sulara karışabilen B, çeşitli bileşik formları halinde sulara ve sucul ortamda bulunabilmektedir (Okay ve ark. 1985; Hilal ve ark. 2011; Arar ve ark. 2013; Teychene ve ark. 2013; Dydo ve ark. 2014). Bor'un sudaki formunu belirleyen en önemli parametre ise pH'dır (İpek ve ark. 2013; Kabay ve ark. 2013; Güler ve ark. 2015). Yüksek konsantrasyonlarda ve yüksek pH'larda (pH=10) B sulara polinükleer türler olan $[B_3O_3(OH)_5]^{2-}$ ve $[B_4O_5(OH)_4]^{2-}$ formlarında bulunurken, düşük konsantrasyonlarda ve $pH \leq 9.15$ de borik asit $[B(OH)_3]$, borat iyonları $[B(OH)_4^-]$ ya da borik oksit (B_2O_3) gibi mononükleer form olarak sulara bulunmaktadır (Hilal ve ark. 2011; Wolska ve Bryjak 2013). Borik asit, borat iyonları ve borik oksit formları yüzey sularında, akarsularda, göllerde ve yer altı sularında çözülmüş halde bulunan B bileşikleridir (Wyness ve ark. 2003; Stueber ve Criss, 2005; Gemici ve ark. 2008; Hasenmueller ve Criss, 2013; Türker ve ark. 2014). Borik asit nispeten suda çözünme özelliği gösteren ve bitkiler, hayvanlar aynı zamanda insanlar tarafından bünyelerine alınabilecek B formudur (Neal ve ark. 1998; Böcük ve ark. 2013; Türker ve ark. 2013a; Türker ve ark. 2013b). Bu nedenle borik asitin sularındaki konsantrasyonun artması beraberinde ekolojik bileşenlerde B'a bağlı toksisite problemleri de getirebilmektedir (Karabal ve ark. 2003; Papadakis ve ark. 2004; Eraslan ve ark. 2007; Reid, 2010; Grieiva ve ark. 2010). Dahası B bileşiklerinin çok küçük dozlarının bile yüzey ve yeraltı sularına karışması ve bunlarında tarımsal sulamada kullanılması, noktasal olmayan B kirlilik problemleri yaratarak bitkilerde fitotoksositeye (Karabal ve ark. 2003; Papadakis ve ark. 2004; Eraslan ve ark. 2007; Reid, 2010; Grieiva ve ark. 2010), insanlar ve hayvanlarda ise teratojenik etkilere ve üreme bozukluklarına neden olabilmektedir (Robbins ve ark. 2010).

Çeşitli tipteki sulardaki fazla B'un arındırılması için konvansiyel arıtma metotlarının kullanıldığı birçok teknoloji bulunmaktadır (Çizelge 1.1) (Hilal ve ark. 2011; Wolska ve Bryjak 2013). Bunlar; ters ozmos sistemleri (Dominguez-Tagle ve ark. 2011; Arar ve ark. 2013; Teychene ve ark. 2013; Dydo ve ark. 2014), İyon değiştirici membranlar (İDM) (Nadav ve ark. 1999; İpek ve ark. 2013; Kabay ve ark. 2013; Güler ve ark. 2015), Çökelme-koagülasyon ve adsorbsion (Simonnot ve ark. 2000; Yılmaz ve ark. 2007; Vasudememan ve ark.

2013; Demey ve ark. 2014) yöntemleridir. Ancak, her ne kadar bu tür sistemler suları deşarj standartlarına uygun hale getirirse de, bu sistemlerin B ile kirlenmiş atık suların arıtılması için kullanılması, beraberinde yüksek maliyet, enerji ve kimyasal kullanımını gerektirmektedir (Davis ve ark. 2002; Marin ve Oron 2007; Allende ve ark. 2012; Türker ve ark. 2013a; Türker ve ark. 2013b; Allende ve ark. 2014). Bu nedenle, son yıllarda artan enerji talebi, işletme maliyetleri ve aynı zamanda konvansiyonel arıtım tekniklerinin hem evsel atık sulardaki hem de endüstriyel atık sulardaki B'un temizlenmesinde düşük arıtım verimi göstermesi, atık suların arıtılması için konvansiyonel arıtma sistemlerine alternatif yeni metotların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Tu ve ark. 2010). Tüm bunların sonucu olarak, ekolojik mühendislik perspektifinin ürünü olan yapay sulak alanların, B içeren atık suların temizlenmesi için etkili, ekonomik ve çevre dostu bir alternatif arıtma metodu olarak kullanılması fikri ortaya çıkmıştır.

Çizelge 1.1. Konvansiyonel arıtım teknolojilerin ortalama Bor giderim performansları

| Metot | Kullanılan Su Tipi | B giderim verimi | Kaynak |
|------------|--------------------|------------------|--------------------------------|
| Adsorsiyon | Deneysel Çözelti | >%50 | Öztürk and Kavak (2005) |
| | Deneysel Çözelti | >%95 | Kıpçak and Özdemir (2012) |
| | Deneysel Çözelti | %28-49 | Demey ve ark. (2014) |
| Çökeltme | İçme suyu | >%28 | Simonnot ve ark. (2000) |
| | Sentetik Çözelti | %24 | Yılmaz ve ark. (2007) |
| | Sentetik Çözelti | %70 | Sayiner ve ark. (2008) |
| | Sentetik Çözelti | %93 | Vasudeman ve ark. (2013) |
| İDM | Sentetik Çözelti | >%99 | Nadav (1999) |
| | Deniz Suyu | >%90 | Kabay ve ark. (2007) |
| | Jeotermal Su | >%90 | İpek ve ark. (2013) |
| | Jeotermal Su | >%90 | Kabay ve ark. (2013) |
| | Deniz Suyu | %70 | Güler ve ark. (2015) |
| Ters ozmoz | Deniz Suyu | %43-78 | Magara ve ark. (1999) |
| | Deneysel Çözelti | %90 | Dominguez-Tagle ve ark. (2011) |
| | Jeotermal Su | %44 | Arar ve ark. (2013) |
| | Acı Su | %96 | Teychene ve ark. (2013) |
| | Deneysel Çözelti | %95-99 | Dydo ve ark. (2014) |

Yapay sulak alanların B içeren atık suların arıtılması için kullanılmasına yönelik ilk çalışma Ye ve ark. (2003) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, laboratuvar şartlarında 14 sulak alan bitkisinin bulunduğu ve yüzey alanı $0,6 \text{ m}^2$ olan mikrokosmlar kullanarak, endüstriyel atık suyu içerisinde bulunan selenyum (Se), arsenik (As), bor (B) ve siyanid (CN)'in arındırılmasını araştırılmıştır. 54 gün süren çalışmalarda sulak alan mikrokosmlar atık sudaki B'ü %31 oranında giderdiğini bulmuşlardır. Aynı zamanda, B'un mikrokosmlar içerisinde öncelikli olarak sedimentte alıkoyulduğunu ve bitkilere absorbe edilen B miktarının ise ihmal edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir. 2003 yılında Murray-Gulde ve ark., hafif tuzlu ve mekanik yağ ile kirlenmiş atık suların arıtılması için ters ozmoz ile yapay sulak alanın oluşturduğu hibrit bir sistemi test etmişlerdir. Bu atık sudaki B düzeyi 28 mg l^{-1} olarak ölçülmüştür. Yapılan analizler sonucunda atık sudaki B konsantrasyonunun ters ozmoz sistemiyle 28 mg l^{-1} 'den 17 mg l^{-1} düzeyine düşürüldüğünü, buna karşın bu sistemden çıkan suyun sulak alan mikrokosmlarına verildiğinde ise herhangi bir B arıtım verimi sağlayamadıklarını rapor etmişlerdir. Ancak, bu durumu açıklayıcı herhangi bir hipotez kuramamışlardır. Kröpfelova ve ark. (2009), evsel atık suların arıtılması için Çek Cumhuriyeti'nde kurulan 3 adet yapay sulak alanın, suda düşük konsantrasyonda bulunan çeşitli mikro besin elementlerini gidermedeki verimliliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada atık sudaki başta Alimünyum, Çinko, Selenyum ve Kurşun olmak üzere 34 tane elementin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar için yapay sulak alanlar iki yıl süresince evsel atık su ile beslenmiş olup bu sudaki B konsantrasyonunun 76 ile 210 µg/l arasında değiştiğini rapor etmişlerdir. Yapılan ölçümler sonucunda, 3 yapay sulak alanının en yüksek % 25,5, ortalamada % 15 B arıtım yüzdesiyle çalıştığını belirlemişlerdir. Avusturyalı araştırmacılar Allende ve ark., 2012 yılında, yapay sulak alanlarda B'un daha etkili arındırılması için kullanılabilir alternatif dolgu malzemeleri üzerine ilk derin araştırmaları başlatmışlardır. Bu araştırmacılar laboratuvar şartlarında çakıl, kokopit (Hindistan cevizi kabuğu), zeolit ve kireç taşı gibi farklı dolgu malzemesi içeren yapay sulak alan kullanarak asidik maden drenaj sularından Arsenik (As), Demir (Fe) ve Bor (B) giderimini araştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda yapay sulak alanlarda kokopit gibi organik madde içeriğinin yüksek olduğu dolgu malzemelerinin

kullanılmasının B giderimini arttırdığını tespit etmişlerdir. Doğal arazi koşullarında yapay sulak alanların test edilmesi ile ilgili yapılan ilk öncü çalışmalar ise 2013 yılında Türker ve ark. tarafından başlatılmıştır. Bu çalışmada, bir polikültür yapay sulak alanın B içeren maden sızıntı suyunun arıtımı için kullanılabilirlik yeteneğini araştırılmıştır. Bu kapsamda *Typha latifolia* ve *Phragmites australis* bitkilerinin bir arada bulunduğu polikültür özelliğe sahip bir yapay sulak alan kullanılmıştır. Aynı araştırmacılar, yine 2013 yılında arazi koşullarında oluşturdukları küçük ölçekte yapay sulak alan kullanarak atık su içerisinde bulunan yüksek derecede çözünmüş B'u temizlemeye çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kurulan yapay sulak alanların % 27 ile % 40 arasında bir B giderim performansı ile çalıştığını bulmuşlardır.

Daha önce bor rezerv alanı içerisinde ve doğal arazi koşullarında yürütülen öncü çalışmaların devamı olarak planlanan bu doktora tez çalışması ile, B üzerine yapılacak eko-teknolojik çalışmaların laboratuvar ortamından çıkıp B ile kirletilmiş atık suların temizlenmesinde veya kontrolünde kullanılacak gerçek boyutlarda bir yapay sulak alanın uygulanmasına bir adım daha yaklaşılabilecektir. Öngörülen bu çalışma ile farklı sulak alan bitkilerinin kombinasyonu sonucu oluşturulacak yapay sulak alanlar sayesinde B maden atık suları ile kirletilmiş sulardan fazla B'un temizlenmesi hedeflenmektedir. Sucul ekosistemler incelendiğinde birçok sulak alan bitkisinin çeşitli baskınlık derecelerinde bir arada bulunduğu görülmektedir (Coleman ve ark. (2001); Katharina ve ark. 2002; Engelhart ve Ritchhie 2002; Karathanasis ve ark. 2003; Driever ve ark. 2005; Picard ve ark. 2005; Demirezen ve ark. 2007; Brisson ve Chazarenc 2009; Debing ve ark., 2009; Njambuya ve ark 2011). Sulak alanların bu kompozisyonundan dolayı bazı araştırmacılar, farklı bitkilerin yapay sulak alanlarda bir arada bulunmasının proses ve mikroorganizma çeşitliliğini arttırdığını böylece kirleticilerin daha yüksek oranda giderildiğini rapor etmişlerdir (Zhang ve ark. 2010; Liang ve ark. 2011). Buna karşın, bazı araştırmacılar ise bitki çeşitliliğinin bitkiler arasında tür içi ve türler arası rekabete neden olabileceğini ve bu durumda kirletici gideriminin etkilenebileceğini belirtmişlerdir (Zhang ve ark. 2007; Demirezen ve ark. 2007). Ancak literatür incelendiğinde, yapılan bioremediasyon çalışmalarında bitki çeşitliliğinin aynı zamanda bitki rekabetinin, yapay sulak alanlarda B gibi

metaloid giderimi üzerinde nasıl bir sonuç vereceği üzerine çok çalışılmamış bir konudur.

Bu tez çalışması ile birlikte, bitkilerinin beraber yetiştiği yapay sulak alandaki durumları, hangi bitki kompozisyonunun daha başarılı B giderimine sahip olduğu ve yapay sulak alanlarda hangi bitki grubunun bir arada kullanılmasının faydalı olacağı araştırılacaktır. Bu sayede, B maden atıkları ile kirletilmiş suların biyolojik temizlenmesinde, farklı bitki çeşitliliğine sahip yapay sulak alanların kullanılıp kullanılmayacağı veya kullanılması durumunda nasıl bir sonuç elde edilebileceği doğal arazi koşullarında test edilmiş olacaktır. Ayrıca bitki rekabetinin yapay sulak alanlarda B arıtımı üzerine olan etkisinin bilinmiyor olması bu çalışma açısından son derece önemlidir. Tez çalışması ile yapay sulak alanlarda oluşabilecek bitki rekabetin belirlenmesi ve aynı zamanda sayısal değerlere dönüştürülmesi ilk defa yürütülecek bir çalışma olup rekabet olayının sulak alanların B arıtımına olan etkisinin belirlenmesi açısından literatüre katkı sağlayacaktır. Dahası, yapay sulak alanlardan iki haftalık periyotlarla bitki örneklerinin alınarak bitki örnekleri için klorofil analizleri ile belirli periyotlarda sediment örnekleri için ise mikrobiyal faaliyetlerin en önemli göstergelerinden olan dehidrogenaz enziminin aktivitesi ölçülecektir. Böylece, B'a karşı cevapları ortaya çıkarılan bitkilerin yapay sulak alanların sürdürülebilirliğine olan etkisinin tartışılması ve yapay sulak alanlardaki mikrobiyal aktivitenin bitki kompozisyonuna göre değişip değişmediği ya da mikrobiyal aktivitelerin B giderimi üzerine etkisinin olup olmadığı belirlenecektir. Öngörülen bu tez çalışması sonunda, yapay sulak alanlardan hasat edebilecek bitki biyomasına göre daha önce diğer araştırmacılar tarafından (Buswell, 1954; Kaltswasser, 1980; Cheng ve ark. 2002; Filimonau ve ark. 2011) önerilen metoda göre yapay sulak alanların enerji bütçeleri çıkarılacak ve bu kapsam da birim alanda ve birim zamanda elde edilebilecek tahmini biyogaz ve elektrik enerjisi hesaplanacaktır. Bu sayede, herhangi bir kirletici maddenin biyolojik olarak temizlenmesi sürecinden maksimum verim alınım ilkesinin kurulduğu bir prototip elde edilmiş olacaktır. Bu nedenle, doktora tez çalışması olarak planladığımız bu araştırmada, tek bir konu üzerine odaklanmak yerine birçok konuyu aynı anda, birbirlerine bağlı şekilde araştırmayı öngörmekteyiz.

Bu doktora tez çalışmasının temel amacı, farklı bitki kompozisyonuna sahip yapay sulak alanların Bor (B) maden atıkları ile kirlenmiş suların biyoremediasyonu için kullanılma potansiyelinin belirlenmesi ve kullanılan bitki kompozisyonunun B giderimi üzerine olan etkilerinin ortaya çıkarılmasıdır. Ayrıca bu çalışmada sunulan ve kullanılacak metotlar; yapay sulak alanların B maden atık sularının arıtılması üzerine yapılan çalışmaları bir adım ileri götürecek, doğal arazi koşullarında yapılan/yapılacak biyoremediasyon çalışmalarını destekleyecek nitelikte olacaktır. Bu nedenle, bu doktora tez çalışması birçok konu başlığını tek çatı altında, birbirleriyle ilişkili şekilde çalışmayı hedeflemektedir. Doktora tez çalışması olarak planladığımız bu araştırmada amaçlarımız kısaca şu şekilde sıralanabilir.

- Arazi koşullarında, farklı bitki çeşitliliğine sahip yapay sulak alanların oluşturulması ve bu sulak alanların birim alanda ve birim hacimde, B maden atıkları ile kirlenmiş suda bulunan fazla Bor'u gidermedeki verimliliğinin ve performansının test edilmesi. Bu kapsamda, yapay sulak alanlardaki bitki kompozisyonunun B giderimine bir etkisinin olup olmadığının belirlenmesi.
- Yapay sulak alanların bünyesinde oluşacak tür içi ve türler arası bitki rekabetin araştırılması ve rekabet olayının bitkilerin nispi gelişme oranları, bitki boyları, üretilen yeni filiz sayısı ve üretilen toplam toprak üstü ve toprak altı biyoması gibi parametreler kullanılarak sayısal değerlere dönüştürülmesi. Bu kapsamda yapay sulak alanlarda oluşabilecek bitki rekabetinin B giderim sürecine olan etkisinin tespit edilmesi.
- Araştırma sonunda, yapay sulak alanlardan elde edilen bitki biyomasına göre elde edilebilecek tahmini biyogaz, metan gazı ve elektrik enerjisi miktarının hesaplanması,
- İki haftalık periyotlar ile yapay sulak alanlardan toplanan bitkilerin klorofil analizlerinin, belirli periyotlarla toplanacak sediment örneklerinin ise dehidrogenaz aktivitesinin analizlerinin yapılması. Böylece B'un yapay sulak alan içerisinde arındırılması sürecinde bitkideki fizyolojik değişimlerin ve sedimentteki mikrobiyal aktivitenin araştırılması,

- Bor'un yapay sulak alanlardaki davranışını kütleli denge modeli yaklaşımı ile belirlenmesi. Böylece yapay sulak alanlarda bulunan bitki ve sediment gibi bileşenlerin B giderim mekanizmasındaki rollerinin ortaya çıkarılması.
- Gelecekte, Türkiye'deki veya Dünyadaki Bor işletme sahalarında B içeren suların kontrol altına alınması ya da temizlenmesi için yapay sulak alan teknolojisinin kullanılmasına karar verilmesi durumunda uygun biyolojik yöntem ve materyal seçimine yönelik bilgilerin tespit edilmesi.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması için dünyanın en büyük B maden rezerv alanlarının bulunduğu Kırka B maden işletme sahası içerisinde, 5 adet poli-kültür, 4 adet mono-kültür ve 1 adet bitkisiz kontrol olmak üzere toplamda 10 adet yapay sulak alan kurulmuş ve araştırmalar bu yapay sulak alan üzerinden gerçekleştirilmiştir. Mart 2014 tarihinde kurulumu tamamlanan yapay sulak alanlar bitkilendirilmeden önce atık suyun sistemlere dağıtımını sağlayacak bir tesisat oluşturulmuş ve tesisatın düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol etmek amacıyla çalışma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların başarı ile tamamlanmasından sonra bir sonraki aşama olan yapay sulak alanların bitkilendirilmesine geçilmiştir. Mart-Mayıs 2014 tarihleri arasında, Kırka Bor rezerv alanı içerisinde çeşitli lokalitelerde yayılışlarını tespit ettiğimiz *Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. (Typhaceae), *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae) ve *Juncus gerardii* Loisel. subsp. *gerardii* (Juncaceae) bitkileri toplanarak zaman kaybedilmeden dikkatli bir şekilde yapay sulak alanlar içerisinde aktarılmıştır. Yapay sulak alanlara aktarılan bitkiler yaklaşık 90 gün boyunca ortama olan adaptasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla kültüre alınmıştır. Çalışma simülasyonları ve kültürleri başarı ile gerçekleştirilen yapay sulak alanlar haziran vejetasyon dönemi içerisinde devreye alınmıştır.

Haziran ayı ile birlikte tez çalışmasının diğer bir adımı olan bor dozlarının hazırlanması ve yapay sulak alanlar üzerinde biyoremediasyon deneyinin gerçekleştirilmesi aşamasına geçilmiştir. Tez çalışmasının kültür periyodu sonrasındaki biyoremediasyon deney aşaması 154 gün sürmüştür. Bu süreç içerisinde, kurulan yapay sulak alanlardan seçilen bekletme süresine göre, her 14 günde bir su örneklenerek başta B olmak üzere tüm su analizlerinin yapılması ve tespiti için Anadolu Üniversitesi Çevre Sorunları ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarına gönderilmiştir. Bununla birlikte, doğal koşullar altında her üç günde bir pH, iletkenlik, sıcaklık, redoks ve çözünmüş oksijen gibi fiziko-kimyasal parametreler izlenerek bu parametrelerin B giderimi ile ilgili olan etkileri değerlendirilmiştir.

Bununla birlikte, bitki rekabetinin yapay sulak alanlarda B arıtımı üzerine olan etkisinin olup olmadığının araştırılması amacıyla, konsantrasyon değişimi

günlerinde (Her 14 günde bir) bitkilerin boyları ölçülerek, nispi gelişme oranları hesaplanmış ve sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Ayrıca, *T.latifolia*, *T. angustifolia*, *P. australis* ve *J. gerardii* bitkilerinin farklı kompozisyonlarda beraber yetiştiği yapay sulak alanlarda hangi bitki kompozisyonuna sahip yapay sulak alanın daha başarılı B giderimine sahip olduğu ve yapay sulak alanlarda hangi bitki grubunun bir arada kullanılmasının faydalı olacağı araştırılmıştır.

Tez çalışmasının son aşamasını oluşturan, Yapay sulak alanlardaki bitkilerin hasat edilmesi, bitkilerin yaş ve kuru biyomaslarının ölçülmesi, bitki örneklerinin analizi için laboratuvar işlemlerinin yapılması (süzülme, kurutulma, öğütme, asitle sindirilme, tekrar süzülme vs...), sediment örneklerinin toplanması, gerekli elementlerin değerlerinin tespiti için örneklerin laboratuvara gönderilmesi aşamalarında tamamlanarak B ile diğer ölçülen parametreler arasındaki grift ve karmaşık ilişkilerin ortaya çıkarılmasına çalışılmıştır.

2.1. Araştırma Alanı

Projenin arazi çalışmaları gerekli izinler alınarak Eti Maden İşletmelerine bağlı Kırka Bor işletme sahası (39°17' N/ 30°30'E) içerisinde ve doğal iklim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yapay sulak alanların kurulacağı alan için, su numunelerinin hazırlanacağı maden deşarj suyu toplama göletine ve evsel atık su arıtma tesisine olan uzaklıklar ve güvenlik koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle yapay sulak alanların kurulumu işletme sahası içerisinde, toplama göletlerinin yakınında bulunan evsel atık su arıtma tesisinin sınırları içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1).



a. Kırka B rezerv alanı uydu görüntüsü

Şekil 2.1. Kırka Bor Maden Rezerv Alanı (a) ve çalışmaların yapıldığı alan (b)



b. Evsel atık su arıtma tesisi

Şekil 2.1. (Devam) Kırka Bor Maden Rezerv Alanı (a) ve çalışmaların yapıldığı alan (b)

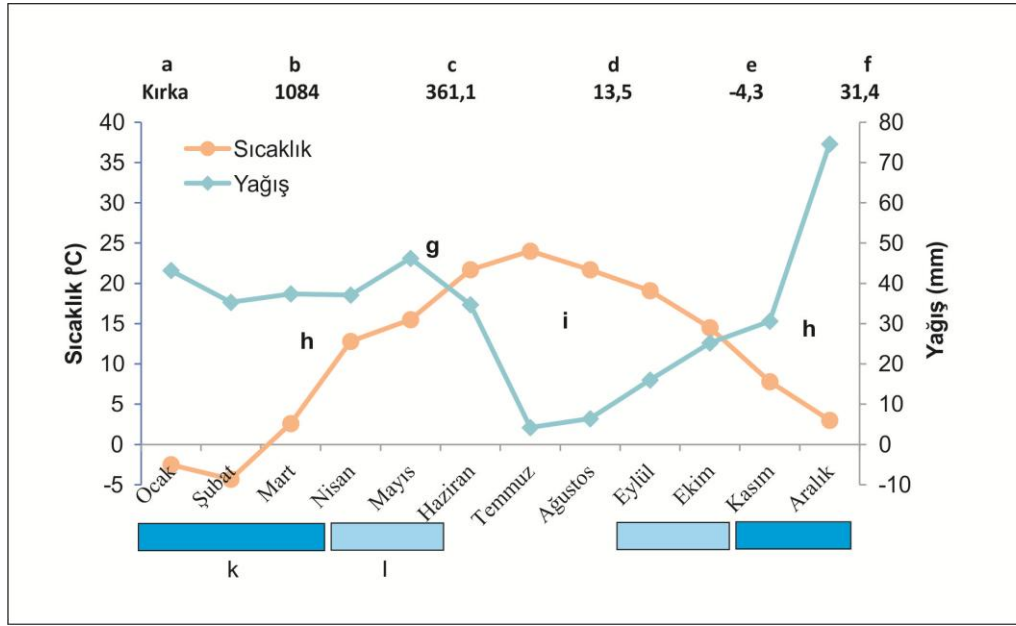
2.2. Araştırma Alanının İklimsel Özellikleri

Araştırmanın yapıldığı Kırka'a (Eskişehir) ait iklimsel veriler, T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (Ankara)'nden temin edilmiştir (2014).

2.2.1. Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve yağış (mm) değerleri

Kırka (Eskişehir)'in 22 yıllık rasat verilerine göre yıllık ortalama sıcaklığı 13.5°C dir. Ortalama sıcaklığın en yüksek olduğu dönem 24°C ile Temmuz ayıdır. Ortalama sıcaklığın en düşük olduğu dönem $-4,3^{\circ}\text{C}$ ile Şubat ayına aittir. Ortalama yüksek sıcaklık en yüksek değerine 28.6°C ile Temmuz ayında, en düşük değerine ise 3°C ile Şubat ayında ulaşmaktadır. Yıllık ortalama yüksek sıcaklık $11,2^{\circ}\text{C}$ 'dir. Kırka beldesinin yıllık ortalama toplam yağış miktarı $361,1$ mm olup, en fazla aylık ortalama yağış miktarı $74,6$ mm ile Aralık ayında, en düşük ise $4,2$ mm ile Temmuz ayında gerçekleşmiştir.

Şekil 2.2.'de Kırka'a ait iklimsel verilerden yararlanılarak Walter (1960) yöntemine göre çizilmiş iklim diyagramı verilmektedir. Bu diyagram incelendiğinde, Kırka'da Haziran ve Ekim ayları arasında, kurak periyodun hakim olduğu görülmektedir.



a: İstasyonun adı, **b:** İstasyonun denizden yüksekliği (m), **c:** Yıllık toplam yağış miktarı (mm), **d:** Yıllık ortalama sıcaklık (°C), **e:** En soğuk ayın minimum sıcaklık ortalaması (°C), **f:** En sıcak ayın maksimum sıcaklık ortalaması (°C), **h:** Yağışlı Periyot, **g:** Aylık ortalama sıcaklık eğrisi, **i:** Kurak periyot, **k:** Ortalama minimum sıcaklığın 0°C'nin altında olan aylar, **l:** Mutlak minimum sıcaklığın 0°C'nin altında olan aylar.

Şekil 2.2 Çalışma Alanına (Kırka, Eskişehir) ait iklim diyagramı

2.2.2. Biyoiklimsel sentez

Emberger (1952), Akdeniz iklim katlarının ve genel kuraklık derecesinin tayini için şu formülü önermiştir.

$$Q = \frac{2000 \cdot P}{(M+m+546,4) (M-m)}$$

(**Q:** Yağış-Sıcaklık emsali, **P:** Yıllık yağış miktarı, **M:** En sıcak ayın maksimum sıcaklık ortalaması (°C), **m:** En soğuk ayın minimum sıcaklık ortalaması (°C)).

İklimsel verilere dayanarak yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan Q değeri;

$Q < 20$; $P < 300$ mm ise; Çok Kurak Akdeniz İklimi

$Q = 20-32$; $P = 300-400$ mm ise; Kurak Akdeniz İklimi

$Q = 32-63$; $P = 400-600$ mm ise; Yarı Kurak Akdeniz İklimi

$Q = 63-98$; $P = 600-800$ mm ise; Az Yağışlı Akdeniz İklimi

$Q > 98$; $P > 1000$ mm ise; Yağışlı Akdeniz İklimi'ni ifade

etmektedir. Bu iklim katlarının her biri özel bir vejetasyon tipine karşılıktır.

“m” donlu dönemlerin süresinin ifadesidir ve m değeri küçüldükçe soğuk dönem o kadar uzun olur. “m” değerinin 0’dan büyük veya küçük olmasına göre Akdeniz biyoiklim tipleri;

$m > 0$ °C ise;

$m > 10$ °C ise; Çok Sıcak Akdeniz İklimi

10 °C < $m < 7$ °C ise; Sıcak Akdeniz İklimi

$4,5$ °C < $m < 3$ °C ise; Yumuşak Akdeniz İklimi

3 °C < $m < 0$ °C ise; Serin Akdeniz İklimi

$m < 0$ °C ise;

$m > -10$ °C ise; Kış Buzlu

-10 °C < $m < -7$ °C ise; Kış Son Derece Soğuk

-7 °C < $m < -3$ °C ise; Kış Çok Soğuk

-3 °C < $m < 0$ °C ise; Kış Soğuk’tur.

Kurak devre ise Emberger’e göre **S**: PE / M formülü ile belirlenebilmektedir. S değerine göre istasyon $S < 5$ ise Akdenizli, $5 < S < 7$ ise Yarı Akdenizli, $S > 7$ ise Akdenizli değildir (**PE**: Yaz yağışı ortalaması, **M**: En sıcak ayın maksimum sıcaklık ortalaması), (Akman 1990).

Araştırma bölgesinin Emberger (1952) yöntemine göre hesaplanmış biyoiklim katı Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Araştırma alanının biyoiklim katı

| İstasyon | Yükseklik | P | PE | M | m | S | Q | Biyoiklim katı |
|----------|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|---------------------------|
| Kırka | 1084 | 361,1 | 15,01 | 31,4 | -4,3 | 0,47 | 35,27 | Yarı Kurak Akdeniz İklimi |

Yukarıdaki verilere göre, Kırka (Q=35,27) ile Yarı Kurak Akdeniz İklimi biyoiklim katında yer almaktadır. En soğuk ayın minimum sıcaklık ortalaması olan m değeri dikkate alındığında ise, Kırka $-4,3$ °C değeri ile kış çok soğuk Akdeniz iklimini, karakterize etmektedir (Çizelge 2.1, Çizelge 2.2).

Şekil 2.2.’de Kırka’ya ait iklimsel verilerden yararlanılarak Walter (1960) yöntemine göre çizilmiş iklim diyagramında belirtildiği gibi biyoremediasyon deneyi nispeten kurak mevsimde gerçekleştirilmiştir. Çalışma periyodu boyunca yağışın en düşük seviyede olması çalışmanın yapıldığı bölgede B içeren atık suyun sistem içerisinde olduğu gibi kaldığını ve atık suya yağmur suyunun karışmadığı ya da en az seviyede karıştığını göstermektedir.

Çizelge 2.2. Çalışma alanının (Kırka, Eskişehir) ayrıntılı rasat verileri (1992-2014)

| PARAMETRE | RASAT (YIL) | AYLAR | | | | | | | | | | | | YILLIK |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | |
| Ortalama Kar Yağışlı Gün Sayısı | 22 | 9,4 | 7,81 | 5,9 | 1,8 | - | - | - | - | - | 1 | 4,2 | 5,9 | 35,27 |
| Ortalama Karla Örtülü Gün sayısı | 22 | 10,35 | 8,2 | 3,4 | 6 | - | - | - | - | - | - | 2,5 | 5,6 | 36 |
| Ortalama Sisli Gün Sayısı | 22 | 6,3 | 3,45 | 2,69 | 1,5 | 1 | 0,2 | - | 2 | 1,9 | 5,8 | 5,8 | 6,5 | 31,34 |
| En Hızlı Esen Rüzgar Hızı (m/sn) | 22 | 15,4 | 15,4 | 18,5 | 28,5 | 21,1 | 21,6 | 22,6 | 26,2 | 13,4 | 19 | 15,4 | 14,9 | 17,1 |
| Ortalama Rüzgar Hızı | 22 | 2,9 | 3,1 | 3,4 | 3,2 | 3 | 3,1 | 3,6 | 3,3 | 2,7 | 2,3 | 2,5 | 3 | 3 |
| Ort. 5 cm Toprak Sıcaklığı (°C) | 22 | 1,2 | 1,9 | 6,1 | 11,5 | 17,6 | 22,4 | 25,7 | 25,4 | 20,4 | 13,9 | 6,5 | 2,55 | 12,9 |
| Ort. 10 cm Toprak Sıcaklığı (°C) | 22 | 1,4 | 1,9 | 6 | 11,3 | 17,3 | 21,9 | 24,8 | 24,6 | 20,3 | 14,1 | 6,9 | 2,9 | 12,7 |
| Ort. 20 cm Toprak Sıcaklığı (°C) | 22 | 2,2 | 2,3 | 5,9 | 10,8 | 16,4 | 20,8 | 23,7 | 23,8 | 20,2 | 14,8 | 7,9 | 3,9 | 12,7 |
| Ort. 50 cm Toprak Sıcaklığı (°C) | 22 | 5,1 | 4,4 | 6,7 | 10,3 | 14,9 | 18,7 | 21,6 | 22,5 | 20,5 | 16,6 | 11,3 | 7,2 | 13,3 |
| Ort. 100 cm Toprak Sıcaklığı (°C) | 22 | 7,9 | 6,6 | 7,2 | 9,3 | 12,4 | 15,5 | 18,2 | 19,8 | 19,3 | 17,1 | 13,6 | 10,2 | 13,4 |
| Ortalama Aylık Buharlaşma (mm) | 22 | - | - | - | 4,97 | 6,55 | 8,27 | 10,24 | 9,84 | 7,3 | 5 | - | - | 52,17 |
| Ortalama Aylık Güneşlenme süresi (saat) | 22 | 03:04 | 04:30 | 05:32 | 06:46 | 08:53 | 10:23 | 11:26 | 11:15 | 09:20 | 06:17 | 04:36 | 02:28 | 07:13 |
| Ortalama Yerel Basınç (hPa) | 22 | 926 | 925 | 924 | 922 | 923 | 923 | 922 | 923 | 925 | 927 | 927 | 927 | 924,9 |
| Ortalama Sıcaklık | 22 | -0,3 | 0,7 | 4,7 | 9,7 | 14,8 | 19,2 | 22,1 | 21,9 | 17 | 11,8 | 5,4 | 1,6 | 10,7 |
| Ortalama Yüksek Sıcaklık (°C) | 22 | 7,1 | 8 | 12,6 | 17 | 20,5 | 24,2 | 26,4 | 26 | 22,2 | 18,1 | 13 | 9,1 | 17 |
| Ortalama Düşük Sıcaklık (°C) | 22 | -8 | -6,7 | -2 | 2,8 | 8,8 | 13,4 | 17,3 | 17,1 | 11,5 | 5,1 | -1,1 | -6 | 4,3 |
| En Yüksek Sıcaklık (°C) | 22 | 12,8 | 14,8 | 22,2 | 25,6 | 29,5 | 33,7 | 36,3 | 35,6 | 32,6 | 28,2 | 20,9 | 14,8 | 25,6 |
| En Düşük Sıcaklık (°C) | 22 | -13,6 | -13,3 | -8,4 | -4,7 | 0,6 | 4,8 | 8,3 | 8 | 2,3 | -2,7 | -7,7 | -11,5 | -3,1 |
| Ortalama Buhar Basıncı (hPa) | 22 | 4,7 | 4,6 | 5,2 | 7,1 | 9,7 | 11,6 | 13 | 12,8 | 10,1 | 8,4 | 6,3 | 5,3 | 8,2 |
| Ortalama Nisbi Nem (%) | 22 | 75,2 | 70 | 64,3 | 62,2 | 59,6 | 54,9 | 51,7 | 52,8 | 57,1 | 64,2 | 69,9 | 75,4 | 63,2 |
| Ortalama Bulutluluk (0-10) | 22 | 6,6 | 5,9 | 5,4 | 5,2 | 4,2 | 2,9 | 1,8 | 1,7 | 2,5 | 4,2 | 5 | 6,7 | 4,3 |
| Ort. Açık Gün Sayısı (0,0-1,9) | 22 | 2,9 | 4,6 | 5,6 | 3,9 | 7,7 | 12,1 | 19,6 | 19,7 | 14,9 | 7,7 | 6,1 | 2,7 | 9 |
| Ortalama bulutlu gün (2,0-8,0) | 22 | 13,3 | 13,2 | 16,2 | 18 | 21,5 | 18,9 | 13,4 | 11,8 | 13,2 | 16,6 | 17,6 | 12,9 | 186,6 |
| Ortalama Kapalı Gün (8,1-10,0) | 22 | 12 | 8,1 | 7,3 | 5 | 2,9 | 2 | 1 | 2,3 | 1,75 | 3,5 | 6,1 | 11,5 | 5,3 |
| Ort. Top. Yağış Miktarı (mm) | 22 | 32,9 | 28,2 | 29,9 | 44,1 | 42,2 | 24,2 | 14,9 | 11,2 | 17,2 | 34,9 | 33,4 | 42,4 | 29,6 |

2.3. Yapay Sulak alanların kurulumu

Tez çalışması kapsamında kurulan yapay sulak alanlar, gerçek prototiplere olabildiğince en yakın şekilde tasarlanmış olup, her bir yapay sulak alan 200 cm uzunluğa, 100 cm genişliğe ve 2 m² alana sahip polyster düzenekten oluşturulmuştur. Yapay alanlara verilecek atık suyun hazırlanması için 5 ton su kapasitesine sahip su tankı (Giriş Su Tankı) kullanılmıştır. (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Yapay sulak alanların kurulacağı polyster düzenekler

Giriş su tankının yapay sulak alanlarla bağlantısını sağlamak amacıyla ana dağıtıcı boru tesisatı kullanılmıştır. Ana dağıtıcı boru ile sulak alanlar arasındaki bağlantısını ise yardımcı dağıtıcı borular sağlamaktadır (Şekil 2.4). Her bir dağıtıcı borunun üzerine kontrol vanaları yerleştirilmiş olup böylece atık su dağıtımını kontrol altında tutulmuştur. Sulak alanlardan su örnekleme çıkış suyu yardımcı toplayıcı borular üzerine yerleştirilmiş çıkış suyu deşarj vanaları yardımıyla yapılmıştır. Örnekleme işlemi sonrasında atık suyun yapay sulak alanlardan boşaltılmasını ise toplayıcı borular sağlamıştır. Buna göre sulak alanların çıkış ünitelerine yardımcı toplayıcı borular yerleştirilmiş ve her bir yardımcı boru ise ana toplayıcı boru ile birleştirilerek, ana toplayıcı borularda bulunan atık suyun sistemlerin çıkışında bulunan atık su toplama tankında birikimi sağlanmıştır (Şekil 2.5).



a



b

Şekil 2.4. Yapay sulak alanlara atık suyun girişini sağlayacak dağıtıcı tesisatın yerleştirilmesi (a) ve toplayıcı borular (b)



a



b



c



d

Şekil 2.5. Kontrol ve çıkış suyu deşarj vanaları (a), atık su toplama tankının yerleştirilmesi (b, c) ve atık suyun toplama tankında biriktirilmesi (d).

Yapay sulak alanların yatak derinliği çalışma simülasyonlarında bitki köklerinin su ile temasının homojen bir şekilde sağlanamama tehlikesine karşı optimize edilerek 50 cm olarak seçilmiştir. Bitkilerin yetiştirilmesi ve yapay sulak alanlarda filtrasyonun sağlanabilmesi için üç katmandan oluşan sediment tabakası hazırlanmıştır. Gerçekçi bir sediment hazırlanması amacıyla en alt katmanda çakıl kullanılmıştır. akıl katmanının derinliği 5 cm'dir. Bu tabakanın üzerine bitki kök gelişiminin ve filtrasyonun daha sağlıklı sağlanması amacıyla 15 cm derinliğinde kum-torf karışımı kullanılmıştır. Allende ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmalarda organik bazlı filtrasyon tabakasının daha yüksek kapasitede de Bor tuttuğu bildirdiği için bu çalışmada filtrasyon malzemelerine ilaveten torf, dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Torf-kum tabakasının üzerine bitki rizomlarının desteklenmesi amacıyla 15 cm derinliğinde kum tabakası yerleştirilmiştir. En st tabaka olarak 5 cm çakıl malzeme serilmiştir (şekil 2.6).



şekil 2.6. Yapay sulak alanlarda kullanılan filtrasyon ve dolgu malzemeleri: akıl (a), kum (b) ve torf (c)

Giriş-ıkış ünitelerindeki tıkanma probleminin önüne geçmek için 5–8 cm çapında çakıl malzeme yapay sulak alanların giriş ve çıkış yapılarına yerleştirilmiştir (şekil 2.7). Son olarak yapay sulak alanların içerisindeki su seviyesinin ölçülebilmesi için sistemlerin ortasına 70 cm uzunluğunda PVC boru konumlandırılmıştır (şekil 2.8).



Şekil 2.7. Yapay sulak alanların giriş ve çıkış bölümlerinde sineklik ve çakıl taşlarının yerleştirilmesi



Şekil 2.8. Araştırma alanı içerisinde kurulan yapay sulak alanlar

Sulak alanın bitkilendirilmesi için Kırka B rezerv alanı içerisinde doğal yayılış gösteren *Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L., *Phragmites australis* ve *Juncus gerardii* subsp. *gerardii* bitkileri kullanılmıştır. Bu türdeki bitkiler çeşitli lokalitelerden toplanmış, budanmış ve rizom durumuna getirilerek yapay sulak alanlara 25 cm derinlikten başlanarak ve her bir rizom arasında 20 cm aralık olacak şekilde dikilmiştir (Şekil 2.9). Bitkilendirme sonrasında bitkiler

buldukları sulak alan sistemine, türlerine (*Typha latifolia* için :Tl, *Typha angustifolia* için: Ta, *Phragmites australis* için: P ve *Juncus gerardii subsp. gerardii* için:J kısaltmaları kullanılmıştır) ve sistemdeki konumlarına göre numaralandırılmıştır (Ör: Tl 1.2, Ta 1.2, P1.2, J1.2).

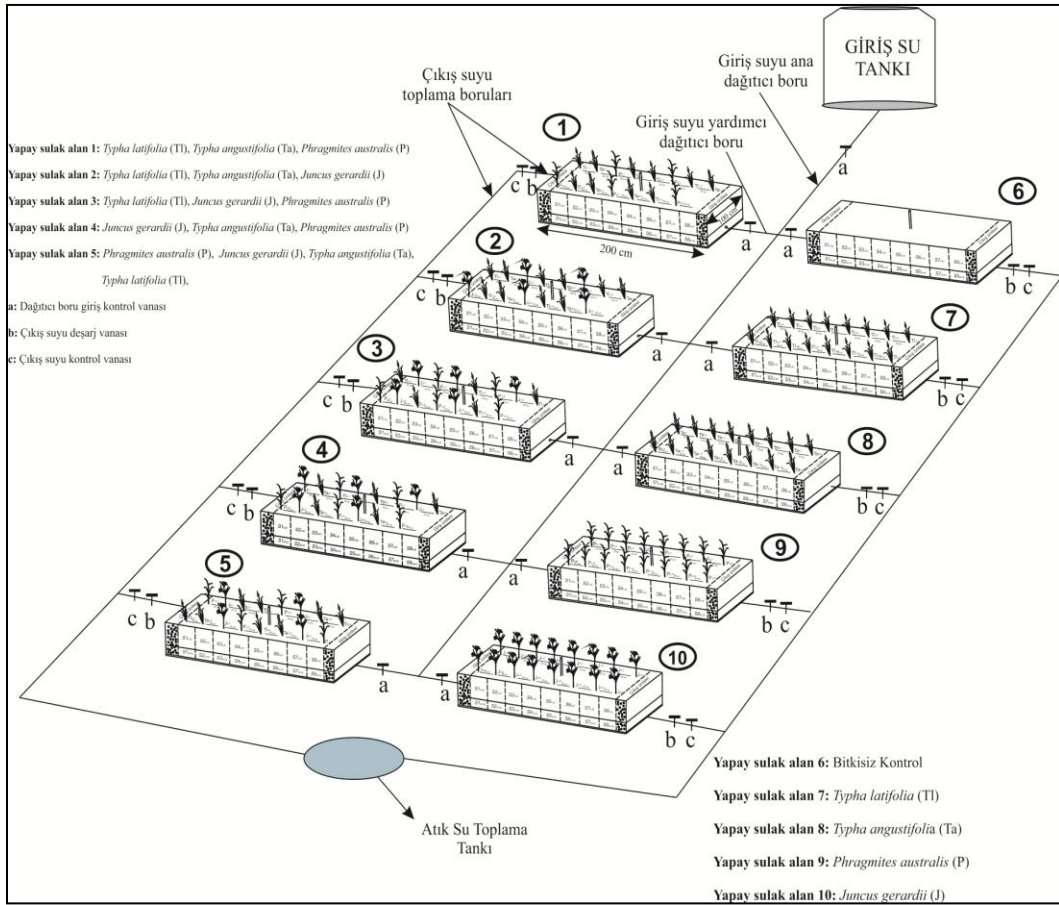


Şekil 2.9. Yapay sulak alanlarda dikilen bitki rizomları (a) ve bitkilendirme (b)

Bununla birlikte B'a maruz bırakılan deney grubu bitkileri ile karşılaştırma yapılması amacıyla her tür için 3 bitkiyi kapsayacak şekilde kontrol mikrokozmlar oluşturulmuştur (Şekil 2.10). Oluşturulan kontrol mikrokozmlar araştırma süresi boyunca evsel atık su ile beslenmiş ve araştırma sonunda hasat edilerek tüm analizleri yapılmıştır. Böylece, yapay sulak alanlarda bulunan deney grubu bitkileri ile B'a maruz kalmayan kontrol mikrokozmları içerisinde bulunan bitkiler arasında B içeriklerinin açısından karşılaştırma yapılacak ikinci bir kontrol grubu oluşturulmuştur.



Şekil 2.10. Kontrol mikrokozmlar



Şekil 2.11. Kurulan yapay sulak alanların ayrıntılı diyagramları

2.4 Kültür periyodu

İsimlendirilmesi ve numaralandırılması yapılan bitkiler sonrasında yaklaşık 90 gün boyunca kültüre alınarak bitki kültürlerinin ortama uyum sağlanması beklenmiştir. Kültür periyodu süresince yapay sulak alanlar işletme sahası içerisinde bulunan arıtma tesisinden temin edilen 3:1 oranında seyreltilmiş ikincil arıtım suyu ile beslenmiştir. Böylece yaklaşık 90 gün boyunca yapay sulak alanlardaki bitkilerin ve mikroorganizmaların büyümelerini teşvik edilmiştir. Bununla birlikte, yapay sulak alanlara konulan bitki rizomlarının ilk 30 günlük kültür periyodu içerisinde hayatta kalma oranı % 75'in altında kaldığı sulak alanlarda, ölü bitki rizomları hemen sağlıklı bitki rizomları ile yer değiştirilmiştir.



Şekil 2.12. Ölü bitki rizomlarının sağlıklı bitki rizomları ile değiştirilmesi

2.5 Atık suların hazırlanması ve giriş Bor dozlarının ayarlanması

Projenin kültür periyodu sonrasında, yapay sulak alanlar üzerinde B'un biyoremediasyon deneyinin gerçekleştirilmesi 154 günlük bir süreyi kapsamıştır. Bor içeren atık su hazırlamak için iki farklı kaynaktan elde edilen sular kullanılmıştır. Birinci örnek Kırka Bor İşletme Tesisi içerisinde bulunan ve yoğun bor madeni atığın deşarj edildiği atık su barajlarından örneklenmiş olup deneysel çalışma için ana su kaynağı olarak kullanılmıştır. İkinci su kaynağı ise, Kırka Bor İşletme sahası içerisinde bulunan konvansiyonel evsel atık su tesisinden örneklenen su olup ana su kaynağını, çalışma için uygun B konsantrasyonlarına seyreltmek için kullanılmıştır. Bor konsantrasyonları belirlenirken daha önce Kırka Bor Rezerv alanı içerisinde gerçekleştirilen çalışmalardan yararlanılmış ve yapay sulak alanlardaki bitki ve mikroorganizmalar için zehir etkisi yaratmaması açısından yapay sulak alanlara uygulanacak olan B dozları 40 ppm düzeyini aşmamıştır. Hazırlanan ve bor maden deşarj suları ile kirlenerek oluşturulan atık sular yapay sulak alanlar içerisinde 14 gün boyunca bekletilmiştir. Bekletme süresi sonunda yapay sulak alanların çıkış suyu ünitelerinden su örnekleri alınarak analizi yapılmıştır.

2.6. Su Analizleri

Sulak alan sitemlerinden 110 giriş (her sistem için 11) ve 110 çıkış (her sistem için 11) suyu olmak üzere toplamda 220 su örneği analiz edilmiştir.

2.6.1. Fiziko- Kimyasal Analizler

Yapay sulak alanlardan örneklenen giriş ve çıkış su numuneleri için öncelikle fiziko-kimyasal su kalite parametrelerinden olan EC, pH ve Sıcaklık arazi şartlarında taşınabilir çoklu su ölçüm cihazı (HACH HQ40D multi-parameter Taşınabilir pH Metre, pH + İletkenlik + Sıcaklık Ölçümü + Çözünmüş oksijen + redoks ölçer) ile belirlenmiştir. Bununla beraber yapay sulak alanların fiziko-kimyasal parametreleri her üç günde bir izlenerek kaydedilmiştir.

2.6.2. AAS Analizleri ve Bor Giderim Oranı

Yapay sulak alanlardan örneklenen su numunelerinin pH'sı vakit kaybetmeden 2'nin altına düşürülmüş ve içerisindeki B miktarlarının belirlenebilmesi için Anadolu Üniversitesi Çevre Sorunları ve Uygulama Araştırma Merkezi'ne gönderilmiştir. Numunelerdeki B miktarları Atomik Absorbsion Spektrometresinde (AAS) tespit edilmiştir.

2.6.3. Nitrit- Nitrat Analizleri

Su örneklerindeki nitrit ve nitrat tayini için pH'sı 5-9 arasına getirilerek UV spektrofotometre aracılığıyla belirlenmiştir. Nitrit tayininde su örnekleri Whatman kağıdı ile süzüldükten sonra 50 ml ya da 50 ml'ye seyreltilmiş numuneye 2 ml renk geliştirici ayraç ilave edilip, karıştırılarak ve 10 dk ile 2 saat arasında bir bekleme süresinden sonra 543 nm dalga boyundaki UV spektrofotometre ile ölçülmüştür. Su örneklerindeki nitrat ise, filtre edilen 50 ml berrak numune üzerine 1 ml HCl çözeltisi eklenip, karıştırıldıktan sonra 220 nm dalga boyundaki UV spektrofotometre ile belirlenmiştir.

2.7. Bitki Örneklerinin Analizleri

Çalışmanın sonunda, her bitki örneklerinin biyomaslarının belirlenmesi ve kimyasal analizlerinin (B, Na, K, Ca ve Mg) yapılabilmesi için yapay sulak alanlardaki bitkiler araştırma sonunda hasat edilmiştir. Bitkisiz kontrol dışında kalan diğer sistemlerdeki tüm bitki örnekleri analiz edilmiştir.

2.7.1 Bitki Biyomas Ölçümleri

Hasat edilen bitki örneklerinin yaş biyomasları laboratuvara getirildikten sonra tartılıp tespit edildikten sonra bu bitkilerin kuru biyomasları 65°C' de 48 saat bekletildikten sonra hesaplanmıştır.

2.7.2. Tür İçi ve Türler Arası Bitki Rekabetinin Değerlendirilmesi

Yapay sulak alanlardaki rekabetin varlığını ortaya koymak ve bu rekabeti yorumlayabilmek için, rekabeti ölçmek ve sayısal değerlere dönüştürmek gerekir. Bu kapsamda sulak alanlardaki rekabeti ölçmek için bitkilerin birim zamanda (14 gün) gerçekleştirdikleri nispi gelişme oranları, bitki boyları ve üretilen yeni filiz sayısına hesaplanmıştır. Bitkilerin nispi gelişme oranlarına bağlı rekabet Pltzer ve Köchy (2001) tarafından önerilen;

RGR = $(\log H_t - \log H_0) / T$ formülü ile hesaplanmıştır. Bu formülde;

RGR = Nispi gelişme oranı

H_t = Bitkinin T zamanında ölçülen bitki boyu (cm)

H₀ = Bitkinin başlangıçtaki boyu (cm)

T = Geçen zaman (gün)

RGR değerleri yukarıdaki formül yardımıyla hesaplanmış ve sulak alanlardaki rekabet sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

2.7.3. Tahmini Enerji Bütçesi, Biyogaz ve Elektrik Enerjisi Eldesinin Hesaplanması

Kaltwasser (1980) uygun anaerobik şartlarda organik materyallerin biyogaza dönüştürebileceğini rapor etmiştir. Bu araştırmacı organik materyalden biyogaz üretimi için 4 basamaklı bir dönüşüm sürecinin gerekli olduğunu bildirmiştir. Bunlar Hidroliz, Asidogenez, Asetogenez-Asetik asit ve Metan formasyonudur. Bu basamaklar sonunda organik materyalin % 30 ile % 60 arasındaki kısmının biyogaza dönüşebileceğini hesaplamıştır. Bununla birlikte Buswell (1952) teorik olarak kullanılan organik substrata göre elde edilecek ürün ve karışımların hesaplanabileceğini rapor etmiştir. Bu çalışmada yapay sulak alanlardan elde edilen toplam kuru biyomas kg cinsinden belirlenerek, hasat edilen kuru organik materyalden elde edilebilecek biyogaz ve metan gazının

miktarı aynı zamanda enerji bütçeleri Buswell (1952) ve Kaltwasser (1980) göre hesaplanmıştır.

Cheng ve ark. (2002) 1 N m³ biyogaz yakıldığında 39,75 MJ enerji açığa çıktığını belirtmiştir. Buna göre yapay sulak alanların enerji bütçeleri hesaplandıktan yapay sulak alanlardan elde edilebilecek tahmini biyogaz eldesi Cheng ve ark. (2002) önerdikleri eşitliğe göre hesaplanmıştır.

Filimonau ve ark. (2011) biyogazın kullanılması sonucunda elektrik enerjisi üretilebileceğini belirtmişlerdir. Buna göre 3,6 MJ'lük enerjiye eşit biyogaz yakılması sonucunda 1 kWh elektrik enerjisi elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Tahmini biyogaz eldesi hesaplandıktan sonra Filimonau ve ark. (2011)'nin önerdiği eşitliğe göre tahmini elektrik enerji eldesi hesaplanmıştır.

2.7.4. Bitki AAS Analizi

Hasat edilen bitkilerin biyomas ölçümleri yapıldıktan sonra kök, gövde ve yaprak olarak ayrıldıktan sonra kimyasal analizleri (B, Na, K, Ca, ve Mg) AAS cihazında yapılmıştır. Bu kapsamda kurutulmuş (65 °C' de 48 saat) ve öğütülmüş (0,84 mm) bitki numunelerinden (kök, gövde ve yaprak) 0,5 g tartılarak üzerlerine 1 birim perklorik asit (HClO₄) ve 3 birim nitrik asit (HNO₃) konularak mikro dalga yakma ünitesinde 40 dk boyunca yakılmıştır. Yakılan bitki örnekleri süzöldükten sonra elde edilen süzöntünün analizleri Anadolu Üniversitesi Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Atomik Absorbsion Spektrometresinde (AAS) yapılmıştır.

2.7.5. Bitki Azot Analizi

Azot, AAS cihazlarında analiz sırasında itici gaz olarak kullanıldığından, örneklerde AAS aracılığı ile N analizi yapılamaması nedeniyle, bitki örneklerindeki N miktarı, Kjeldahl metoduna göre belirlenmiştir.

2.7.6. Klorofil Analizleri

Yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerden iki haftalık periyotlar halinde alınan taze yaprak örneklerinden Wellburn (1994) metoduna göre klorofil-a ve klorofil-b'nin miktarsal analizleri yapılmıştır. Buna göre, yaklaşık 1 gr yaprak örneği sıvı azotta iyice toz haline getirildikten sonra 3 ml'lik eppendorf tüpüne

alınmıştır. Üzerine %80'lik 3 ml aseton çözeltisi eklenmiş ve 1500 G'de 15 dk boyunca santrifüj edilmiştir. Santifüj edilen örneğin üste kalan pellet kısmı alınarak klorofil-a ve klorofil-b analizi için laboratuara gönderilmiştir.

2.8 Sediment Örneklerinin Analizleri

Bor uygulaması öncesinde ve araştırma sonunda 1'i bitkisiz kontrol olmak üzere 9 yapay sulak alandaki sedimentten, 0-20 ve 20-40 cm derinliğinden ve giriş, orta ve çıkış olmak üzere homojen bir şekilde örnekleme yapılmıştır. Her bir sulak alan sisteminden 12 tane olmak üzere toplamda 120 sediment örneği toplanarak analizleri yapılmıştır.

2.8.1. Fiziksel Analiz

Araştırmadaki sediment örneklerinin fiziksel analizleri ise, toprağı meydana getiren taneciklerin, birbirleri ile bağlantılarını kaldırarak taneciklerin yüzde oranlarının bulunması esasına dayanan *Bouyoucus Hidrometre Yöntemi* kullanılarak yapılmıştır.

2.8.2. Ekstrakte Edilebilir Bor Analizi

Yapay sulak alanlardan elde edilen sediment örnekleri laboratuvardaki toprak tavaları üzerine serilerek kuruması sağlanmıştır, daha sonra iyice ezilerek, 2 mm ve 0.5 mm gözenek çapına sahip eleklerden geçirilip, elek içerisinde kalan 2 mm den büyük granüller uzaklaştırılmıştır. Bu işlemlerin ardından sediment örneklerinin B miktarları, karminik derişik sülfürik asit içindeki çözeltisiyle, B konsantrasyonuna bağlı olarak verdiği kırmızı rengin ışık absorpsiyonunun, UV spektrofotometre aracılığı ile belirlenmesi esasına dayanan *Karminik metot* kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem için havada kurutulmuş ve 2 mm'lik elekten geçirilmiş 100 g sediment tartılarak 200 mm'lik erlenmayere konularak. Üzerine saturasyon haline gelinceye kadar büret aracılığı ile distile su ilave edilmiştir. Sarfedilen su miktarı kaydedilip, aşağıdaki % Saturasyon formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Saturasyon} = \frac{\text{İlave edilen su miktarı (ml)} \times (100 + \% \text{Rutubet})}{\text{Hava kuru toprak ağırlığı (g)}}$$

Hazırlanan çözelti 1 gece bekletilip, ertesi gün vakumlu bir filtre aracılığı ile süzölmüştür. 100 ml'lik borsuz balon jojelere, ekstrattan 2 ml alınıp, üzerine 2

ml derişik hidroklorik asit (HCl) ve 10 ml derişik sülfürik asit (H₂SO₄) ilave edilmiştir. İyice karıştırılarak çözeltinin soğuması bekletilip, üzerine 10 ml karmin çözeltisinden (karmin + H₂SO₄) ilave edilerek ve en az 45 dk sonra, UV spektrofotometre aracılığı ile 585 nm dalga boyunda ölçüm yapılarak örneklerin B miktarları belirlenmiştir.

2.8.3. pH (Toprak Reaksiyonu) Analizi

Sediment örneklerinin pH değerleri, su ilavesi ile sediment çözeltisine geçen H⁺ iyonları konsantrasyonun pH ölçer aracılığı ile belirlenmesi esasına dayanan *1/2,5 Oranında Sediment/Su Yöntemi* ile belirlenmiştir.

2.8.4. Azot Analizi

Sediment örneklerindeki azot miktarı, örnekteki azotun çeşitli işlemlerle çözeltiye geçirilip, asit ile titre edilerek sarfedilen asit miktarından yararlanarak azot miktarının hesaplanması esasına dayanmakta olan *Kjeldahl Yöntemi* ile belirlenmiştir. Yöntem şu şekilde özetlenebilir; 0.5 mm'lik elekten geçirilmiş, hava kurusu sedimentten 0.5 ila 1 g arasında örnek analitik terazi kullanılarak tartılıp, tartım sonucu tam olarak kaydedilerek, Kjeldahl tüplerine aktarılmıştır. Kör (şahit) olarak kullanılacak tüplere örnek konulmaz. Her bir tüpün içerisine katalizör olarak görev yapacak olan 2 adet Bakır sülfat (Cu₂SO₄) + Potasyum sülfat (K₂SO₄) karışımı içeren tableten atılıp, Her bir tüp içerisine 12 ml konsantre sülfürik asit (H₂SO₄) eklenecek ve tüpler Kjeldahl cihazının yakma ünitesinin üzerine yerleştirilmiştir. Yakma işlemi bittiğinde örnek tüplerinde yeşil renk gözlenecektir. Tüplerin soğuması beklendikten sonra tam otomatik Kjeldahl cihazında ölçüm yapılarak azot miktarları belirlenmiştir.

2.8.5. Fosfor Analizi

Araştırmadaki sedimentlerin fosfor miktarı, sediment ekstratı çözeltisine geçen fosfor, molibdofosforik mavi renk yöntemine göre belirlenmesi esasına dayanan *Sodyum Bikarbonat Yöntemine (Olsen yöntemi)* göre belirlenmiştir. Fosfor miktarının belirlenmesi için; 100 ml'lik bir erlenmayere, havada kurutulmuş ve 0.5 mm'lik elekten geçirilmiş 2.5 g sediment örnekleri tartılarak ve üzerlerine 50 ml 0.5 N NaHCO₃ ilave edilip, çalkalama cihazında 30 dk süre ile (~100 devir/dk) çalkalanmıştır. Çalkalama süresi sonunda çözelti, Whatman

kağıdı aracılığı ile süzülüp, 25 ml'lik balon jöjeye, elde edilen süzüntüden 5 ml alınarak ve Üzerlerine 5 ml %15'lik amonyum molibdat $[(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O]$ çözeltisi ilave edilip, tam yanmanın gerçekleşmesi için 15 dk beklenmiştir. Sonrasında çözeltinin üzerine yaklaşık seviye 22 ml olacak şekilde distile su eklenip, taze olarak hazırlanmış sulu kalay klorür ($SnCl_2.2H_2O$) çözeltisinden 1 ml alınarak çözeltinin üzerine ilave edilecek ve son hacim 25 ml olacak şekilde distile su ile tamamlanmıştır. 10 dk içerisinde UV spektrofotometre aracılığı ile 660 nm dalga boyunda ölçüm yapılarak sedimentlerin fosfor miktarları belirlenmiştir.

2.8.6. Toplam B, Na^+ , K^+ , Ca^{++} ve Mg^{++} Analizi

Çalışma kapsamında, sedimentlerdeki toplam Bor(B) sodyum (Na^+), potasyum (K^+) analizi, kalsiyum (Ca^{++}) ve magnezyum (Mg^{++}) miktarı, *Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi Yöntemi* ile belirlenmiştir.

2.8.7. Dehidrogenaz Aktivitesinin Belirlenmesi

Dehidrogenaz aktivitesi Tabatabai ve ark. (1999) tarafından önerilen metoda göre yapılmıştır. Bu metoda göre 5 g sediment örneği % 0.5'lik 5 ml trifenil tetrazolium klorit ile muamele edilmiştir. Hazırlanan solüsyon 37 °C'de 24 saat boyunca inkübe edildikten sonra 485 nm dalga boyunda UV spektrofotometre kullanılarak tespit edilmiş ve enzim aktivitesi μg trifenil tetrazolium formazan toprak s^{-1} olarak verilmiştir.

2.9. Verilerin istatistiksel analizleri, formüller ve Bor kütleli denge modeli

Çalışma sonucunda elde edilen veriler, SPSS 19.0 programı kullanılarak istatistiksel açıdan değerlendirilmiştir. Giriş ve çıkış su örnekleri arasındaki ilişkiler One-Way ANOVA analizi uygulanarak, B giderimi ile fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler ve bitkilerin yaprak, gövde ve kök kısımlarının içerdikleri B açısından ilişkiler Pearson Korelasyon analizleri ile tespit edilmiştir. Sediment örneklerindeki B ile diğer elementler arasındaki ilişkiler aynı analiz yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Veriler arasındaki ilişkiler, 0,01 ve 0,05 anlam düzeyinde yapılmıştır.

Yapay sulak alanların bor giderim verimlilikleri (BGO) Wu ve ark. (2011) tarafından önerilen formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$BGO = \frac{(K_G H_i - K_C H_s)}{K_G H_i} \times 100$ formülüne göre belirlenmiştir.

BGO = Bor Giderim Oranı (%)

K_G = Giriş suyu B konsantrasyonu (mg l⁻¹)

H_i = Başlangıçtaki su seviyesi (cm)

K_C = Çıkış suyu B konsantrasyonu (mg l⁻¹)

H_s = Örnekleme günündeki su seviyesi (cm)

Yapay sulak alanların Kütlesel Bor giderim oranı (KGO) Wu ve ark. (2011) tarafından önerilen formül yardımıyla hesaplanmıştır:

KGO = (K_GH_i-K_CH_s)/birim alan/Hidrolik bekletme zamanı

KGO = Kütlesel Giderim oranı (mg/m²/gün)

K_G = Giriş suyu B konsantrasyonu (mg l⁻¹)

H_i = Başlangıçtaki su seviyesi (cm)

K_C = Çıkış suyu B konsantrasyonu (mg l⁻¹)

H_i = Örnekleme günündeki su seviyesi (cm)

Kültür periyodu sonunda, sistem içerisindeki bitkiler için hayatta kalma oranı (BHKO) Türker ve ark. (2013) tarafından önerilen formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$BHKO (\%) = \frac{B_{ilk}}{B_{son}} \times 100$$

Formülde, (**B**)_{ilk} Kültür periyodu öncesinde yapay sulak alanlar içerisindeki bitki sayısını, (**B**)_{son} kültür periyodu sonrasında yapay sulak alanlar içerisindeki bitki sayısını ifade etmektedir.

Yapay sulak alanlardaki B'un hangi giderim mekanizması sonucunda en çok giderildiğinin tespit edilmesi amacıyla aşağıda gösterilen bir Bor kütlesel denge modeli (BKDM) geliştirilmiştir. Araştırma sırasında ve deneysel çalışmalar sonunda elde edilen veriler bu modele yerleştirilerek her bir yapay sulak alanın Bor kütlesel denge değerleri hesaplanacaktır. Bu modele göre:

$$B_{girdisi} = B_{çiktisi}$$

Eşitlikte, $B_{girdisi}$ araştırma periyodu boyunca yapay sulak alanlara eklenen B miktarını (mg), $B_{çiktısı}$ sulak alanlardan araştırma periyodu sonunda toplanan B miktarını (mg) ifade etmektedir.

$$B_{girdisi} = A \times G$$

$$G = Q_g \times V_g$$

Eşitlikte, “A” araştırma periyodu boyunca (154 gün) yapay sulak alan içerisinde geçen toplam su miktarını (m^3), “G” giriş suyundaki toplam B konsantrasyonunu, “ Q_g ” giriş suyundaki ortalama B konsantrasyonunu ($mg\ l^{-1}$), “ V_g ” sulak alanlara uygulanan giriş suyunun hacminin litre cinsinden değerini ifade etmektedir.

$$B_{çiktısı} = Ç + B_{bitki} + B_{sediment} + U$$

$$Ç = Q_ç \times V_ç$$

Eşitlikte, “Ç” çıkış suyundaki toplam B konsantrasyonunu, “ $Q_ç$ ” çıkış suyundaki ortalama B konsantrasyonunu, “ $V_ç$ ” sulak alanlardan toplanan çıkış suyunun B hacminin litre cinsinden değerini ifade etmektedir.

$$B_{bitki} = (T_{son} \times B_{son})/1000$$

Eşitlikte, “ B_{bitki} ” bitki bünyesindeki B konsantrasyonunu, “ T_{son} ” araştırma periyodu sonunda sulak alanlardan elde edilen toplam bitki biyomasını (g), “ B_{son} ” araştırma periyodu sonunda hasat edilen bitkilerdeki B konsantrasyonu ifade etmektedir.

$$B_{sediment} = (M_{sediment} \times T_{sediment})/1000$$

Eşitlikte, “ $B_{sediment}$ ” sedimentte kalan toplam B miktarını, “ $M_{sediment}$ ” ağırlık bazında yapay sulak alanlara eklenen toplam sediment miktarını (g), “ $T_{sediment}$ ” araştırma sonunda sedimentte tespit edilen toplam B konsantrasyonunu (mg/g) ifade etmektedir.

$$U_{belirlenemeyen} = B_{girdisi} - Ç - B_{bitki} - B_{sediment}$$

Eşitlikte, “ $U_{belirlenemeyen}$ ” araştırma periyodu içerisinde belirlenemeyen B konsantrasyonunu ifade etmektedir.

2.10 Araştırmalar sırasında kullanılan cihazlar

- AAS (Atomic absorption Spektrometresi)
 - Analytikjena ContraAA 700
- Spektrofotometre
 - Shimadzu UV-2101 PC
- Tam Otomatik Azot Analiz (Kjeldahl) Cihazı
 - Foss Kjelttec 2300
 - Foss Digester 2020 (Yakma ünitesi)
- Ultra Saf Su Cihazı
 - Millipore ELIX Synthesis A10
- Saf Su Cihazı
 - Nüve NS 108
- alkalama Cihazları
 - Gerhardt Laboshake
 - Heidolph Unimax 2010
- Isıtıcı tabla ve manyetik karıştırıcı
 - Stuart SD 300
 - Velp Scientifica Arex 2
- Teraziler
 - OHAUS Analytical Plus (Analitik Terazi)
 - OHAUS Adventurer Pro (Hassas terazi)
 - Scaltec SPO 51 (Hassas terazi)
- İnkübatör
 - Nüve EN 120
- Sterilizatör
 - Nüve FN 500
- Elekler ve Elek Sarsma Cihazı
 - Retsch Elek Seti (0,5-2,0 mm)
 - Retsch AS 200 Elek Sarsma
- Bitki Öğütme Değirmeni
 - Knifetec 1095 Sample Mill

- Stereo Mikroskop
 - Leica MZ 12.5
- Multi parametrel, pH, Elektriksel iletkenlik, sıcaklık, çözünmüş oksijen ve redoks ölçer
 - HACH HQ40D multi-parameter

3. BULGULAR

Yapay sulak alanlar (YSA) üzerinde biyoremediasyon deneyine başlamadan önce ve kültür periyodu sonunda, yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerin durumları incelenmiş ve bitki türlerinin hayatta kalma oranları hesaplanmıştır (Çizelge 3.1). Elde edilen sonuçlara göre, yapay sulak alanlara B verilmeden önce hayatta kalan bitki oranının *Phragmites australis* ile bitkilendirilen YSA 9 hariç tüm yapay sulak alanlarda %75 üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.1). Bu sonuç yapay sulak alanlarda kullanılan *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* ve *Juncus gerardii* türlerinin hem iklimsel hem de operasyonel koşullara uyum sağladığını göstermektedir. Buna karşın, *P.australis* türünün 1,3, 5 ve 9. yapay sulak alanlarda ölü bitki bireylerine rastlanması ve özellikle YSA 9’da hayatta kalma oranının %75’in altında olması bu bitki türünün iklimsel ve operasyonel koşullara nispeten daha az adaptasyon yeteneği gösterdiğini belirtmektedir.

Çizelge 3.1. Yapay sulak alanlarda hayatta kalan bitki birey sayısı (H), ölü birey sayısı (Ö) ve hayatta kalma oranı

| | Bitki Türleri | | | | Hayatta Kalma |
|---------------|------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------|
| | <i>Typha latifolia</i> | <i>Typha angustifolia</i> | <i>Juncus gerardii</i> | <i>Phragmites australis</i> | Oranı (%) |
| | (H-Ö) | (H-Ö) | (H-Ö) | (H-Ö) | |
| YSA 1 | 5-5 | 5-5 | X | 5-3 | 86 |
| YSA 2 | 5-5 | 5-5 | 5-5 | X | 100 |
| YSA 3 | 5-5 | X | 5-5 | 5-3 | 86 |
| YSA 4 | X | 5-5 | 5-5 | 5-5 | 100 |
| YSA 5 | 4-4 | 4-4 | 4-4 | 4-3 | 93 |
| YSA 7 | 16-16 | X | X | X | 100 |
| YSA 8 | X | 16-16 | X | X | 100 |
| YSA 9 | X | X | X | 16-8 | 50 |
| YSA 10 | X | X | 16-16 | X | 100 |



a



b



c



d

Şekil 3.1. Kültür periyodu sonunda yapay sulak alanlarda bulunan *Typha latifolia* (a), *Typha angustifolia* (b), *Phragmites australis* (c) ve *Juncus gerardii* (d) bitki türlerinin durumları

3.1. Fiziko-Kimyasal Ölçümler

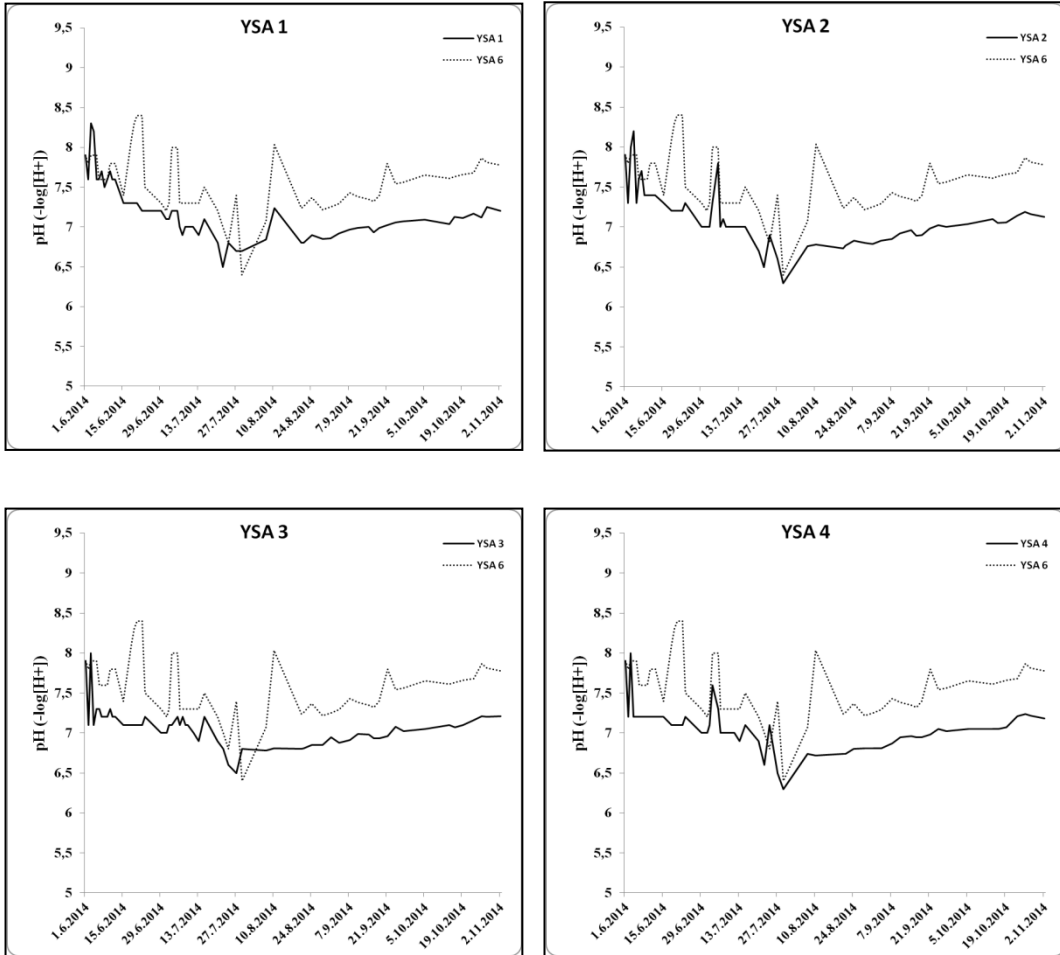
3.1.1. pH

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanlara ait giriş ve çıkış sularına ait ortalama pH değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

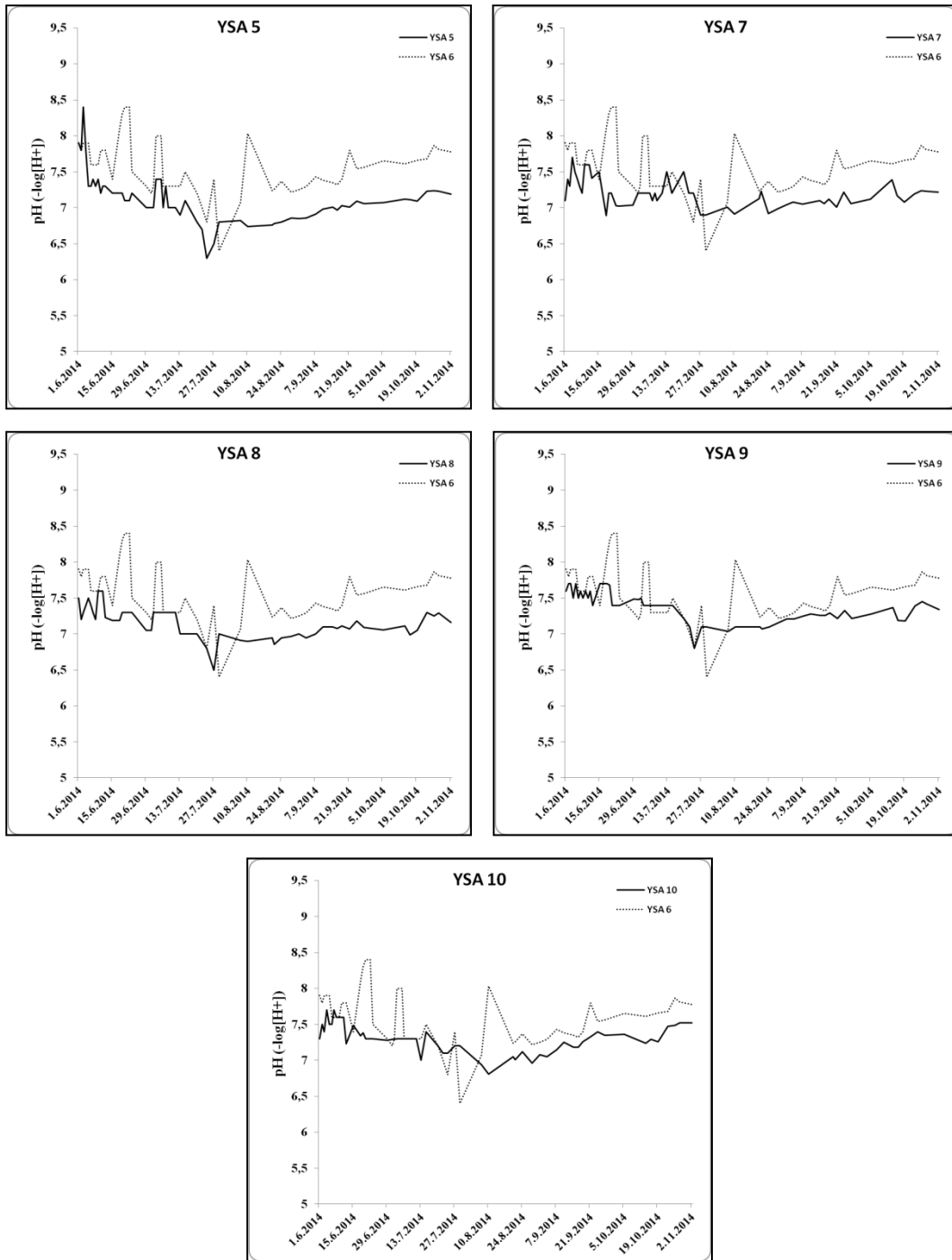
Çizelge 3.2. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularının ortalama, pH, EC, Sıcaklık, çözülmüş oksijen, redoks potansiyeli, nitrat ve nitrit değerleri

| | Numune | pH (-log[H ⁺]) | EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | Sıcaklık (°C) | Çözülmüş Oksijen (mg l^{-1}) | Redoks (mV) | Nitrat (mg l^{-1}) | Nitrit (mg l^{-1}) |
|---------------|---------------|--------------------------------------|--|-------------------------|---|-----------------------|---|---|
| YSA 1 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.17 ±0.35 | 912±233 | 20.49±4.48 | 3.49±0.79 | + 169±106 | 0.7363±0.2 | 0.0704±0.05 |
| YSA 2 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.10 ±0.65 | 848±261 | 19.7±4.10 | 2.85±0,7 | + 127±141 | 0.9009±0.45 | 0.0756±0.031 |
| YSA 3 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.06±0.23 | 846±201 | 18.7±3.97 | 2.9±0.85 | + 40,8±87 | 1.24±1.43 | 0.142±0.287 |
| YSA 4 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.05±0.26 | 854±239 | 19.2±4.011 | 3.03±0.98 | + 46,3±100 | 0.75±0.24 | 0.058±0.031 |
| YSA 5 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.10±0.32 | 906±245 | 19.12±4.019 | 3.21±1.18 | + 58,4±88,6 | 0.81±0.28 | 0.098±0.049 |
| YSA 6 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.61 ±0.55 | 795±161 | 19.9±4.15 | 2.78±0.96 | - 6,68±98,7 | 1.27±0.96 | 0.1213±0.073 |
| YSA 7 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.19 ±0.2 | 846±291 | 20±4.2 | 3.69±0.96 | + 47,05±67,7 | 0.645±0.29 | 0.076±0.027 |
| YSA 8 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.15 ±0.22 | 857±308 | 19.8±9.9 | 3.5±1.03 | + 39,22±74,2 | 0.645±0.28 | 0.066±0.031 |
| YSA 9 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.31 ±0.16 | 1024±795 | 20.05±4.11 | 3.59±0.62 | + 9,8±122 | 0.6454±0.25 | 0.219±0.212 |
| YSA 10 | Giriş | 9.2 ±0.79 | 874±183 | 20.8±4.38 | 3.02±1.09 | + 20,2±118 | 2.67±1.97 | 1.15±0.703 |
| | Çıkış | 7.28 ±0.18 | 949±217 | 20.16±4.08 | 3.47±0.85 | + 27,84±104 | 0.618±0.25 | 0.2604±0.206 |

Aynı zamanda, bitkili yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait pH değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna (YSA 6) göre değişimi Şekil 3.2’de gösterilmektedir. İstatistiksel testler sonucunda yapay sulak alanların çıkış suyu pH’ları ile giriş suyu pH değerleri arasında anlamlı bir fark olduğu ve çıkış suyu pH’ları ile giriş suyu pH değerleri göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir ($p<0.05$). Aynı zamanda bitkili yapay sulak alan pH değerleri de bitkisiz kontrol grubuna göre daha düşüktür ($p<0.05$). Bu nedenle, sulak alanlara giren B içeren suyun biyoremediasyon süreci sonunda bitkili yapay sulak alanlar içerisinde önemli miktarda asitleştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte poli-kültür yapay sulak alanların mono-kültür yapay sulak alanlara göre daha yüksek oranda pH’ın düşümesini sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.2. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre pH değişimleri

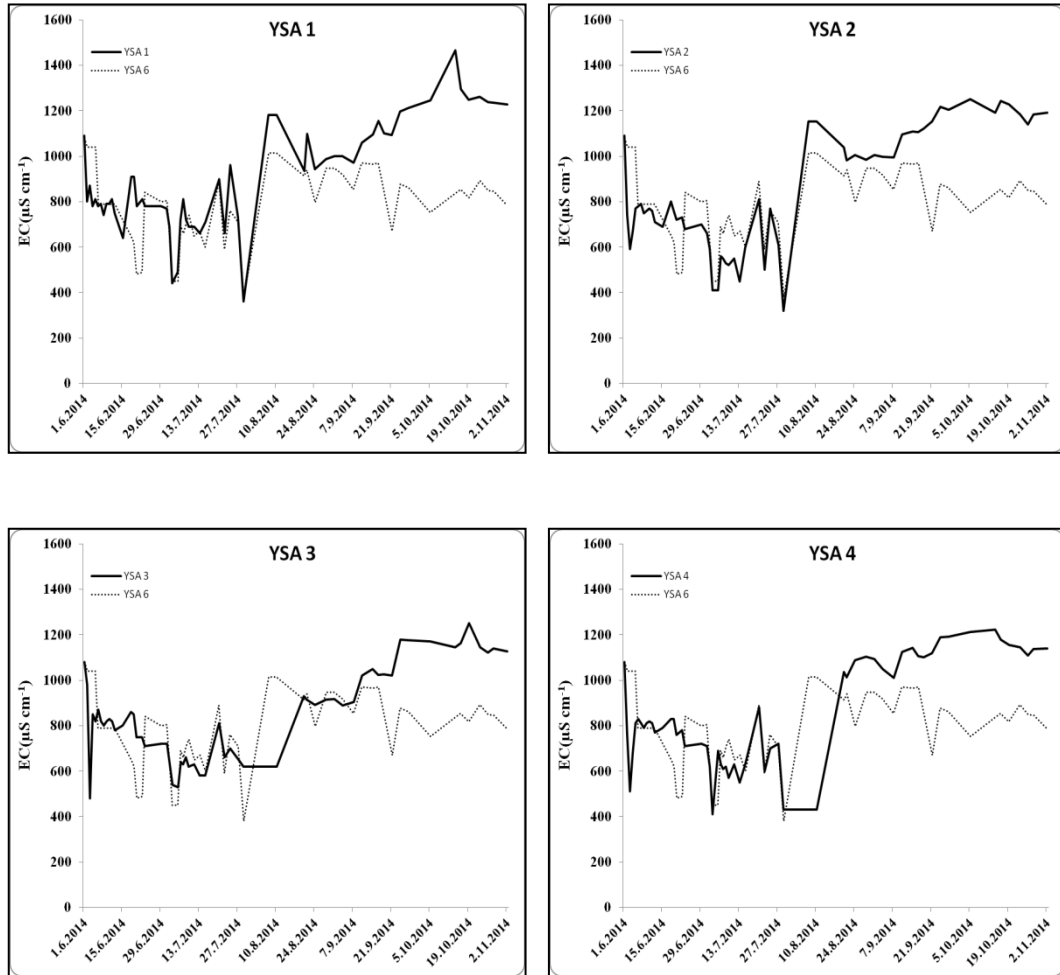


Şekil 3.3. (Devam) Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre pH değişimleri

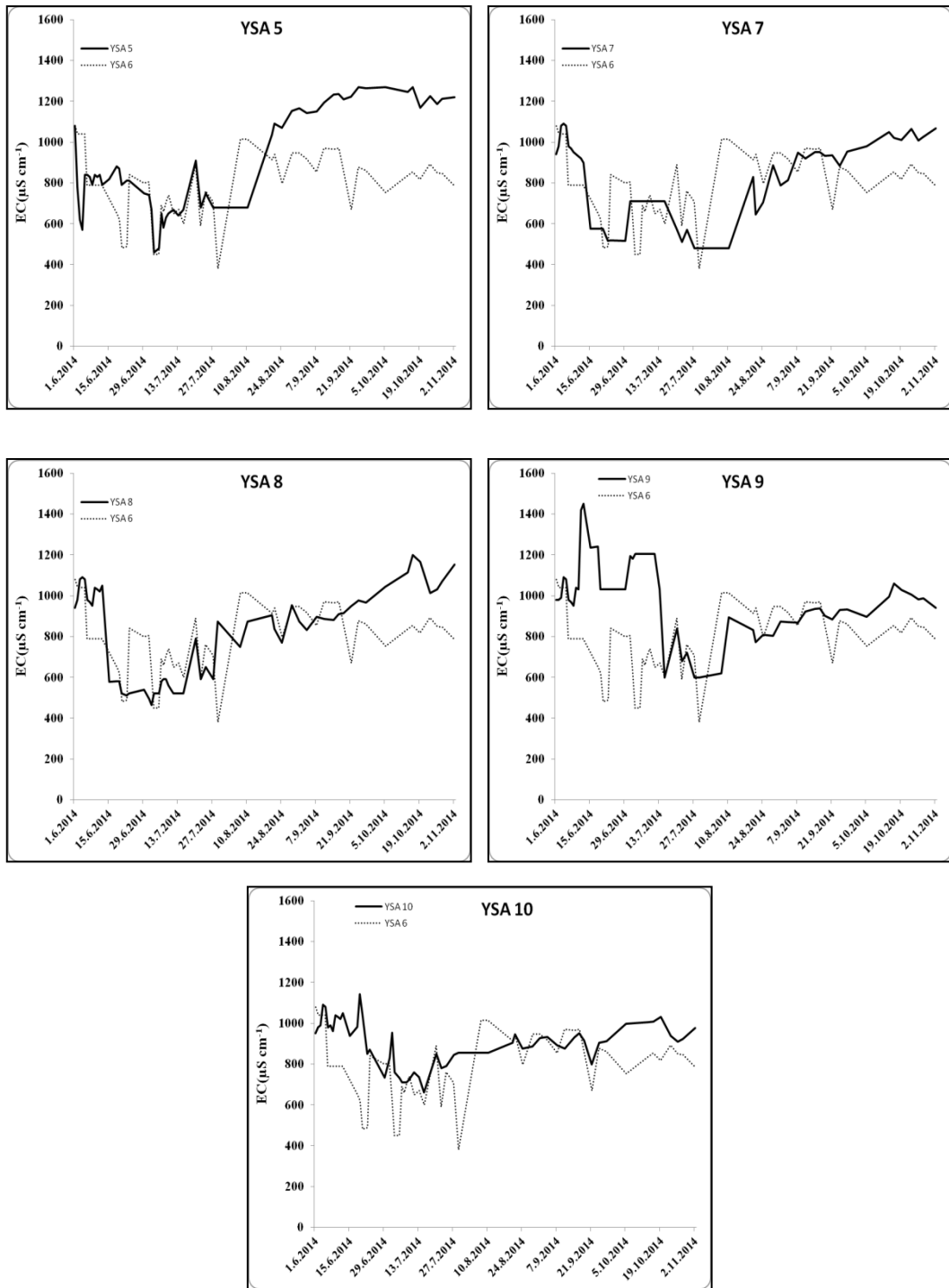
3.1.2. Elektriksel İletkenlik (EC)

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularına ait ortalama EC (μ/cm) değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Bununla birlikte,

bitkili yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait EC değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna (YSA 6) göre değişimi Şekil 3.3’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre giriş ve çıkış sularında istatistiksel olarak herhangi bir fark belirlenmemiş olup bitkili ve bitkisiz yapay sulak alanlar arasında da anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p>0,05$). Aynı zamanda YSA 1, YSA 5, YSA 9 ve YSA 10’un çıkış sularının EC değerlerinin giriş suyundan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, yapay sulak alanların atık su içerisindeki çözülmüş halde bulunan birçok iyonun etkili bir şekilde yapay sulak alanlar ile giderilmediği tespit edilmiştir.



Şekil 3.4. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre EC değişimleri

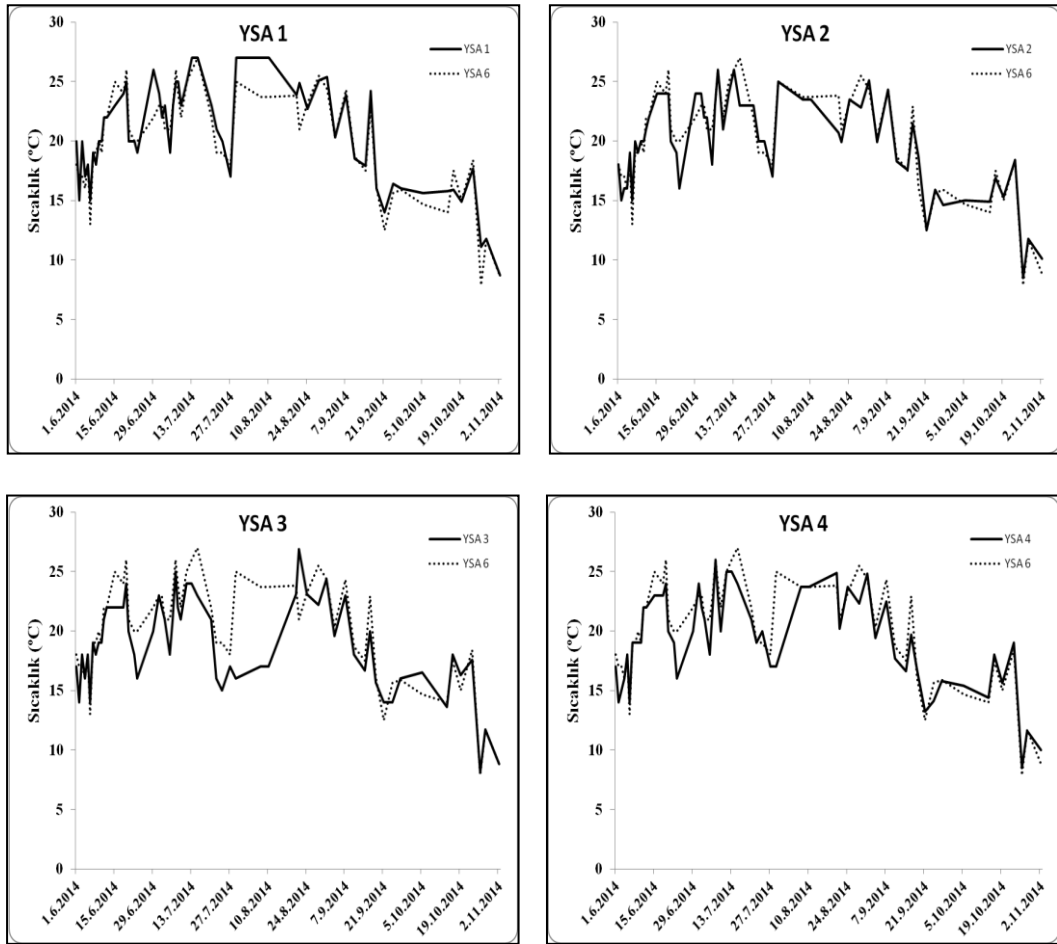


Şekil 3.5. (Devam) Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre EC değişimleri

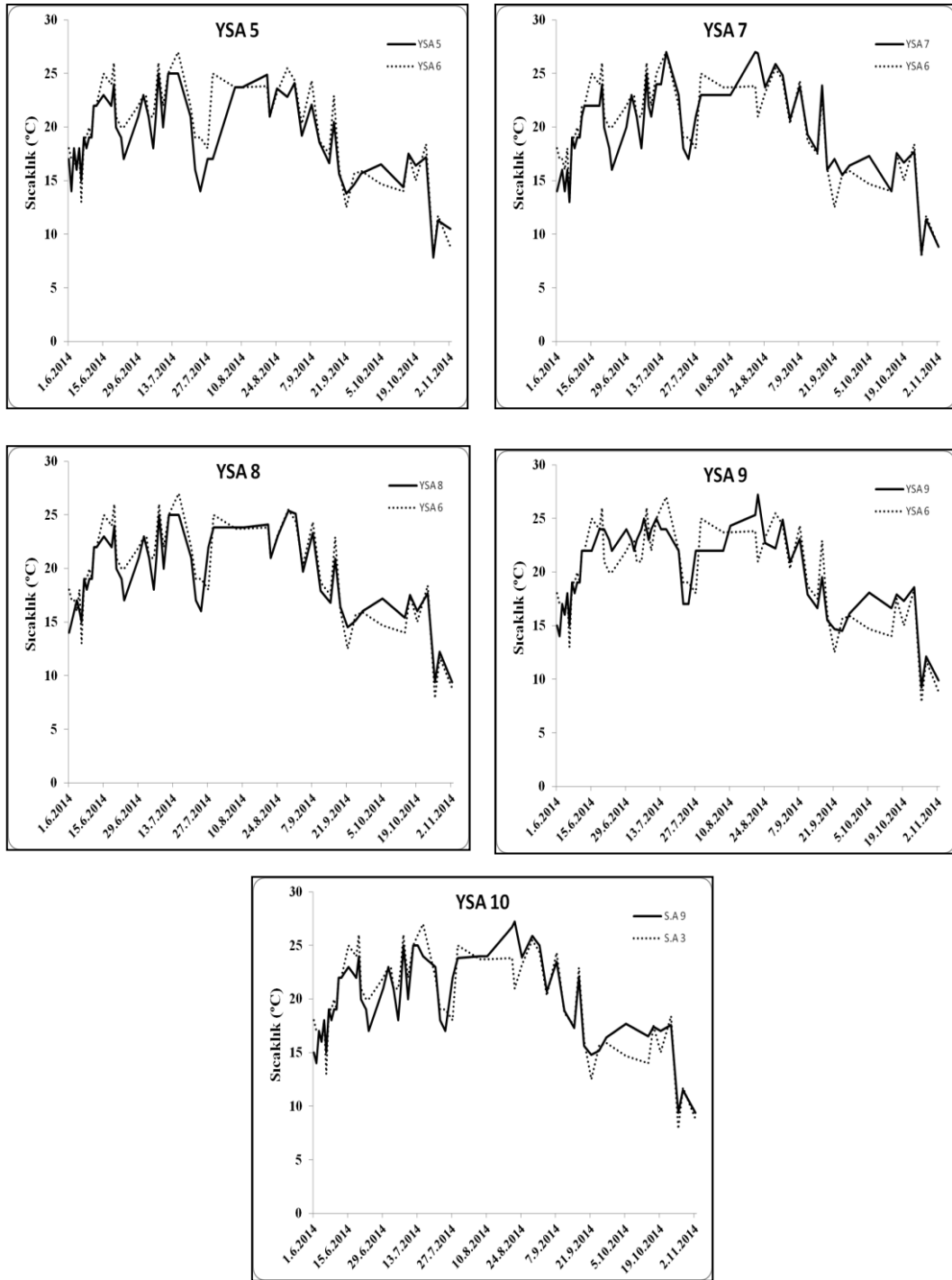
3.1.3. Sıcaklık (°C)

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularına ait ortalama sıcaklık değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir. Ayrıca yapay sulak

alanlardan elde edilen çıkış sularına ait sıcaklık değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna göre değişimi Şekil 3.4’de gösterilmektedir. Yapılan istatistiksel analizlerde hem giriş ve çıkış su değerleri arasında hem de bitkili ve bitkisiz yapay sulak alanların çıkış suları arasında anlamlı bir fark tespit edilememiştir ($p>0.05$). Bununla birlikte, su sıcaklığının araştırma periyodu içerisinde ortam şartlarından daha çok çevre şartlarına göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Vejetasyon dönemi sonuna doğru bir tarih olan 21.09.2014’den itibaren su sıcaklığının tüm yapay sulak alanlarda ani bir şekilde 15 °C’nin altına düşmesi bu duruma örnek verilebilir.



Şekil 3.6. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre sıcaklık değişimleri

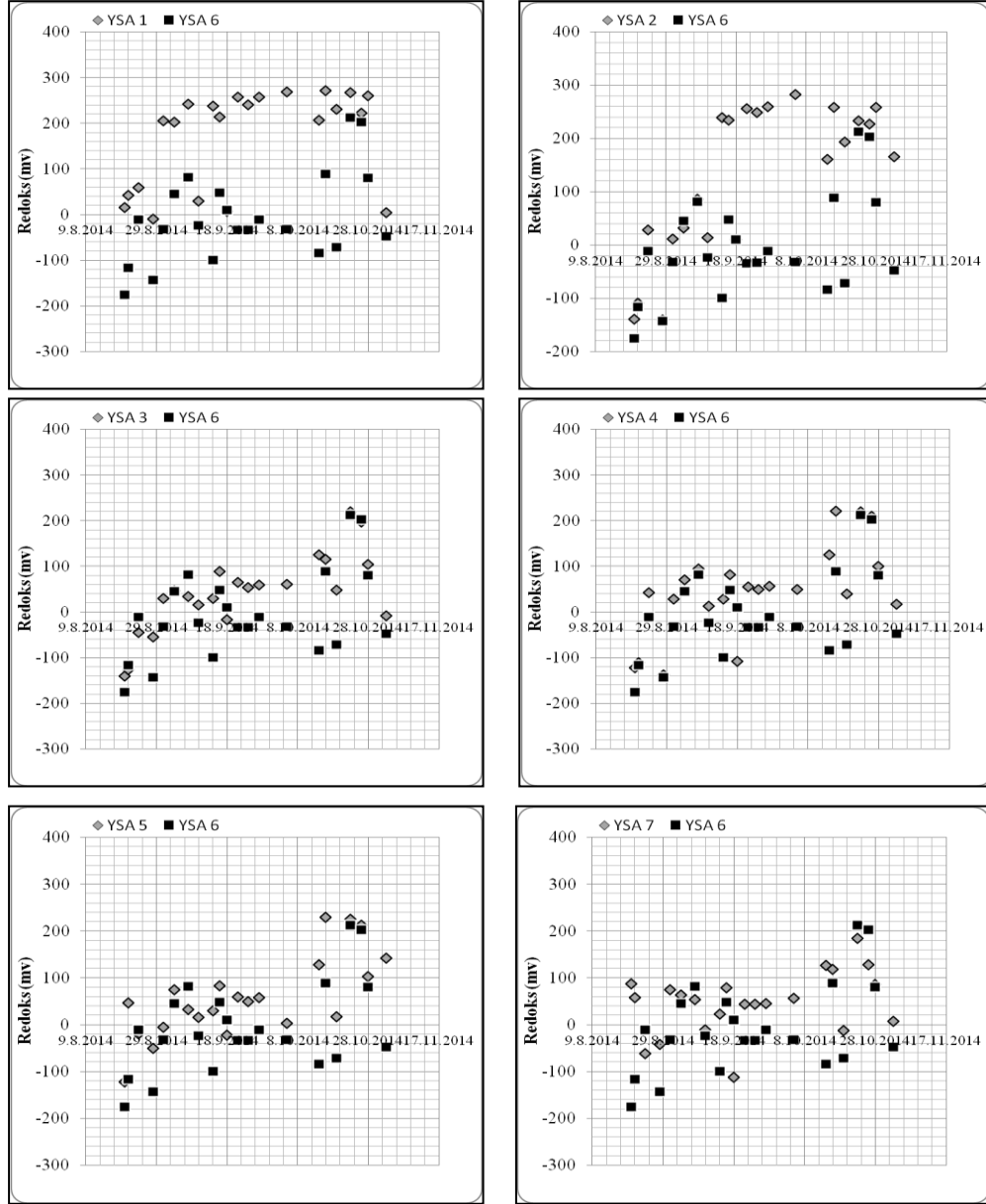


Şekil 3.7. (Devam) Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre sıcaklık değişimleri

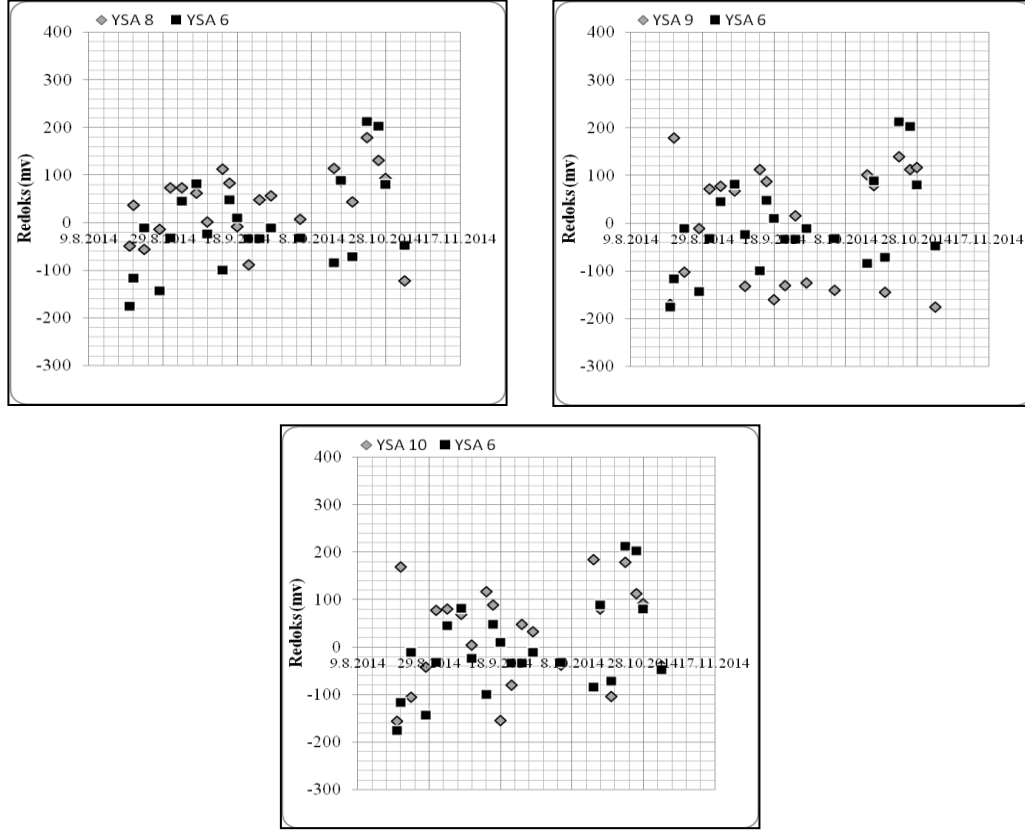
3.1.3. Redoks

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularına ait ortalama redoks değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir. Bununla birlikte, yapay

sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait redoks değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna göre değişimi Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bitkili yapay sulak alanlardan örneklenen su numunelerinin giriş suyuna göre daha yüksek redoks potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, bitkisiz yapay sulak alandan örneklenen numunelerin giriş suyundan daha düşük redoks potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.



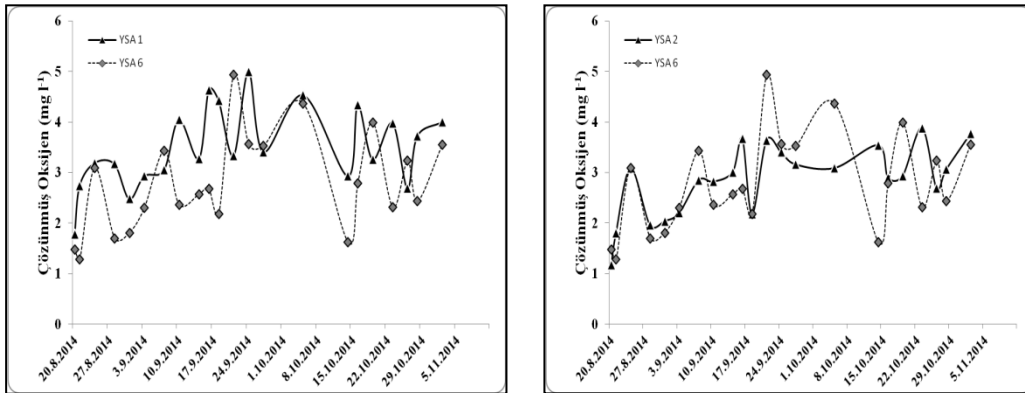
Şekil 3.8. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre redoks değişimleri



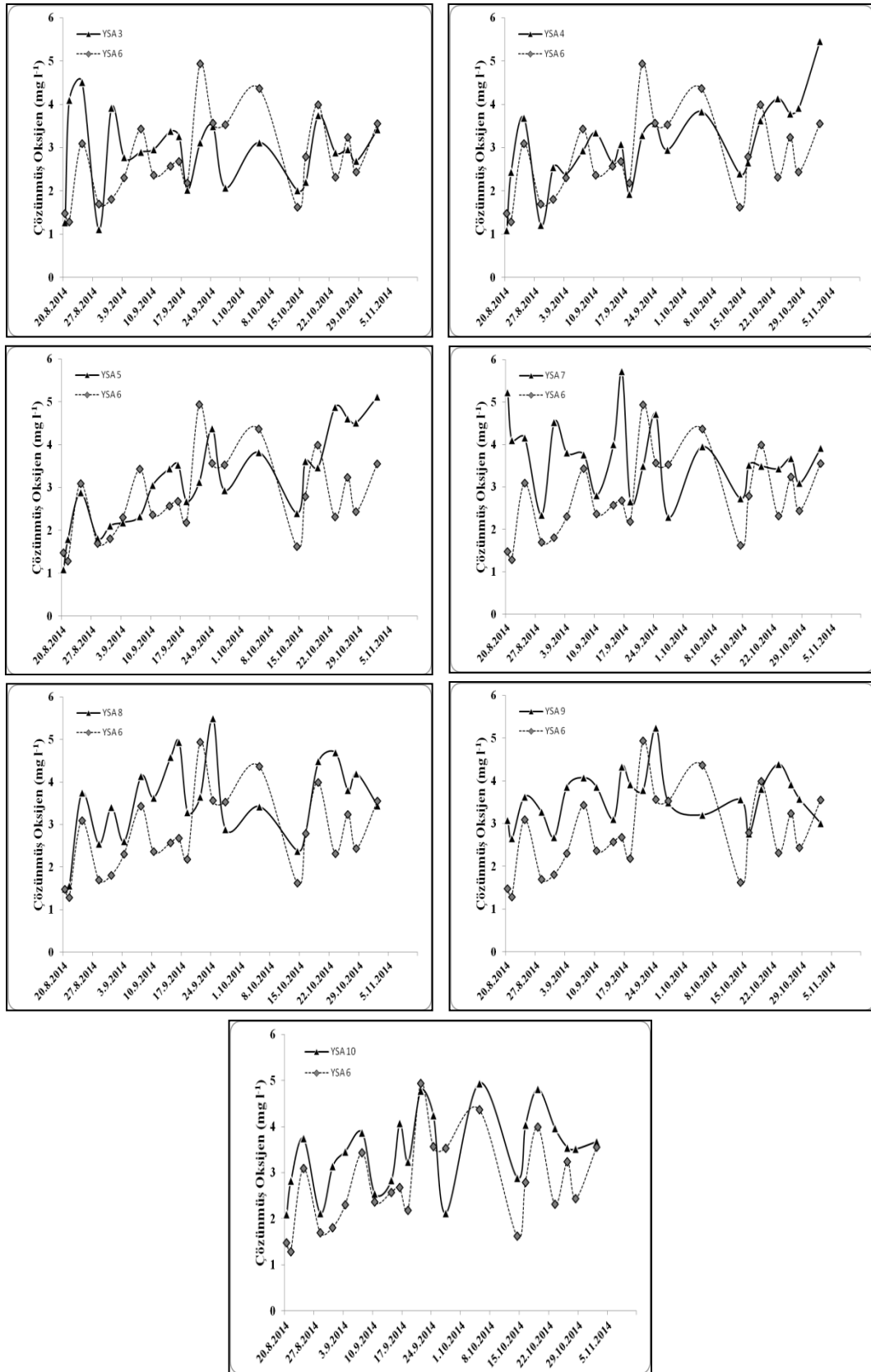
Şekil 3.9. (Devam) Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre redoks değişimleri

3.1.4. Çözünmüş Oksijen

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularına ait ortalama çözünmüş oksijen değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Bununla birlikte, yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait çözünmüş oksijen değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna göre değişimi Şekil 3.6’de gösterilmektedir.



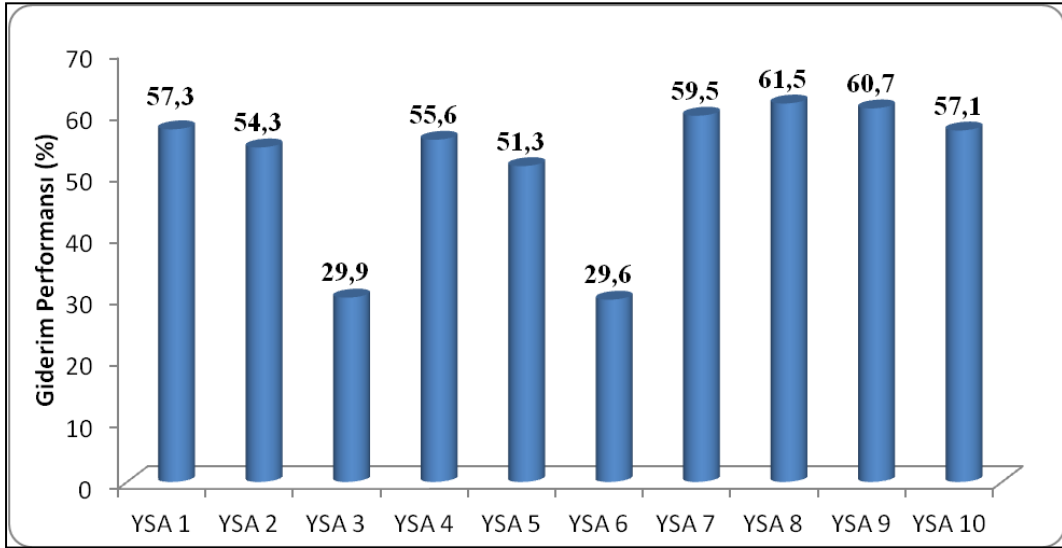
Şekil 3.10. Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre çözünmüş oksijen değişimleri



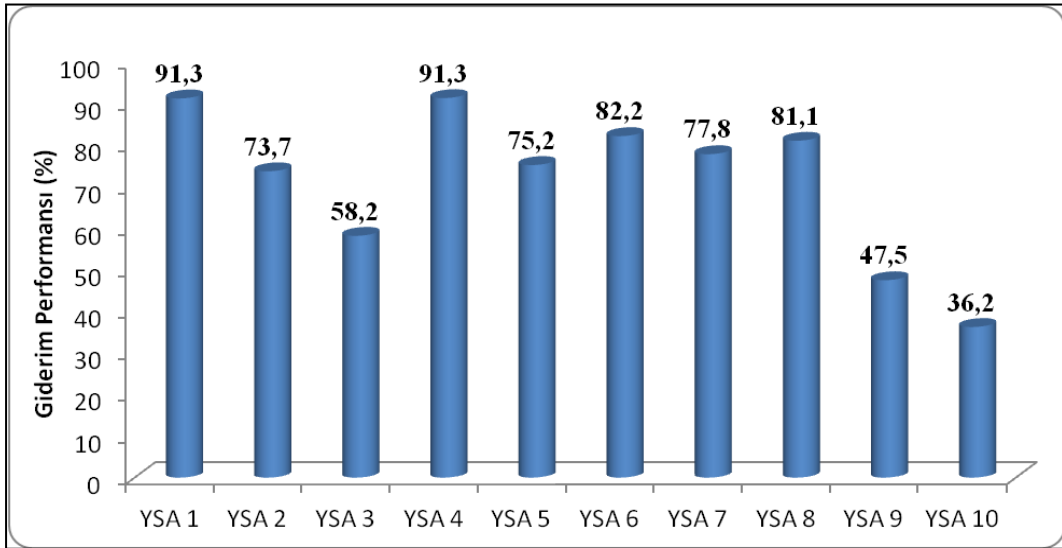
Şekil 3.11. (Devam) Yapay sulak alanların çıkış sularının araştırma periyodu içerisinde kontrol yapay sulak alana göre çözünmüş oksijen değişimleri

3.1.5. Nitrat ve Nitrit giderimi

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularına ait ortalama nitrat ve nitrit değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Ayrıca, yapay sulak alanların nitrat ve nitrit giderim performansları Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Yapay sulak alanların araştırma periyodu içerisindeki ortalama Nitrat giderim oranları



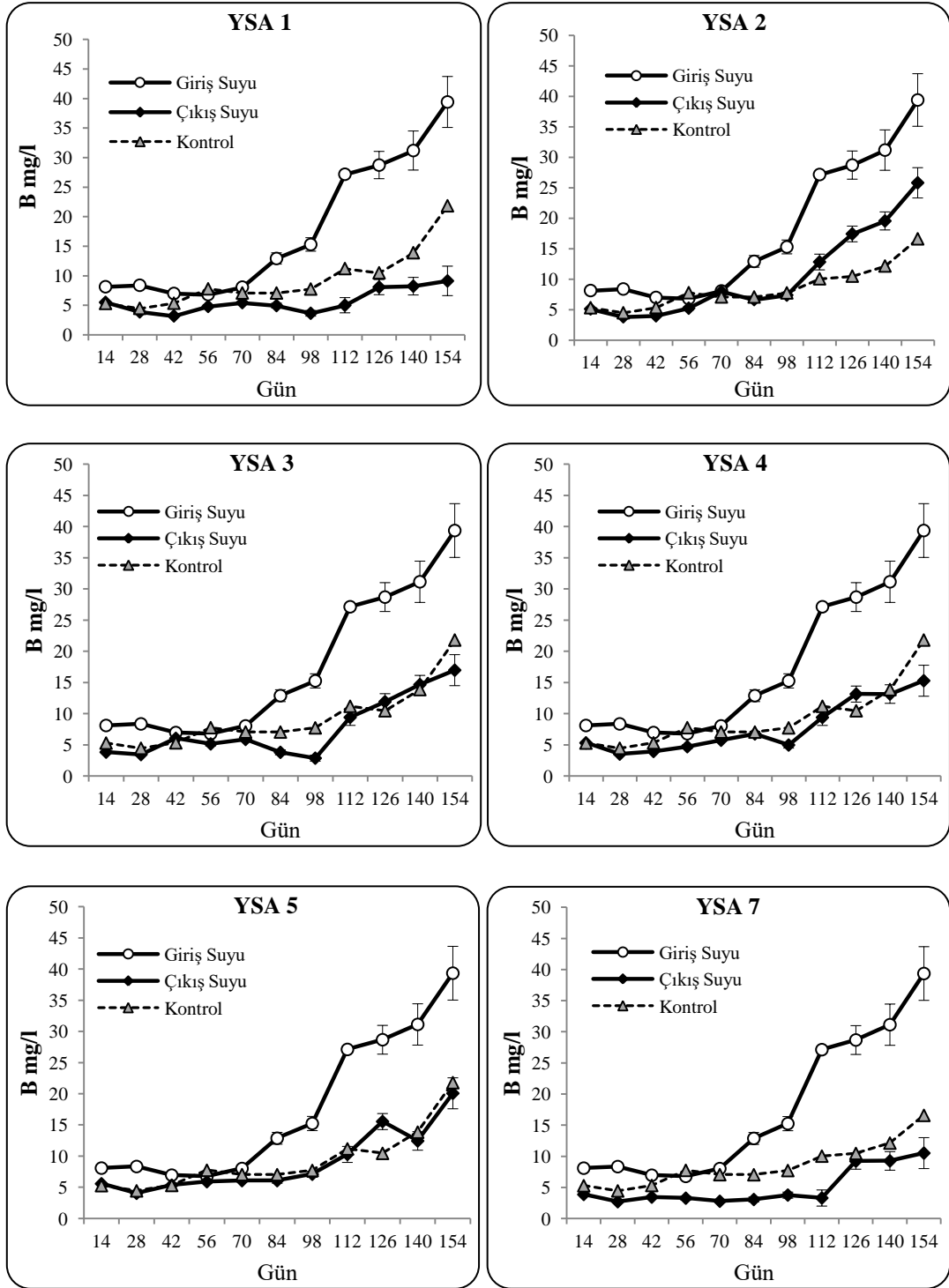
Şekil 3.13. Yapay sulak alanların araştırma periyodu içerisindeki ortalama Nitrit giderim oranları

Yapılan istatistiksel analizler, hem nitrat hem de nitrit’in etkili bir şekilde yapay sulak alanlar ile giderildiğini göstermektedir ($p < 0.05$) (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8). Bununla birlikte, bitkili yapay sulak alanların bitkisiz yapay sulak alanlara

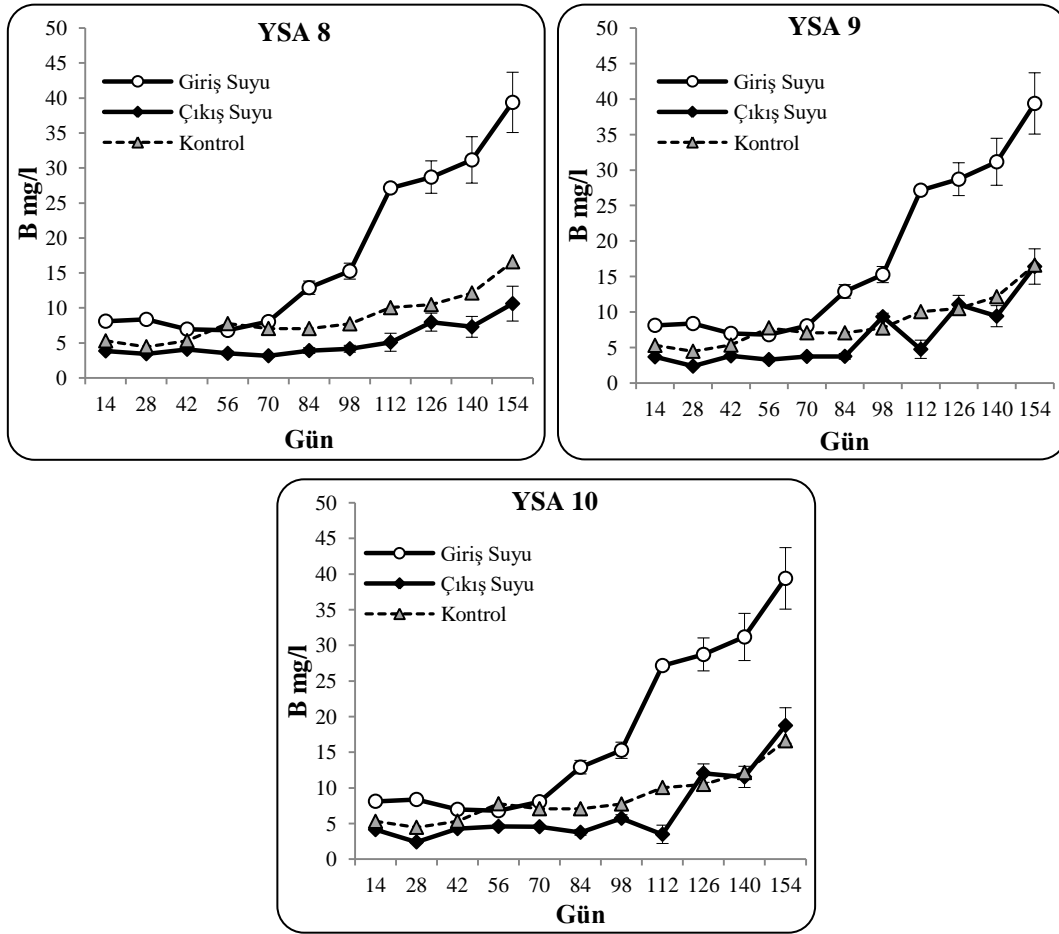
göre daha yüksek nitrat giderimi gerçekleştirdiği belirlenmiştir. En yüksek nitrat gideriminin YSA 8’de, en düşük nitrat gideriminin ise bitkisiz kontrolde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek nitrit gideriminin *T. latifolia*, *T. angustifolia* ve *P. australis* türlerinin bir arada kullanıldığı YSA 1’de olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda en düşük nitrit giderim performansına ise YSA 10’nun sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapay sulak alanların araştırma periyodu içerisinde çoğunlukla yüksek oranlarda nitrat ve nitrit giderim performansı ile çalışması yüksek miktarda inorganik azotunda yapay sulak alanlarda alı konulduğu belirlenmiştir.

3.2. Yapay sulak alanların bor (B) giderim performansları

Doğal koşullar altında 154 gün boyunca B arıtım performansları test edilen yapay sulak alanların giriş ve çıkış suları, 14 günlük periyotlar halinde düzenli olarak örneklenmiş ve analizleri yapılmıştır. Konsantrasyon değiştirme günlerinde her bir yapay sulak alandan örneklenen giriş ve çıkış sularının B konsantrasyonları ve B giderim oranları (BGO) Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilmektedir. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanlara uygulanan B dozları incelendiğinde giriş suyu B konsantrasyonunun 6 ile 39,5 mg l⁻¹ arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına bakıldığında ise, tüm çıkış su örneklerinin B konsantrasyonunun giriş su örneklerinden daha az B konsantrasyonuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan One-Way ANOVA analizlerinde, araştırma için kurulan tüm yapay sulak alanlardan örneklenen çıkış suyu numunelerinin B konsantrasyonu açısından giriş suyu örneklerinden istatistiksel olarak farklı olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, atık su içerisinde bulunan B’un yapay sulak alanlar sayesinde verimli ve etkili bir şekilde giderildiğini göstermektedir ($p < 0.05$). Şekil 3.11 incelendiğinde, giriş suyu bor konsantrasyonlarının artması ile tüm yapay sulak alanların BGO oranlarının da buna paralel olarak arttığı tespit edilmiştir.



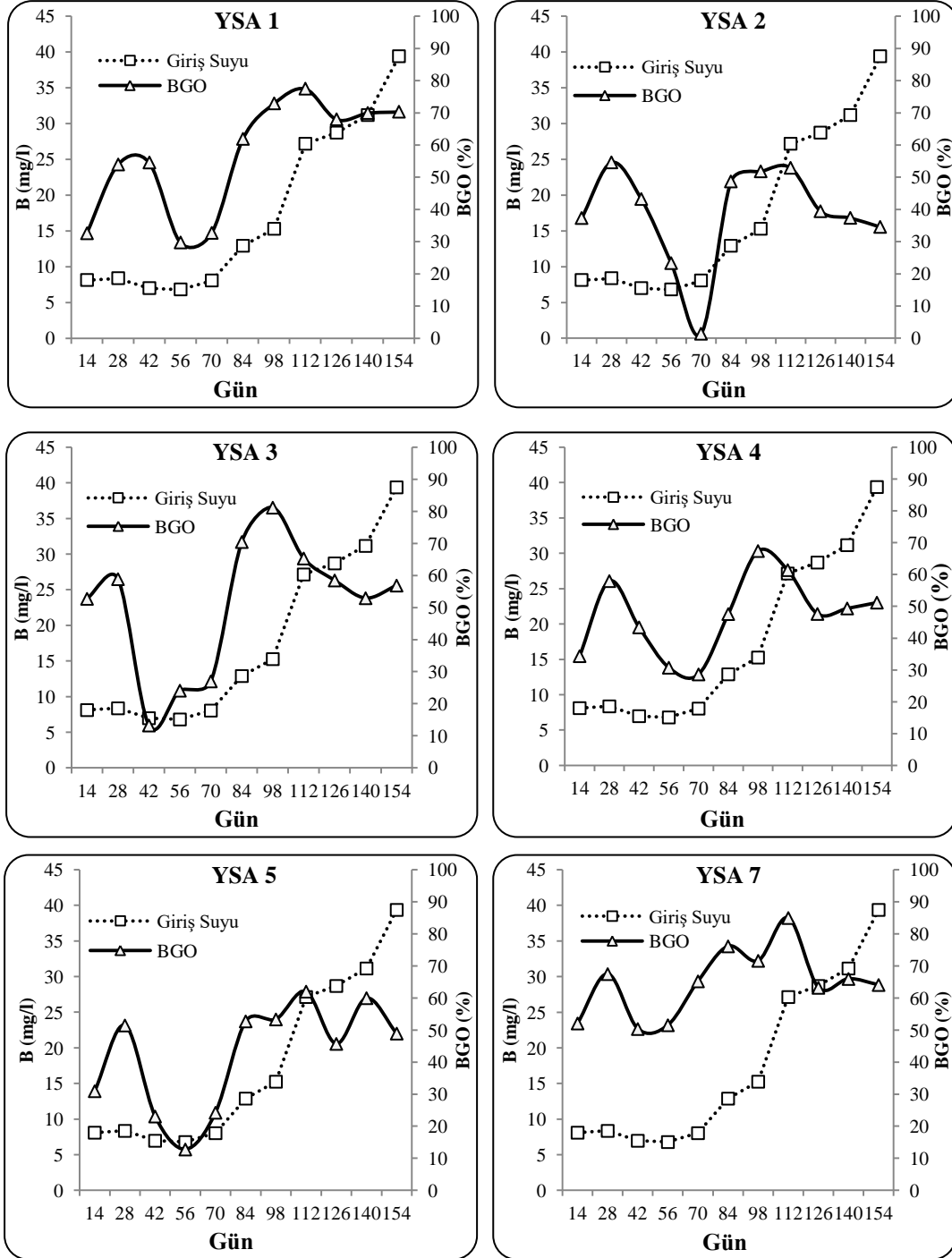
Şekil 3.14. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanların ve kontrol grubunu oluşturan yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularının B konsantrasyonları



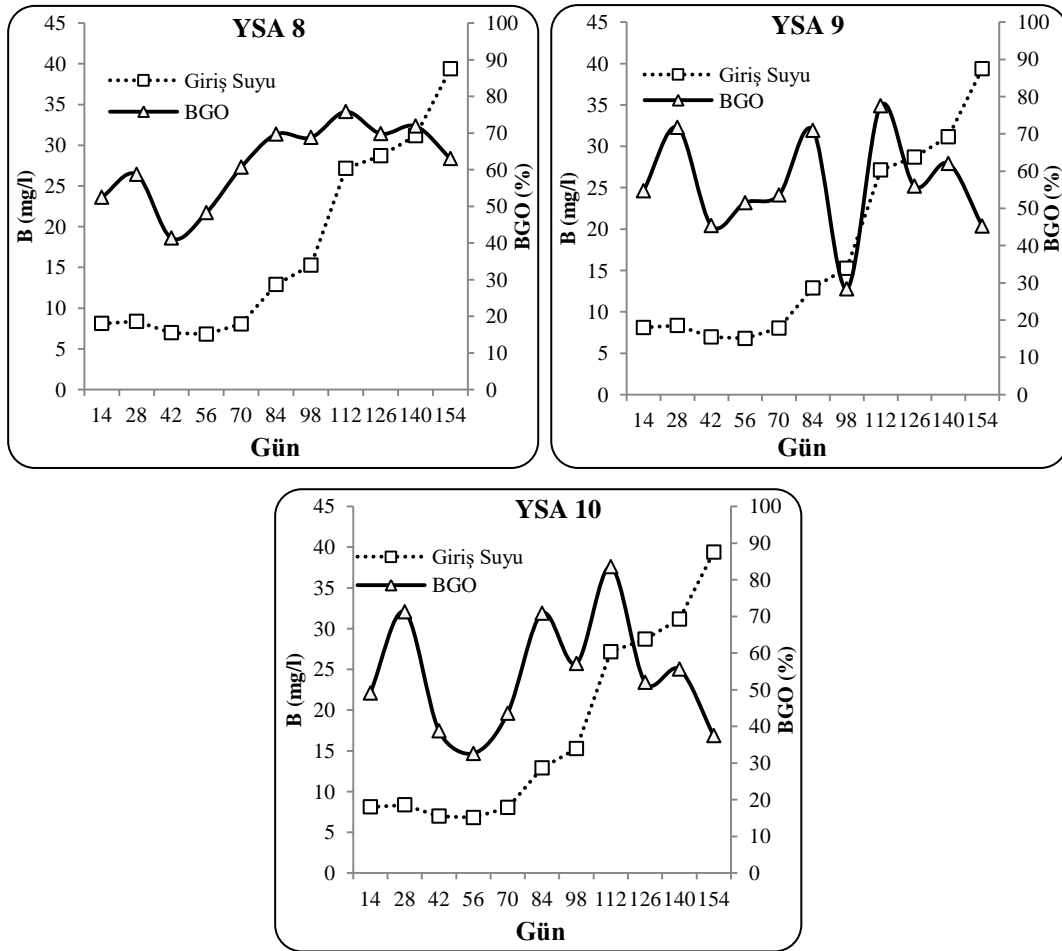
Şekil 3.15. (Devam) Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanların ve kontrol grubunu oluşturan yapay sulak alanların giriş ve çıkış sularının B konsantrasyonları

Elde edilen sonuçlara göre, ortalama en yüksek B giderim oranı (BGO) %64 ile YSA 7’de tespit edilmiştir. Buna karşın en düşük B giderim oranı ise %38,1 ile bitkisiz kontrol olarak kurulan YSA 6’da olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, biyoremediasyon deneyi boyunca, farklı bitki çeşitliliğine sahip yapay sulak alanların, bitkisiz kontrol grubuna göre daha yüksek bir arıtım kapasitesiyle çalıştığını göstermektedir. Bununla birlikte yapılan One-Way ANOVA istatistiksel analizleri sadece YSA 7 ve YSA 8’in çıkış suları ile bitkisiz kontrol grubu arasında istatistiksel anlamda fark olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Poli-kültür yapay sulak alanlardan alınan sonuçlara bakıldığında, *T. latifolia*, *T. angustifolia* ve *P. australis* bitkilerinin bir arada kullanılması sonucu oluşan YSA 1’in diğer poli-kültür sulak alanlara göre daha yüksek B giderim oranı ile çalıştığı

tespit edilmiştir. Buna karşın, bitkili yapay sulak alanlarda en düşük giderim oranı ise %38,5 ile *T. latifolia*, *T. angustifolia* ve *J. gerardii* bitkilerinin bir arada bulunduğu YSA 2’de belirlenmiştir. Aynı zamanda tüm bitkilerin bir arada kullanıldığı YSA 5’in de arıtım yüzdesi % 42 olarak tespit edilmiştir.

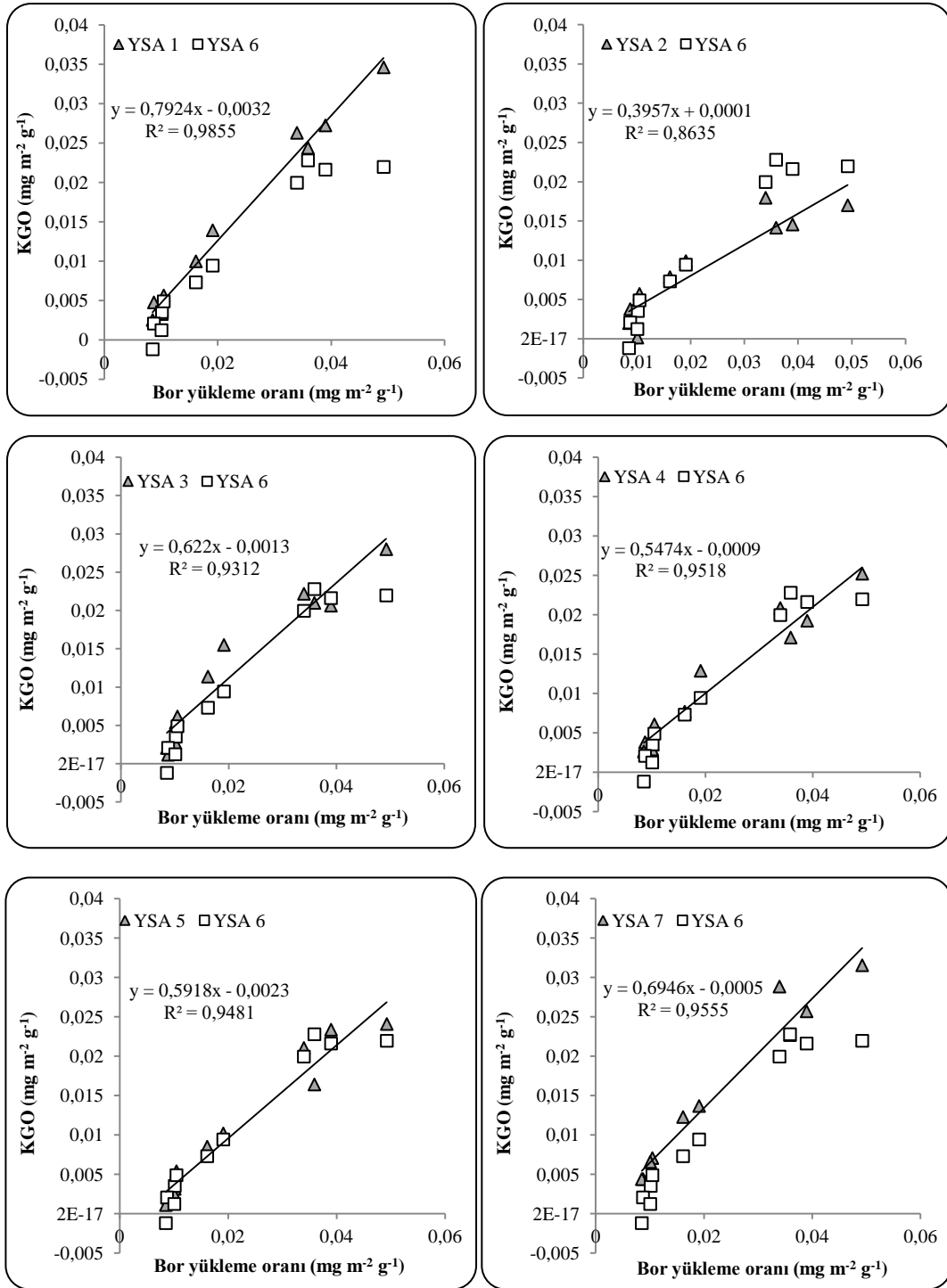


Şekil 3.16. Araştırma periyodu içerisindeki Giriş suyu B konsantrasyonu ve yapay sulak alanların Bor giderim oranları (BGO)

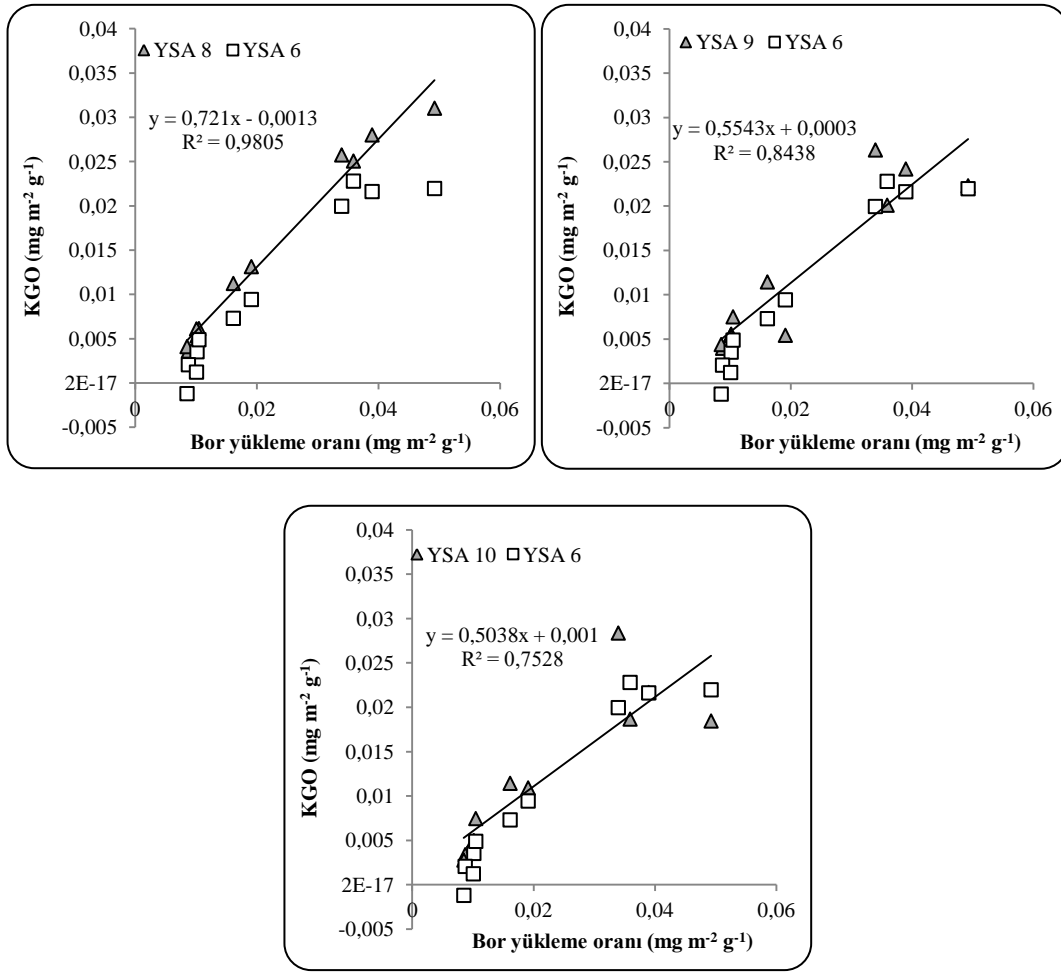


Şekil 3.17. (Devam) Araştırma periyodu içerisindeki Giriş suyu B konsantrasyonu ve yapay sulak alanların Bor giderim oranları (BGO)

Araştırma periyodu süresince günlük olarak yapay sulak alanlara yüklenen B miktarları ve her bir yapay sulak alanın kütleli B giderim oranları (KGO) Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Yapay sulak alanlardan elde edilen kütleli giderim oranlarına bakıldığında, birim alan ve birim gün bazında en yüksek B ’un mono-kültür dizayna parametrelerine sahip YSA 7 ile giderildiği tespit edilmiştir. En düşük kütleli giderim performansını ise poli-kültür yapay sulak alan olan YSA 2 ile elde edilmiştir. Bununla birlikte, çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanlara yüklenen B’un atık su içerisindeki konsantrasyonun artmasıyla birlikte kütleli B giderim oranı ve dolayısıyla yapay sulak alanlarda alı konulan B miktarı da artış göstermiştir.



Şekil 3.18. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanlara yüklenen bor yüklem oranları ve yapay sulak alanların kontrol grubuna göre kütleli giderim oranları (KGO)



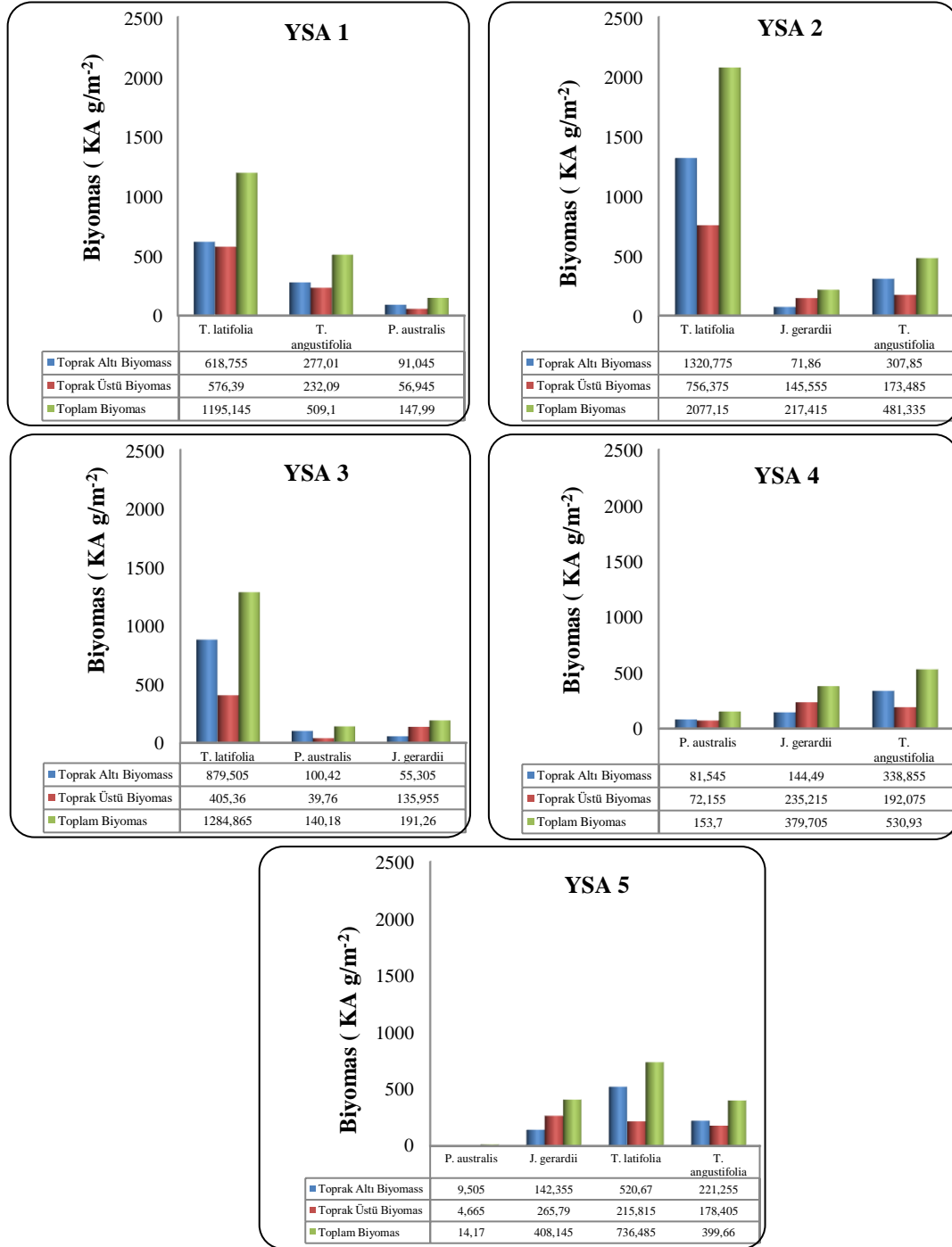
Şekil 3.19. (Devam) Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alanlara yüklenen bor yüklem oranları ve yapay sulak alanların kontrol grubuna göre kütesel giderim oranları (KGO)

3.3. Bitki Analizleri

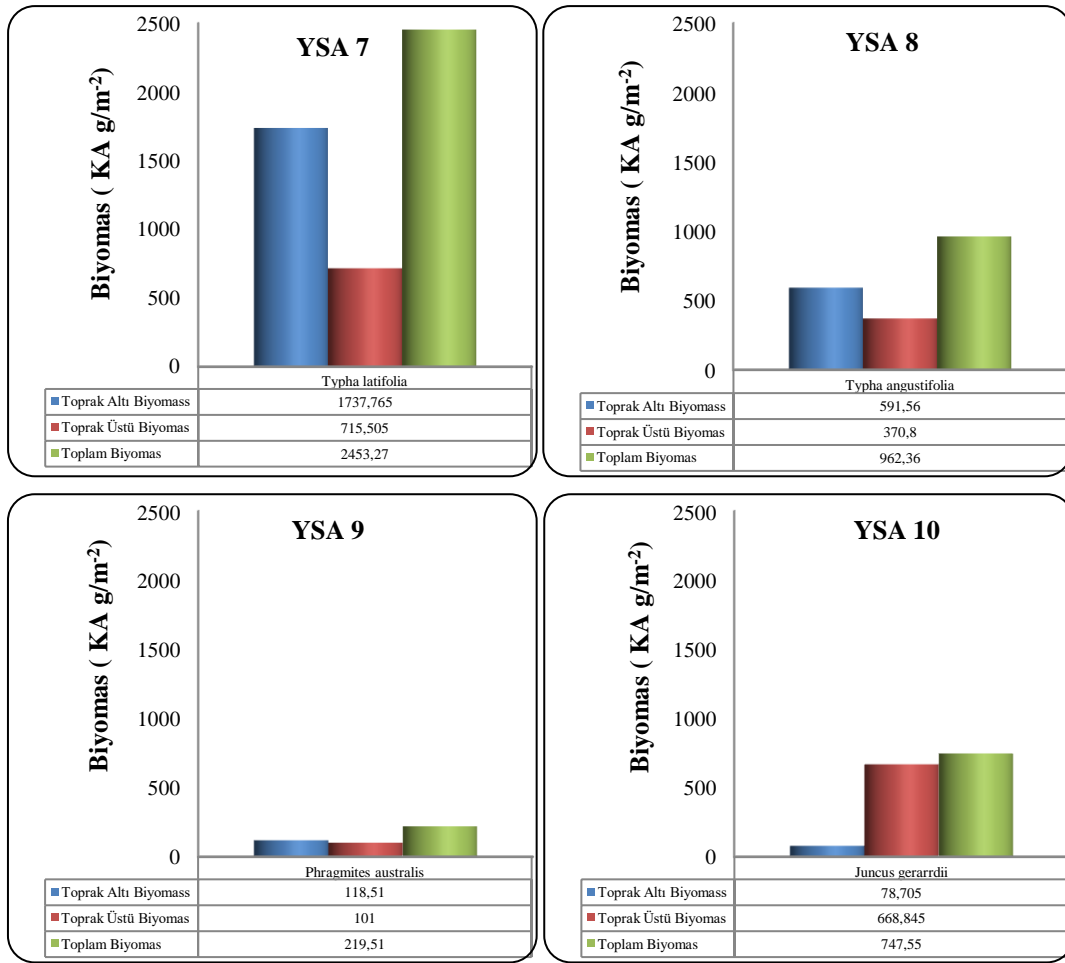
3.3.1. Bitki Biyomas Ölçümleri

Araştırma periyodu sonunda, yapay sulak alanlardan hasat edilen bitkilerin toprak altı ve toprak üstü biyomasları kuru ağırlık cinsinden (KA g/m²) Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre, en yüksek toplam bitki biyoması 2,775 (KA g/m²) ile YSA 2'de, en düşük toplam bitki biyoması ise 219 (KA gr/m²) ile YSA 10'da tespit edilmiştir. Bununla birlikte bitkilerin toprak üstü ve toprak altı biyomasları değerlendirildiğinde *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *P.australis* türlerinin biyoremediasyon deneyi boyunca daha fazla toprak altı bitki biyoması ürettiği görülmektedir. Buna karşın *J.gerrardii* bitkisi ise daha çok

toprak üstü bitki biyoması üretmiştir (Şekil 3.14). Ayrıca Şekil 3.15 incelendiğinde, yapay sulak alanlardan elde edilen bitki biyomaslarının bitki kompozisyonuna göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Örneğin *T.latifolia* bitkisi en çok biyoması YSA 2’de üretmişken, en az bitki biyomasını YSA 5’de ürettiği tespit edilmiştir.



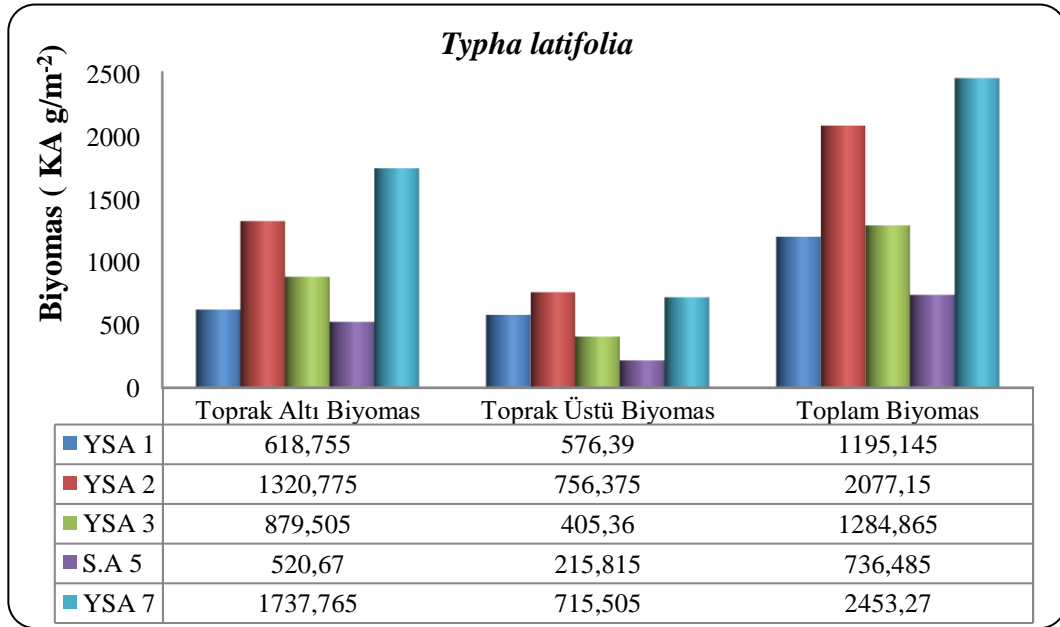
Şekil 3.20. Yapay sulak alanlardan araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki biyomasları



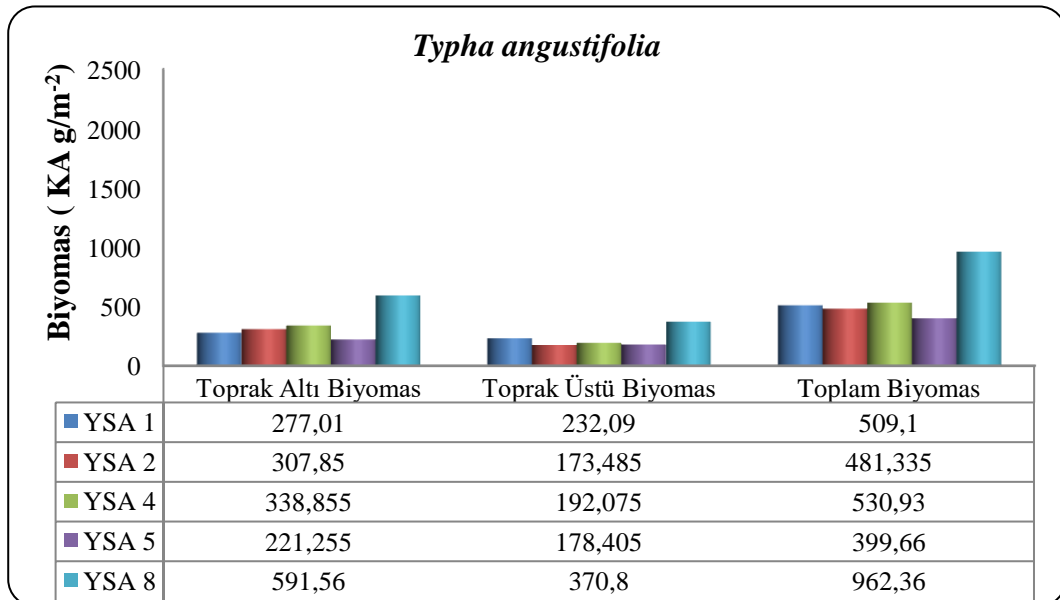
Şekil 3.21. (Devam) Yapay sulak alanlardan araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki biyomasları

Ayrıca, her bir bitki türünün farklı yapay sulak alanlarda araştırma periyodu süresince ürettiği toplam toprak altı ve toprak üstü biyomas Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Şekil 3.13 görüldüğü gibi *T.latifolia* türü en çok toplam biyoması YSA 7'de üretirken en az biyoması ise YSA 5'de üretmiştir. *T.angustifolia* türü ise en çok toprak altı ve toprak üstü biyoması mono-kültür YSA 8'de üretmişken, en az biyoması YSA 5'de ürettiği tespit edilmiştir (Şekil 3.14). Bununla birlikte, *P.australis* bitkisi en yüksek biyoması YSA 3'de, en az biyoması ise diğer yukarıda bahsedilen türler gibi YSA 5'de ürettiği belirlenmiştir (Şekil 3.15). Son olarak *J.gerardii* türü en çok biyoması mono-kültür YSA 10'da ürettiği tespit edilirken, en az biyoması diğer türlerden farklı olarak YSA 3'de ürettiği belirlenmiştir (Şekil 3.16). Ayrıca, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13' de gösterildiği gibi yapay sulak alanlarda en yüksek bitki

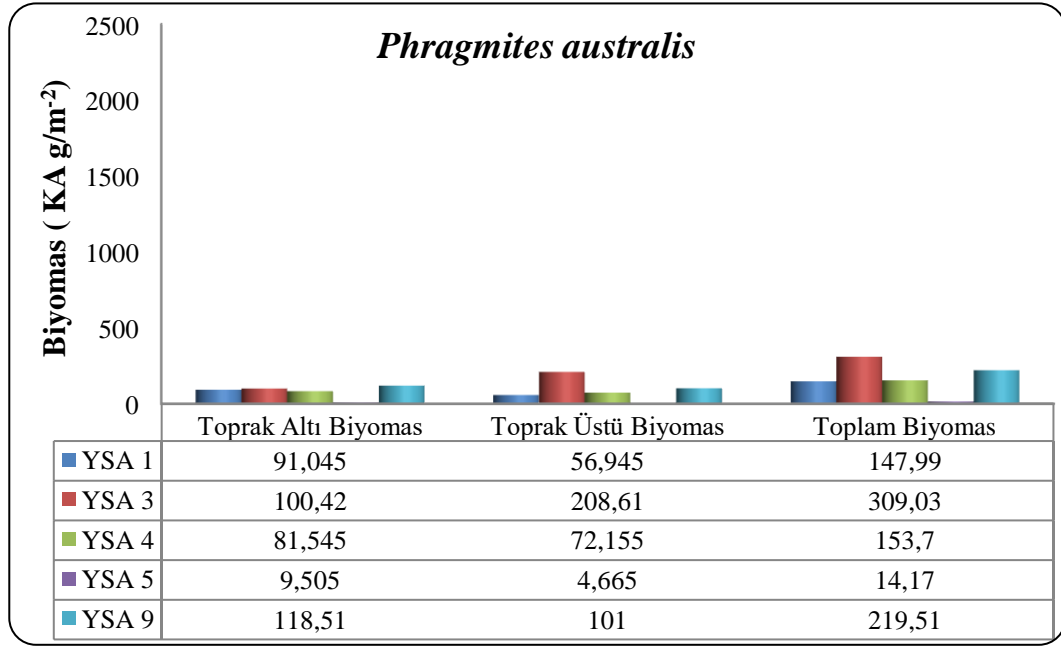
biyomasının *T. latifolia* bitkisinden elde edilebileceği bulunmuştur. Bu durumda *T. latifolia* bitkisinin yapay sulak alan içerisinde diğer türler ile karşılaştırıldığında operasyonel ve iklimsel koşullara daha yüksek bir adaptasyon yeteneği gösterdiği belirlenmiştir.



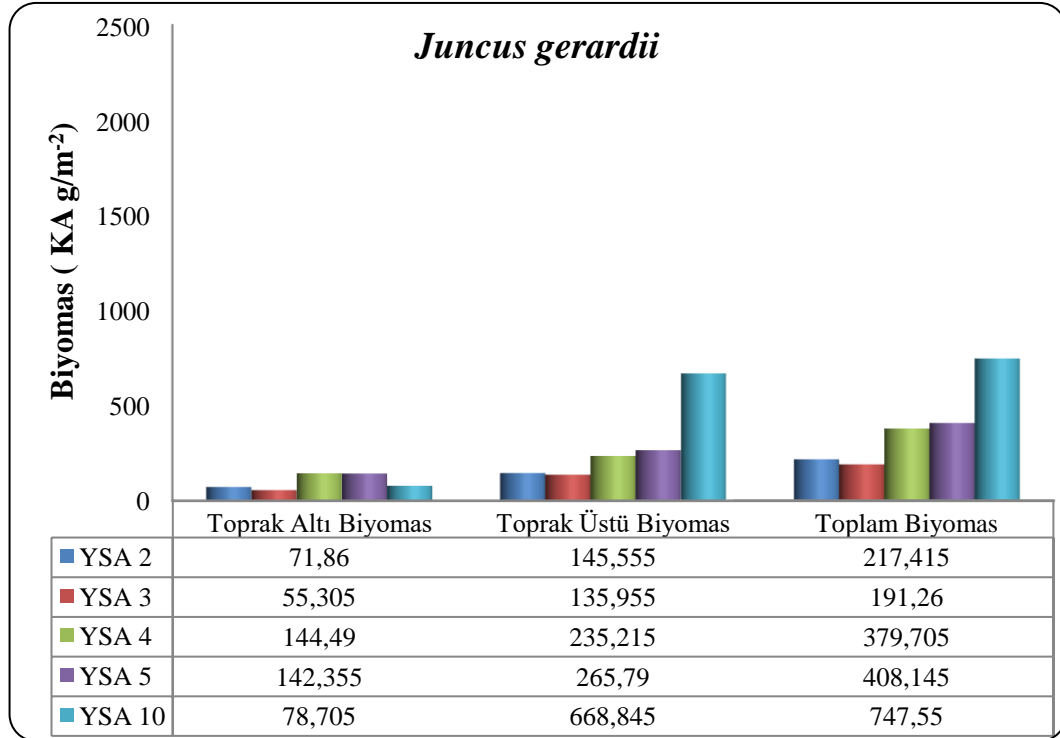
Şekil 3.22. *Typha latifolia* bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları



Şekil 3.23. *Typha angustifolia* bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları



Şekil 3.24. *Phragmites australis* bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları

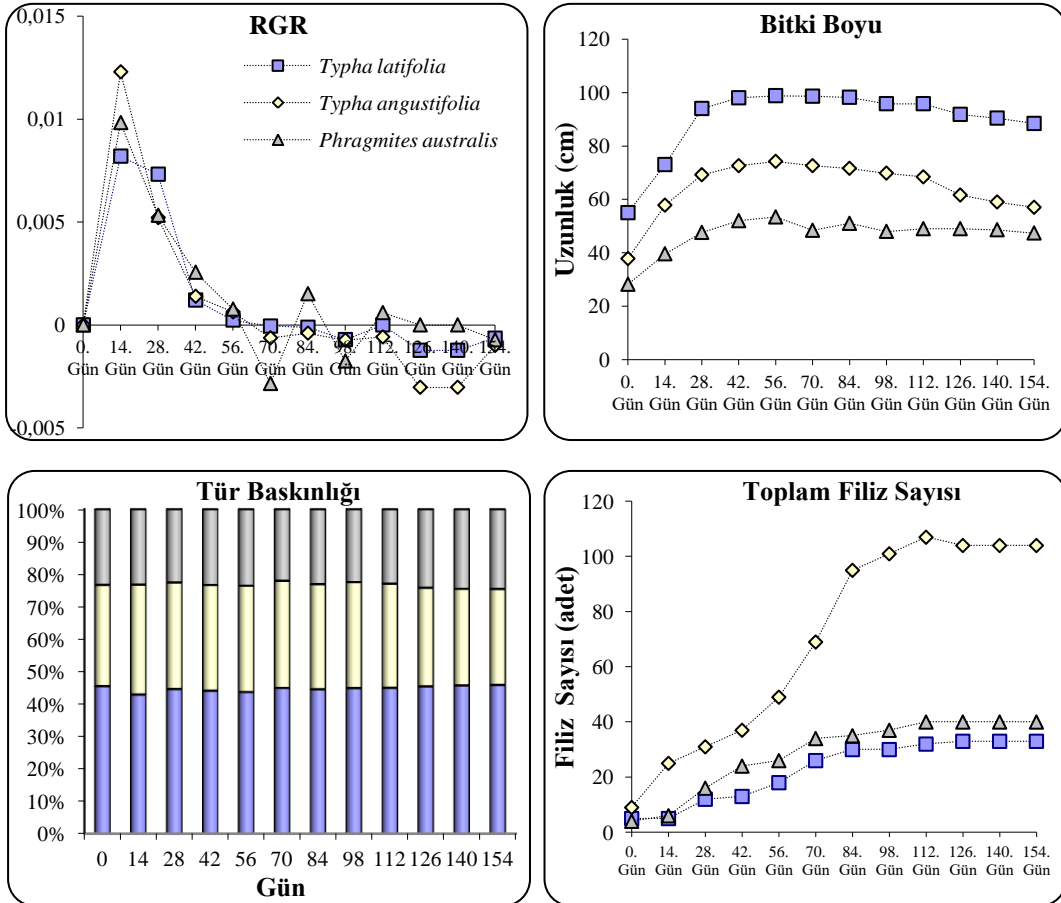


Şekil 3.25. *Juncus gerardii* bitkisinin araştırma sonunda farklı yapay sulak alan sistemlerindeki toprak altı, toprak üstü ve toplam biyomasları

3.3.2. Bitki Rekabet Analizlerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi

3.3.2.1 Yapay Sulak Alan 1'deki bitki rekabeti

Yapay sulak alan 1'e ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de gösterilmektedir.



Şekil 3.26. YSA 1'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

Araştırma periyodu boyunca *T.latifolia* türü için RGR değerlerinin 56. izleme gününe kadar pozitif değerlerde olduğu ve RGR değerinin 0,008 ile 0,002 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak 56. günden sonra RGR değeri negatif değerlere gerilemiş ve çalışma sonuna kadar bu eğilim devam etmiştir. Sulak alan içerisinde bulunan *T.angustifolia* türüne baktığımızda bu bitkiye ait RGR değeri ilk 56. izleme günü içerisinde 0,01 ile 0,001 arasında değiştiği ama sonrasında tıpkı *Typha latifolia* bitkisinde olduğu gibi RGR'in sıfırın altına düştüğü

bulunmuştur. Çalışma sonuna kadar da RGR değerleri pozitif değerlere çıkmamıştır. Son olarak *Phragmites australis* türünün RGR değerine baktığımızda diğer türleri nazaran bu bitkinin RGR değerleri araştırma periyodu boyunca dalgalı bir trend izleyerek ilk 84 gün içerisinde 0,009 ile 0,001 arasında bir RGR değerleri elde edilmiştir. Ancak 84. izleme gününden sonra sıfırın altına gerilemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yapay sulak alanlardaki tüm bitkiler ulaşabileceği maksimum boy uzunluğuna 56. gün sonunda erişerek dikey büyümelerini tamamlamışlardır. Bu izleme gününden sonra bitkilerin boy uzunlukları kademeli olarak düşüş göstermişlerdir. Bu kapsamda araştırma süresi boyunca *Typha latifolia* türünün boy uzunluğu 55 cm ile 98 cm arasında, *Typha angustifolia* bitkisinin boy uzunluğu 37 cm ile 74 cm arasında, *Phragmites australis* bitkisinin boy uzunluğu ise 28 cm ile 53 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Buna paralel olarak, *T. latifolia* bitkisinin yapay sulak alanlarda bitki boy uzunluğuna bağlı olarak daha büyük bir baskınlık derecesinde sulak alanda bulunduğu gözlemlenmiştir.

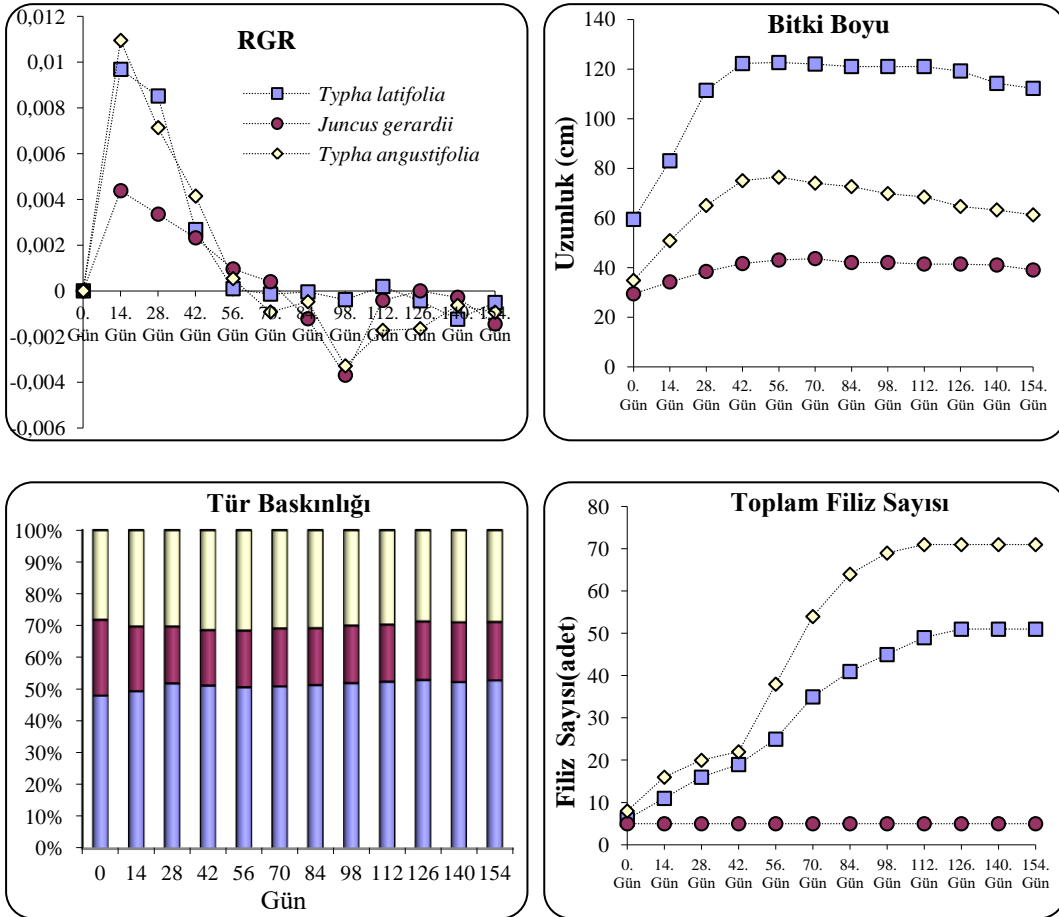


Şekil 3.27. Yapay sulak alan 1'deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

Araştırma periyodu boyunca, üretilen yeni filiz sayısına bakıldığında, *T. latifolia* bitkisinin 33 adet, *T. angustifolia*'nın 104 adet ve *P. australis* türünün 40 adet yeni filiz üretildiği tespit edilmiştir. Vejetasyon dönemi sonuna doğru hem bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş hem de üretilen filiz sayısında azalma tespit edilmiştir. Bu durum vejetasyon dönemi sonunda, doğal sulak alanlarda da gözlemlenen tipik bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.3.2.2 Yapay Sulak Alan 2'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 2'e ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.19 ve 3.20'de gösterilmektedir.

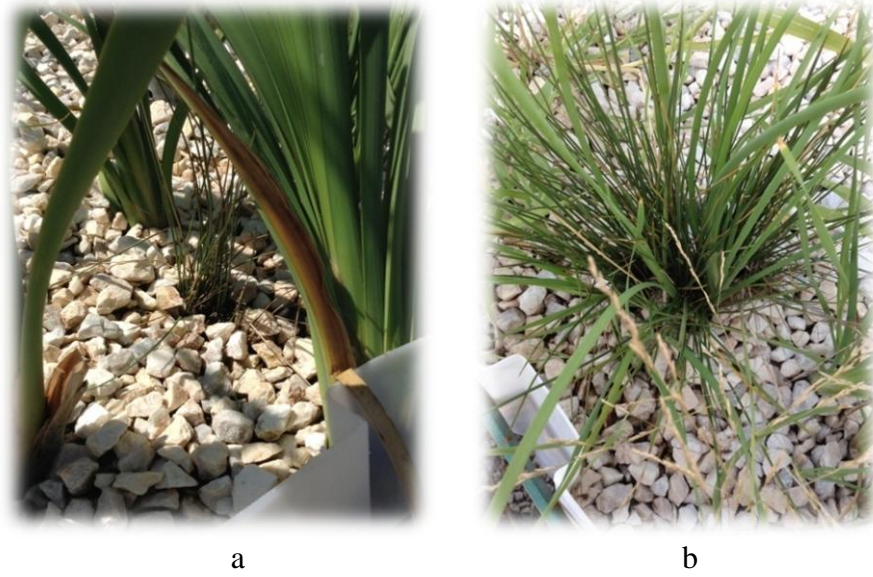


Şekil 3.28. YSA 2'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

Yapılan ölçümlerde YSA 2’de bulunan bitkilerin ilk 42 izleme günü içerisinde yüksek bir RGR değerine sahip olduğu bulunmuştur. Buna göre, *T.latifolia* türünün RGR değerinin 0,009 ile 0,002 arasında, *T.angustifolia* bitkisinin RGR değerinin 0,01 ile 0,004 arasında ve *J.gerardii* bitkisinin RGR değerinin 0,004 ile 0,002 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak bu izleme gününden sonra her üç türünde RGR değerleri kademeli olarak gerileyerek 70. izleme gününden sonra sıfırın altına inmiştir. Bununla birlikte, RGR değerleri araştırmanın sonuna kadar sıfırın altında kalmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, araştırma periyodu içerisinde *T.latifolia* bitkisinin boy uzunluğunun 59 cm ile 122 cm arasında, *T.angustifolia* türünün boy uzunluğunun 34 cm ile 76 cm arasında ve *J.gerardii* bitkisinin boy uzunluğunun 29 cm ile 43 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir. *T.latifolia* ve *T.angustifolia* türlerinin maksimum boy uzunluğuna 56. izleme gününde, *J.gerardii* bitkisinin ise maksimum boy uzunluğuna 70. izleme gününde ulaştığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, *T. latifolia* bitkisinin yapay sulak alanlarda bitki boy uzunluğuna bağlı olarak daha büyük bir baskınlık derecesinde sulak alanda bulunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.29. Yapay sulak alan 2’deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları



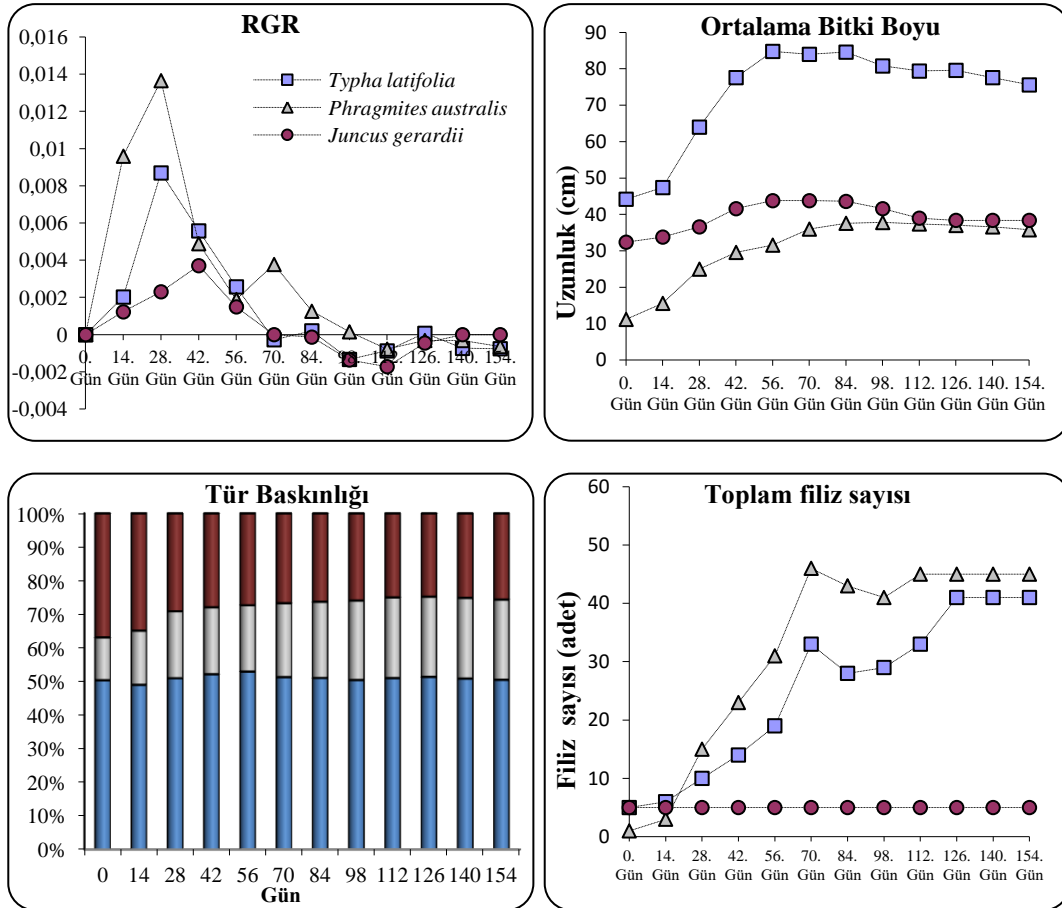
Şekil 3.30. Yapay sulak alan 2’deki *Juncus gerardii* türünün gelişmesi, *Typha latifolia* bitkisi (a) ve *Typha angustifolia* (b) bitkisi tarafından baskılanması

Şekil 3.19’da gösterildiği gibi araştırma periyodu süresince, YSA 2’de üretilen yeni filiz sayısına bakıldığında, *T.latifolia* bitkisinin 51 adet ve *T.angustifolia*’nın 71 adet yeni filiz ürettiği belirlenmiştir. Ancak *J.gerardii* türünün morfolojik olarak kümeleşerek yayılma göstermesi nedeniyle ürettiği filiz sayısı tespit edilememiştir. Bununla birlikte *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkileri gerçekleştirdikleri yüksek boylanma ve yeni filiz üretimi sayesinde yapay sulak alan içerisinde bulunan *J.gerardii* bitkilerinin gelişimlerinin baskılandığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.21). Vejetasyon dönemi sonuna doğru hem bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş hem de üretilen filiz sayısında azalma tespit edilmiştir. Bu durum vejetasyon dönemi sonunda, doğal sulak alanlarda da gözlemlenen tipik bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.3.2.3 Yapay Sulak Alan 3’deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 3’a ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.22 ve Şekil 3.23 ’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan bitkiler arasında en yüksek RGR değerini *P. australis* bitkisinin gösterdiği tespit edilmiştir. *T.latifolia* ve *J.gerardii* türleri 70.güne kadar nispi gelişimleri

sürdürmüşken, *P. australis* bitkisi 98. gün sonuna kadar nispi gelişmesini devam ettirmiştir, ancak bu izleme günü sonrasında her üç türünde nispi gelişmesi sıfırın altına gerilemiştir. Buna karşın, ortalama bitki boylanmasına baktığımızda ise en çok bitki boylanmasının 85 cm ile *T. latifolia* bitkisi tarafından sağlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.31. YSA 3'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

P. australis bitkisi ise sulak alan içerisinde yüksek nispi gelişme göstermesine rağmen ortalama boylanmada başarısız olmuştur. Bu durum tür baskınlıkları incelendiğinde de karşımıza çıkmakta ve en düşük tür baskınlığına *P. australis* bitkisinin sahip olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek filiz üretiminin ise 46 adet ile *P. australis* bitkisi tarafından üretildiği belirlenmiştir. Ancak bu yüksek filiz üretimi bitki yayılışında herhangi bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Vejetasyon dönemi sonuna doğru tıpkı diğer sulak alanlarda olduğu gibi hem bitki

yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş hem de üretilen filiz sayısında azalma tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, YSA 3’de bitki rekabetinin yüksek olmadığı ve kullanılan tüm bitkilerin gerekli büyüme ve gelişme ortamı bulunduğu tespit edilmiştir.

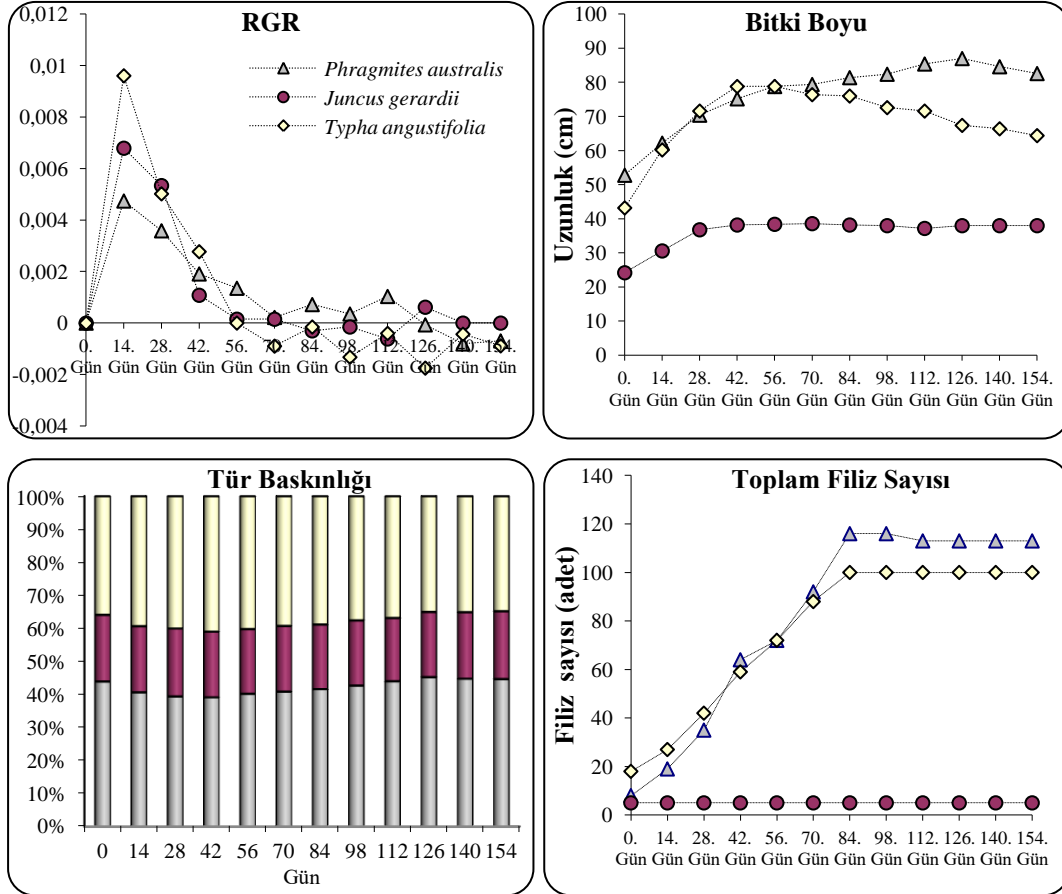


Şekil 3.32. Yapay sulak alan 3’deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

3.3.2.4 Yapay Sulak Alan 4’deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 4’e ait nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de gösterilmektedir. YSA 4’deki nispi gelişme oranlarına bakıldığında en yüksek nispi gelişme oranı *T.angustifolia* türüne ait olduğu tespit edilmiştir. 56. gün sonunda *T.angustifolia* ve *J. gerradii* bitkilerin nispi gelişme oranları sıfırın altına gerilerken, *P.australis* bitkisinin nispi gelişme oranı 72. gün sonunda durmuştur. Ancak 84. gün ile birlikte tekrardan yükselerek 126. gün sonunda sıfırın altına gerilemiştir. Bu durum, *P.australis* bitkisinin diğer sulak alanlarda bulunan aynı türe ait bireyelerine göre daha uygun gelişme ortamı bulunduğu bir

sonucu olabilir. Bununla birlikte, *P.australis* bitkisi ortalama bitki boyu açısından da, yapay sulak alan içerisinde en yüksek değere sahip bitki türü olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.33. YSA 4'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

Yeni üretilen filiz sayısına bakıldığında, en çok filizin *P.australis* bitkisi tarafından üretildiği gözlemlenmiştir. Tür baskınlığı açısından bakıldığında, ilk izleme günlerinde *T.angustifolia* bitkisi sulak alan içerisinde daha baskın bir durumda olsa da, ilerleyen haftalarla birlikte *P.australis* bitkisi baskın duruma gelmiştir. Vejetasyon dönemi sonuna doğru tıpkı diğer sulak alanlarda olduğu gibi hem bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş hem de üretilen filiz sayısında azalma tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, yapay sulak alan 4'de bitki rekabetinin yüksek olmadığı ve

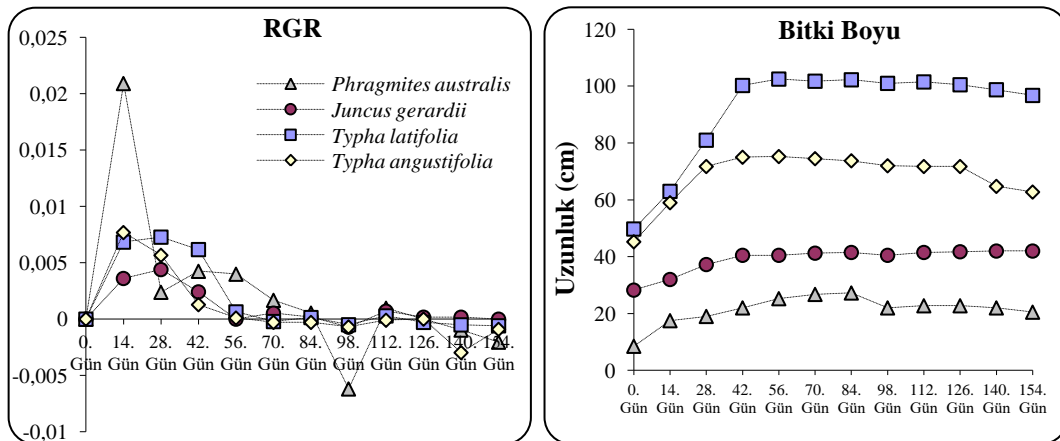
kullanılan tüm bitkilerin gerekli büyüme ve gelişme ortamı bulunduğu tespit edilmiştir.



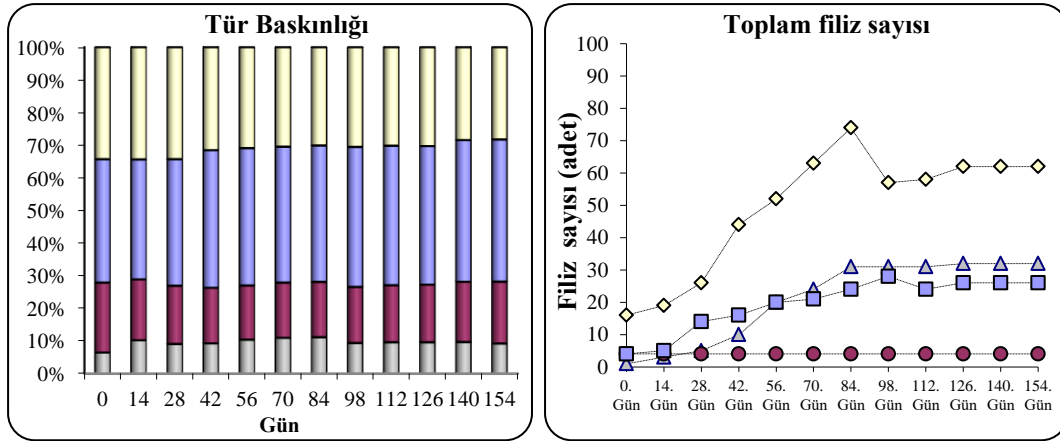
Şekil 3.34. Yapay sulak alan 4'deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

3.3.2.5 Yapay Sulak Alan 5'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Biyoremediasyon çalışmasında kullanılan tüm türlerin bir arada bulunduğu Yapay sulak alan 5'e ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.26 ve Şekil 3.27 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.35. YSA 5'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı



Şekil 3.36. (Devam) YSA 5'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

YSA 5'deki bitkilerin RGR oranlarına bakıldığında araştırma periyodu boyunca *P.australis* bitkisinin ilk 70 gün boyunca 0,002 ile 0,0001 arasında bir nispi gelişme gösterdiği, *T.latifolia* türünün ilk 56 günlük izleme periyodunda 0,006 ile 0,0006 arasında bir nispi gelişme, *T.angustifolia* bitkisinin ilk 56 günlük periyot boyunca 0,007 ile 0,0001 arasında bir nispi gelişme ve son olarak *J.gerardii* bitkisinin ilk 84 gün boyunca 0,003 ile 0,0005 arasında bir nispi gelişme gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek nispi gelişmeyi ilk haftalarda *P.australis* gösterse de, daha sonra *T.latifolia* ve *T.angustifolia* türleri yüksek gelişme oranı göstermişlerdir. 56. gün sonunda ise bu türlerin nispi gelişmeleri sıfırın altına gerilemiştir. Buna karşın, *P.australis* bitkisi gelişmesini 84. Sonuna kadar sürdürmüştür. Ortalama bitki boylarına bakıldığında ise en yüksek bitki boyuna 75 cm ile *T.latifolia* bitkisinin ulaştığı, en düşük bitki boyuna ise 27 cm ile *P.australis* bitkisinin ulaştığı bulunmuştur. Tür baskınlıklarına bakıldığında, sulak alanın %70'inden fazlasının *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkileri tarafından kaplandığı tespit edilmiştir. Bu durum, sulak alanlarda agresif türler arasında olduğunu bildiğimiz bu iki türün yapay sulak alanlarda bir arada bulunması *P.australis* ve *J.gerardii* bitkilerinin gelişimlerini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Ortalama filiz sayısına bakıldığında ise en çok filiz üretiminin *T.angustifolia* bitkisi tarafından üretildiği belirlenmiştir. Bu yüksek filiz üretimi yapay sulak alan içerisinde bu türün daha fazla yayılmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Vejetasyon dönemi sonuna doğru tıpkı diğer sulak

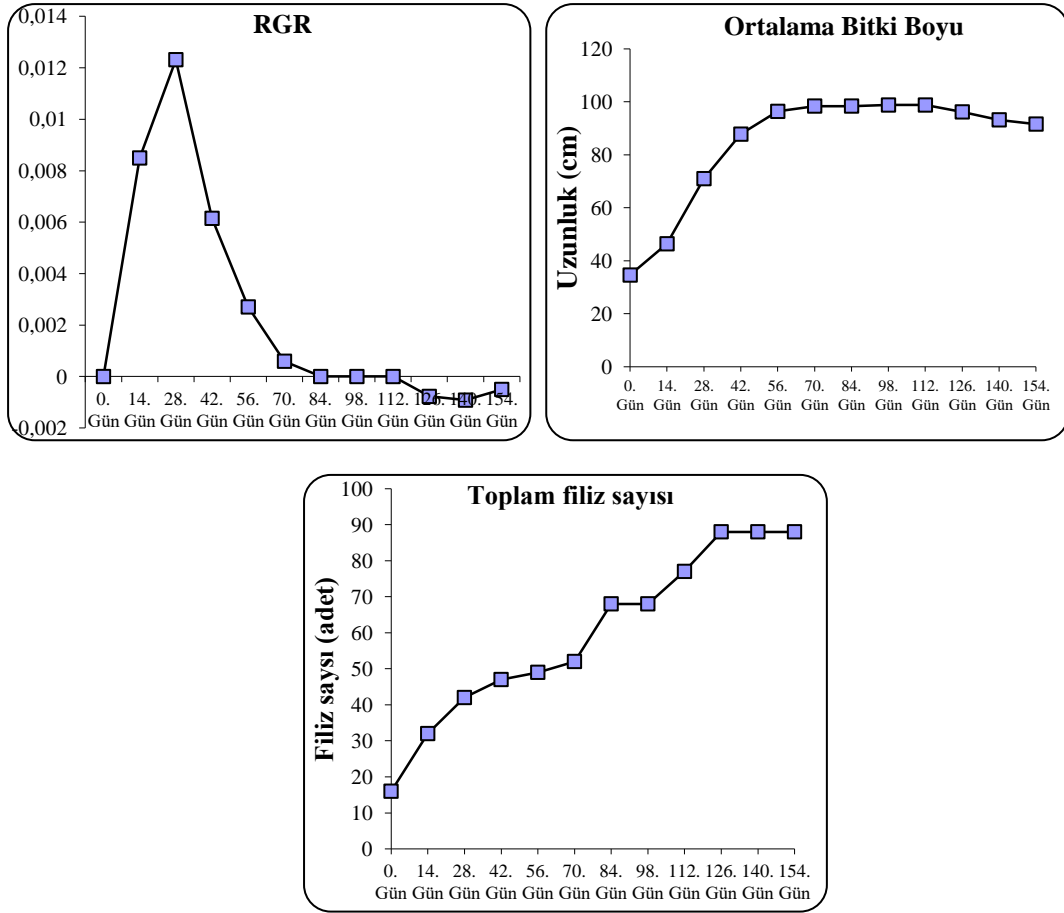
alanlarda olduğu gibi hem bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş hem de üretilen filiz sayısında azalma tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, yapay sulak alan 5’de tüm bitkilerin bir arada bulunması hem alan, hem de besin rekabeti oluşturduğu için bitki rekabeti yüksek seyretmiştir. Bunun bir kanıtı olarak *T.latifolia* bitkisinin tıpkı YSA 2’deki aynı türe ait bireyinde olduğu gibi spika üretimi göstermesi örnek gösterilebilir.



Şekil 3.37. Yapay sulak alan 5’deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

3.3.2.6 Yapay Sulak Alan 7’deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 7’e ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.28 ve Şekil 3.29 ’de gösterilmektedir. YSA 7’deki nispi gelişme oranlarına bakıldığında ilk 28 gün sulak alan içerisindeki bitkilerin nispi gelişme oranlarının kademeli olarak arttığı, ancak bu izleme günü sonrasında nispi gelişme oranlarının sürekli olarak azalma trendine girdiği tespit edilmiştir. 70. günün sonunda durma noktasına gelen nispi gelişme oranı 84. gün sonunda ise tamamen durmuştur.



Şekil 3.38. YSA 7'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

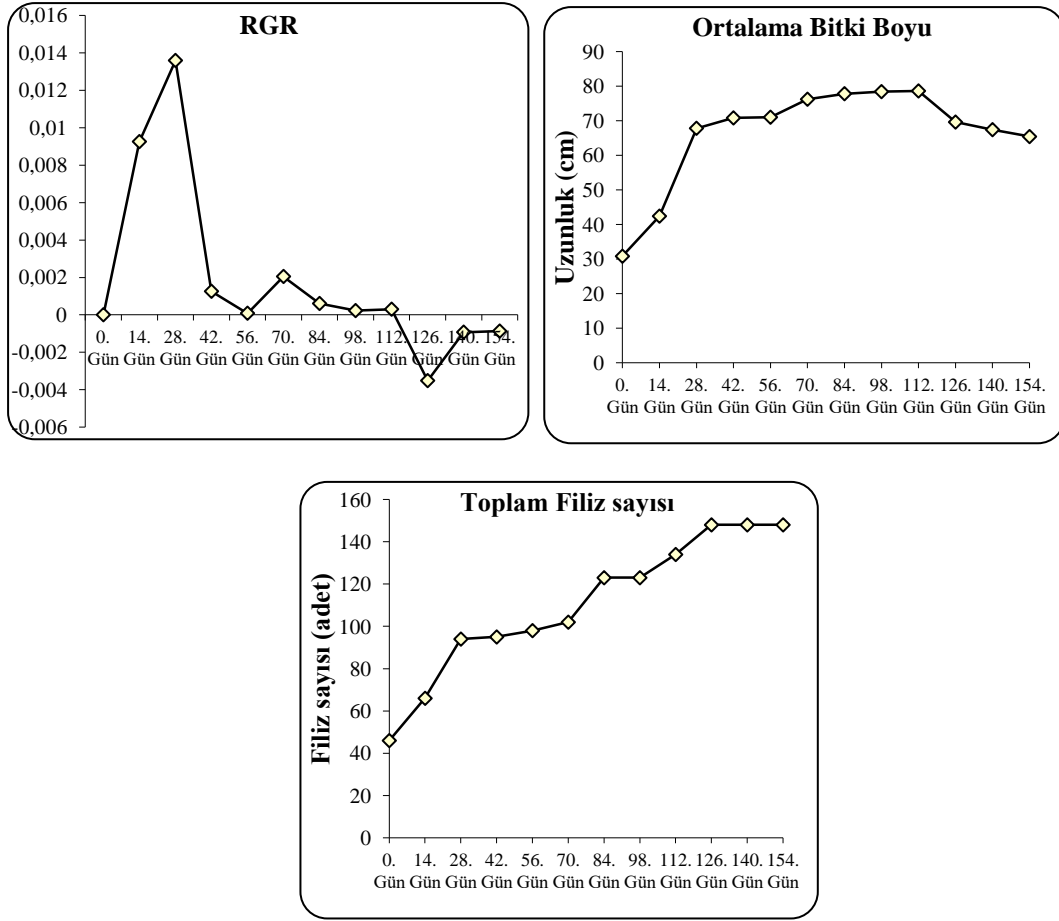
Bununla birlikte, araştırma periyodu süresince bitkilerin boylarına bakıldığında yapay sulak içerisinde bulunan *T.latifolia* bitkisinin 70. gün sonunda maksimum boya ulaşarak dikey büyümesini tamamladığı belirlenmiştir. 112. izleme gününe bitkilerin boyu sabit kalmış sonraki izleme günlerinde ise bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 2.28 gösterildiği gibi YSA 7'de üretilen yeni filiz sayısı 126. güne kadar kademeli olarak artış göstermiş ancak bu izleme gününden araştırma sonuna kadar sabit kalmıştır. Önemli bir nokta olarak YSA 7'de bitkilerin poli-kültür yapay sulak alanlarda gözlemlendiğimiz yatay yayılış davranışını nispeten daha az sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durumda yapay sulak alanlarda bulunan *T.latifolia* türünün herhangi bir rekabet olayına maruz kalmadığı bulunmuştur.



Şekil 3.39. Yapay sulak alan 7'deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

3.3.2.7 Yapay Sulak Alan 8'deki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 8'e ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 'de gösterilmektedir. YSA 8'deki nispi gelişme oranlarına bakıldığında ilk 28 gün sulak alan içerisindeki bitkilerin nispi gelişme oranlarının kademeli olarak arttığı, ancak bu izleme günü sonrasında nispi gelişme oranının aniden düştüğü ve 56. gün sonunda durduğu tespit edilmiştir. Ancak 70. izleme gününde nispi gelişme oranı tekrar yükselmiş ve 98. güne kadar sabit bir büyüme trendi gözlemlenmiştir. 112. günden sonra bitkilerin nispi gelişme oranları tamamen durmuş ve çalışma sonuna kadar herhangi bir nispi gelişme oranı tespit edilmemiştir.



Şekil 3.40. YSA 8’deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

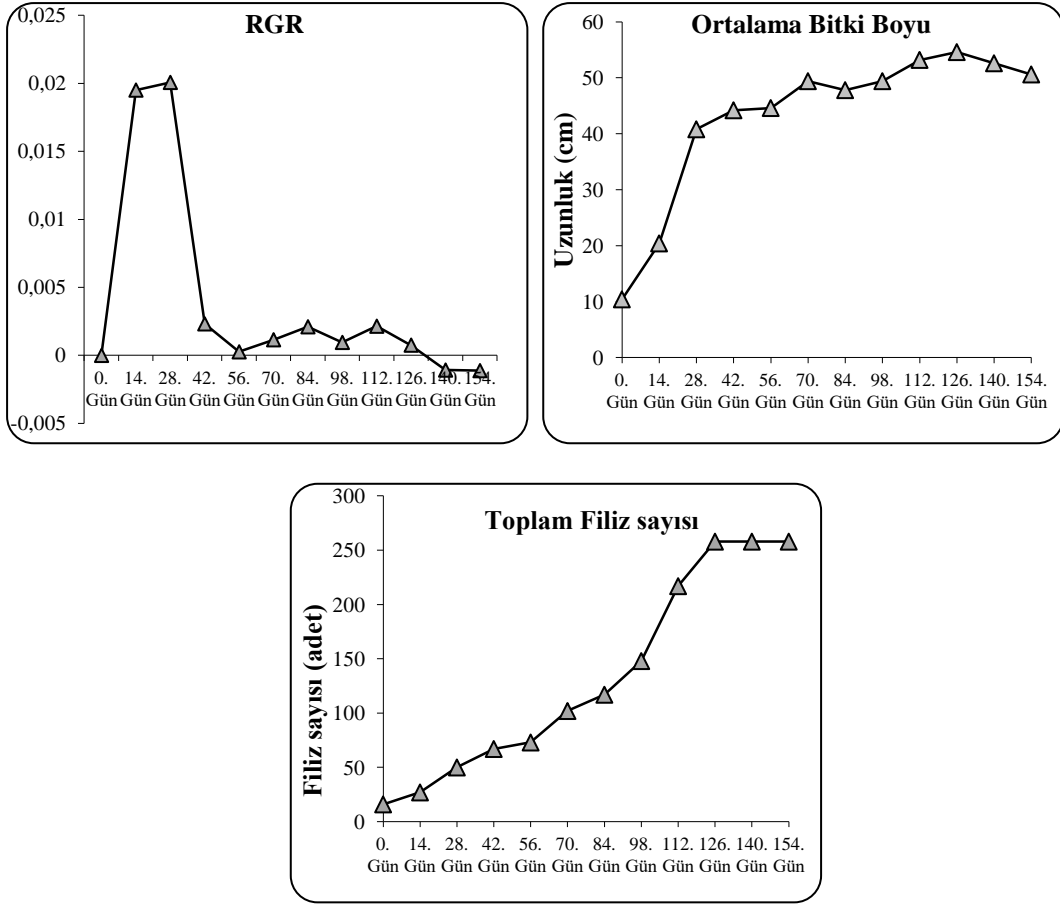
Araştırma periyodu süresince bitkilerin boylarına bakıldığında yapay sulak içerisinde bulunan *T.angustifolia* bitkisinin 112. gün sonunda maksimum boya ulaşarak dikey büyümesini tamamladığı belirlenmiştir. 112. izleme gününden sonra bitkilerin boyunda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bu düşüşün temel nedeninin diğer sulak alanlarda olduğu bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş meydana gelmesi olduğu düşünülmektedir. YSA 8’de üretilen yeni filiz sayısına bakıldığında, filiz sayısı 126. güne kadar kademeli olarak artış gösterdiği ancak bu izleme gününden araştırma sonuna kadar sabit kaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte tıpkı YSA 8’de olduğu gibi üretilen filizlerde çok az yatay yayılış davranışı gözlemlenmiştir. Buda, yapay sulak alan içerisinde bulunan *T.angustifolia* bitkisinin rekabet olayından çok fazla etkilenmediğini göstermektedir.



Şekil 3.41. Yapay sulak alan 8'deki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

3.3.2.8 Yapay Sulak Alan 9'daki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 9'a ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları, üretilen yeni filiz sayısı ve genel görünüşleri Şekil 3.32 ve Şekil 3.33 'de gösterilmektedir. YSA 9'daki *P.australis* bitkisinin nispi gelişme oranlarına bakıldığında ilk 28 gün sulak alan içerisindeki bitkilerin nispi gelişme oranlarının kademeli olarak arttığı, ancak bu izleme günü sonrasında nispi gelişme oranının aniden düştüğü ve 56. Gün sonunda durduğu tespit edilmiştir. Ancak 56. izleme gününde itibaren bitkilerin nispi gelişme oranı tekrar yükselmiş ve 126. izleme güne kadar nispeten artış trendi gözlemlenmiştir. 126. günden sonra bitkilerin nispi gelişme oranları tamamen durmuş ve çalışma sonuna kadar herhangi bir nispi gelişme oranı tespit edilmemiştir.



Şekil 3.42. YSA 9'deki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve üretilen yeni filiz sayısı

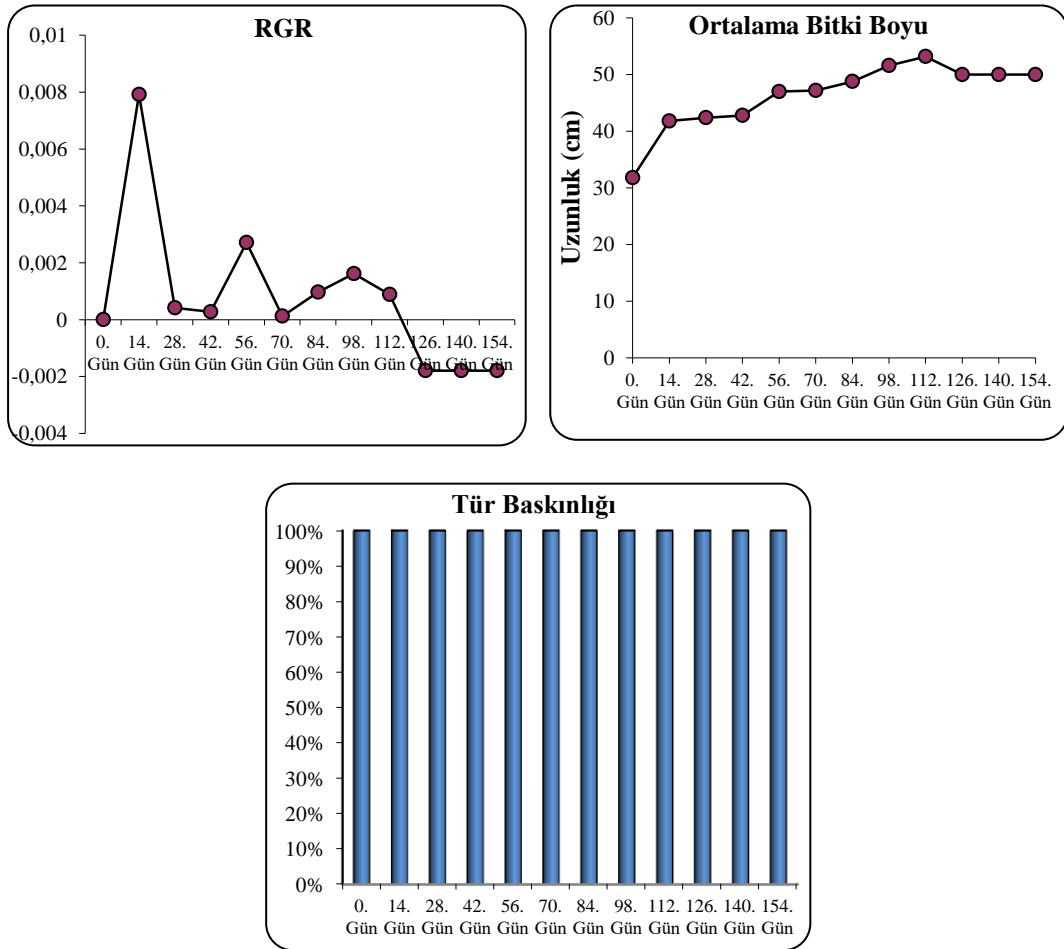
Bitkilerin araştırma periyodu boyunca boylarına bakıldığında yapay sulak içerisinde bulunan *P.australis* bitkisinin çok fazla boylanmadığı ve maksimum olarak 55 cm civarında bir dikey boylanmaya gerçekleştirdiği belirlenmiştir. YSA 9'da üretilen yeni filiz sayısına bakıldığında, filiz sayısı 112. güne kadar kademeli olarak artış gösterdiği ancak bu izleme gününden araştırma sonuna kadar sabit kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca üretilen filiz sayısı 250 adet civarına ulaşmış ve burada sabit kalmıştır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlara göre yapay sulak alan 9'da bulunan *P.australis* türü herhangi bir yatay gelişme göstermemiş ve Şekil 3.32'de görüldüğü sulak alanda düşük bir genel örtüşü gerçekleştirmiştir. Diğer mono-kültür yapay sulak alanlarda da olduğu gibi rekabet mekanizmasının bu sulak alanda B artımına ve bitki büyümesine etkisine yönelik bir etkisi bulunamamıştır.



Şekil 3.43. Yapay sulak alan 9'daki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

3.3.2.9 Yapay Sulak Alan 10'daki bitki rekabetinin değerlendirilmesi

Yapay sulak alan 10'a ait bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları, tür baskınlıkları ve genel görünüşleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35 'de gösterilmektedir. YSA 10'da bulunan *J.gerardii* bitkisi 126. izleme gününe kadar nispeten dalgalı bir büyüme eğrisi göstermiş ancak 126. günden itibaren büyümesi durmuş ve RGR değerinin negatife düştüğü tespit edilmiştir. Bitkilerin göstermiş olduğu boy uzunluklarına bakıldığında bitkilerin 112. izleme gününde maksimum boylanma gösterdikleri ve bu izleme günü sonunda boylanmalarının düştüğü tespit edilmiştir. Bu düşüşün temel nedeninin diğer sulak alanlarda olduğu bitki yapraklarının uçlarının kırılmasına bağlı olarak bitki boylarında düşüş meydana gelmesi olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte *J.gerardii* bitkisinin morfolojisinden kaynaklı olarak yatay bir yayılış gösterememesinden dolayı araştırma periyodu boyunca üretilen yeni filiz sayısı kaydedilememiştir. Bu durumda yapay sulak alan içerisinde gerekli alan ve besin bulunduran *J.gerardii* türünün herhangi bir rekabet olayına maruz kalmadığı düşünülmektedir.



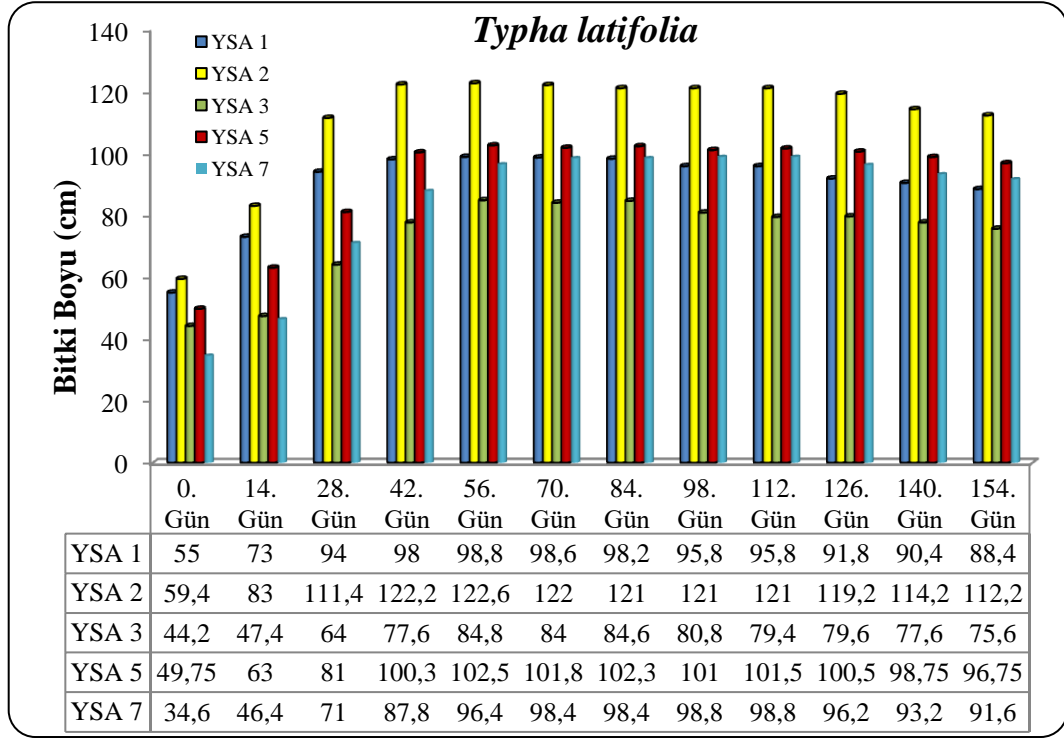
Şekil 3.44. YSA 10'daki bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), boy uzunlukları ve tür baskınlıkları

Bununla birlikte *J.gerardii* türünün mono-kültür bir yapay sulak alanda bulunması, poli-kültür yapay sulak alanlarda bulunan aynı türün bireyelerine göre diğer agresif türler tarafından daha az baskılanmasına neden olmuş bu nedenle de rekabet olayı bu sulak alanda bitki büyümesinde ve gelişmesinde daha az etkili olduğu tespit edilmiştir.

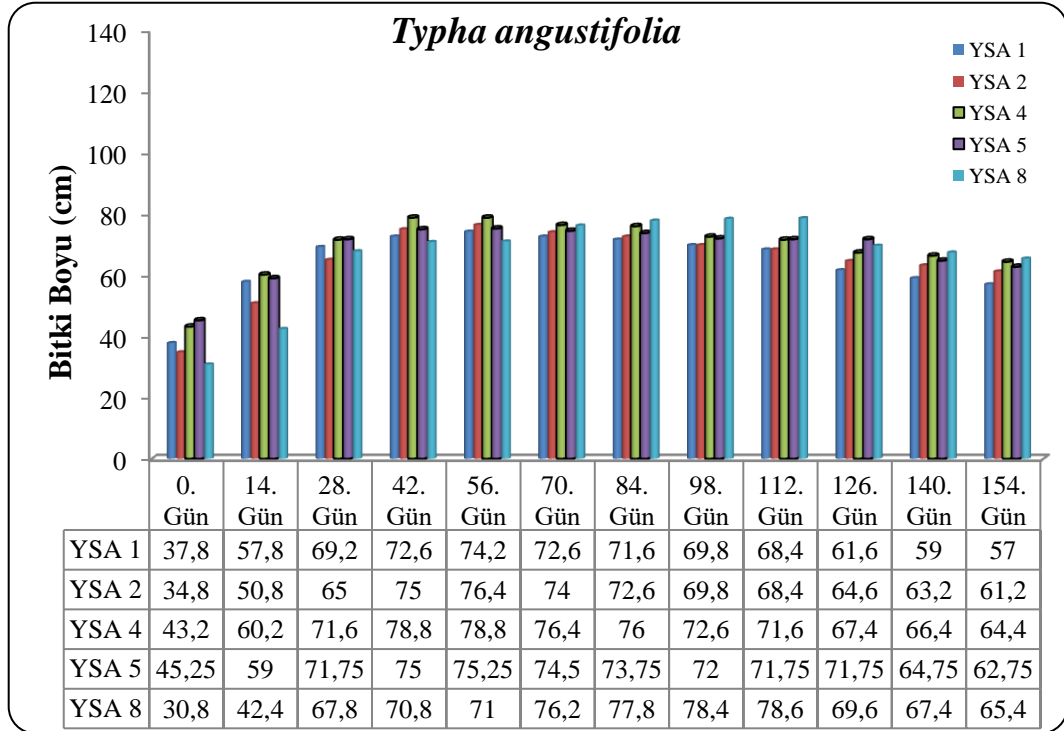


Şekil 3.45. Yapay sulak alan 10'daki bitkilerin 98. gündeki genel durumları

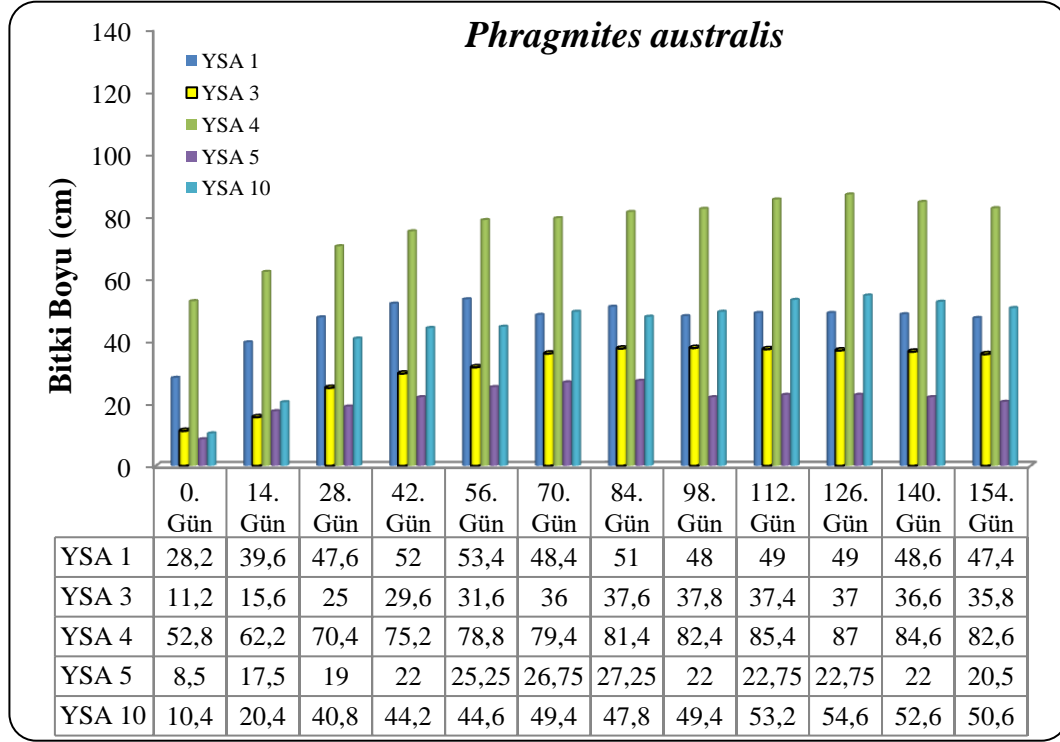
Aynı türe ait bitkilerin farklı yapay sulak alanlardaki ortalama boy uzunlukları Şekil 3.36, 3.37, 3.38 ve 3.39'de gösterilmektedir. İlgili şekiller incelendiğinde, *T.latifolia* türünün en yüksek boylanmayı YSA 2'de gerçekleştirdiği görülmektedir. En düşük boylanmayı ise YSA 3'de gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. *T.angustifolia* türüne bakıldığında ise, en yüksek boylanma yapay sulak alan 4'de, en düşük boylanma ise YSA 5'de gerçekleştirdiği belirlenmiştir. *P.australis* türü ise en yüksek bitki boylanmasını YSA 4'de en düşük bitki boylanması ise YSA 5'de olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, *J.gerrardii* bitkisine bakıldığında, bitki boylanmasının nispeten tüm yapay sulak alanlarda aynı olmakla birlikte en yüksek bitki boylanması YSA 10'da en düşük bitki boylanması ise YSA 4'de olduğu belirlenmiştir.



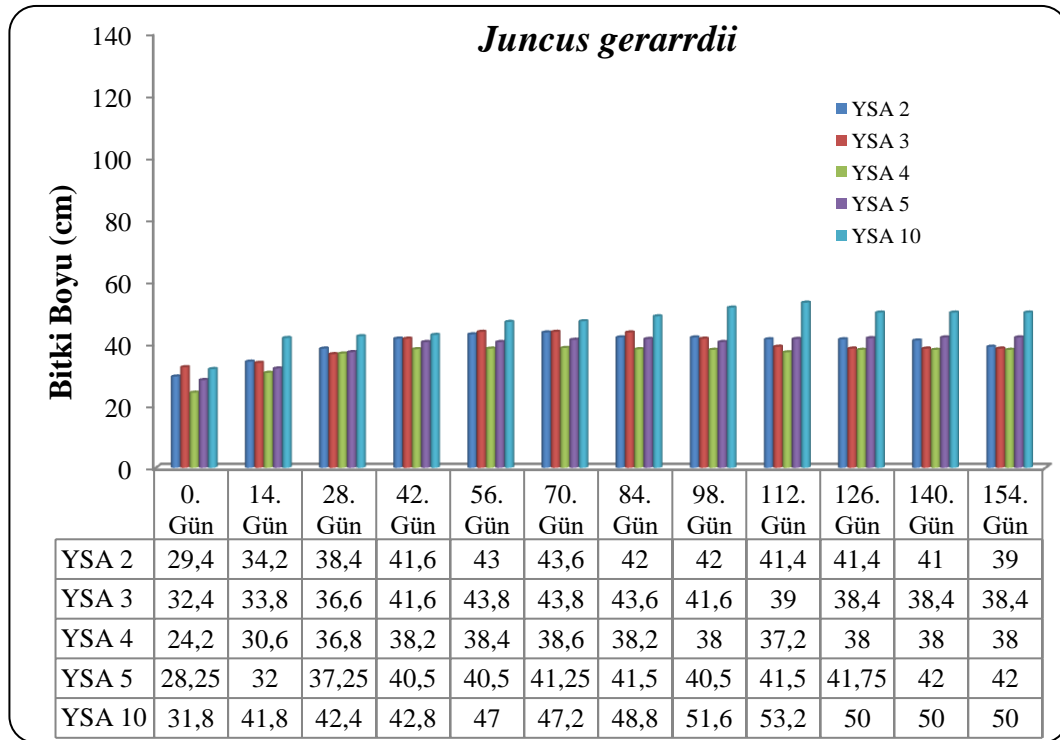
Şekil 3.46. *Typha latifolia* bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları



Şekil 3.47. *Typha angustifolia* bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları



Şekil 3.48. *Phragmites australis* bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları

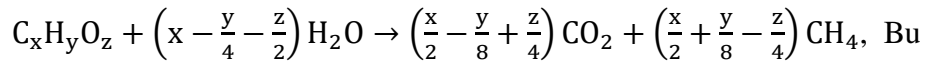


Şekil 3.49. *Juncus gerardii* bitkisinin farklı sulak alanlardaki boy uzunlukları

3.3.3. Tahmini Biyogaz, Elektrik Enerjisi Eldesi ve Enerji Bütçelerinin Hesaplanması

Doğada organik materyallerin Hidroliz, Asidogenez, Asetogenez-Asetik asit formasyonu ve Metan formasyonu gibi süre gelen basamaklar ile biyogaza dönüşebileceği birçok araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Kaltwasser 1980). Bununla birlikte Buswell (1952) ürettiği eşitlikte kullanılan substrata göre teorik olarak ne kadar biyogaz üretiminin hesaplanacağını bulmuştur.

Buswell (1954) eşitliği şu şekildedir:



eşitlikte;

C: Karbon

H: Hidrojen

O: Oksijen

x,y,z: elementlerin atom sayısı

Çizelge 3.3'de gösterildiği gibi araştırma sonunda birim alan (2 m²) ve birim hacimde (1,2 m³) yapay sulak alanlarda bulunan tüm bitkilerin toprak altı ve toprak üstü biyomaslarının hasat edilmesi durumunda bu bitkilerin biyogaza çevrilme potansiyelleri 0,1398 ile 1,6255 m³ arasında değişebileceği tespit edilmiştir. Bu bitkilerden elde edilebilecek toplam metan miktarı ise 0,1273 ile 1,4801 m³ arasındadır. Bitkilerin biyogaz ve metana çevrilmesi durumunda bu gazların yakılması ile birlikte birim alan (2 m²) ve birim hacimde (1,2 m³) üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı 0,489 ile 5,689 kWh arasında değişebilir. Son olarak bitkilerin yakılması sonucunda ortaya çıkabilecek enerji potansiyellerinin 4,58 ile 53,28 MJ arasında olabileceği düşünülmektedir. Bu değerlerin birim alan (2 m²) ve birim hacimde (1,2 m³) büyük yapay sulak alan sistemler kurulması durumunda hektar⁻¹ 5 ay⁻¹ bazında modellenmesi ayrıca Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Yapay sulak alan sistemlerinden hasat edilen bitki biyomaslarından ve modelleme sonucu elde edilebilecek biyogaz (m³), metan (m³), elektrik (kWh) ve enerji (MJ) potansiyelleri

| | | Biyogaz (m ³) | Metan (m ³) | Elektrik (kWh) | Enerji (MJ) | Biyogaz (m ³ hektar ⁻¹ 5 ay ⁻¹) | Metan (m ³ hektar ⁻¹ 5 ay ⁻¹) | Elektrik (kWh hektar ⁻¹ 5 ay ⁻¹) | Enerji (MJ hektar ⁻¹ 5 ay ⁻¹) |
|---------------|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|---|---|---|--|
| YSA 1 | <i>T.A.B</i> | 0,5755 | 0,5240 | 2,014 | 18,86 | 1151 | 1048 | 4028 | 37733 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,2868 | 0,2612 | 1,004 | 9,404 | 573 | 522 | 2008 | 18808 |
| | <i>T.B</i> | 0,8624 | 0,7853 | 3,018 | 28,27 | 1724 | 1570 | 6036 | 56542 |
| YSA 2 | <i>T.A.B</i> | 0,9775 | 0,8901 | 3,421 | 32,04 | 1955 | 1780 | 6842 | 64090 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,6479 | 0,5900 | 2,267 | 21,24 | 1295 | 1180 | 4535 | 42483 |
| | <i>T.B</i> | 1,6255 | 1,4801 | 5,689 | 53,28 | 3251 | 2960 | 11378 | 106573 |
| YSA 3 | <i>T.A.B</i> | 0,5981 | 0,5446 | 2,093 | 19,6 | 1196 | 1089 | 4187 | 39217 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,3272 | 0,2980 | 1,145 | 10,7 | 654 | 569 | 2290 | 21456 |
| | <i>T.B</i> | 0,9254 | 0,8426 | 3,239 | 30,33 | 1850 | 1685 | 6478 | 60673 |
| YSA 4 | <i>T.A.B</i> | 0,3291 | 0,2997 | 1,152 | 10,79 | 658 | 599 | 2304 | 21580 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,3002 | 0,2733 | 1,050 | 9,84 | 600 | 546 | 2101 | 19683 |
| | <i>T.B</i> | 0,6293 | 0,5731 | 2,202 | 20,63 | 1258 | 1146 | 4405 | 41264 |
| YSA 5 | <i>T.A.B</i> | 0,5139 | 0,5120 | 1,798 | 16,84 | 1027 | 935 | 3597 | 33693 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,3985 | 0,3807 | 1,395 | 13,06 | 797 | 725 | 2790 | 26132 |
| | <i>T.B</i> | 0,9124 | 0,8928 | 3,193 | 29,91 | 1824 | 1661 | 6387 | 59825 |
| YSA 7 | <i>T.A.B</i> | 0,9945 | 0,9056 | 3,480 | 32,60 | 1989 | 1811 | 6961 | 65204 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,4320 | 0,3934 | 1,512 | 14,16 | 864 | 786 | 3024 | 28329 |
| | <i>T.B</i> | 1,4266 | 1,2990 | 4,993 | 46,76 | 2853 | 2598 | 9986 | 93533 |
| YSA 8 | <i>T.A.B</i> | 0,3489 | 0,3177 | 1,221 | 11,43 | 687 | 635 | 2442 | 22878 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,2247 | 0,2046 | 0,786 | 7,36 | 449 | 409 | 1573 | 14735 |
| | <i>T.B</i> | 0,5737 | 0,5224 | 2,007 | 18,80 | 1147 | 1044 | 4015 | 37613 |
| YSA 9 | <i>T.A.B</i> | 0,0755 | 0,0687 | 0,264 | 2,47 | 151 | 137 | 528 | 4951 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,0643 | 0,0586 | 0,225 | 2,11 | 128 | 117 | 450 | 4220 |
| | <i>T.B</i> | 0,1398 | 0,1273 | 0,489 | 4,58 | 279 | 254 | 979 | 9171 |
| YSA 10 | <i>T.A.B</i> | 0,0212 | 0,0193 | 0,074 | 0,697 | 42 | 38 | 148 | 1394 |
| | <i>T.Ü.B</i> | 0,3954 | 0,3600 | 1,384 | 12,96 | 790 | 720 | 2768 | 25926 |
| | <i>T.B</i> | 0,4167 | 0,3794 | 1,458 | 13,66 | 833 | 758 | 2917 | 27321 |

Elde edilen sonuçlara göre, üzerindeki bitkilerin hasat edilmesi durumunda en yüksek biyogaza çevrilme potansiyeli olan sistemin 1,6255 m³ ile YSA 2’de olduğu belirlenmiştir. En düşük potansiyele sahip sistem ise 0.1398 ile YSA 9’da tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen değerlerin birim alan ve birim zamana göre modellenmesi sonucunda ise bitki biyomaslarının biyogaza çevrilme potansiyeli en yüksek olan sistemin 3251 m³ ile YSA 2’de olan bitkilerin, en düşük biyogaza çevrilme potansiyeli olan sistemin ise 279 m³ ile YSA 9 olacağı belirlenmiştir.

3.3.4. Bitki örneklerindeki Bor ve diğer elementlerin konsantrasyonları

Yapay sulak alan sitemlerinde bulunan deney grubu bitkileri ile B ile kirlenmemiş ortamda yetiştirilen ve kontrol grubu olarak kullanılan bitki örneklerine ait başta B olmak üzere diğer element konsantrasyonları standart sapmaları (\pm) ile birlikte aşağıdaki çizelgelerde görülmektedir.

Çizelge 3.4. Yapay sulak alan 1’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B (mg kg ⁻¹) | N (%) | K (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) | Ca (mg kg ⁻¹) | Mg (mg kg ⁻¹) |
|------------------------|--------|------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>T. latifolia</i> | Yaprak | YSA ₁ | 458,7 \pm 142,1 | 0,55 \pm 0,14 | 2040 \pm 255,2 | 2167,7 \pm 263 | 5378 \pm 1231 | 1766 \pm 21 |
| | | Kontrol | 144,5 \pm 21 | 0,41 \pm 0,08 | 1643 \pm 466 | 2412 \pm 857 | 4905 \pm 782 | 1334 \pm 614 |
| | Gövde | YSA ₁ | 224,6 \pm 83,7 | 0,47 \pm 0,28 | 3217 \pm 357 | 2534 \pm 468 | 2550 \pm 1529 | 1885 \pm 423 |
| | | Kontrol | 164,1 \pm 88 | 0,76 \pm 0,06 | 3470 \pm 434 | 2406 \pm 389 | 6288 \pm 459 | 2734 \pm 567 |
| | Kök | YSA ₁ | 233,0 \pm 92,7 | 0,47 \pm 0,3 | 3405 \pm 143 | 3599 \pm 585 | 4181 \pm 1176 | 2469 \pm 255 |
| | | Kontrol | 68,7 \pm 52 | 0,31 \pm 0,2 | 3624 \pm 356 | 3267 \pm 298 | 1787 \pm 741 | 1145 \pm 569 |
| <i>T. angustifolia</i> | Yaprak | YSA ₁ | 354,51 \pm 87,7 | 0,45 \pm 0,13 | 1514 \pm 410,4 | 2538 \pm 525 | 6638,4 \pm 356 | 2276 \pm 169 |
| | | Kontrol | 469,7 \pm 134 | 0,49 \pm 0,06 | 2063 \pm 10 | 2189 \pm 347 | 9838 \pm 915 | 3784 \pm 417 |
| | Gövde | YSA ₁ | 269,18 \pm 81,7 | 0,85 \pm 0,35 | 3134 \pm 119,6 | 2354 \pm 702 | 4054 \pm 1071 | 2334 \pm 200 |
| | | Kontrol | 293,9 \pm 87 | 1,15 \pm 0,2 | 3282 \pm 355 | 2080 \pm 436 | 4392 \pm 656 | 3003 \pm 910 |
| | Kök | YSA ₁ | 177,1 \pm 84,8 | 0,73 \pm 0,09 | 3357,1 \pm 238 | 2829 \pm 470 | 3331 \pm 592 | 2662 \pm 227 |
| | | Kontrol | 227 \pm 78 | 0,88 \pm 0,3 | 3254 \pm 924 | 2491 \pm 563 | 5856 \pm 310 | 3127 \pm 455 |
| <i>P. australis</i> | Yaprak | YSA ₁ | 251,5 \pm 128 | 0,29 \pm 0,02 | 1965,6 \pm 832 | 1522 \pm 624 | 2564 \pm 356 | 1535 \pm 230 |
| | | Kontrol | 187,7 \pm 25 | 0,84 \pm 0,06 | 1305 \pm 245 | 731 \pm 439 | 3010 \pm 367 | 1788 \pm 410 |
| | Gövde | YSA ₁ | 307,0 \pm 68,0 | 0,17 \pm 0,06 | 1925,6 \pm 832 | 1160 \pm 427 | 1018 \pm 581 | 892 \pm 527 |
| | | Kontrol | 229,5 \pm 84 | 0,24 \pm 0,2 | 2275 \pm 257 | 395 \pm 182 | 535 \pm 345 | 566 \pm 45 |
| | Kök | YSA ₁ | 259 \pm 46 | 0,42 \pm 0,03 | 3070,1 \pm 303 | 1369 \pm 417 | 1730 \pm 1844 | 1787 \pm 890 |
| | | Kontrol | 201,5 \pm 59 | 0,33 \pm 0,3 | 3481 \pm 678 | 467 \pm 147 | 1762 \pm 415 | 1227 \pm 675 |

Çizelge 3.5. Yapay sulak alan 2’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B | N | K | Na | Ca | Mg |
|------------------------|--------|------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | (mg kg ⁻¹) | (%) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) |
| <i>T. latifolia</i> | Yaprak | YSA ₂ | 570,5 ± 52,6 | 0,51 ± 0,18 | 1890 ± 214 | 2202 ± 313 | 6081 ± 805 | 2456 ± 269 |
| | | Kontrol | 144,5 ± 21 | 0,41 ± 0,08 | 1643 ± 466 | 2412 ± 857 | 4905 ± 782 | 1334 ± 614 |
| | Gövde | YSA ₂ | 417,7 ± 100,6 | 0,41 ± 0,15 | 3851 ± 118 | 3422 ± 505 | 5101 ± 2894 | 2860 ± 563 |
| | | Kontrol | 164,1 ± 88 | 0,76 ± 0,06 | 3470 ± 434 | 2406 ± 389 | 6288 ± 459 | 2860 ± 563 |
| | Kök | YSA ₂ | 267,6 ± 143 | 0,56 ± 0,22 | 3576 ± 192 | 3577 ± 526 | 3689 ± 840 | 2693 ± 455 |
| | | Kontrol | 68,7 ± 52 | 0,31 ± 0,2 | 3624 ± 356 | 3267 ± 298 | 1787 ± 741 | 1145 ± 569 |
| <i>J. gerardii</i> | Yaprak | YSA ₂ | 578,6 ± 194,1 | 0,62 ± 0,17 | 2534 ± 818 | 1670 ± 520 | 3519 ± 1481 | 3226 ± 683 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 33 | 0,89 ± 0,06 | 3377 ± 710 | 988 ± 234 | 1566 ± 512 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₂ | 647,7 ± 169 | 0,82 ± 0,33 | 2217 ± 599 | 1175 ± 261 | 4623 ± 1574 | 4006 ± 831 |
| | | Kontrol | 243,4 ± 81 | 0,77 ± 0,2 | 2942 ± 568 | 1358 ± 496 | 6496 ± 571 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₂ | 373,2 ± 186,6 | 0,47 ± 0,08 | 2534 ± 323 | 3022 ± 513 | 8710 ± 3474 | 7588 ± 389 |
| | | Kontrol | 312,9 ± 59 | 0,37 ± 0,3 | 2822 ± 294 | 2373 ± 683 | 4361 ± 1257 | 3127 ± 455 |
| <i>T. angustifolia</i> | Yaprak | YSA ₂ | 382,8 ± 69,2 | 0,8 ± 0,74 | 1514 ± 410,4 | 2583 ± 392 | 9523 ± 2034 | 2655 ± 1087 |
| | | Kontrol | 469,7 ± 134 | 0,49 ± 0,06 | 2063 ± 10 | 2189 ± 347 | 9838 ± 915 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₂ | 182,5 ± 81,7 | 0,99 ± 0,35 | 3134 ± 119,6 | 2102 ± 211 | 3462 ± 428 | 1872 ± 387 |
| | | Kontrol | 293,9 ± 87 | 1,15 ± 0,2 | 3282 ± 355 | 2080 ± 436 | 4392 ± 656 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₂ | 300,5 ± 161,5 | 0,71 ± 0,15 | 3357,1 ± 238 | 2583 ± 392 | 5055 ± 2453 | 2882 ± 1268 |
| | | Kontrol | 227 ± 78 | 0,88 ± 0,3 | 3254 ± 924 | 2491 ± 563 | 5856 ± 310 | 3127 ± 455 |

Çizelge 3.6. Yapay sulak alan 3’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B | N | K | Na | Ca | Mg |
|---------------------|--------|------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | (mg kg ⁻¹) | (%) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) |
| <i>P. australis</i> | Yaprak | YSA ₃ | 129,4 ± 104 | 0,48 ± 0,08 | 2587 ± 281 | 936 ± 477 | 2818 ± 735 | 1401 ± 169 |
| | | Kontrol | 187,7 ± 25 | 0,84 ± 0,06 | 1305 ± 245 | 731 ± 439 | 3010 ± 367 | 1788 ± 410 |
| | Gövde | YSA ₃ | 285,3 ± 22 | 0,37 ± 0,08 | 1889 ± 217 | 1032 ± 243 | 786 ± 359 | 665 ± 188 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 84 | 0,83 ± 0,14 | 2275 ± 257 | 395 ± 182 | 535 ± 345 | 566 ± 45 |
| | Kök | YSA ₃ | 58,8 ± 24 | 0,74 ± 0,1 | 2931 ± 328 | 1006 ± 252 | 477 ± 1519 | 585 ± 218 |
| | | Kontrol | 201,5 ± 59 | 0,33 ± 0,3 | 3481 ± 678 | 467 ± 147 | 1762 ± 415 | 1227 ± 675 |
| <i>J. gerardii</i> | Yaprak | YSA ₃ | 361,3 ± 85 | 0,8 ± 0,16 | 3500 ± 162 | 2103 ± 325 | 1460 ± 464 | 1568 ± 289 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 33 | 0,89 ± 0,06 | 3377 ± 710 | 988 ± 234 | 1566 ± 512 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₃ | 600,7 ± 298 | 0,58 ± 0,1 | 2957 ± 218 | 2036 ± 394 | 3744 ± 1216 | 2531 ± 325 |
| | | Kontrol | 243,4 ± 81 | 0,77 ± 0,2 | 2942 ± 568 | 1358 ± 496 | 6496 ± 571 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₃ | 430,4 ± 144 | 0,58 ± 0,18 | 2141 ± 587 | 2593 ± 700 | 4238 ± 720 | 2713 ± 555 |
| | | Kontrol | 312,9 ± 59 | 0,37 ± 0,3 | 2822 ± 294 | 2373 ± 683 | 4361 ± 1257 | 3127 ± 455 |
| <i>T. latifolia</i> | Yaprak | YSA ₃ | 311,3 ± 189 | 0,44 ± 0,05 | 1920 ± 860 | 2250 ± 722 | 6674 ± 1367 | 1562 ± 508 |
| | | Kontrol | 144,5 ± 21 | 0,41 ± 0,08 | 1643 ± 466 | 2412 ± 857 | 4905 ± 782 | 1334 ± 614 |
| | Gövde | YSA ₃ | 253,3 ± 124 | 0,59 ± 0,02 | 3241 ± 556 | 2928 ± 715 | 4980 ± 1019 | 2453 ± 580 |
| | | Kontrol | 164,1 ± 88 | 0,76 ± 0,06 | 3470 ± 434 | 2406 ± 389 | 6288 ± 459 | 2860 ± 563 |
| | Kök | YSA ₃ | 173 ± 133 | 0,49 ± 0,27 | 3325 ± 307 | 3333 ± 816 | 3123 ± 716 | 2296 ± 376 |
| | | Kontrol | 68,7 ± 52 | 0,88 ± 0,3 | 3624 ± 356 | 3267 ± 298 | 1787 ± 741 | 1145 ± 569 |

Çizelge 3.7. Yapay sulak alan 4’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B | N | K | Na | Ca | Mg |
|------------------------|--------|------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | (mg kg ⁻¹) | (%) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) |
| <i>P. australis</i> | Yaprak | YSA ₄ | 251,09 ± 122 | 0,37 ± 0,03 | 1536 ± 193 | 985 ± 288 | 2854 ± 498 | 1535 ± 230 |
| | | Kontrol | 187,7 ± 25 | 0,84 ± 0,06 | 1305 ± 245 | 731 ± 439 | 3010 ± 367 | 1788 ± 410 |
| | Gövde | YSA ₄ | 233,5 ± 104 | 0,28 ± 0,14 | 1253 ± 268 | 844 ± 288 | 822 ± 440 | 892 ± 527 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 84 | 0,24 ± 0,2 | 2275 ± 257 | 395 ± 182 | 535 ± 345 | 566 ± 45 |
| | Kök | YSA ₄ | 232 ± 66 | 0,55 ± 0,2 | 1592 ± 28 | 1575 ± 689 | 3355 ± 1519 | 1787 ± 890 |
| | | Kontrol | 201,5 ± 59 | 0,33 ± 0,3 | 3481 ± 678 | 467 ± 147 | 1762 ± 415 | 1227 ± 675 |
| <i>J. gerardii</i> | Yaprak | YSA ₄ | 169,2 ± 144 | 0,69 ± 0,04 | 2341 ± 311 | 1714 ± 279 | 1679 ± 398 | 1500 ± 146 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 33 | 0,3 ± 0,06 | 3377 ± 710 | 988 ± 234 | 1566 ± 512 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₄ | 798,1 ± 307 | 0,58 ± 0,07 | 1283 ± 311 | 1513 ± 536 | 7102 ± 3801 | 4266 ± 1675 |
| | | Kontrol | 243,4 ± 81 | 0,77 ± 0,2 | 2942 ± 568 | 1358 ± 496 | 6496 ± 571 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₄ | 280,3 ± 144 | 0,49 ± 0,24 | 1273 ± 119 | 2534 ± 877 | 5673 ± 2588 | 3184 ± 1096 |
| | | Kontrol | 312,9 ± 59 | 0,37 ± 0,3 | 2822 ± 294 | 2373 ± 683 | 4361 ± 1257 | 3127 ± 455 |
| <i>T. angustifolia</i> | Yaprak | YSA ₄ | 446,5 ± 224 | 0,44 ± 0,2 | 1195 ± 444 | 2833 ± 998 | 7267 ± 1769 | 1949 ± 692 |
| | | Kontrol | 469,7 ± 134 | 0,49 ± 0,06 | 2063 ± 804 | 2189 ± 347 | 9838 ± 915 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₄ | 183,6 ± 136 | 0,62 ± 0,4 | 2010 ± 769 | 2854 ± 803 | 4462 ± 1564 | 2153 ± 508 |
| | | Kontrol | 293,9 ± 87 | 1,15 ± 0,2 | 3282 ± 355 | 2080 ± 436 | 4392 ± 656 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₄ | 230,2 ± 96 | 0,68 ± 0,21 | 1655 ± 35 | 4040 ± 478 | 7007 ± 2828 | 3245 ± 1230 |
| | | Kontrol | 227 ± 78 | 0,88 ± 0,3 | 3254 ± 924 | 2491 ± 563 | 5856 ± 310 | 3127 ± 455 |

Çizelge 3.8. Yapay sulak alan 5’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B | N | K | Na | Ca | Mg |
|------------------------|--------|------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | (mg kg ⁻¹) | (%) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) |
| <i>P. australis</i> | Yaprak | YSA ₅ | 277,5 ± 188 | 0,29 ± 0,2 | 3930 ± 640 | 592 ± 287 | 2019 ± 296 | 1440 ± 227 |
| | | Kontrol | 187,7 ± 25 | 0,84 ± 0,06 | 1305 ± 245 | 731 ± 439 | 3010 ± 367 | 1788 ± 410 |
| | Gövde | YSA ₅ | 96,2 ± 71 | 0,53 ± 0,36 | 2733 ± 299 | 557 ± 402 | 673 ± 301 | 651 ± 154 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 84 | 0,83 ± 0,14 | 2275 ± 257 | 395 ± 182 | 535 ± 345 | 566 ± 45 |
| | Kök | YSA ₅ | 200,8 ± 61 | 0,63 ± 0,17 | 2933 ± 750 | 551 ± 287 | 1652 ± 513 | 1397 ± 395 |
| | | Kontrol | 201,5 ± 59 | 0,33 ± 0,3 | 3481 ± 678 | 467 ± 147 | 1762 ± 415 | 1227 ± 675 |
| <i>J. gerardii</i> | Yaprak | YSA ₅ | 148,7 ± 83 | 0,8 ± 0,26 | 3316 ± 272 | 1884 ± 171 | 1348 ± 233 | 1616 ± 683 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 33 | 0,89 ± 0,06 | 3377 ± 710 | 988 ± 234 | 1566 ± 512 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₅ | 590,6 ± 287 | 0,67 ± 0,16 | 2991 ± 569 | 2607 ± 682 | 2928 ± 1263 | 4393 ± 3834 |
| | | Kontrol | 243,4 ± 81 | 0,77 ± 0,2 | 2942 ± 568 | 1358 ± 496 | 6496 ± 571 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₅ | 334,4 ± 189 | 0,35 ± 0,04 | 2572 ± 402 | 3308 ± 434 | 4606 ± 2670 | 3342 ± 1013 |
| | | Kontrol | 312,9 ± 59 | 0,37 ± 0,3 | 2822 ± 294 | 2373 ± 683 | 4361 ± 1257 | 3127 ± 455 |
| <i>T. latifolia</i> | Yaprak | YSA ₅ | 312 ± 79 | 0,43 ± 0,08 | 2232 ± 753 | 2187 ± 546 | 7528 ± 2376 | 2218 ± 180 |
| | | Kontrol | 144,5 ± 21 | 0,41 ± 0,08 | 1643 ± 466 | 2412 ± 857 | 4905 ± 782 | 1334 ± 614 |
| | Gövde | YSA ₅ | 108,4 ± 53 | 0,69 ± 0,21 | 3223 ± 65 | 2640 ± 1070 | 2573 ± 1561 | 1759 ± 758 |
| | | Kontrol | 164,1 ± 88 | 0,76 ± 0,06 | 3470 ± 434 | 2406 ± 389 | 6288 ± 459 | 2860 ± 563 |
| | Kök | YSA ₅ | 153,4 ± 120 | 0,45 ± 0,16 | 3176 ± 522 | 3216 ± 641 | 2007 ± 875 | 1728 ± 458 |
| | | Kontrol | 68,7 ± 52 | 0,31 ± 0,2 | 3624 ± 356 | 3267 ± 298 | 1787 ± 741 | 1145 ± 569 |
| <i>T. angustifolia</i> | Yaprak | YSA ₅ | 385 ± 129 | 0,38 ± 0,03 | 1641 ± 493 | 2156 ± 1070 | 7265 ± 1757 | 2529 ± 623 |
| | | Kontrol | 469,7 ± 134 | 0,49 ± 0,06 | 2063 ± 10 | 2189 ± 347 | 9838 ± 915 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₅ | 173,6 ± 83 | 0,94 ± 0,26 | 3291 ± 93 | 2354 ± 579 | 4166 ± 696 | 2373 ± 215 |
| | | Kontrol | 293,9 ± 87 | 1,15 ± 0,2 | 3282 ± 355 | 2080 ± 436 | 4392 ± 656 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₅ | 238,2 ± 151 | 0,59 ± 0,11 | 3395 ± 264 | 2525 ± 731 | 2763 ± 261 | 2199 ± 500 |
| | | Kontrol | 227 ± 78 | 0,88 ± 0,3 | 3254 ± 924 | 2491 ± 563 | 5856 ± 310 | 3127 ± 455 |

Çizelge 3.9. Yapay sulak alan 7’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B (mg kg ⁻¹) | N (%) | K (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) | Ca (mg kg ⁻¹) | Mg (mg kg ⁻¹) |
|---------------------|--------|------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>T. latifolia</i> | Yaprak | YSA ₇ | 489,9±222 | 0,50 ± 0,15 | 668,7± 318 | 3005 ± 667 | 7998 ± 1786 | 1810 ± 494 |
| | | Kontrol | 144,5 ± 21 | 0,41 ± 0,08 | 1643 ± 466 | 2412 ± 857 | 4905 ± 782 | 1334 ± 614 |
| | Gövde | YSA ₇ | 290,4 ± 172 | 0,53 ± 0,16 | 2413 ± 946 | 3746 ± 351 | 10211 ± 2485 | 2574 ± 889 |
| | | Kontrol | 164,1 ± 88 | 0,76 ± 0,06 | 3470 ± 434 | 2406 ± 389 | 6288 ± 459 | 2860 ± 563 |
| | Kök | YSA ₇ | 318,8 ± 183 | 0,48 ± 0,11 | 2432 ± 948 | 4039 ± 676 | 6996 ± 875 | 2573 ± 876 |
| | | Kontrol | 68,7 ± 52 | 0,31 ± 0,2 | 3624 ± 356 | 3267 ± 298 | 4312 ± 741 | 1145 ± 569 |

Çizelge 3.10. Yapay sulak alan 8’de bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B (mg kg ⁻¹) | N (%) | K (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) | Ca (mg kg ⁻¹) | Mg (mg kg ⁻¹) |
|------------------------|--------|------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>T. angustifolia</i> | Yaprak | YSA ₈ | 517 ± 251 | 0,34 ± 0,1 | 475,5 ± 220 | 2748 ± 473 | 8860 ± 3707 | 2451 ± 855 |
| | | Kontrol | 469,7 ± 134 | 0,49 ± 0,06 | 2063 ± 10 | 2189 ± 347 | 9838 ± 915 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₈ | 329,3 ± 117 | 0,73 ± 0,31 | 1841 ± 765 | 6086 ± 210 | 8720 ± 5774 | 2759 ± 639 |
| | | Kontrol | 293,9 ± 87 | 1,15 ± 0,2 | 3282 ± 355 | 2080 ± 436 | 4392 ± 656 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₈ | 381,9 ± 127 | 0,59 ± 0,24 | 2066 ± 785 | 3555 ± 720 | 6547 ± 3521 | 2741 ± 1089 |
| | | Kontrol | 227 ± 78 | 0,88 ± 0,3 | 3254 ± 924 | 2491 ± 563 | 5856 ± 310 | 3127 ± 455 |

Çizelge 3.11. Yapay sulak alan 9’da bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B (mg kg ⁻¹) | N (%) | K (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) | Ca (mg kg ⁻¹) | Mg (mg kg ⁻¹) |
|---------------------|--------|------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>P. australis</i> | Yaprak | YSA ₉ | 242,5 ± 100 | 0,71 ± 0,56 | 3930 ± 640 | 592 ± 287 | 4229 ± 2277 | 2500 ± 2052 |
| | | Kontrol | 187,7 ± 25 | 0,84 ± 0,06 | 1305 ± 245 | 731 ± 439 | 3010 ± 367 | 1788 ± 410 |
| | Gövde | YSA ₉ | 175,4 ± 125 | 0,62 ± 0,15 | 2733 ± 299 | 557 ± 402 | 2599 ± 2282 | 937 ± 537 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 84 | 0,83 ± 0,14 | 2275 ± 257 | 395 ± 182 | 535 ± 345 | 566 ± 45 |
| | Kök | YSA ₉ | 153,2 ± 98 | 0,72 ± 0,17 | 2933 ± 750 | 551 ± 287 | 12223 ± 8271 | 1803 ± 599 |
| | | Kontrol | 201,5 ± 59 | 0,33 ± 0,3 | 3481 ± 678 | 467 ± 147 | 1762 ± 415 | 1227 ± 675 |

Çizelge 3.12. Yapay sulak alan 10’da bulunan deney grubu ve kontrol grubu bitkilerinin element içerikleri

| Bitki | Organ | | B (mg kg ⁻¹) | N (%) | K (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) | Ca (mg kg ⁻¹) | Mg (mg kg ⁻¹) |
|--------------------|--------|-------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>J. gerardii</i> | Yaprak | YSA ₁₀ | 469,7 ± 218 | 0,68 ± 0,22 | 2318 ± 908 | 2235 ± 656 | 2632 ± 1294 | 2125 ± 460 |
| | | Kontrol | 229,5 ± 33 | 0,89 ± 0,06 | 3377 ± 710 | 988 ± 234 | 1566 ± 512 | 3784 ± 417 |
| | Gövde | YSA ₁₀ | 751,6 ± 391 | 0,65 ± 0,13 | 1525 ± 812 | 1889 ± 777 | 8026 ± 7539 | 2472 ± 450 |
| | | Kontrol | 243,4 ± 81 | 0,77 ± 0,2 | 2942 ± 568 | 1358 ± 496 | 6496 ± 571 | 3003 ± 910 |
| | Kök | YSA ₁₀ | 446 ± 163 | 0,52 ± 0,14 | 1826 ± 731 | 3509 ± 838 | 28746 ± 25574 | 3989 ± 1427 |
| | | Kontrol | 312,9 ± 59 | 0,37 ± 0,3 | 2822 ± 294 | 2373 ± 683 | 4361 ± 1257 | 3127 ± 455 |

Elde edilen sonuçlara göre, genellikle bitkilerin toprak üstü kısımlarının toprak üstü kısımlara göre daha yüksek B konsantrasyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yapay sulak alanlardan hasat edilen *T.latifolia* türüne bakıldığında en yüksek B konsantrasyonu, 1257 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 2’de bulunan bitki bireylerinde, en düşük B konsantrasyonu ise 573 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 5’de bulunan *T.latifolia* bitkilerinde bulunmuştur. Ayrıca *T.latifolia* bitkilerin yapraklarındaki B konsantrasyonu 311 mg kg^{-1} ile 570 mg kg^{-1} arasında değişirken gövdelerindeki B konsantrasyonu 108 mg kg^{-1} ile 417 mg kg^{-1} arasında ve köklerdeki B konsantrasyonu 153 mg kg^{-1} ile 318 mg kg^{-1} arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yapay sulak alanlardan elde edilen *T.angustifolia* türüne bakıldığında ise en yüksek B konsantrasyonu, 1227 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 8’de bulunan bitki bireylerinde, en düşük B konsantrasyonu ise 796 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 5’de belirlenmiştir. Araştırma periyodu sonunda *T.angustifolia* bitkisinin yapraklarındaki B konsantrasyonunun 354 mg kg^{-1} ile 517 mg kg^{-1} arasında değiştiği, buna karşın gövdelerindeki B konsantrasyonu 173 mg kg^{-1} ile 329 mg kg^{-1} arasında köklerdeki B konsantrasyonu ise 177 mg kg^{-1} ile 381 mg kg^{-1} arasında değiştiği tespit edilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde, yapay sulak alanlardan elde edilen *P.australis* bitkisine bakıldığında, en yüksek B konsantrasyonu 917 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 1’de bulunan türlerde, en düşük B konsantrasyonu ise 472 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 3’de bulunan *P.australis* bireylerine ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca *P.australis* bitkilerin yapraklarındaki B konsantrasyonunun araştırma periyodu sonunda 311 mg kg^{-1} ile 570 mg kg^{-1} arasında değiştiği, gövdelerindeki B konsantrasyonu 96 mg kg^{-1} ile 307 mg kg^{-1} arasında ve köklerindeki B konsantrasyonu ise 58 mg kg^{-1} ile 259 mg kg^{-1} arasında değiştiği tespit edilmiştir. Son olarak *J.gerardii* türüne bakıldığında, en yüksek B konsantrasyonu 1664 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 10’da bulunan bitki bireylerinde, en düşük B konsantrasyonu ise 1072 mg kg^{-1} ile yapay sulak alan 5’de olduğu belirlenmiştir. Yapraklardaki B konsantrasyonu 148 mg kg^{-1} ile 578 mg kg^{-1} arasında değiştiği, buna karşın gövdelerindeki B konsantrasyonu 590 mg kg^{-1} ile 798 mg kg^{-1} arasında ve köklerdeki B konsantrasyonu 280 mg kg^{-1} ile 446 mg kg^{-1} arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Aynı zamanda tüm sulak alanlardaki deney grubu bitkilerinin, araştırma periyodu sonunda kontrol grubundan hasat edilen bitkilere göre daha yüksek miktarda B içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin yapraklarında tespit edilen B konsantrasyonu ise, diğer bitki organlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. *J.gerardii* türünde ise en yüksek B konsantrasyonu bitkilerin gövde kısmında bulunmuştur. Deney grubunu oluşturan *P. australis* bitkilerine bakıldığında, en yüksek B konsantrasyonunun yaprak ve gövde organında, en düşük B konsantrasyonu ise kök organında bulunmuştur.

3.3.4. Bitkilerin Klorofil a+b miktarları

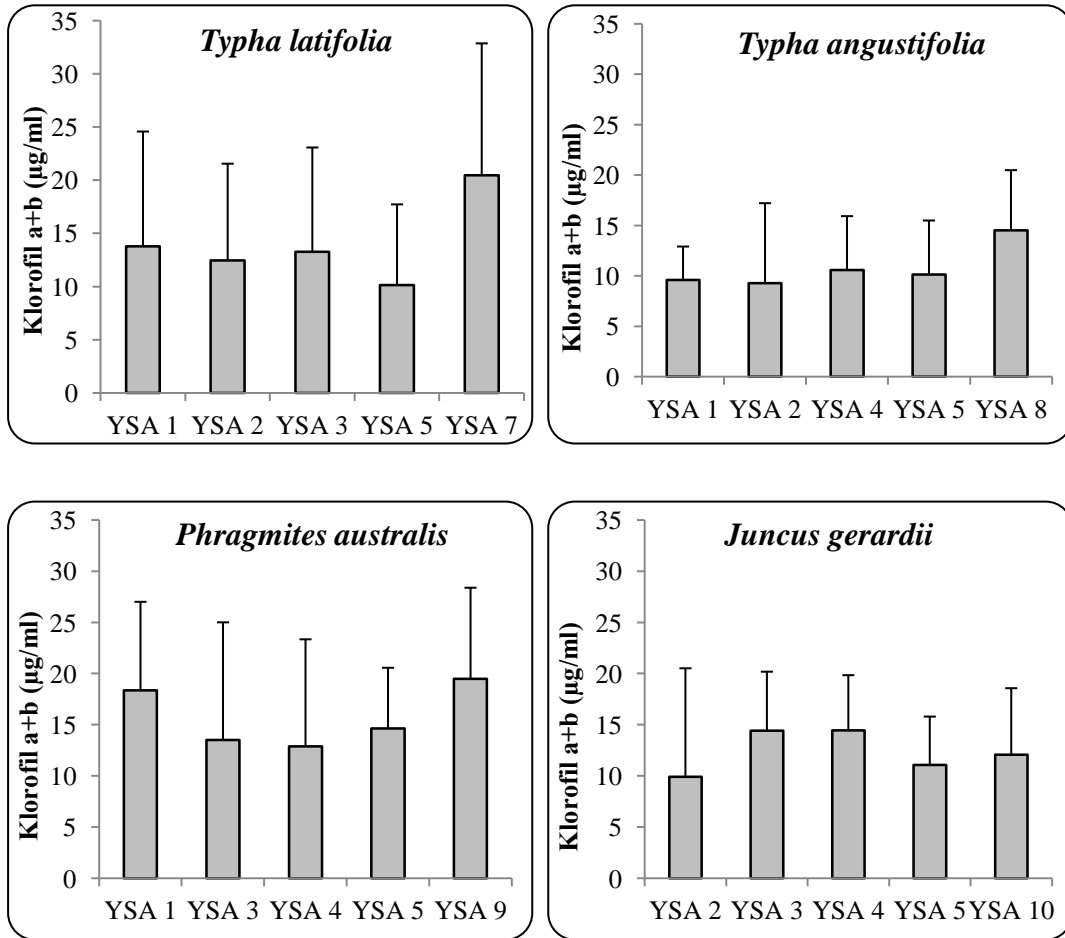
Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan sistemlerinden toplanan bitkilerin ortalama klorofil miktarları (Klorofil a+b) Çizelge 3.13’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.13. Yapay sulak alanlardan toplanan bitkilerin ortalama klorofil a+b miktarları

| | <i>Typha latifolia</i> | <i>Typha angustifolia</i> | <i>Juncus gerardii</i> | <i>Phragmites australis</i> |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Toplam Klorofil a+b (mg/μl) | Toplam Klorofil a+b (mg/μl) | Toplam Klorofil a+b (mg/μl) | Toplam Klorofil a+b (mg/μl) |
| YSA 1 | 13,77±10,8 | 9,59±3,32 | X | 18,36±8,64 |
| YSA 2 | 12,4±9,1 | 9,28±7,92 | 9,89±10,6 | X |
| YSA 3 | 13,2±9,81 | X | 14,4±5,76 | 13,5±11,4 |
| YSA 4 | X | 10,5±5,33 | 14,4±5,4 | 12,8±10,4 |
| YSA 5 | 10,1±7,58 | 10,1±5,35 | 11,06 | 14,6±5,9 |
| YSA 7 | 20,14±12,3 | X | X | X |
| YSA 8 | X | 14,5±5,97 | X | X |
| YSA 9 | X | X | X | 19,47±8,91 |
| YSA 10 | X | X | 12,06±6,5 | X |

Elde edilen sonuçlara göre YSA 1’de en yüksek klorofil a+b miktarı *P.australis* bitkisinde tespit edilmişken, en düşük klorofil a+b miktarı *T.angustifolia* bitkisinde belirlenmiştir. YSA 2’e bakıldığında en yüksek klorofil a+b miktarı 12,4 mg/μl ile *T.latifolia* bitkisinde tespit edilmiştir. Sistem

içerisindeki diğer bitkilerin klorofil a+b miktarının nispeten aynı düzeyde olduğu belirlenmiştir. *P.australis*, *T.latifolia* ve *Juncus gerardii* bitkilerinin bir arada bulunduğu YSA 3’de en yüksek klorofil a+b konsantrasyonu 14,4 mg/µl ile *J.gerardii* bitkisinde tespit edilmiştir. Diğer bitkilerin klorofil a+b miktarının nispeten aynı düzeyde olduğu belirlenmiştir. YSA 4’e bakıldığında en yüksek klorofil a+b konsantrasyonu 14,4 mg/µl ile *J.gerardii* bitkisinde tespit edilmişken en düşük klorofil a+b konsantrasyonu ise 10,5 mg/µl ile *T.angustifolia* bitkisinde bulunmuştur. Tüm bitki türlerinin bir arada bulunduğu YSA 5’e baktığımızda en yüksek klorofil a+b miktarı 14,6 mg/µl ile *P.australis* bitkisinde tespit edilmişken, diğer bitkilerin klorofil miktarlarının ise nispeten aynı olduğu belirlenmiştir. Mono-kültür YSA’ların klorofil a+b miktarlarına bakıldığında en yüksek toplam klorofil miktarı 20,14 mg/µl ile *T.latifolia* bitkisinde tespit edilmişken, en düşük klorofil miktarı 12,06 mg/µl ile *J.gerardi* bitkisinde belirlenmiştir.



Şekil 3.50. Araştırma periyodu boyunca kullanılan bitki türlerinin ayrı yapay sulak alanlardaki ortalama klorofil (a+b) miktarları

Son olarak, her bir türün farklı yapay sulak alanlardaki en yüksek klorofil a+b miktarlarına bakıldığında *T.latifolia*'nın YSA 7'de, *T.angustifolia* türünün YSA 8'de, *P.australis* bitkisinin YSA 9'da ve *J.gerardii* bitkisinin ise YSA 3'de olduğu tespit edilmiştir.

3.3.5. Sediment örneklerinin analiz sonuçları

Yapay sulak alanlardan ve kontrol grubu örneklerinden araştırma periyodu sonunda toplanan sediment örneklerine ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.14'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bitkili ve kontrol yapay sulak alan sistemlerinden toplanan sediment örneklerindeki toplam B miktarları arasında önemli bir fark olmadığı ve ortalamada 15 ile 19 mg kg⁻¹ arasında değiştiği belirlenmiştir. En çok toplam B konsantrasyonu 19,25 mg kg⁻¹ ile YSA 7'de belirlenmişken, en az B 15,8 mg kg⁻¹ ile YSA 3'de tespit edilmiştir. Bor maden atıkları ile kirletilmemiş atık suyun uygulandığı kontrol sedimentindeki B konsantrasyonunun ise 5,75 mg kg⁻¹ olduğu belirlenmiştir. Sediment örneklerindeki ekstrakte edilebilir B miktarına bakıldığında ise yapay sulak alan sistemleri arasında önemli bir fark olmamakla birlikte en yüksek ekstrakte edilebilir B miktarı 4,56 ppm ile YSA 7'de en düşük ekstrakte edilebilir B miktarı ise YSA 2'de tespit edilmiştir. Kontrol sedimentindeki ekstrakte edilebilir B miktarının 0,644 ppm civarında olduğu bulunmuştur. Sediment örneklerinin diğer fiziksel ve kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında, bitkili yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerinin bitkisiz yapay sulak alan örneklerine göre bir takım farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Yüzde azot (%N) değerlerine bakıldığında en yüksek değer 0,066 ile YSA 8'de tespit edilirken en düşük %N 0,0309 ile YSA 6'da olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara sediment örnekleri arasında en yüksek fosfor (P) konsantrasyonu 100 ppm ile YSA 9'da bulunurken en düşük P konsantrasyonu 41 ppm ile YSA 8 de tespit edilmiştir. Bununla birlikte, makro ve mikro elementlere baktığımızda bitkili yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerinin, bitkisiz kontrol grubuna göre az miktarda element konsantrasyonuna sahip olduğu görülmektedir.

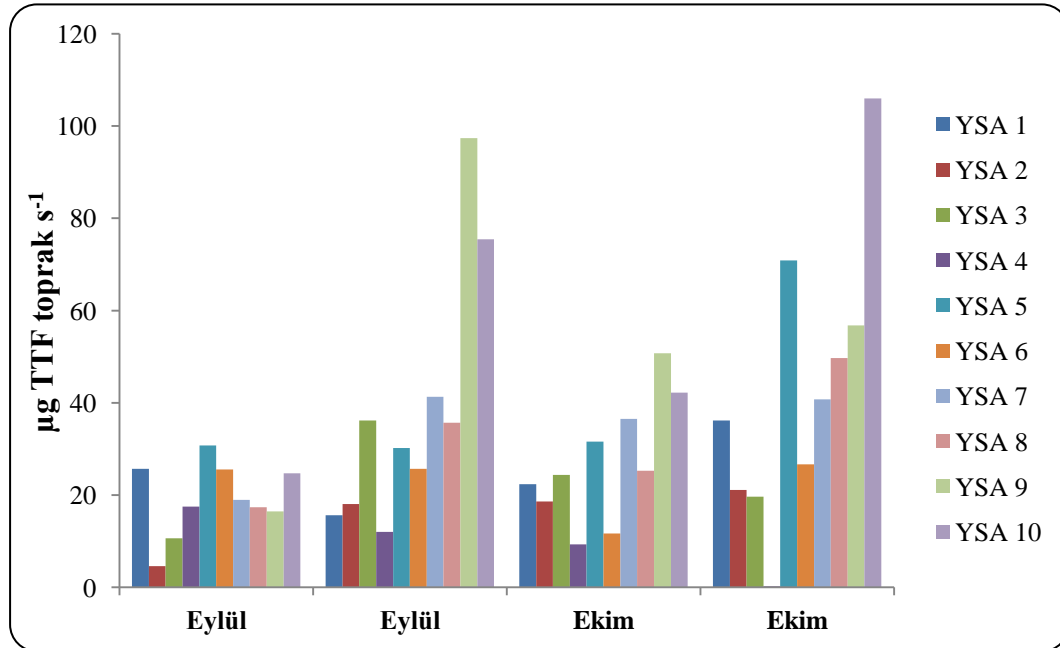
Çizelge 3.14. Yapay sulak alanlardan ve kontrol grubu örneklerinden araştırma periyodu sonunda toplanan sediment örneklerine ait fiziksel ve kimyasal analizleri

| Yapay Sulak Alan No | Toplam B (mg kg ⁻¹) | Ekstrakte edilebilir B (ppm) | N (%) | P (ppm) | Ca (mg kg ⁻¹) | Mg (mg kg ⁻¹) | Na (mg kg ⁻¹) | K (mg kg ⁻¹) | pH | CaCO ₃ (%) | Toprak Fiziği | | | |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|---------------|---------|---------|----------------|
| | | | | | | | | | | | Kum (%) | Kil (%) | Toz (%) | Toprak Bünyesi |
| 1 | 17,5 | 3,2 ± 1,4 | 0,0347 ± 0,04 | 75,2 | 3382 ± 661 | 1305 ± 236 | 86 ± 22 | 314 ± 45 | 8,08 ± 0,04 | 1,65 ± 1,2 | 90,16 | 6,84 | 3 | Kum |
| 2 | 15,8 | 2,04 ± 0,6 | 0,0324 ± 0,03 | 89,4 | 3341 ± 868 | 1404 ± 261 | 128 ± 15 | 1404 ± 261 | 8,08 ± 0,115 | 3,1 ± 1,3 | 91,8 | 6,84 | 0,36 | Kum |
| 3 | 15,65 | 3,8 ± 1,66 | 0,0330 ± 0,02 | 70,8 | 1641 ± 391 | 1602 ± 76 | 75 ± 58 | 141 ± 47 | 8,27 ± 0,18 | 1,7 ± 1,11 | 91,62 | 5,12 | 3,26 | Kum |
| 4 | 16,45 | 3,9 ± 2,14 | 0,0499 ± 0,02 | 84,3 | 3326 ± 2006 | 1377 ± 259 | 128 ± 35 | 1046 ± 291 | 8,26 ± 0,09 | 2,5 ± 1,01 | 92,62 | 5,84 | 1,54 | Kum |
| 5 | 16,15 | 3,07 ± 2,5 | 0,0576 ± 0,08 | 80,7 | 1869 ± 454 | 1726 ± 533 | 46 ± 13 | 148 ± 72 | 8,12 ± 0,21 | 1,5 ± 0,82 | 92,8 | 6,34 | 0,86 | Kum |
| 6 | 16,25 | 3,3 ± 0,11 | 0,0309 ± 0,01 | 91,7 | 4522 ± 1889 | 1544 ± 291 | 132 ± 21 | 1544 ± 291 | 7,89 ± 0,06 | 2,9 ± 1,8 | 92,8 | 5,84 | 1,36 | Kum |
| 7 | 19,25 | 4,56 ± 2,22 | 0,048 ± 0,024 | 49,9 | 26536 ± 4086 | 4617 ± 435 | 138 ± 4 | 545 ± 157 | 8,2 ± 0,03 | 5,5 ± 0,4 | 89,44 | 5,12 | 5,44 | Kum |
| 8 | 18,85 | 3,91 ± 1,48 | 0,066 ± 0,052 | 41,9 | 10353 ± 1344 | 1136 ± 91 | 92 ± 27 | 516 ± 132 | 8,17 ± 0,032 | 4,7 ± 1,1 | 87,44 | 4,4 | 8,16 | Kum |
| 9 | 18,25 | 2,05 ± 1,07 | 0,031 ± 0,013 | 110 | 8648 ± 1565 | 613 ± 71 | 74 ± 8 | 507 ± 92 | 8,14 ± 0,06 | 5,1 ± 0,5 | 85,44 | 6,4 | 8,16 | Kum |
| 10 | 17,24 | 4,47 ± 2,17 | 0,06 ± 0,067 | 71,2 | 8513 ± 998 | 910 ± 121 | 104 ± 19 | 486 ± 109 | 8,24 ± 0,09 | 5,2 ± 1,4 | 87,44 | 4,4 | 8,16 | Kum |
| Kontrol | 5,75 | 0,644 ± 0,13 | 0,0211 ± 0,02 | 61,6 | 4591 ± 412 | 477 ± 52 | 58 ± 11 | 44 ± 1,77 | 8,3 ± 0,14 | 4,88 ± 1,39 | 89,44 | 4,4 | 6,16 | Kum |

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek Ca konsantrasyonu 26536 mg kg^{-1} ile YSA 7'de bulunurken, en düşük Ca konsantrasyonu 1641 mg kg^{-1} ile YSA 3'de olduğu tespit edilmiştir. En yüksek Mg değeri ise 4617 mg kg^{-1} ile YSA 7'de tespit edilirken, en düşük Mg konsantrasyonu 613 mg kg^{-1} ile YSA 9'da olduğu bulunmuştur. Ayrıca en yüksek Na konsantrasyonu 138 mg kg^{-1} ile YSA 7'de, en düşük Na konsantrasyonu ise 74 mg kg^{-1} ile YSA 9'da tespit edilmiştir. Ayrıca, en yüksek K konsantrasyonu 1544 mg kg^{-1} ile YSA 6'da tespit edilirken, en düşük K konsantrasyonu YSA 3'de olduğu belirlenmiştir. Toplanan sediment örneklerinde en düşük pH 7,89 ile YSA 6'da tespit edilirken en yüksek pH ise 8,3 ile YSA 10'da belirlenmiştir. En yüksek CaCO_3 miktarı 5,2 ile YSA 10'da belirlenirken, en düşük CaCO_3 miktarı 1,5 ile YSA 5'de belirlenmiştir. Toplanan sediment örneklerinin fiziksel özelliklerine bakıldığında tüm örneklerin kum bünyesine sahip topraklar grubunda yer aldığı bulunmuştur. Sediment örneklerinin ayrıntılı kum, toz ve kil miktarları ayrıca çizelge 3.13'de gösterilmektedir.

3.3.6. Dehidrogenaz enzim aktivitesi

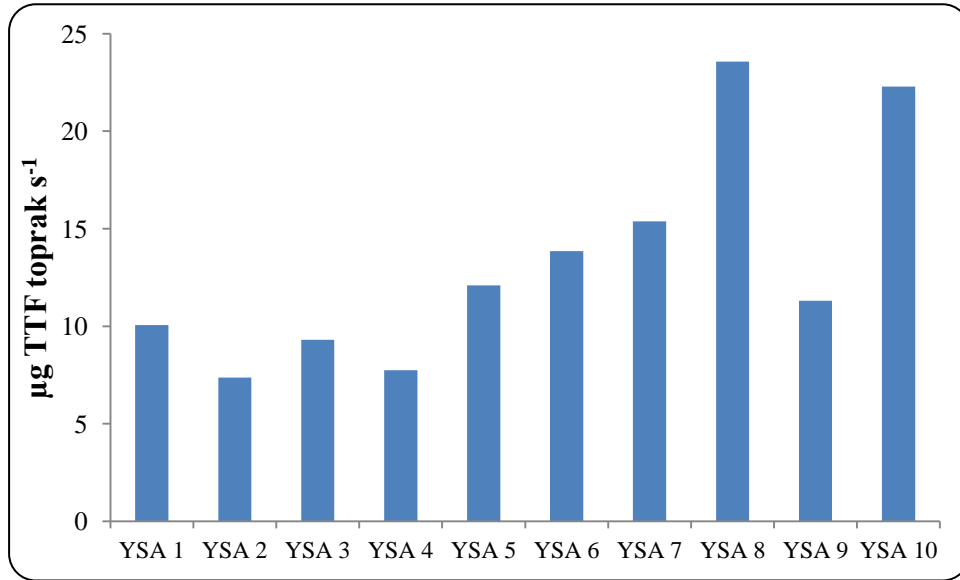
Araştırma periyodu içerisinde ve araştırma sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz enziminin aktivitesine ait bulgular Şekil 3.41 ve Şekil 3.42'de verilmektedir.



Şekil 3.51. Araştırma periyodu içerisinde Eylül ve Ekim aylarında iki haftalık periyotlar halinde toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesi

Araştırma periyodu içerisinde Eylül ve Ekim aylarında iki haftalık periyotlar halinde toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesine bakıldığında Eylül ayında en yüksek aktivite YSA 9'da tespit edilmişken, en düşük aktivite ise YSA 2'de belirlenmiştir. Ekim ayında ise en yüksek aktivite YSA 10'da tespit edilmişken, en düşük aktivite YSA 4'de belirlenmiştir.

Araştırma periyodu sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesine bakıldığında en yüksek aktivite YSA 8'de, en düşük aktivite ise YSA 2'de tespit edilmiştir. Bununla birlikte mono-kültür yapay sulak alanların poli-kültür yapay sulak alanlara göre daha yüksek dehidrogenaz aktivite gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.52. Araştırma periyodu sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesi

3.3.5. Kütleli denge değerleri ve B'un yapay sulak alanlardaki davranışı

DeneySEL çalışmalar sonunda Bor kütleli denge modeli (BKDM) kullanarak yapay sulak alanlar için elde edilen kütleli denge değerleri çizelge 3.15'de verilmektedir.

Çizelge 3.15. Bor kütleli denge modeli (BKDM) kullanarak yapay sulak alanlar için elde edilen kütleli denge değerleri

| | <i>A</i> (<i>m₃</i>) | <i>G</i> (<i>mg l⁻¹</i>) | <i>Ç</i> (<i>mg l⁻¹</i>) | <i>B_{bitki}</i> (<i>g</i>) | <i>T_{son}</i> (<i>kg</i>) | <i>B_{son}</i> (<i>mg kg⁻¹</i>) | <i>B_{sediment}</i> (<i>g</i>) | <i>M_{sediment}</i> (<i>kg</i>) | <i>*T_{sediment}</i> (<i>mg g⁻¹</i>) | <i>X</i> (<i>g</i>) | <i>Y</i> (<i>g</i>) | <i>Z</i> (<i>g</i>) | <i>T</i> (<i>g</i>) |
|---------------|--------------------------------------|--|--|--|---|---|---|--|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| YSA 1 | 1,54 | 17,5 | 6,1 | 0,835 | 2,930 | 285 | 14,1 | 1200 | 11,75 | 27 | 9 | 18 | +2,62 |
| YSA 2 | 1,54 | 17,5 | 10,5 | 0,769 | 4,551 | 169 | 12,6 | 1200 | 10,5 | 27 | 16 | 11 | -2,59 |
| YSA 3 | 1,54 | 17,5 | 9,9 | 0,964 | 3,192 | 302 | 11,9 | 1200 | 9,9 | 27 | 12 | 13 | +0,09 |
| YSA 4 | 1,54 | 17,5 | 8,6 | 0,647 | 2,128 | 304 | 12,8 | 1200 | 10,7 | 27 | 13 | 14 | +0,22 |
| YSA 5 | 1,54 | 17,5 | 8,9 | 0,707 | 3,116 | 227 | 12,5 | 1200 | 10,45 | 27 | 14 | 13 | 0 |
| YSA 6 | 1,54 | 17,5 | 9,2 | - | - | - | 12,7 | 1200 | 10,6 | 27 | 14 | 13 | +0,06 |
| YSA 7 | 1,54 | 17,5 | 5,7 | 1,815 | 4,906 | 370 | 16,2 | 1200 | 13,5 | 27 | 8,78 | 18 | +0,16 |
| YSA 8 | 1,54 | 17,5 | 5,9 | 0,777 | 1,924 | 404 | 15,7 | 1200 | 13,1 | 27 | 9,09 | 18 | +1,37 |
| YSA 9 | 1,54 | 17,5 | 7,6 | 0,098 | 0,439 | 224 | 15 | 1200 | 11,4 | 27 | 12 | 15 | +0,15 |
| YSA 10 | 1,54 | 17,5 | 7,9 | 0,788 | 1,414 | 557 | 13,8 | 1200 | 12,5 | 27 | 12 | 15 | +0,21 |

*Araştırma sonunda yapay sulak alanlardan elde edilen Bor (B) değerlerinden kontrol sedimentinde tespit edilen B değerinin çıkarılması sonucunda elde edilmiştir.

X: Araştırma periyodu süresince giriş suyu içerisinde yapay sulak alanlara verilen toplam B miktarını,

Y: Araştırma periyodu süresince çıkış suyu içerisinde yapay sulak alanlardan deşarj edilen toplam B miktarını,

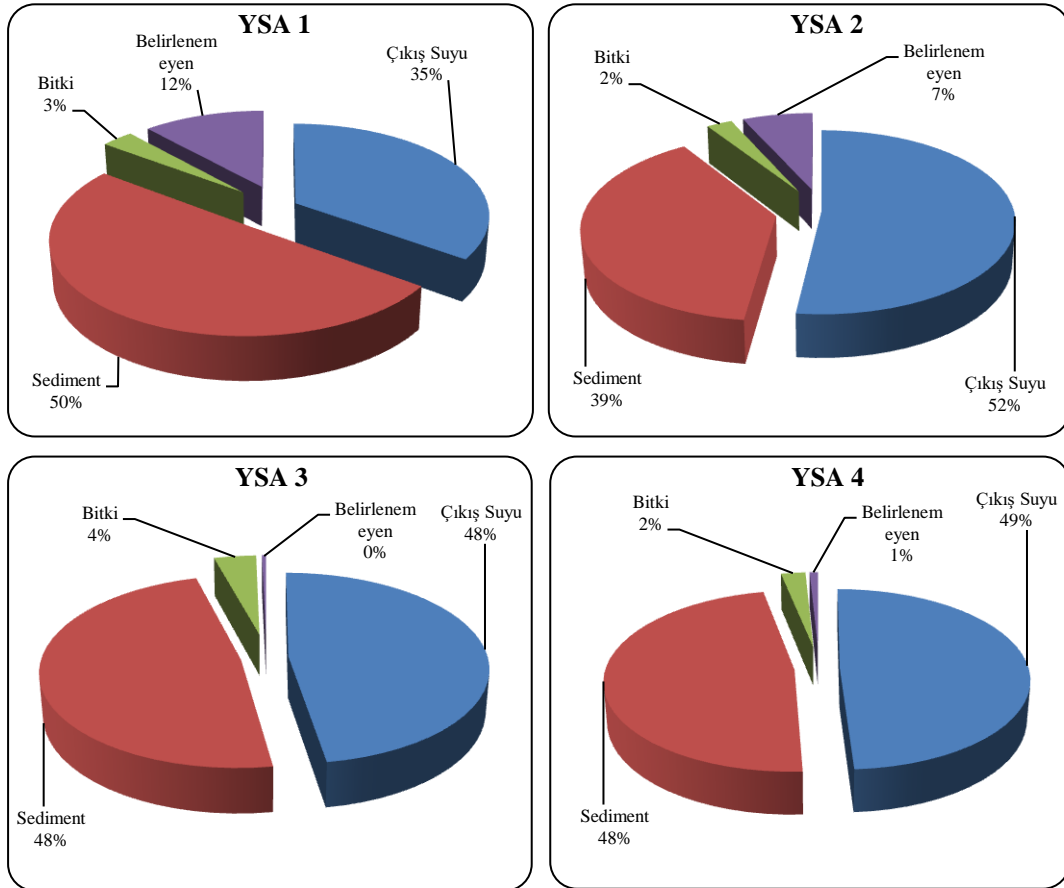
Z: Araştırma periyodu süresince yapay sulak alanlar içerisinde alı konulan toplam B miktarını.

T: Model uygulaması sonrasında yapay sulak alanlar içerisindeki belirlenemeyen B miktarını ifade etmektedir.

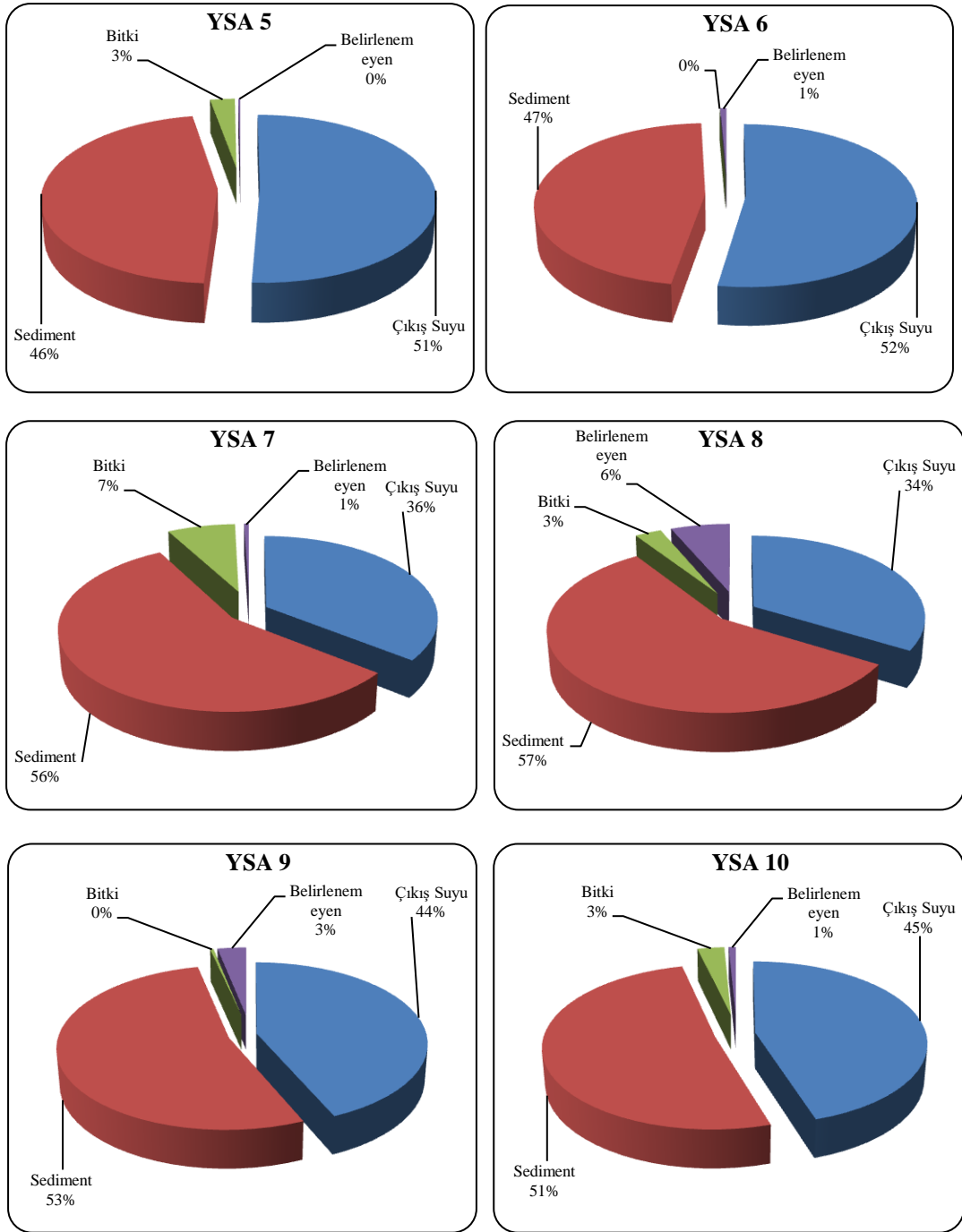
Bu modele göre, YSA 1'e yüklenen toplam 27 g B'un 18 g yapay sulak alanlarda alı konulmuşken, 9 g B tekrardan çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Organik-bazlı sedimentin 14,1 g, sistem içerisinde bulunan bitkilerin ise 0,835 g B'u alı koyduğu tespit edilmiştir. Belirlenemeyen B miktarı ise + 2,62 g'dır. YSA 2'e bakıldığında, sisteme yüklenen 27 g B'un 11 g yapay sulak alan içerisinde alı konulmuşken, 16 g B çıkış suyunda olduğu tespit edilmiştir. Sedimentte ve bitkilerde alı konulan toplam B miktarı sırasıyla 12,6 g ve 0,769 g olarak bulunmuştur. Belirlenemeyen B miktarı ise - 2,59 g'dır. YSA 3'e yüklenen toplam 27 g B'un 13 gramı yapay sulak alanlarda alı konulmuşken, 12 g B tekrardan çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Organik-bazlı sedimentin 14,1 g, sistem içerisinde bulunan bitkilerin ise 0,835 g B'u alı koyduğu tespit edilmiştir. Sistem içerisinde belirlenemeyen B miktarı ise + 0,09 g'dır. YSA 4 incelendiğinde, sisteme yüklenen 27 g B'un 14 g yapay sulak alan içerisinde alı konulmuşken, 13 g B çıkış suyunda olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sedimentte ve bitkilerde alı konulan toplam B miktarları sırasıyla 12,8 g ve 0,947 g olarak bulunmuştur. Belirlenemeyen B miktarı ise + 0,22 g'dır. YSA 5'e yüklenen toplam 27 g B'un 13 gramı yapay sulak alanlarda alı konulmuşken, 14 g B tekrardan çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Sedimentte ve bitkilerde alı konulan toplam B miktarı sırasıyla 12,6 g ve 0,769 g olarak bulunmuştur. Sistem içerisinde belirlenemeyen B miktarı ise 0 g'dır. Kontrol sistemi oluşturan YSA 6'a bakıldığında, sisteme verilen 27 g B'un 13 g yapay sulak alan içerisinde alı konulmuşken, 14 g B çıkış suyunda olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca organik bazlı sedimentte alı konulan toplam B miktarı 12,7 g olarak tespit edilmiştir. Bu sulak alanda belirlenemeyen B miktarı ise + 0,06 g'dır. Mono-kültür dizayn parametrelerine sahip YSA 7'e baktığımızda, yüklenen toplam 27 g B'un 18 gramı yapay sulak alanlarda alı konulmuşken, 8,78 g B tekrardan çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Organik-bazlı sedimentin 16,2 g, sistem içerisinde bulunan bitkilerin ise 1,815 g B'u alı koyduğu tespit edilmiştir. Sistem içerisinde belirlenemeyen B miktarı ise + 0,16 g'dır. Sadece *T.angustifolia* ile bitkilendirilen YSA 8'e baktığımızda sisteme verilen 27 g B'un 18 gramı sistem içerisinde alı konulmuşken, 9,09 g B çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Sedimentte toplanan B miktarı 15,7 olarak bulunmuşken bitkilerde biriktirilen B miktarının

0,777 g olduğu tespit edilmiştir. Hesaplanamayan B miktarı ise +1,37 civarındadır. Mono-kültür ve *P.australis* bitkisi ile bitkilendirilen YSA 9'a baktığımızda sisteme verilen 27 g B'un 15 g yapay sulak alan içerisinde alı konulmuşken 12 gramı çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Bitkilerde toplanan B miktarı 0,098 g olarak bulunmuşken, sedimentte alı konulan B 15 g olarak tespit edilmiştir. Ayrıca hesaplanamayan B miktarı ise + 0,15 g'dır. *J.gerardii* ile bitkilendirilen YSA 10'a bakıldığında verilen 27 g B'un 15 g sistem içerisinde alı konulmuşken, 12 g tekrardan çıkış suyu içerisinde deşarj edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sedimentte toplanan B miktarı 13,8 g olduğu tespit edilmişken bitkilerde biriktirilen B miktarı 0,788 g olarak belirlenmiştir. Sistem içerisinde belirlenemeyen B miktarı ise 0,21 g olarak bulunmuştur.

Çalışma periyodu içerisinde sistemlere verilen B'un yüzdesel dağılımı Şekil 3.43'de gösterilmektedir.



Şekil 3.53. Çalışma periyodu içerisinde sistemlere verilen B'un yüzdesel dağılımı



Şekil 3.54. (Devam) Çalışma periyodu içerisinde sistemlere verilen B'nin yüzdesel dağılımı

Bu sonuçlara göre yapay sulak alanlara giriş suyu içerisinde verilen B'nin %39 ile %57'i sedimentte, %0,3 ile 7'i bitkilerde kaldığı belirlenmişken, giriş suyundaki B'nin %34 ile %54'lik kısmı tekrardan çıkış suyundan deşarj edilmiştir. Ayrıca sulak alan içerisinde belirlenemeyen B yüzdesinin % 0,1 ile %12 arasında değiştigi tespit edilmiştir.

3.3.6. Pearson Korelasyon Analiz sonuçları

Yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularının pH, EC, sıcaklık, redoks, çözünmüş oksijen, nitrit ve nitrat değerlerinin birbirleri ve B ile Bor giderim oranları ile arasında olan istatistiksel ilişkiler aşağıdaki çizelgelere gösterilmektedir. Çizelge 3.16’de gösterildiği gibi YSA 1’de çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık ve çözünmüş oksijen arasında pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir ($p<0,05$). Ayrıca Bor giderim oranı ile çözünmüş oksijen arasında yine pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon belirlenmiştir ($p<0,05$). YSA 2’e bakıldığında sadece çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık arasında pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.17). Elde edilen istatistiksel verilere göre YSA 3’de yalnız çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık arasında istatistiksel olarak anlamlı pozitif yönlü bir korelasyon olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.18). YSA 4’e baktığımızda ise sadece suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık arasında pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.19). Çizelge 3.20’de gösterildiği gibi YSA 5’de çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık ve çözünmüş oksijen arasında pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir ($p<0,05$). Ayrıca Bor giderim oranı ile redoks arasında yine pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon belirlenmiştir ($p<0,05$). Bitkisiz kontrol olan YSA 6’ya bakıldığında çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile EC arasında negatif yönlü, sıcaklık ile pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir ($p<0,05$). Aynı sistemde Bor giderimi ile pH ve EC arasında negatif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.21). Bitkisiz kontrolde tespit edilen bu korelasyonlar diğer sulak alanlara göre bir takım farklılıklar göstermektedir. Mono-kültür YSA 7’e bakıldığında çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile EC arasında negatif yönlü, sıcaklık ile pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.22). Elde edilen istatistiksel verilere göre YSA 8’de yalnız çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık arasında pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.23). Mono-kültür YSA 9’a bakıldığında çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile EC,

sıcaklık ve nitrat konsantrasyonu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.24). Son olarak, YSA 10'a bakıldığında, çıkış suyundaki B konsantrasyonu ile sıcaklık arasında pozitif yönlü istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon tespit edilmişken ($p<0,05$), B giderimi ile EC arasında istatistiksel olarak anlamlı negatif yönlü bir korelasyon belirlenmiştir ($p<0,05$) (Çizelge 3.25).

Çizelge 3.16. YSA 1’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|---------|---------|----------|---------|------------------|-------|---------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | -,097 | -,264* | -,548** | -,331 | -,426 | ,165 | ,742** | -,514 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,464 | ,043 | ,008 | ,132 | ,191 | ,628 | ,009 | ,106 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | -,097 | 1 | -,454** | ,023 | -,426* | -,141 | ,000 | ,234 | -,512 |
| | Sig (2-tailed) | ,464 | - | ,000 | ,920 | ,048 | ,680 | ,999 | ,488 | ,106 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,264* | -,454** | 1 | ,372 | ,435* | ,622* | ,221 | ,185 | ,223 |
| | Sig (2-tailed) | ,043 | ,000 | - | ,088 | ,043 | ,041 | ,514 | ,586 | ,510 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,548** | ,023 | ,372 | 1 | ,196 | ,085 | -,799** | ,047 | ,319 |
| | Sig (2-tailed) | ,008 | ,920 | ,088 | - | ,382 | ,805 | ,003 | ,892 | ,339 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,331 | -,426* | ,435* | ,196 | 1 | ,651* | ,309 | -,261 | ,700* |
| | Sig (2-tailed) | ,132 | ,048 | ,043 | ,382 | - | ,030 | ,355 | ,439 | ,017 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,426 | -,141 | ,622* | ,085 | ,651* | 1 | ,284 | -,290 | ,413 |
| | Sig (2-tailed) | ,191 | ,680 | ,041 | ,805 | ,030 | - | ,387 | ,387 | ,207 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | ,165 | ,000 | ,221 | -,799** | ,309 | ,284 | 1 | -,306 | -,122 |
| | Sig (2-tailed) | ,628 | ,999 | ,514 | ,003 | ,355 | ,387 | - | ,361 | ,720 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,742** | ,234 | ,185 | ,047 | -,261 | -,290 | -,306 | 1 | -,244 |
| | Sig (2-tailed) | ,009 | ,488 | ,586 | ,892 | ,439 | ,387 | ,361 | - | ,469 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,514 | -,512 | ,223 | ,319 | ,700* | ,4133 | -,122 | -,244 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,106 | ,106 | ,510 | ,339 | ,017 | ,207 | ,720 | ,469 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$

* $p < 0,05$

Çizelge 3.17. YSA 2’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözülmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|---------|---------|----------|---------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | -,144 | -,312* | -,699** | -,471* | -,509 | ,401 | ,240 | -,042 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,275 | ,016 | ,000 | ,109 | ,109 | ,221 | ,476 | ,903 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | -,144 | 1 | -,486** | -,327 | -,564** | -,022 | -,586 | -,256 | -,005 |
| | Sig (2-tailed) | ,275 | - | ,000 | ,137 | ,006 | ,949 | ,058 | ,448 | ,989 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,312* | -,486** | 1 | ,706** | ,568** | ,776** | -,543 | -,489 | -,194 |
| | Sig (2-tailed) | ,016 | ,000 | - | ,000 | ,006 | ,005 | ,084 | ,127 | ,568 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,699** | -,327 | ,706** | 1 | ,805** | ,585 | -,334 | -,290 | ,093 |
| | Sig (2-tailed) | ,000 | ,137 | ,000 | - | ,000 | ,058 | ,316 | ,387 | ,786 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 59 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözülmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,471* | -,564** | ,568** | ,805** | 1 | ,417 | -,127 | -,142 | ,228 |
| | Sig (2-tailed) | ,109 | ,006 | ,006 | ,000 | - | ,202 | ,710 | ,202 | ,500 |
| | N | 33 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,509 | -,022 | ,776** | ,585 | ,417 | 1 | -,442 | -,526 | -,060 |
| | Sig (2-tailed) | ,109 | ,949 | ,005 | ,058 | ,202 | - | ,173 | ,096 | ,860 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | ,401 | -,586 | -,543 | -,334 | -,127 | -,442 | 1 | ,689* | -,553 |
| | Sig (2-tailed) | ,221 | ,058 | ,084 | ,316 | ,710 | ,173 | - | ,019 | ,078 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,240 | -,256 | -,489 | -,290 | -,142 | -,526 | ,689* | 1 | -,437 |
| | Sig (2-tailed) | ,476 | ,448 | ,127 | ,387 | ,202 | ,096 | ,019 | - | ,179 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,042 | -,005 | -,194 | ,093 | ,228 | -,060 | -,553 | -,437 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,903 | ,989 | ,568 | ,786 | ,500 | ,860 | ,078 | ,179 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.18. YSA 3'den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|---------|-------|----------|---------|------------------|-------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | ,043 | -,141 | -,552** | ,099 | -,207 | -,148 | ,581 | -,425 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,748 | ,286 | ,008 | ,662 | ,541 | ,665 | ,061 | ,192 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | ,043 | 1 | -,449** | -,381 | -,419 | -,190 | ,395 | ,585 | ,476 |
| | Sig (2-tailed) | ,748 | - | ,000 | ,080 | ,052 | ,575 | ,229 | ,059 | ,139 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,141 | -,381 | 1 | ,511* | -,045 | ,713* | -,588 | -,110 | ,000 |
| | Sig (2-tailed) | ,286 | ,080 | - | ,015 | ,844 | 0,14 | ,057 | ,748 | 1,000 |
| | N | 59 | 22 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,552** | -,381 | ,511* | 1 | ,017 | ,422 | -,614* | -,601 | ,240 |
| | Sig (2-tailed) | ,008 | ,080 | ,015 | - | ,939 | ,196 | ,044 | ,051 | ,477 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | ,099 | -,419 | -,045 | ,017 | 1 | -,033 | ,290 | -,499 | -,144 |
| | Sig (2-tailed) | ,662 | ,052 | ,844 | ,939 | - | ,923 | ,923 | ,118 | ,673 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,207 | -,190 | ,713* | ,422 | -,033 | 1 | -,343 | -,269 | ,036 |
| | Sig (2-tailed) | ,541 | ,575 | 0,14 | ,196 | ,923 | - | ,302 | ,423 | ,916 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | -,148 | ,395 | -,588 | -,614* | ,290 | -,343 | 1 | ,069 | ,065 |
| | Sig (2-tailed) | ,665 | ,229 | ,057 | ,044 | ,923 | ,302 | - | ,840 | ,849 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,581 | ,585 | -,110 | -,601 | -,499 | -,269 | ,069 | 1 | ,019 |
| | Sig (2-tailed) | ,061 | ,059 | ,748 | ,051 | ,118 | ,423 | ,840 | - | ,849 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,425 | ,476 | ,000 | ,240 | -,144 | ,036 | ,065 | ,019 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,192 | ,139 | 1,000 | ,477 | ,673 | ,916 | ,849 | ,849 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.19. YSA 4'den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözülmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|--------|---------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | ,000 | -,281* | -,429* | -,056 | -,364 | -,203 | ,825** | -,320 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,998 | ,031 | ,046 | ,804 | ,271 | ,550 | ,002 | ,337 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | ,000 | 1 | -,430** | -,180 | -,674** | ,173 | -,097 | -,084 | -,058 |
| | Sig (2-tailed) | ,998 | - | ,001 | ,422 | ,001 | ,611 | ,776 | ,805 | ,865 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,281* | -,180 | 1 | ,368 | ,414 | ,775** | -,465 | -,082 | ,211 |
| | Sig (2-tailed) | ,031 | ,422 | - | ,092 | ,055 | ,005 | ,149 | ,810 | ,532 |
| | N | 59 | 22 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,429* | -,674** | ,414 | 1 | ,519* | ,083 | -,198 | ,070 | ,345 |
| | Sig (2-tailed) | ,046 | ,001 | ,055 | - | ,013 | ,807 | ,559 | ,838 | ,299 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözülmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,056 | -,674** | ,414 | ,519* | 1 | ,078 | -,183 | ,029 | ,520 |
| | Sig (2-tailed) | ,804 | ,001 | ,055 | ,013 | - | ,820 | ,589 | ,932 | ,101 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,364 | ,173 | ,775** | ,083 | ,078 | 1 | -,343 | -,300 | ,197 |
| | Sig (2-tailed) | ,271 | ,611 | ,005 | ,807 | ,820 | - | ,302 | ,370 | ,562 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | -,203 | -,097 | -,465 | -,198 | -,183 | -,343 | 1 | -,437 | -,107 |
| | Sig (2-tailed) | ,550 | ,776 | ,149 | ,559 | ,589 | ,302 | - | ,179 | ,753 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,825** | -,084 | -,082 | ,070 | ,029 | -,300 | -,437 | 1 | -,236 |
| | Sig (2-tailed) | ,002 | ,805 | ,810 | ,838 | ,932 | ,370 | ,179 | - | ,485 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,320 | -,058 | ,211 | ,345 | ,520 | ,197 | -,107 | -,236 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,337 | ,865 | ,532 | ,299 | ,101 | ,562 | ,753 | ,485 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.20. YSA 5’den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|---------|---------|----------|---------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | -,145 | -,207 | -,633** | -,501* | -,519 | -,066 | ,290 | -,620* |
| | Sig (2-tailed) | - | ,272 | ,116 | ,002 | ,018 | ,102 | ,848 | ,387 | ,042 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | -,145 | 1 | -,402** | -,317 | -,509* | ,152 | -,330 | -,427 | ,351 |
| | Sig (2-tailed) | ,272 | - | ,002 | ,151 | ,655 | ,655 | ,322 | ,190 | ,290 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,207 | -,402** | 1 | ,337 | ,637** | ,810** | ,150 | -,188 | ,167 |
| | Sig (2-tailed) | ,116 | ,002 | - | ,125 | ,001 | ,003 | ,659 | ,580 | ,623 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,633** | -,317 | ,337 | 1 | ,659** | ,135 | ,030 | -,347 | ,678* |
| | Sig (2-tailed) | ,002 | ,151 | ,125 | - | ,001 | ,693 | ,931 | ,296 | ,022 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 59 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,501* | -,509* | ,637** | ,659** | 1 | ,624* | -,054 | -,069 | ,461 |
| | Sig (2-tailed) | ,018 | ,015 | ,001 | ,001 | - | ,040 | ,875 | ,840 | ,154 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,519 | ,152 | ,810** | ,135 | ,624* | 1 | ,043 | -,008 | ,399 |
| | Sig (2-tailed) | ,102 | ,655 | ,003 | ,693 | ,040 | - | ,900 | ,982 | ,224 |
| | N | 13 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | -,066 | -,330 | ,150 | ,030 | -,054 | ,043 | 1 | ,159 | -,456 |
| | Sig (2-tailed) | ,848 | ,322 | ,659 | ,931 | ,875 | ,900 | - | ,641 | ,159 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,290 | -,427 | -,188 | -,347 | -,069 | -,008 | ,159 | 1 | -,543 |
| | Sig (2-tailed) | ,387 | ,190 | ,580 | ,296 | ,840 | ,982 | ,641 | - | ,085 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,620* | ,351 | ,167 | ,678* | ,461 | ,399 | -,456 | -,543 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,042 | ,290 | ,623 | ,022 | ,154 | ,224 | ,159 | ,085 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.21. YSA 6'dan elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|--------|--------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | -,208 | -,122 | ,130 | -,231 | -,151 | ,302 | ,052 | -,717* |
| | Sig (2-tailed) | - | ,114 | ,114 | ,565 | ,301 | ,657 | ,366 | ,879 | ,013 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | -,208 | 1 | -,251 | -,259 | ,286 | -,630* | ,478 | ,222 | -,711* |
| | Sig (2-tailed) | ,114 | - | ,055 | ,245 | ,197 | ,038 | ,512 | ,512 | ,014 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,122 | -,251 | 1 | ,183 | -,150 | ,688* | -,266 | -,567 | ,375 |
| | Sig (2-tailed) | ,114 | ,055 | - | ,415 | ,504 | ,019 | ,429 | ,069 | ,255 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | ,130 | -,259 | ,183 | 1 | ,233 | -,524 | ,124 | -,097 | ,219 |
| | Sig (2-tailed) | ,565 | ,245 | ,415 | - | -,296 | ,098 | ,716 | ,776 | ,518 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,231 | ,286 | -,150 | ,233 | 1 | -,290 | ,138 | ,026 | ,251 |
| | Sig (2-tailed) | ,301 | ,197 | ,504 | -,296 | - | ,387 | ,685 | ,940 | ,457 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,151 | -,630* | ,688* | -,524 | -,290 | 1 | -,396 | -,483 | ,315 |
| | Sig (2-tailed) | ,657 | ,038 | ,019 | ,098 | ,387 | - | ,228 | ,133 | ,346 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | ,302 | ,478 | -,266 | ,124 | ,138 | -,396 | 1 | -,168 | -,067 |
| | Sig (2-tailed) | ,366 | ,512 | ,429 | ,716 | ,685 | ,228 | - | -,622 | ,844 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,052 | ,222 | -,567 | -,097 | ,026 | -,483 | -,168 | 1 | -,314 |
| | Sig (2-tailed) | ,879 | ,512 | ,069 | ,776 | ,940 | ,133 | -,622 | - | -,347 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,717* | -,711* | ,375 | ,219 | ,251 | ,315 | -,067 | -,314 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,013 | ,014 | ,255 | ,518 | ,457 | ,346 | ,844 | -,347 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.22. YSA7'den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|--------|---------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | ,380** | -,231 | -,415 | ,218 | ,503 | ,517 | -,102 | -,178 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,003 | ,079 | ,055 | ,330 | ,114 | ,103 | ,766 | ,600 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | ,380** | 1 | -,532** | -,451* | ,205 | -,612* | -,099 | ,208 | -,431 |
| | Sig (2-tailed) | ,003 | - | ,000 | ,035 | ,361 | ,045 | ,772 | ,539 | ,186 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,231 | -,532** | 1 | ,174 | -,180 | ,793** | ,294 | -,162 | ,256 |
| | Sig (2-tailed) | ,079 | ,000 | - | ,439 | ,422 | ,004 | ,380 | ,634 | ,448 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,415 | -,451* | ,174 | 1 | ,233 | -,369 | -,158 | ,229 | ,212 |
| | Sig (2-tailed) | ,055 | ,035 | ,439 | - | ,296 | ,264 | ,643 | ,499 | ,532 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | ,218 | ,205 | -,180 | ,233 | 1 | -,013 | ,270 | ,270 | ,028 |
| | Sig (2-tailed) | ,330 | ,361 | ,422 | ,296 | - | ,970 | ,422 | ,422 | ,936 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | ,503 | -,612* | ,793** | -,369 | -,013 | 1 | ,570 | -,333 | -,004 |
| | Sig (2-tailed) | ,114 | ,045 | ,004 | ,264 | ,970 | - | ,067 | ,318 | ,990 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | ,517 | -,099 | ,294 | -,158 | ,270 | ,570 | 1 | -,568 | -,236 |
| | Sig (2-tailed) | ,103 | ,772 | ,380 | ,643 | ,422 | ,067 | - | ,068 | ,484 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | -,102 | ,208 | -,162 | ,229 | ,270 | -,333 | -,568 | 1 | -,282 |
| | Sig (2-tailed) | ,766 | ,539 | ,634 | ,499 | ,422 | ,318 | ,068 | - | ,400 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,178 | -,431 | ,256 | ,212 | ,028 | -,004 | -,236 | -,282 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,600 | ,186 | ,448 | ,532 | ,936 | ,990 | ,484 | ,400 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.23. YSA 8'den elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|-------|---------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | ,142 | -,243 | -,156 | -,080 | ,560 | ,350 | ,060 | ,118 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,282 | ,063 | ,487 | ,724 | ,073 | ,292 | ,860 | ,730 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | ,142 | 1 | -,532** | -,323 | -,184 | -,001 | ,446 | ,467 | -,470 |
| | Sig (2-tailed) | ,282 | - | ,000 | ,143 | ,413 | ,998 | ,169 | ,148 | ,145 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,243 | -,532** | 1 | ,127 | ,479* | ,870** | ,100 | -,306 | ,429 |
| | Sig (2-tailed) | ,063 | ,000 | - | ,575 | ,024 | ,000 | ,770 | ,361 | ,188 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,156 | -,323 | ,127 | 1 | ,284 | ,101 | -,262 | ,003 | ,705* |
| | Sig (2-tailed) | ,487 | ,143 | ,575 | - | ,201 | ,768 | ,436 | ,993 | ,015 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,080 | -,184 | ,479* | ,284 | 1 | ,441 | -,306 | -,185 | ,452 |
| | Sig (2-tailed) | ,724 | ,413 | ,024 | ,201 | - | ,174 | ,360 | ,585 | ,163 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | ,560 | -,001 | ,870** | ,101 | ,441 | 1 | ,254 | -,376 | ,384 |
| | Sig (2-tailed) | ,073 | ,998 | ,000 | ,768 | ,174 | - | ,451 | ,254 | ,244 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | ,350 | ,446 | ,100 | -,262 | -,306 | ,254 | 1 | ,121 | -,486 |
| | Sig (2-tailed) | ,292 | ,169 | ,770 | ,436 | ,360 | ,451 | - | ,722 | ,130 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 11 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,060 | ,467 | -,306 | ,003 | -,185 | -,376 | ,121 | 1 | -,427 |
| | Sig (2-tailed) | ,860 | ,148 | ,361 | ,993 | ,585 | ,254 | ,722 | - | ,190 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | ,118 | -,470 | ,429 | ,705* | ,452 | ,384 | -,486 | -,427 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,730 | ,145 | ,188 | ,015 | ,163 | ,244 | ,130 | ,190 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.24. YSA 9'dan elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözünmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|--------|--------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | ,631** | -,102 | -,186 | -,041 | -,150 | -,165 | -,452 | -,300 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,000 | ,444 | ,407 | ,858 | ,660 | ,628 | ,162 | ,369 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | ,631** | 1 | ,135 | -,215 | ,216 | ,731* | ,776** | -,073 | -,307 |
| | Sig (2-tailed) | ,000 | - | ,309 | ,338 | ,334 | ,011 | ,005 | ,831 | ,359 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,102 | ,135 | 1 | -,008 | ,256 | ,895** | ,691* | ,002 | -,450 |
| | Sig (2-tailed) | ,444 | ,309 | - | ,972 | ,251 | ,000 | ,019 | ,994 | ,165 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | -,186 | -,215 | -,008 | 1 | -,101 | -,175 | -,035 | ,184 | ,157 |
| | Sig (2-tailed) | ,407 | ,338 | ,972 | - | ,654 | ,607 | ,918 | ,587 | ,645 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözünmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,041 | ,216 | ,256 | -,101 | 1 | ,499 | ,429 | ,358 | -,167 |
| | Sig (2-tailed) | ,858 | ,334 | ,251 | ,654 | - | ,118 | ,188 | ,279 | ,623 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | -,150 | ,731* | ,895** | -,175 | ,499 | 1 | ,841** | -,005 | -,374 |
| | Sig (2-tailed) | ,660 | ,011 | ,000 | ,607 | ,118 | - | ,001 | ,989 | ,257 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | -,165 | ,776** | ,691* | -,035 | ,429 | ,841** | 1 | ,358 | -,422 |
| | Sig (2-tailed) | ,628 | ,005 | ,019 | ,918 | ,188 | ,001 | - | ,280 | ,196 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | -,452 | -,073 | ,002 | ,184 | ,358 | -,005 | ,358 | 1 | ,166 |
| | Sig (2-tailed) | ,162 | ,831 | ,994 | ,587 | ,279 | ,989 | ,280 | - | ,626 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | -,300 | -,307 | -,450 | ,157 | -,167 | -,374 | -,422 | ,166 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,369 | ,359 | ,165 | ,645 | ,623 | ,257 | ,196 | ,626 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

Çizelge 3.25. YSA 10'dan elde edilen çıkış suyu numunelerindeki Bor ve Bor giderim oranları ile diğer fiziko-kimyasal parametreler arasındaki istatistiksel ilişkiler (Pearson Korelasyon Analizi)

| | | pH | EC | Sıcaklık | Redoks | Çözülmüş Oksijen | Bor | Nitrat | Nitrit | Bor Giderimi |
|------------------|---------------------|---------|--------|----------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------------|
| pH | Pearson Correlation | 1 | ,382** | -,539** | ,026 | -,302 | ,327 | -,095 | ,062 | ,011 |
| | Sig (2-tailed) | - | ,003 | ,000 | ,908 | ,172 | ,327 | ,781 | ,856 | ,974 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| EC | Pearson Correlation | ,382** | 1 | -,273* | -,148 | -,148 | ,238 | ,360 | ,353 | -,620* |
| | Sig (2-tailed) | ,003 | - | ,037 | ,510 | ,512 | ,480 | ,277 | ,287 | ,042 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Sıcaklık | Pearson Correlation | -,539** | -,273* | 1 | ,045 | ,420 | ,840** | ,391 | -,050 | -,297 |
| | Sig (2-tailed) | ,000 | ,037 | - | ,842 | ,052 | ,001 | ,234 | ,884 | ,376 |
| | N | 59 | 59 | 59 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Redoks | Pearson Correlation | ,026 | -,148 | ,045 | 1 | -,070 | -,249 | -,189 | ,146 | ,530 |
| | Sig (2-tailed) | ,908 | ,510 | ,842 | - | ,756 | ,460 | ,578 | ,669 | ,094 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Çözülmüş Oksijen | Pearson Correlation | -,302 | -,148 | ,420 | -,070 | 1 | ,261 | ,360 | ,317 | ,029 |
| | Sig (2-tailed) | ,172 | ,512 | ,052 | ,756 | - | ,438 | ,276 | ,342 | ,933 |
| | N | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor | Pearson Correlation | ,327 | ,238 | ,840** | -,249 | ,261 | 1 | ,596 | ,074 | -,339 |
| | Sig (2-tailed) | ,327 | ,480 | ,001 | ,460 | ,438 | - | ,053 | ,829 | ,307 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrat | Pearson Correlation | -,095 | ,360 | ,391 | -,189 | ,360 | ,596 | 1 | ,083 | -,565 |
| | Sig (2-tailed) | ,781 | ,277 | ,234 | ,578 | ,276 | ,053 | - | ,809 | ,070 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Nitrit | Pearson Correlation | ,062 | ,353 | -,050 | ,146 | ,317 | ,074 | ,083 | 1 | -,148 |
| | Sig (2-tailed) | ,856 | ,287 | ,884 | ,669 | ,342 | ,829 | ,809 | - | ,664 |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Bor Giderimi | Pearson Correlation | ,011 | -,620* | -,297 | ,530 | ,029 | -,339 | -,565 | -,148 | 1 |
| | Sig (2-tailed) | ,974 | ,042 | ,376 | ,094 | ,933 | ,307 | ,070 | ,664 | - |
| | N | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

** $p < 0,01$ * $p < 0,05$

4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışması, 154 gün boyunca doğal arazi koşullarında bor maden atıkları ile kirletilmiş suların farklı bitki kompozisyonuna sahip yapay sulak alanlar ile biyolojik temizlenmesi ve uzaklaştırılması ile ilgili önemli gözlemler ve analizler içermektedir. Doğal iklim koşulları altında ve Kırka Bor rezerv alanı içerisinde yapılan çalışmalar ile birlikte yapay sulak alanların B giderim performanslarının tespit edilmesi, kullanılan bitkilerin ve vejetasyon yapısının yapay sulak alanlarda B giderimi üzerine olan etkisinin ortaya çıkarılması, rekabet mekanizmasının yapay sulak alanlarda B giderimine her hangi bir etkisinin olup olmadığının belirlenmesi, araştırma sonunda yapay sulak alanlardan hasat edilebilir bitki biyomasına göre tahmini biyogaz ve elektrik enerjisi gibi ikincil kazanımların tartışılması, yapay sulak alanlarda B'un suların arındırılması esnasında mikrobiyal aktivitenin nasıl değiştiğinin gözlemlenmesi ve son olarak ülkemizde ya da dünyada B işletme sahalarında yapay sulak alan teknolojisinin kullanılabilirliği için uygun biyolojik yöntem ve materyal seçimine yönelik bilgilerin belirlenmesi ile ilgili pek çok bilimsel verinin, hem ülkemiz hem de dünya literatürüne önemli katkılar yapacağı düşünülmektedir.

Araştırmaların yapıldığı Kırka Bor rezerv alanı, bünyesinde yüksek konsantrasyonda buldurduğu B mineraller nedeniyle, birçok bitki grubu için ekstrem ekolojik ve çevresel koşulların oluşmasına neden olabilmektedir (Böcük, 2010). Böyle ekstrem ortamların içerisinde ya da yakın çevresinde gelişebilme yeteneği gösterebilen bitki türlerinin tespit edilmesi ve bunların biyoremediasyon kapasitelerinin ortaya konulması B kirliliğinin muhtemel negatif etkilerinin doğal yollar ile önlenmesi açısından önemli fikirler sağlayabilirler (Türker, 2011). Bu nedenle bu tez çalışmasında yapay sulak alanların bitkilendirilmesi için Kırka Bor rezerv alanı içerisinde ve yerel flora da bolca gözlemlediğimiz bitkilerden olan *Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis* ve *Juncus gerardii* türleri kullanılmıştır. Çizelge 3.1 incelendiğinde, yapay sulak alanlarda hayatta kalan bitki oranının YSA 9 hariç % 75 olduğu görülmektedir. Bu durum yapay sulak alanlarda kullanılan *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *J.gerardii* türlerinin hem iklimsel hem de operasyonel koşullara kültür periyodu içerisinde iyi uyum sağladığını göstermektedir. Araştırma periyodu süresince kullanılan bitki

türlerinin yapraklarında kloroz (sarıma) ya da nekroz (doku parçalanması) gibi B toksisite semptomlarının gözlemlenmemiş olması bu durumu destekler niteliktedir. Buna karşın, *P.australis* türünün 1,3, 5 ve 9. yapay sulak alanlarda ölü bitki bireylerine rastlanması ve özellikle YSA 9'da hayatta kalma oranının %75'in altında olması bu bitki türünün iklimsel ve operasyonel koşullara diğer bitki türleri ile karşılaştırıldığında nispeten daha az adaptasyon yeteneği gösterdiğini belirtmektedir. Ayrıca, araştırma sonunda yapay sulak alanlardan elde edilen bitki biyoması sonuçlarına baktığımızda deneysel çalışma boyunca en yüksek bitki biyomasının *T.latifolia* bitkisinden elde edildiği ve bu bitki türünün diğer bitkilerle karşılaştırıldığında iki kat daha fazla biyomas ürettiği tespit edilmiştir (Şekil 3.13). Bu sonuçlar, *T.latifolia* türünün diğer bitki türleri ile karşılaştırıldığında yapay sulak alanlardaki organik-bazlı filtrasyon materyaline, sistem içerisindeki atık suyun akış rejimine ve B içeren atık suyun kompozisyonuna daha hızlı bir şekilde adapte olduğunu göstermektedir. Bu nedenle gelecekte B içeren suların arındırılması için kurulacak yapay sulak alan sistemlerinde *T latifolia* türünün ana donör bitki olarak kullanılması yapay sulak alanların hızlı bir şekilde bitkilendirilmesini sağlayabilir. Literatür incelendiğinde diğer araştırmacılarda birtakım benzer sonuçlar rapor ettiği gözlemlenmektedir (Ye ve ark. 2003; Türker ve ark. 2013a; Türker ve ark. 2013b).

Araştırmaların farklı bitki kompozisyonuna sahip yapay sulak alanlar üzerinde yapılması ile 154 günlük deney periyodu boyunca, 14 günde bir alınan çıkış su örneklerindeki B miktarının azalma eğiliminde olması ve bu azalma eğiliminin farklı B konsantrasyon için de çeşitlilik göstermesi bu tez çalışmasının en temel başarı ölçütleri arasında bulunmaktadır. Araştırma süreci içinde yapılan giriş ve çıkış su analizlerine göre, beklendiği gibi tüm yapay sulak alan sistemleri atık su içerisindeki B'ü azaltıcı yönde bir çalışma performansı göstermişlerdir (Şekil 3.9). Bununla birlikte, yapay sulak alanlardan elde edilen giriş ve çıkış sularının içerdikleri B konsantrasyonu, One-Way ANOVA istatistiksel analiz metodu kullanılarak değerlendirilmiş ve çıkış suyu B konsantrasyonlarının azalma eğilimlerinin $p<0,05$ düzeyinde anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık, atık su içerisinde bulunan B'un yapay sulak alanlar sayesinde verimli ve etkili bir şekilde giderildiğini göstermektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, yapay

sulak alanların B giderim oranlarının giriş suyu B konsantrasyonuna göre bir takım farklılık gösterdiği ve en yüksek B giderim oranının giriş suyu konsantrasyonunun 15 mg l^{-1} ile 27 mg l^{-1} arasında olduğu aralıkta sağlandığı belirlenmiştir. Ancak, giriş suyu B konsantrasyonunun 27 mg l^{-1} 'den yüksek ve 8 mg l^{-1} 'den düşük olması durumunda yapay sulak alanların B giderim performansları kademeli olarak azalmaktadır. Bu sonuçlar yapay sulak alan sistemlerinin nispeten 10 mg l^{-1} 'den daha yüksek B konsantrasyonlarında başarılı olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle, yapay sulak alanların verimli olarak çalışabilmesi ve daha yüksek bir B giderim oranı elde edilebilmesi için giriş suyu B konsantrasyonlarının belirtilen aralıklarda tutulması önerilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 3.11 incelendiğinde, yapay sulak alanlara yüklenen giriş suyu bor konsantrasyonlarının artması ile tüm yapay sulak alanların KGO oranlarının da buna paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak 112. izleme gününden itibaren ise yapay sulak alanların KGO'da bir miktar düşüş tespit edilmiştir. Bu durum yapay sulak alanların taşıyacağı B miktarının 112. izleme gününden itibaren sınır değerine yaklaştığını göstermektedir. Ayrıca bitki vejetasyon döneminin sona yaklaşması da sistemlerin arıtım verimlerinde düşüş meydana getirmiş olabilir. Çünkü bitkili yapay sulak alan sistemlerine bakıldığında, bazı yapay sulak alanlarda (YSA 5 ve YSA 2) giderim oranlarının 112. izleme günü sonrasında sürekli bir düşüş eğiliminde olması bu durumu açıklamaktadır.

Şekil 3.10 incelendiğinde, araştırma periyodu süresince mono-kültür yapay sulak alanların % 53 ile % 64 arasında, poli-kültür yapay sulak alanların %38,5 ile %56 arasında ve bitkisiz kontrol yapay sulak alanın ise %38,1 B giderim performansı ile çalıştığını görülmektedir. Bu sonuçlar aynı çalışma süresi ve operasyonel koşullar altında mono-kültür yapay sulak alanların daha başarılı bir performans gösterdiğini belirtmektedir. Ayrıca, farklı bitki kompozisyonuna sahip yapay sulak alanların, bitkisiz yapay sulak alan sistemine (bitkisiz kontrol) göre daha yüksek bir Bor (B) arıtma performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, bitkilerin yapay sulak alanlarda bulunmasının sistemlerin B giderim performanslarına olumlu etki yaptığını ve sistemlerin B giderim performanslarının bitki tür kompozisyonuna veya vejetasyon yapısına göre bir takım değişiklikler gösterdiğini vurgulamaktadır. Mono-kültür yapay sulak

alanlara bakıldığında ortalama en yüksek B giderim performansları % 64 ile *T.latifolia* ile bitkilendirilen YSA 7’de ve % 61 ile *T.angustifolia* bitkisinin bulunduğu YSA 8’den elde edilmiştir. Buna karşın mono-kültür yapay sulak alanlar arasında en düşük B giderim performansları ise % 53 ile *P.australis* ile bitkilendirilen YSA 9’da ve % 56 ile *J.gerardii* bitkisinin bulunduğu YSA 10’da bulunmuştur. Ancak yapılan One-Way ANOVA istatistiksel analizlerinde giriş suyu ve çıkış suyu B konsantrasyonları açısından sadece YSA 7 ve YSA 8 ile bitkisiz kontrol (YSA 6) arasında anlamlı istatistiksel bir farklılık tespit edilmiştir. Bu durum, kurulan mono-kültür yapay sulak alanlarda bulunan *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin diğer bitki türlerine göre B’un arındırılma sürecinde önemli bir rollerinin olduğunu göstermektedir. Buna karşın, *P.australis* ve *J.gerardii* bitkilerin mono-kültür dizayn parametreleri içerisinde kurulacak yapay sulak alanlar içerisinde bulunmasının B’un giderilme sürecine etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle B içeren suların temizlenmesinde mono-kültür yapay sulak alanlar için en uygun bitki kompozisyonun *T.latifolia* veya *T.angustifolia* olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu bitkilerin yapay sulak alanlarda ayrı ayrı kullanılması durumunda yüksek bir B arıtım verimliliği elde edilebileceği düşünülmektedir. Araştırma periyodu süresince YSA 7 ve YSA 8 tarafından atık sudan uzaklaştırılan B miktarının, YSA 9 ve YSA 10’a göre günlük metrekare başına ortalama 0,021 mg’dan fazla olması, *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin mono-kültür yapay sulak alanlar için uygun bitki türü olduğunu destekler niteliktedir (Şekil 3.11).

Poli-kültür yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına bakıldığında, tüm çıkış su örneklerinin giriş su örneklerine göre daha az B konsantrasyonuna sahip olduğu bulunmuştur ($p<0,05$). Buda, B’un poli-kültür yapay sulak alanlarda etkili bir şekilde alı konulduğunu göstermektedir. Bununla birlikte biyoremediasyon deneyi süresince poli-kültür yapay sulak alanların %38,1 ile %56 arasında bir arıtım performansı ile çalıştığı belirlenmiştir. Ancak istatistiksel olarak poli-kültür yapay sulak alanlar ile bitkisiz kontrol grubu arasında giriş ve çıkış suyu B konsantrasyonu açısından herhangi bir anlamlı farklılık tespit edilememiştir ($p>0,05$). Bu durum, poli-kültür yapay sulak alanlarda bulunan bitki kompozisyonunun B’un arındırılma süreci üzerinde doğrudan etkisinin

olmadığını göstermektedir. Ancak poli-kültür yapay sulak alanlarda kullanılan bitki kompozisyonuna bakıldığında en yüksek arıtım verimi %56 ile *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *P.australis* bitkilerinin bir arada kullanıldığı YSA 1'den elde edilmiştir. Buna karşın, en düşük giderim oranı ise %38,5 ile *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *J.gerardii* bitkilerinin bir arada bulunduğu YSA 2'de belirlenmiştir. Aynı zamanda tüm bitkilerin bir arada kullanıldığı YSA 5'de elde edilen B giderim yüzdesi yaklaşık olarak % 42'dir. Tüm giderim oranları değerlendirildiğinde, B'un suların biyolojik temizlenmesinde poli-kültür yapay sulak alanların mono-kültür yapay sulak alanlara göre daha düşük bir giderim performansı gösterdiği görülmektedir. Bu durumun en temel nedeninin ise poli-kültür yapay sulak içerisinde cereyan eden bitki rekabeti ve sonucunda vejetasyon yapısında oluşan dengesizlik olabileceği düşünülmektedir. Literatür incelendiğinde bazı araştırmacılar bu durumu destekler nitelikte raporlar bildirmişlerdir. Örneğin, Coleman ve ark. (2001) *T.latifolia* türü ile bitkilendirilen mono-kültür yapay sulak alanın *Juncus effuses*, *Scirpus validus*, *T.latifolia* ile bitkilendirilen poli-kültür yapay sulak alana göre daha yüksek azot ve fosfor giderdiği tespit etmişlerdir. Buna paralel olarak, Türker ve ark. (2013b) *T.latifolia* ve *P.australis* bitkileri ile oluşturulmuş poli-kültür bir yapay sulak alanın performansının rekabet mekanizması nedeniyle azaldığını tespit etmişlerdir. Ancak yinede, B içeren atık suların arıtılması için bir poli-kültür yapay sulak alan kurulması gerekiyor ise *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *P.australis* türlerinin yapay sulak alan içerisinde bir arada kullanılmasının en uygun bitki kompozisyonu olacağı düşünülmektedir.

Araştırma periyodu süresince yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait pH değişimleri incelendiğinde, pH değişimlerinin yapay sulak alanlardaki bitki kompozisyonuna göre bir takım farklılıklar gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi giriş suyu ortalama pH değeri yapay sulak alanlar sayesinde 9,2'den 7,05-7,61 aralığına kadar düşürülmüştür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, pH'nın düşüşünün temel etkenlerinin başında ortamda gerçekleşen organik madde mineralizasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyonun geldiği bildirilmiştir (Cossu ve ark. 2001; Stottmeister ve ark. 2003; Maine ve ark. 2009). Bu çalışmalara göre ortamda nitrifikasyon

basamağının oluşabilmesi için 6,6 üzerinde pH değeri, denitrifikasyon basamağı içinde 6,5 ile 9,5 arasında pH değeri ideal bir değer olarak kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlarda, yapay sulak alanlar içerisinde akışı sağlanan çıkış suyunun pH değerlerinin 7,05 ile 7,61 arasında değiştiğini göstermektedir (Şekil 3.2). Bu değerler nitrifikasyon ve denitrifikasyon basamaklarının oluşabilmesi için gereken şartların yapay sulak alan dinamiği içerisinde oluştuğunu belirtmektedir. Bu durumda, muhtemelen yapay sulak alanlarda gerçekleşen organik madde mineralizasyonu sonucu ortaya çıkan CO₂ gazı ile, nitrifikasyon ve denitrifikasyon olayları sonucunda ortamdaki konsantrasyonu değişen NO₃ (Nitrat) ve NO₂ (Nitrit) bileşikler pH'nın düşmesini sağlamıştır. Yapay sulak alanların B ile birlikte yüksek oranda nitrat ve nitrit giderim performansı göstermesi bu durumu destekler niteliktedir. Ayrıca rizosfer bölgesinden kök solumunu sonucunda oluşan CO₂ gazının sucul ortama salınması ile yine köklerden suya bırakılan malat sitrat, amino asit, benzoik asit, fenol gibi organik asitlerin suyun pH'sının düşmesinde ayrıca rol oynamış olabilir. Bitkili sulak alanlarda pH'nın bitkisiz sulak alana göre daha fazla düşmesi bu duruma örnek verilebilir. Bununla birlikte, bu çalışmada yapay sulak alanlar içerisinde bekletilen suların pH'larının nispeten nötre yakın olması B'un bitkiler tarafından alınmasını da kolaylaştırmış olabilir. Çünkü, Oertli ve Grgurevic (1975) tarafından yapılan bir çalışmada, ortam pH'sının asidiğe yaklaşması ile bitkiler tarafından alınan B miktarının arttığını, pH'nın yükselmesi ile birlikte de B alınımının düştüğü rapor edilmiştir. Yapılan Pearson korelasyon analizlerin bazı yapay sulak alanlarda (YSA 5) pH düşüşü ile B giderimi arasında anlamlı korelasyonların tespit edilmesi bu durumu destekler niteliktedir ($p < 0,05$; $r = -,620$). Sonuç olarak sistemlerin içerisinde süregelen fiziksel, kimyasal ve biyolojik mekanizmalar, suyun pH'sında düşüş meydana getirmiş, bu da B'un yapay sulak alanlar içerisinde alı konulma miktarlarını değiştirerek farklı giderim performanslarının ortaya çıkmasına yardımcı olmuştur.

Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alanlardan elde edilen ortalama giriş ve çıkış su numunelerindeki Elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin değişimlerini gösteren Çizelge 3.2 incelendiğinde, genelde çıkış su konsantrasyonlarının EC değerlerinin giriş suyu değerlerine göre daha düşük

olduğu tespit belirlenmiştir. Ancak YSA 1, YSA 5, YSA 9 ve YSA 10 gibi sistemlerde çıkış suyu ortalama EC değerlerinin giriş suyu değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte One Way ANOVA istatistiksel analiz sonuçları tüm sulak alanların giriş suyu ile çıkış suyu arasında EC değerleri açısından anlamlı bir fark olmadığını belirtmektedir ($p>0,05$). Bu sonuç, kurulan yapay sulak alan sistemlerinin etkili bir EC giderimi kapasitesine sahip olmadığını göstermektedir. Ayrıca araştırma süreci içinde ölçülen EC değerlerine baktığımızda bitkili yapay sulak alanların çıkış sularının değerlerinin bitkisiz kontrole göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak bitkili yapay sulak alanlar ile bitkisiz kontrol grubundan elde edilen çıkış suyu EC değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilememiştir ($p>0,05$). Bu nedenle yapay sulak alanlar içerisinde B'un arındırılma sürecinde bitkilerin her hangi bir önemli rolünün olmadığı ve yapay sulak alanlardaki EC düşüşünün sedimantasyon gibi fiziksel süreçlere bağlı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, bitkili yapay sulak alanlarda bitkisiz kontrole göre daha yüksek bir EC değeri tespit edilmesi muhtemelen bitkili yapay sulak alanlarda bulunan vejetasyonun sebep olduğu yüksek transpirasyon oranı ile ilişkilidir. Buna göre bitkili yapay sulak alanlarda vejetasyon sayesinde daha fazla suyun buharlaşarak sistemlerden uzaklaştırılması, su içerisindeki anyonik ve katyonik iyonların derişimlerinin artmasına ve sonucunda EC değerlerinin yükselmesine neden olmuştur. Ayrıca yapılan Pearson korelasyon analiz sonuçlarına göre sadece en düşük EC değerinin belirlendiği bitkisiz kontrol grubunun EC değeri ile B giderimi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir ($p<0,05$). Bu sonuç, atık su içerisindeki düşük iyon konsantrasyonunun yapay sulak alanların B giderim performanslarını arttırabileceği ile ilgili önemli ipuçları sağlamaktadır. Ancak EC ile B giderimi arasındaki ilişki ile ilgili kesin bir yargıya varabilmek için daha spesifik çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır.

Yapay sulak alanlardan elde edilen giriş ve çıkış sularının sıcaklık değerlerine bakıldığında giriş ve çıkış örnekleri arasında ortalama sıcaklık değerleri nispeten aynıdır ($p>0,05$). Ayrıca, yapılan Pearson Korelasyon analizlerinde B giderimi ile sıcaklık arasında anlamlı bir korelasyon tespit

edilememiştir. Bu sonuçlar, araştırma sürecinde su sıcaklığının B giderimi üzerine olan etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir ($p>0,05$).

Araştırma periyodu içerisinde yapılan ölçümlerde çözünmüş oksijen değerinin yapay sulak alanlara göre bir takım farklılıklar gösterdiği bulunmuştur. Bununla birlikte, çoğu yapay sulak alandan örneklenen çıkış suyu çözünmüş oksijen konsantrasyonunun giriş suyu konsantrasyonundan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerin köklerinden ortama oksijenin salındığı düşünüldüğünde bu beklenen bir durumdur. Ancak bitki yapay sulak alanlardan YSA 2 ve YSA 3 ile bitkisiz kontrol grubu oluşturan YSA 6'nın çıkış suyu çözünmüş oksijen konsantrasyonu giriş suyu değerinden düşüktür. Buda, bitkisiz kontrol grubu dışında YSA 2 ve YSA 3'de bulunan bitkilerin köklerinden salınan oksijen miktarının suyun çözünmüş oksijen değerini değiştirmeye yetmediğini göstermektedir. Yapılan One-Way ANOVA istatistiksel analiz sonuçlarına göre sadece YSA 7 ve YSA 8'den örneklenen çıkış suyu ile giriş suyu arasında çözünmüş oksijen konsantrasyonu arasında bir ilişki tespit edilmiştir ($p<0,05$). Dahası, Pearson korelasyon analiz sonuçları YSA 1 ile YSA 8 için B giderimi ile çözünmüş oksijen arasında anlamlı bir korelasyon olduğunu göstermektedir ($p<0,05$). Bu sonuçlar aerobik ortamla B giderimi arasında yakın bir ilişki olduğunu ve ortamda artan oksijen konsantrasyonunun yapay sulak alanların B giderim performanslarına olumlu etki yaptığını belirtmektedir. Ancak bu ilişkiler hakkında kesin bir yargıya karar verebilmek için aerobik ortam-B giderimi üzerine daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, redoks değerlerinin +250 mV ile +225 mV arasında değişmesi durumunda denitrifikasyonun gerçekleştiği, +225 mV ile + 100 mV arasında manganın indirgendiği, +100 mV ile - 100 mV arasında demirin indirgendiği, - 100 mV ile - 200 mV arasında sülfatın indirgendiği ve -200 mV'dan sonra metanın ortaya çıktığı belirtilmektedir (Zehnder, 1980; Gambrell ve ark. 1991; Killham, 1994; Mitch ve Gosselink, 2000; Middelburg, 2000). Ayrıca pozitif değerlerin aerobik, negatif değerlerin anaerobik ortamla ilişkili olduğu bulunmuştur (Vymazal ve Kröpfelova, 2008). Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi, araştırma periyodu süresince ortalama redoks değerleri -6,68 mV ile +169 mV arasında değişmiştir. Bu sonuç araştırma

periyodu boyunca yapay sulak alanlar içerisinde mangan ve demirin indirgendiği redoks değerlerinin oluştuğunu göstermektedir. Dahası, elde edilen sonuçlara göre, demirin B'un arındırılma sürecinde yapay sulak alanlar içerisinde daha çok indirgenebilir olduğu söylenebilir. Vymazal ve Kröpfelova (2008) yapay sulak alanlarda demirin indirgenmesinin mikrobiyal faaliyetler sonucunda özellikle demir indirgeyen-bakteriler sayesinde olduğunu rapor etmişlerdir. Aynı araştırmacılara göre, demirin mikrobiyal etkinlik ile oksidasyonu sonrasında sulak alan içerisinde iyonların çökeltilmesinin sağlayan bir demir plaka formasyonu oluşturduğunu ve bu iyonların demir plaka formasyonuna bağlanması sonucunda sulak alan sedimentin de alı konulduğunu bulmuşlardır. Bu durumda muhtemelen, yapay sulak alan içerisinde B'un arındırılma sürecinde oluşan redoks ortamları demir oksitleyen bakterilerin faaliyetlerini arttırmış ve mikrobiyal faaliyetler sonucunda redoks +100 mV ile - 100 mV arasında demir plaka formasyonları meydana gelmiştir. Oluşan bu formasyonlar yapay sulak alanlar içerisinde bulunan B'a tutunarak B'un organik bazlı sedimente bağlanmasına ya da tutulmasına yardımcı olmuştur. Böylece yapay sulak alanların arıtım performansları yükselmiştir. Araştırma süresince mikrobiyal aktivitenin bir indikatörü olan dehidrogenaz enziminin yapay sulak alanlarda ölçülebilmesi demir oksitleyen bakterilerin faaliyetlerinin olduğunu kanıtlamaktadır (Şekil 3.41). Bununla birlikte yapılan Pearson korelasyon analizlerinde bazı yapay sulak alanlarda (YSA 5 ve YSA 8) B giderimi ile redoks arasında pozitif yönlü korelasyonların bulunması B'un arındırılma sürecinin pozitif redoks değerlerinde yani aerobik ortamlarda daha yüksek olabileceğini göstermektedir. Bu durum redoks ile oksijenin doğru orantılı bir ilişkisi olduğu düşünüldüğünde beklenen bir sonuçtur. Ayrıca, yapılan ölçümlerde bitkili yapay sulak alanlardaki redoks değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durumun yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerin ortama oksijen vermesi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Çünkü bitkisiz kontrol grubundan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ortalama redoks değerinin araştırma periyodu içerisinde -6,68 olarak ölçülmesi bu durumu destekler niteliktedir.

Yapay sulak alanlarda, inorganik azot formundaki nitrat ve nitrit giderimi amonifikasyon, nitrifikasyon ve denitrifikasyon, bitki akümüasyonu ve

sedimentasyon gibi mekanizmalar ile ilgilidir (Lee et al. 2009). Deneysel çalışmalar süresince, hem nitratın hem de nitritin verimli bir şekilde yapay sulak alanlar tarafından giderildiği belirlenmiştir ($p < 0,05$) (Şekil 3,7 ve Şekil 3,8). Elde edilen sonuçlara bakıldığında, bitkili yapay sulak alanlar bitkisiz yapay sulak alanlara göre daha yüksek nitrat ve nitrit giderimi gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu durumda, yüksek oranlarda nitrat ve nitrit giderimi yüksek miktarda inorganik azotunda yapay sulak alanlarda alı konulmuştur. Biyoremediasyon deneyi boyunca inorganik azotun yapay sulak alanlarda kalması hem mikroorganizmaların hem de bitkilerin sağlıklı bir şekilde yaşamsal faaliyetlerini sürdürmesini sağlamıştır. Araştırma periyodu içerisinde bitkilerde herhangi bir büyüme aksaklığının yaşanmaması ve elde edilen yüksek bitki biyoması bu durumu destekler niteliktedir. Bununla birlikte, bitkisiz kontrol YSA 6'da ortalama % 29 nitrat ve % 82 nitrit giderimi sağlanması, yapay sulak alanlarda nitrat ve nitrit gideriminin bitki kaynaklı olmasından ziyade mikrobiyal orjinli olduğu göstermektedir. Literatür incelendiğinde bu durumu destekleyecek birçok çalışma mevcuttur (Reedy ve De' Angelo, 1997; Mitsch 2000).

Bu çalışmada, yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerin konsantrasyon değiştirme günlerinde (2 haftalık periyotlarla) boy uzunlukları, bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR), üretilen yeni filiz sayısı ve tür baskınlıkları ölçülerek rekabet değerlendirilmesi yapılmıştır. Bunun sonucunda, yapay sulak alanlarda bulunan bitki türlerinin, sulak alan içerisinde bulunan diğer bitkilerin gelişimlerini nasıl etkilediğini ve sistemlerin B giderim performanslarının nasıl değiştiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, YSA 1'de agresif bir tür olduğunu bildiğimiz *T.latifolia* ve *T.angustifolia* türleri ilk izleme günlerinden itibaren yüksek bir RGR göstererek yapay sulak alanlarda baskınlıklarını arttırmışlardır (Şekil 3.17). Ancak, 56. izleme gününden sonra *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin maksimum boy aralığına ulaşması ile birlikte ve *P.australis* türü nispeten daha yüksek bir nispi gelişme göstererek yapay sulak alan içerisinde baskın hale gelmeye başlamıştır. Bitki boyları açısından değerlendirildiğinde, araştırma periyodu boyunca agresif bir tür olan *T.latifolia* bitkisi diğer türlere göre YSA 1 içerisinde daha yüksek bir boy uzunluğuna ulaşmıştır. Bu sonuç, *T.latifolia* bitkisinin diğer iki türe göre gövde rekabetinde

daha başarılı olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, araştırma sonunda elde edilen bitki biyomas ölçümleri incelendiğinde *T.latifolia* bitkisinin toprak üstü biyomasının diğer türlere göre yüksek olması bu durumu kanıtlar niteliktedir. YSA 1’de üretilen yeni filiz sayısına bakıldığında ise, en çok yeni filizin *T.angustifolia* bitkisi tarafından üretildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç *T.latifolia* bitkisinin diğer bitki türlerine göre daha hızlı bir şekilde yapay sulak alan içerisinde yayılış gösterdiğini belirtmektedir. Bununla birlikte *P.australis* bitkisi sulak alan içerisinde *T.latifolia* bitkisine göre daha fazla sayıda yeni filiz üretmesine rağmen baskınlık sağlayamamıştır. Bu durum, *P.australis* türünün organik bazlı sedimente daha düşük adaptasyon göstermesi sonucu olmuş olabilir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, her ne kadar bu yapay sulak alanda bulunan *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *P.australis* türleri arasında bir türler arası rekabet ortamı oluşmuşsa da bu üç bitkinin her birinin agresif özelliklere sahip olması yapay sulak alan içerisinde bir denge unsuru yaratmış ve rekabet mekanizmasının B’un arındırılma sürecine etkisinin daha düşük düzeyde olmasını sağlamış olabilir. Ayrıca Bor giderim performanslarına bakıldığında poli-kültür bir bitki kompozisyona sahip YSA 1’in bitkisiz kontrol grubunu oluşturan YSA 6’a göre daha yüksek bir B giderim performans göstermesi, buna karşın YSA 7 ve YSA 8 gibi mono-kültür sistemlere göre daha düşük B giderimi sağlaması bu durumu açıklamaktadır.

YSA 2’den elde edilen sonuçlara göre, beklendiği gibi kullanılan bitkilerden agresif *T.latifolia* ve *T.angustifolia* türleri tıpkı YSA 1’de olduğu gibi yüksek bir RGR’e sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu sulak alanda, YSA 1’den farklı olarak bitkilerin nispi gelişmeleri 70.gün sonuna kadar devam etmiş ve 70.gün sonunda sıfırın altına gerilemiştir. Şekil 3.19’da gösterildiği gibi araştırma periyodu içerisinde agresif *T.latifolia* ve *T.angustifolia* türleri *J.gerardii* bitkisine göre yapay sulak alanda daha yüksek bir boy uzunluğuna ulaşmıştır. Bunun sonucunda yapay sulak alan içerisinde *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin etkinliği artmış ve *J.gerardii* bitkisinin gelişimi olumsuz yönde etkilenmiştir (Şekil 3.21). Bunun kanıtı olarak, tür baskınlığı açısından bakıldığında, *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin yapay sulak alanlarda daha yüksek bir baskınlıkla sulak alanda bulunmuş olması gösterilebilir. Üretilen yeni

filiz sayısı incelendiğinde, en çok yeni filiz üretiminin *T.angustifolia* bitkisi tarafından üretildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte YSA 1’den farklı olarak bu sulak alanda, bulunan *T.latifolia* bitkisinin spika ürettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sulak alan içerisinde *T.latifolia* bitkisinin rekabet ortamı içerisinde olduğuna ilişkin bir takım ipuçlarına işaret etmektedir. Weigelt ve Jolliffe (2003) yaptıkları çalışmada *T.latifolia* bitkisinin tür içi ya da türler arası rekabete girdiği zaman bir an önce kolonileşmesini tamamlamak ve ortamda baskın hale gelmek için çok sayıda spika üretme davranışı gösterdiğini bulmuşlardır. Bu nedenle, muhtemelen YSA 2’de bulunan *T.latifolia* bitkisi sistem içerisinde üstünlüğü ele geçirmek için *T.angustifolia* ve *J.gerardii* türü ile rekabete girmiş ve YSA 2’de yüksek seviyede oluşan rekabet ortamı B’un sulak alan içerisindeki arındırılma sürecini etkilemiştir. Bu durum, Şekil 3. 12’de gösterildiği gibi YSA 2’nin B giderim performansının düşmesine neden olmuştur. YSA 2 sisteminin bitkisiz kontrol grubun arıtım performansına en yakın B arıtım performansı göstermesi ve kurulan tüm bitkili yapay sulak alanlar arasında en düşük B giderim oranına sahip olması bu durumu destekler niteliktedir. Bu nedenle araştırmacıların gelecekte *T.latifolia* *T.angustifolia* ve *J.gerardii* kompozisyonunda bir yapay sulak alan tasarlanmasına karar vermesi durumunda rekabet mekanizmasının B giderim üzerine olan olası etkilerini göz önünde bulundurmaları gerekmektedir.

Tüm bitkilerin bir arada bulunduğu ve bitki çeşitliliğinin en çok olduğu poli-kültür YSA 5’deki rekabet analiz sonuçları incelendiğinde, en yüksek nispi gelişmeyi ilk haftalarda *P.australis* gösterse de, daha sonra *T.latifolia* ve *T.angustifolia* türleri yüksek RGR değeri göstermişlerdir. Ayrıca araştırma periyodu süresince, *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin ulaştığı boy uzunluklarının *P.australis* ve *J.gerardii* bitkilerinin ulaştığı boy uzunluğunda fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum, *T. latifolia* ve *T. angustifolia* bitkilerinin yapay sulak alan içerisinde rekabette üstünlüğünü sağladığını göstermektedir. Yapay sulak alanın %70’inden fazlasının *T. latifolia* ve *T. angustifolia* bitkileri tarafından kaplanması bu durumu destekler niteliktedir. Ayrıca ilginç bir şekilde *T.latifolia* bitkisinin bireylerinin tıpkı YSA 2’deki *T.latifolia* bitkileri gibi spika ürettiği belirlenmiştir. Bu durum YSA 5’de bulunan bitkiler arasında bir rekabet ortamı oluştuğunu göstermektedir. Bitkilerin bu yapay sulak alan içerisinde bir biri ile

rekabete girmesi muhtemelen sistemin B giderim performansını düşürmüştür. YSA 5'in araştırma periyodu süresince mono-kültür yapay sulak alanlara nazaran % 42 gibi düşük bir artım performansı ile çalışması bu durumu açıklamaktadır.

Araştırma periyodu süresince diğer poli-kültür yapay sulak alanlardan (YSA 3, YSA 4) elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, YSA 3'de *T.latifolia* bitkisinin, YSA 4'de ise *T.angustifolia* ve *P.australis* türlerinin baskın durumda olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu sistemlerde rekabet üstünlüğünün bu türlerde olduğu söylenebilir. Ayrıca bu sistemlerden elde edilen B giderim performanslarının rekabet ortamının olduğu sistemler olan YSA 2 ve YSA 5'den yüksek olması nispeten bu sistemlerde rekabet olayının düşük sevide seyrettiğini göstermektedir.

Mono-kültür yapay sulak alanlardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise, bu tip sistemlerde bulunan bitkilerin bir birleriyle hem alan, hem de besin rekabetine girmediği düşünülmektedir. Özellikle mono-kültür yapay sulak alanlarda bulunan *T. latifolia* ve *T. angustifolia* türlerinin poli-kültür yapay sulak alan sistemlerine göre nispeten daha az yatay yayılım göstermesi ile *J.gerardii* bitkisinin poli-kültür sistemlere göre daha yüksek bitki uzunluğuna erişmesi, rekabetin mono-kültür yapay sulak alanlarda ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle, araştırmalar süresince mono-kültür yapay sulak alanlarda bulunan bitkiler arasında rekabet ortamı oluşmadığından dolayı mono-kültür sistemlerde bitki rekabetinin B'un arındırılma sürecine doğrudan ya da dolaylı bir etkisi bulunamamıştır.

Bu doktora tez çalışması kapsamında ölçülen RGR, bitki uzunluğu, tür baskınlığı ve yeni filiz sayısı gibi parametreler sayesinde yapay sulak alanlarda erken safhada oluşabilecek bitki rekabeti hakkında değerli bilgiler elde edilmiştir. Biyoremediasyon deneyinin başlamasıyla elde edilen sonuçlar, yapay sulak alanlarda süre gelen rekabet olayının şiddetinin yapay sulak alanlarda bulunan bitki kompozisyonuna göre değişiklik gösterebileceğini belirtmektedir. Bununla birlikte araştırma periyodu süresince yapay sulak alanların bünyesinde oluşan rekabet ortamının bazı poli kültür yapay sulak alanlarda B giderim performansları üzerine olası etkilerine yönelik bulgular tespit edilmiştir. Buna göre, özellikle YSA 2 ve YSA 5 gibi sistemlerde bitkiler arasındaki rekabetin şiddetli, YSA 1,

YSA 3 ve YSA 4 gibi sistemlerde ise düşük seviyede süre geldiği düşünülmektedir. Araştırma periyodu boyunca en düşük B giderim performansının rekabet olayının yüksek seyrettiği düşünülen sistemlerde tespit edilmesi bu durumu açıklamaktadır. Ayrıca mono-kültür sistemlerde poli-kültür sistemlerle karşılaştırıldığında yüksek B giderim performansı belirlenmesi bitki rekabetinin B'un arındırılma sürecine etkisi olabileceğini göstermektedir. Ancak, yapay sulak alanlarda bitki rekabet ortamının oluştuğuna yönelik kesin bir yargıya varabilmek için bitkilerin rekabet durumunda salgıladıkları allelopatik kimyasallarının ayrıca analiz edilmesi gerekmektedir.

AAS analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerin, B'a maruz bırakılmayan kontrol grubu bitkilerinden daha yüksek konsantrasyonlarda B içerdiği göstermektedir. Bu sonuç, deneysel çalışmalar süresince B'a maruz bırakılan deney grubu bitkilerinin bünyelerine atık su içerisinde bulunan B'u aldıklarını belirtmektedir. Ayrıca, araştırma periyodu sonunda hasat edilen bitkilerin toplam B içerikleri incelendiğinde mono-kültür sistemlerde bulunan bitkilerin (YSA 9'da bulunan *P.australis* türü hariç) poli-kültür yapay sulak alanlara göre daha fazla B içerdiği belirlenmiştir. Bu durum, mono-kültür sistemlerde bulunan bitki türlerinin atık su içerisinde bulunan B'u, poli-kültür sistemlerde bulunan aynı türe ait bireylerine göre kendi bünyelerine akümüle etmede daha başarılı olduğunu göstermektedir. Dahası, poli-kültür yapay sulak alanlarda oluşan yoğun bitkisel rekabet ortamı bu tür sistemlerin akümüstasyon kapasitelerinin düşmesine neden olmuş olabilir. Çünkü araştırma periyodu içerisinde daha öncede bahsedildiği gibi poli-kültür sistemlerde rekabet ortamı oluştuğu bulunmuştur. Öte yandan, poli-kültür sistemlerde elde edilen dikkat çekici noktalardan bir tanesi de tüm bitkilerin bir arada bulunduğu YSA 5'de bitkilerin bünyelerine akümüle ettiği B miktarının mono-kültür sistemler ve diğer poli-kültür sistemler ile karşılaştırıldığında daha düşük bulunmasıdır. Bu sonuç, yapay sulak alan içerisinde bitki çeşitliliğinin artması ile birlikte bitkilerin B akümüstasyon oranının düştüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, araştırma periyodu sonunda elde edilen sonuçlara göre toprak üstü kısımların içerdikleri B miktarının toprak altı kısımlara göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Literatürdeki bazı çalışmalar incelendiğinde bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile

bir takım benzerlikler bulunmuştur. Örneğin, Vymazal ve ark. (2009) bir yüzey altı akışlı yapay sulak alanda bulunan *P.australis* bitkisinde en yüksek B konsantrasyonunu toprak üstü kısımlarda tespit etmişlerdir. Aynı şekilde Morrari ve ark. (2015) evsel atık suların arıtımı için kurulan yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerin toprak üstü kısımlarının toprak altı kısımlara göre daha yüksek B içerdiğini bulmuşlardır. Türker ve ark. (2013a) yaptıkları çalışmada yaprak ve gövdelerde tespit ettikleri B miktarlarının köklerden daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, yapay sulak alan içerisinde bulunan bitkilerin yaprak ve gövde gibi toprak üstü organlarının B'un atık su içerisinde uzaklaştırılmasında kökler gibi toprak altı organlara göre daha önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu sonuçlar atık su içerisinde bulunan B'un kökler vasıtasıyla bitki bünyesine alındıktan sonra gövde ve yaprak gibi kısımlara taşındığını göstermektedir. Bor'un toprak altı kısımlardan toprak üstü kısımlara doğru taşınması B'un toprak üstü kısımlarda bir takım fizyolojik mekanizmalarda görev alması nedeniyle olabilir. Çünkü bitkilerde borik asit ya da borat iyonları formunda alınan B, polen çimlenmesinde, polen tüpü gelişiminde, çiçeklenme ve meyve oluşumunda, hücre zarı ve hücre duvarı yapısına katılma gibi çoğunlukla toprak üstü kısımlarda gerçekleşen fizyolojik olaylarda rol oynamaktadır (Blevins ve Lukaszewski 1998; Brown ve ark. 2002; Wang ve ark. 2003; Dinçer 2003; Camacho-Cristobal ve ark. 2004; Türe ve Bell 2004).

Bu çalışmada, araştırma periyodu sonunda yapay sulak alanlardan hasat edilen bitkilerin uygun ortam koşulları altında biyogaza çevrilmesi durumunda elde edebilecek tahmini toplam biyogaz, metan gazı, elektrik enerjisi miktarı ve enerji potansiyelleri hesaplanmıştır (Çizelge 3.3). Bununla birlikte bulunan değerlerin daha büyük alanlara modellenmesi birim alan ve birim zaman olarak belirlenmiş ve ($\text{hektar}^{-1} \text{ ay}^{-1}$) olarak verilmiştir. Çizelge 3.3 gösterildiği gibi, en yüksek biyogaz üretme potansiyeli olan sistemin *T.latifolia*, *T.angustifolia* ve *J.gerardii* bitkilerinin bir arada bulunduğu YSA 2 olduğu, en düşük biyogaz üretme potansiyelin ise sadece *P.australis* türünü içeren mono-kültür YSA 9'da olduğu bulunmuştur. Bu durum, araştırma sonunda hasat edilen bitki biyomasları ile paralellik göstermekle birlikte, *T.latifolia* türünü bulunduran sistemlerin yüksek bitki biyomasına sahip olması göz önüne alındığında beklenen bir

sonuçtur. Öte yandan, tespit edilen dikkat çekici noktalardan bir tanesi de araştırma periyodu boyunca en yüksek B giderim performansı gösterdiği belirlenen YSA 7'in, kurulan sistemler arasında 1,4266 m³ gibi yüksek bir biyogaz üretme kapasitesine de sahip olmasıdır. Buna göre, YSA 7'de bulunan *T.latifolia* bitkisinin hasat edilerek biyogaza çevrilmesi durumunda 1,299 m³ bir metan gazı elde edilebilmektedir. Biyogaz içerisinde yanıcı olduğu bilinen metanın yakılması sonucunda YSA 7'deki toplam bitki biyomasından 4,993 kWh elektrik üretilebileceği ön görülmektedir. Bu nedenle, her ne kadar en yüksek biyogaz elde edilme potansiyeli YSA 2'de tespit edilse de, YSA 7' nin hem yüksek B giderim performansı göstermesi hem de bu sistemde bulunan bitkilerden yüksek biyogaz üretme kapasitesinin bulunması, etkili bir atık yönetimi stratejisi açısından değerlendirildiğinde bu sistemi diğer yapay sulak alanlar arasında bir adım öne çıkarmaktadır.

Bir ekosistemde bulunan bitkilerin primer verimliliği yaklaşıpta olsa ekosistemin üretkenliği hakkında da bilgi sağlamaktadır (Murphy ve ar. 2006). Primer verimlilik bitkilerdeki klorofil *a* ve klorofil *b* pigmentlerinin toplam miktarlarının ölçülmesi sonucunda belirlenebilmektedir (Odum ve Barret, 2000). Bu çalışmada yapay sulak alanlarda bulunan bitkilerden 14 günlük periyotlar halinde toplanan yaprak örneklerinin içerdikleri toplam klorofil (a+b) miktarları ölçülmüş ve bitkilerin primer verimliliği ile ilişkili bilgiler elde edilmiştir. Çizelge 3.13'de gösterildiği gibi, yapay sulak alan içerisinde bulunan bitkilere ayrı ayrı bakıldığında bitkilerin toplam klorofil miktarının bitki türüne göre farklılık gösterdiği bulunmuştur. Ancak her ne kadar bitki türlerinin içerdikleri klorofil konsantrasyonu farklı olsa da örneğin poli-kültür yapay sulak alanların toplam klorofil konsantrasyonları birbirine az çok benzemektedir. Odum ve Barret (2000) primer üretim ve klorofil arasındaki bu ilişkiyi “Bütün; hem parçaların toplamından farklıdır; hem de parçaları bütünü açıklamaya yetmez” prensibi ile açıklamaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, poli-kültür yapay sulak alanlarda bulunan vejetasyonun primer verimliliğinin araştırma periyodu boyunca aynı düzeyde olduğunu göstermektedir. Bu durum, bitkilerin araştırma periyodu boyunca güneşlenme sürelerinin aynı olması ve operasyonel koşullara benzer tepkiler vermesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, aynı türe ait bireylerin poli-

kültür ve mono-kültür sistemlerdeki toplam klorofil konsantrasyonuna bakıldığında, mono-kültür yapay sulak alanlarda bulunan bitki bireylerinin (YSA 10'da bulunan *J.gerardii* türü hariç) daha yüksek klorofil konsantrasyonuna sahip olduğu bulunmuştur. Bu durum poli-kültür sistemlerde olan bireylerin fizyolojik olarak baskılandığını göstermektedir. Oluşan fizyolojik baskılanmanın temel nedeninin poli-kültür sistemlerde süre gelen rekabet mekanizması olabilir. Alizade ve ark. (2011) yılında yaptıkları çalışmada, ortamda oluşan tür içi veya türler arası rekabetin bitkilerdeki toplam klorofil konsantrasyonunu düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca, Carter ve Knapp (2001) rekabet mekanizmasının klorofil konsantrasyonu üzerindeki fizyolojik baskılama ajanı olduğunu rapor etmiştir. Bu nedenle, poli-kültür sistemlerde klorofil konsantrasyonu mono-kültür sistemlere göre düşük olması, poli-kültür sistemlerde bulunan bitkilerin bir birleri ile rekabete girdiğinin diğer bir kanıtı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak YSA 3 ve YSA 4 gibi poli-kültür sistemlerde bulunan *J.gerardii* türü, mono-kültür sistemlere göre daha yüksek klorofil konsantrasyonu içermektedir. Bu durum, bu poli-kültür sistemlerde bulunan *J.gerardii* türünün mono-kültür sistemlerde bulunan aynı türe ait bireylerine göre daha üretken olduğunu göstermektedir. Rekabet olayının bu sistemlerde diğer poli-kültür sistemlere nazaran düşük seviyede gerçekleşmesi bu durumu açıklamaktadır.

Yapay sulak sedimentinde tutulan B'un miktarı sediment bünyesinde bulunan organik madde miktarı ile yakından ilişkilidir (Türker ve ark. 2014). Pek çok araştırmacı yapay sulak alanlarda organik bazlı sedimentin kullanılması durumunda daha fazla B'un atık sudan temizlenebileceğini rapor etmişlerdir (Ye ve ark. 2003; Kuyucak ve Zimmer, 2004; Groos ve ark. 2007; Allende ve ark. 2012; Allende ve ark. 2014). Bu nedenle bu çalışmada kum, çakıl gibi dolgu malzemeleri ile birlikte torf maddesi de kullanılarak organik bazlı bir sediment tabakası hazırlanmıştır. Çizelge 3.13. görüldüğü gibi, araştırma periyodu sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerindeki toplam B konsantrasyonunun kontrol grubu örneklerinden daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, araştırma süresince yapay sulak alan sistemlerinden geçen atık su içerisinde bulunan B'un organik bazlı sedimentte alı konulduğunu göstermektedir. Allende ve ark. (2014) yapay sulak alan içerisindeki B'un organik bazlı sedimente

tek bir OH⁻ iyonu değişimi ve diyol ile ko-diyol kompleksi sayesinde yapıştığını ve sedimentte kalıcı olarak tutunduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada muhtemelen atık su içerisinde bulunan B'un bir kısmı yapay sulak alan içerisinde hidrolik bekletme sureci içerisinde OH⁻ iyonu değişimi ve diyol ile ko-diyol kompleksi sureleri sonunda organik bazlı sedimente tutunmuş ve araştırma periyodu sonuna kadar burada kalıcı olarak alı konulmuştur. Sedimentte alı konulan B'un miktarını belirleyen bir diğer önemli parametre ise toprak pH'sıdır. Sartaj ve Fernadez (2006) ve Craw ve ark. (2006) nötral-alkali pH'larda B'un alimunyum ve demir kompleksleri tarafından absorbe edildiğini bulmuşlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre sediment pH'sının hafif alkali olmakla birlikte nötral değerlere yakın olduğu görülmektedir. Buda, yapay sulak alanlar içerisindeki B'un organik bazlı sedimentte alı konulmasını ve alimunyum ve demir gibi kompleksler tarafından absorbe edilmesini kolaylaştıran bir pH ortamının olduğunu belirtmektedir. Bu kapsamda, uygun pH koşulları B'un alimunyum ve demir gibi komplekslere absorbe edilmesi ile organik bazlı sedimentte kalıcı olarak alı konulmasını sağlamıştır. Araştırmalar boyunca yapay sulak alanlarda redoks değerlerinin +200 mV ile - 100 mV arasında değişerek B'un bağlandığı demir plaka formasyonlarının yapay sulak alan içerisinde olduğunun bilinmesi bu durumu destekler niteliktedir. Bununla birlikte, sedimentin içerdiği kireç miktarı da yapay sulak alanlarda tutunan B miktarını değiştirebilmektedir. Ye et al. (2003) B ile kalsiyumun yapay sulak alan içerisinde beraber okelti oluşturarak sediment tabakasına tutunduğunu bulmuşlardır. Bu nedenle aynı araştırmacılar kireç taşının alternatif bir dolgu malzemesi olarak yapay sulak alanlarda kullanılabileceğini önermişlerdir. Böylece yapay sulak alanların B giderim performanslarının artabileceğini belirtmişlerdir. Çizelge 3.13'de grldğu gibi araştırma sonunda toplanan sediment rneklerinin Ca ve CaCO₃ değerlerinin yapay sulak alanlarda bulunan bitki kompozisyonuna göre bir takım farklılık göstermiştir. Buna göre, mono-kültür sistemlerden toplanan sediment rneklerinin Ca değerinin 8513 ile 10353 mg kg⁻¹ arasında poli-kültür sistemlerden toplanan örneklerin Ca değerinin 1641 ile 4522 mg kg⁻¹ arasında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca, CaCO₃ değerlerine bakıldığında mono-kültür sistemlerin CaCO₃ değerinin poli-kültür sistemlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, araştırma periyodu boyunca yapay

sulak alan sistemlerinden geçen atık su içerisindeki B miktarının bitki kompozisyonuna göre bir takım farklılıklar gösterdiğini belirtmektedir. Buna göre, Ye ve ark. (2003) belirttiği gibi mono-kültür sistemlerin sedimentinde daha fazla miktarda bulunan Ca ve CaCO₃ atık su içerisinde bulunan B ile daha fazla çökelti oluşturmuş böylece mono-kültür sistemlerin daha yüksek B giderme performansı göstermesine yardımcı olmuştur. En yüksek B giderim performansının sağlandığı YSA 7’de, ayrıca en çok Ca ve CaCO₃ miktarının da tespit edilmiş olması bu durumu desteklemektedir. Bununla birlikte, bitkiler için yararlı olan ekstrakte edilebilir B miktarına bakıldığında sedimentteki toplam B miktarı ile paralel olarak mono-kültürlerden örneklerde (YSA 9 hariç) daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Dehidrogenaz enziminin aktivitesi bir ortamdaki mikrobiyal aktivitenin düzeyini gösteren en önemli indikatörlerden biridir (Hinojosa ve ark. 2008; Paradelo ve Barral, 2009; Bonanomi ve ark. 2011). Ayrıca bu enzimin aktivitesi ölçülerek ortamda herhangi bir stres faktörünün olup olmadığı anlaşılabilir (Kumar ve ark. 2013). Bu çalışmada araştırma periyodu içerisinde ve araştırma sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz enziminin aktivitesi farklı zamanlarda ölçülerek hem yapay sulak alanlardaki mikrobiyal aktivitenin düzeyi hesaplanmıştır hem de atık su ile birlikte sistemlere verilen B’un mikrobiyal etkinliklere herhangi bir etkisinin olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu sonuçlara göre dehidrogenaz aktivitesinin yapay sulak alanlara verilen B dozajları ile yakın ilişkili olmayıp daha çok çevresel koşullara göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte Şekil 3.41’de gösterildiği gibi ekim ayında toplanan sediment örneklerindeki dehidrogenaz aktivitesinin eylül ayındaki örneklerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum literatürdeki örneklerle karşılaştırıldığında beklenen bir durumdur. Buna göre ekim ayında bitki vejetasyonunun yavaş yavaş sonlanması ile birlikte yapay sulak alanlarda daha fazla organik madde kalmış buda daha yüksek bir mikrobiyal aktiviteye neden olmuştur. Dehidrogenaz aktivitesi ile organik madde miktarı arasında güçlü bir korelasyonun bulunması bu durumu açıklamaktadır (Kumar ve ark. 2013). Ancak en düşük dehidrogenaz aktivitesi araştırma sonunda yapay sulak alanlardan toplanan sediment örneklerinde tespit edilmiştir. Bu durum,

araştırma sonunda hem hava hem de su sıcaklığının 10⁰C'nin altına düştüğü için mikrobiyal aktivitenin de yavaşladığı düşünüldüğünde beklenen bir durumdur. Ayrıca elde edilen ilginç sonuçlardan biri de, mono-kültür yapay sulak alanlarda ölçülen dehidrogenaz enziminin aktivitesinin genellikle poli-kültür yapay sulak alanlardaki aktivitedene daha yüksek olduğunun tespit edilmesidir. Bu da, yapay sulak alanlarda bulunan mikrobiyal aktivitelerinin bitki kompozisyonuna göre değişiklik gösterebileceğini belirtmektedir. Ayrıca poli-kültür yapay sulak alanlarda dehidrogenaz aktivitesinin düşük seyretmesinin bir nedeni de bu sistemlerde gerçekleşen bitki rekabeti olabilir. Ancak bu durumla ilgili kesin bir yargıya varabilmek için bitki rekabeti ve mikrobiyal aktivite ilişkisi üzerine daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Yapay sulak alanlarda B giderim mekanizması temelde atık su içerisinde bulunan B'un filtrasyon malzemesine ya da organik bazlı sedimente tutunması, çökeltmesi ve bitki bünyesine alınımı olaylarına dayanmaktadır (Ye ve ark. 2003; Kuyucak ve Zimmer, 2004; Groos ve ark. 2007; Allende ve ark. 2012; Türker ve ark. 2013a; Türker ve ark. 2013b; Türker ve ark.2014; Allende ve ark. 2014). Bunlardan ilk iki proses bir çok araştırmacı tarafından B'un yapay sulak alan içerisinde alı konulmasında en önemli mekanizmalar olarak kabul edilmektedir (Ye ve ark. 2003; Allende ve ark. 2012; Türker ve ark.2014; Allende ve ark. 2014). Bu çalışmada yapay sulak alanlarda kullanılan bitki ve sediment bileşenlerinin B'un arındırılma sürecindeki rollerinin ortaya çıkarılması ve B'un sistem içerisinde hangi mekanizmalar ile arındırıldığına tespiti için bir Bor kütleli denge modeli (BKDM) kullanılmıştır. Bu model kullanılarak, sisteme yüklenen toplam B miktarı, sediment tarafından tutunan B miktarı, bitkiler tarafından absorbe edilen B miktarı ve yapay sulak alanlara giren ve çıkan B miktarına göre belirlenemeyen B miktarı tespit edilebilmiştir (Çizelge 3.14). Ayrıca bu model kullanılarak yapay sulak alanlara yüklenen B'un sistem içerisinde yüzdesel olarak nasıl dağıldığı belirlenebilmiştir. BKDM kullanılarak elde edilen B'un dağılımına baktığımızda, yapay sulak alanlara verilen B'un % 46,5 ile %60,5'inin organik bazlı sedimentte alı konulduğu, %0,3 ile %6,73'nün bitkiler tarafından akümüle edildiği ve % 0,12 ile %12'nin ise belirlenemediği bulunmuştur. Buna göre, yapay sulak alanlara atık su içerisinde yüklenen B'un

büyük bir kısmının organik bazlı sediment tarafından tutunduğu görülmektedir. Buna karşın, atık su içerisinde bulunan B'un çok küçük bir kısmı bitkiler tarafından absorbe edilmiştir. Bu durum, yapay sulak alan içerisindeki B'un temel arındırılma mekanizmasının organik bazlı sediment olduğunu göstermektedir. Bitkisiz kontrol sisteminden araştırma periyodu boyunca % 38 civarında bir B giderim performansı göstermesi organik bazlı sedimentin bitkilere göre B'un arındırılma sürecinde daha önemli bir rolü olduğunu desteklemektedir. Ancak, B giderim performanslarına baktığımızda bitkili yapay sulak alanlardan elde edilen giderim performanslarının, bitkisiz kontrole göre yüksek seyretmesi hatta bazı sistemlerden elde edilen B giderim oranlarının bitkisiz kontrole göre neredeyse iki katına yakın olması (YSA 7 ve YSA 8) organik bazlı sediment ile bitkilerin etkileşimlerinin B giderim mekanizması üzerinde kümülatif bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, B'un yapay sulak alan içerisindeki arındırılma mekanizmasının bitki türene, vejetasyon kompozisyonuna, sediment tipine ve çevresel faktörlere göre değişebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın bilimsel katkılarının yanı sıra doğal yöntemlerle B kirliliğinden kaynaklı problemleri çözümlenmeye yönelik araştırmalara da katkı sağlayacağı da kesindir. Çünkü çevrenin B maden atık suları ile kirletilmesinin azaltılması ve B'ca kirletilmiş çevrenin kontrol altına alınması, hatta çevreye salınan B'un tekrar kullanılabilir forma dönüştürülmesi bu tez çalışmasının hedeflerinin en başında gelmektedir. Bu sayede; ekosistemlerde yüksek konsantrasyonlarda bulunması durumunda başta insanlar olmak üzere tüm canlılar ve çevre için tehlikeli kirleticilerden biri olabilecek B, canlı yaşamını daha az tehdit eder hale getirilebilecektir. Açık ocak B madenciliğinin yapıldığı Kırka B işletmesi gibi tesislerde, cevher üzerindeki toprağın sıyrılması ve B cevherinin yıkanması sonucunda kalan atık materyaller dekabaj alanlarında biriktirmektedir. Ancak yılın belli dönemlerinde özellikle yağmur ve erozyon gibi sebepler ile sürekli veya aralıklı olarak dekabaj alanlarından sızan B içeren atık sular dekabaj alanı sınırları içerisinde birikerek sucul ekosistemler açısından bir tehdit oluşturmaktadır (Şekil 4.44). Bu tez çalışmasında oluşturulan yapay sulak alan prototipleri sayesinde, Kırka B rezerv bölgesinde dekabajlardan sızan suların kontrol altına alınabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle Kırka B işletmesi ile

Türkiye’deki diğer B işletme sahaları içerisinde bulunan dekabaj alanlarının etrafına yapay sulak alanların kurulması bu alanlardan kaynaklanacak sızıntıların hem kontrolünü sağlayabilecek hem de atık suların çevreye verebileceği zararları en aza indirgeyecektir. Şimdilik pilot çalışma düzeyinde yürütülen bu çalışma, gerçek boyutlardaki yapay sulak alanların kirlilik kontrolü uygulamaları için kullanılması için bir adımdır.



Şekil 4. 1. Bor rezerv alanı içerisinde oluşturulan dekabaj alanları etrafında biriken sızıntı suları ve yapay sulak alanların kurulabileceği potansiyel bir alan.

Ekolojik sürdürülebilirlik bilincinin her geçen gün arttığı günümüzde, atık bitki biyomaslarının değerlendirilmesi çevre dostu uygulamalar olarak ön plana çıkmaya başlamıştır (Arevalo ve ark. 2005; Tejada ve ark. 2008). Bu nedenle, yapay sulak alanlarda kullanılan bitkilerin, belirli periyotlar ile hasat edilip, bu bitkilerin organik kısımlarının bozundurulup biyogaza, bozundurulamayan posa kısmının ise B ve diğer besleyici element içeriği bakımından fakir olan alanlarda yeşil gübre olarak kullanılabilirliği düşünülmektedir. Bu uygulamalar ile birlikte, suların biyolojik temizlenmesinin yanı sıra ek çıktılardan yararlanarak sürdürülebilir bir atık stratejisi kurulabilir. Bununla birlikte, yapay sulak

alanlardan hasat edilen bitkilerin sepet, hasır ve benzeri eşya yapımında kullanılan türler arasında bulunması için ayrıca önem arz etmektedir.

Bu çalışmada elde edilecek sonuçların, ileride yapay sulak alanların, ülkemizdeki ve dünyadaki B işletme sahalarında B'un suların arındırma işlemleri için bir alternatif olarak kullanılmasında veya arındırmanın bir parçası haline gelmesinde kullanılabileceği bir gerçektir. Arındırma işleminin etkisinin artırılması ve arındırmanın maliyetinin düşürülmesiyle madencilik aktivitelerinin çevreye verdiği zararın azaltılması sağlanabilir. Bu tür ilk kurulum ve işletme maliyetleri düşük olan arındırma stratejilerinin ülkemizde Eti Maden İşletmeleri bünyesinde faaliyet gösteren Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek işletmelerine etkili ve ucuz atık yönetimi için önemli bir alternatif sağlayabileceği düşünülmektedir. Bu işletmelerden oluşturulan maden atıkları sonucu kirlenmiş olan çevrenin temizlenmesinde ve işletmelerin çevre politikaları için önemli bir parametre sayılan karbon ayak izlerinin düşürülmesine bu projenin yardımcı olacağı büyük öneme sahip diğer bir katkıdır.

Bu çalışmanın, yapay sulak alan teknolojisinin sadece B içeren atık sular için değil, aynı zamanda ülkemizde evsel ve endüstriyel atık suların arıtılmasında kullanımını sağlayacak bir model olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, üzerinde çalışılması öngörülen bu projeden elde edilecek sonuçların, yapay sulak alanlar gibi çevre dostu uygulamalarının ülkemizde özellikle arazinin bol ve ucuz olduğu kırsal kesim ve köylerde yaygınlaştırılmasına olumlu yönde katkı sağlayacaktır.

Bu kadar düşük bütçeli bu tez çalışması, mikro düzeyde Türkiye'deki B işletmelerine, makro düzeyde ise ülke ekonomisine yapabileceği katkılar son derece önemlidir. Çevresel risk yönetimi açısından değerlendirildiğinde, uygulanması kolay, maliyetinin son derece düşük, çok etkili ve tamamen çevre dostu bu tür uygulamaların kullanılması konvansiyonel arıtım teknolojileri açısından dışarıya olan bağımlığımızı az da olsa azaltacağı bir gerçektir.

KAYNAKLAR

- Adrodos, B., Sanchez, O., Arias, C.A., Becares, E., Garrido, L., Mas, J., Bix, H., Morato, J. (2014), "Microbial communities from different types of natural wastewater treatment systems: Vertical and horizontal flow constructed wetlands and biofilters" *Water Research*, **74**, 203-212.
- Akman, Y., Ketenoglu, O. ve Geven, F. (2001), *Vejetasyon ekolojisi ve arastirma yontemleri*, Ankara.
- Alizade, A., Nejad, T.S., Rafiee, M. (2011), "Effect of plant density on percent of remobilization, chlorophyll content, light penetration rate and effective grain filling period of chickpea (*Cicer arietinum*) in dry farming" *Life Science Journal*, **8**, 36-39.
- Allende, K.L., Fletcher, T.D., Sun, G. (2012), "The effect of substrate media on the removal of arsenic, boron and iron from an acidic wastewater in planted column reactors", *Chem. Eng. J.*, **179**, 119-130.
- Allende, K.L., McCarthy, D.T, Fletcher, T.D. (2014), "The influence of media type on removal of arsenic, iron and boron from acidic wastewater in horizontal flow wetland microcosms planted with *Phragmites australis*", *Chem. Eng. J.* **246**, 217-228.
- Anderson, B. ve M'Gonigle, M. (2012), "Does ecological economics have a future? Contradiction and reinvention in the age of climate change" *Ecological Economics*, **84**, 37-48.
- Arar, Ö., Yüksel, Ü., Kabay, N., Yüksel, M. (2013), "Application of electrodeionization (EDI) for removal of boron and silica from reverse osmosis (RO) permeate of geothermal water" *Desalination*, **310**, 25-33.
- Arevalo, C.B.M., Drew, A.P. ve Volk, T.A. (2005), "The effect of common Dutch white clover (*Trifolium repens* L.) as a green manure, on biomass production, allometric growth and foliar nitrogen of two willow clones", *Biomass and Bioenergy*, **29**, 22-31.
- Barot, S. Lata, J-C, Lacroix, G. (2012), "Meeting the relational challenge of ecological engineering within ecological Sciences" *Ecol. Eng.*, **45**, 13-23.

- Batar, T., Köksal, N.S. ve Yersel, Ş.E. (2009), “Atık Bor, Atık Kağıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu”, *Ekoloji* **18**, 45-53.
- Bentli, İ., Özdemir, O., Çelik, M.S. ve Ediz, N. (2001), “Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri”
- Bergen, S.D., Bolton, S.M., Fridley, J.L. (2001), “Design principles for ecological engineering” *Ecol. Eng.* **18**, 201-210.
- Bialowiec, A., Albuquerque, A., Randerson, P.F. (2014), “The influence of evapotranspiration on vertical flow subsurface constructed wetland performance” *Ecol. Eng.* **67**, 89-94.
- Bilgin, M., Şimşek, İ., Tulun, Ş. (2014), “Treatment of domestic waste water using a lab-scale activated sludge/vertical flow subsurface constructed wetlands by using *Cyperus alternifolius*” *Ecol. Eng.* **70**, 362-365.
- Blankenberg, A-G.B., Haarstad, K. ve Søvik, A-K. (2008), “Nitrogen retention in constructed wetland filters treating diffuse agriculture pollution” *Desalination*, **226**, 114-120.
- Blevins, D.G. ve Lukaszewski, K.M. (1998), “Boron in plant structure and function”, *Annual Reviews of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **49**, 481-500.
- Böcük, H. (2010), *Batı Anadolu’da Yüksek Bor İçeren Topraklarda Doğal Yayılış Gösteren Bitkilerin Toprak Bitki İlişkisi Bakımından Araştırılması*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 2010.
- Böcük, H., Yakar, A., Türker, O. C., (2013), “Assessment of *Lemna gibba* L. (duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent”, *Ecological Indicators*, **29**, 538-548.
- Bonanno, G., Cirelli, G.L., Toscano, A., Giudice, R.L., Pavone, P. (2013), “Heavy metal content in ash of energy crops growing in sewage-contaminated natural wetlands: Potential applications in agriculture and forestry?” *Science of The Total Environment*, **452-453**, 349-354.
- Brisson, J. ve F. Charazenc. (2009), “Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection?” *Science of the Total Environment*, **407**, 3923-3930.

- Brix, H. ve Arias, C.A. (2005) “The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines”, *Ecol. Eng.*, **25**, 491-500.
- Brown, P.H., Bellaloui, N., Wimmer, M.A., Bassil, E.S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeffer, H., Dannel, F. ve Röheld, V. (2002), “Boron in Plant Biology”, *Plant Biol.*, **4**, 205-223.
- Brüll, A., van Bohemen, H., Costanza, R., Mitsch, W.J. (2011), “Benefits of ecological engineering practices” *Procedia Environmental Sciences*, **9**, 16-20.
- Buswell E G. (1952), “Laboratory studies of sludge digestion [Article] /Illinois Division of State Water Survey”, Vol. Bulletin no. 30.
- Camacho-Cristóbal, J. J., Rexach, J., González-Fontes, A. (2008), “Boron in plants: deficiency and toxicity”, *J Integr Plant Biol.* **50**, 1247-1255.
- Carter, G.A. ve Knapp, A.K. (2001), “Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristic to stress and chlorophyll concentration” *American Journal of Botany*, **88(4)**, 677-684.
- Chen, Z., Kuschik, P., Paschke, Heidrun, Kastner, M., Müller, J.A., Köser, H. (2014), “Treatment of a sulfate-rich groundwater contaminated with perchloroethene in a hydroponic plant root mat filter and a horizontal subsurface flow constructed wetland at pilot-scale” *Chemosphere*, **117**, 178-184.
- Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F. ve Thoennessen, M. (2002), “Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals”, *Ecol. Eng.*, **18**, 317-325.
- Choudhary, A.K., Jha, J:N., Gill, K.S. (2010), “Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on reinforced flyash slope” *Geotextiles and Geomembranes*, **28**, 393–402.
- Coban, O., Kuschik, P., Kappelmeyer, U., Spott, O., Martienssen, M., Jetten, M.S.M., Knoeller, K. (2015), “Nitrogen transforming community in a horizontal subsurface-flow constructed wetland” *Water Research*, **74**, 203-212.

- Coleman, J., Hensch, K., Garbutt, K., Sextone, A., Bissonnette, G., Skousen, J., (2001), "Treatment of domestic wastewater by three wetland plant species in constructed wetlands", *Water, Air Soil Poll.*, **128**, 283–295.
- Comino, E., Riggio, V., Rosso, M. (2011), "Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland" *Ecol. Eng.*, **37**, 1673-1680.
- Coombes, M.A, Marca, E.C.L., Naylor, L.A. (2015), "Getting into the groove: Opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures" *Ecol. Eng.*, **77**, 314-323.
- Cossu, R., Haarstad, K., Lavagnolo, M. C. ve Littarru, P. (2001), "Removal of Municipal Solid Waste COD and NH₄-N by Phyto-reduction: A Laboratory-scale Comparison of Terrestrial and Aquatic Species at Different Organic Loads", *Ecological Engineering*, **16**, 459–470.
- Craw, D., Rufaut, C.G., Haffert, L., Todd, A., (2006), "Mobilisation and attenuation of boron during coal mine rehabilitation", Wangaloa, New Zealand", *Sci Total Environ.* 368, 444-455.
- Davidson, G. R., Bassett, R. L., (1993), "Application of boron isotopes for identifying contaminants such as fly ash leachate in groundwater", *Environ Sci Technol.*, **27**, 172–6.
- Davis, S.M., Drake, K.D. ve Maier, K.J. (2002), "Toxicity of boron to the duckweed, *Spirodella polyrrhiza*", *Chemosphere*, **48**, 615-620.
- Davison, L., Pont, D., Bolton, K. ve Headley, T. (2006), "Dealing with nitrogen in subtropical Australia: Seven case studies in the diffusion of ecotechnological innovation", *Ecol. Eng.*, **28**, 213-223.
- Davison, L., Pont, D., Bolton, K. ve Headley, T. (2006), "Dealing with nitrogen in subtropical Australia: Seven case studies in the diffusion of ecotechnological innovation", *Ecol. Eng.*, **28**, 213-223.
- Day, J.W, Arancibia, A.Y, Mitsch, W.J., Lara-Domingez, A.L., Day, J.N.D, Ko, J-Y, Lane, R., Lindsey, J., Lomeli, D.Z. (2003), "Using Ecotechnology to address water quality and wetland habitat loss problems in the Mississippi basin: a hierarchical approach" *Biotechnology Advances*, **22**, 135–159.

- Debing, J., Lianbi, Z., Xiaosong, Y., Jianming, H., Mengbin, Z., Yuzhong, W. (2009), "COD, TN and TP Removal of *Typha* Wetland Vegetation of Different Structures", *Pol. J. Environ. Stud*, **18**, 183-190.
- Demey, H., Vincent, T., Ruiz, M., Nogueras, M., Sastre, A.M., Guibal, E. (2014). "Boron recovery from seawater with a new low-cost adsorbent material" *Chem. Eng. J.*, **254**, 463-471.
- Demirezen, D., Aksoy, A., Uruç, K. (2007), "Effect of population density on growth, biomass and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae)", *Chemosphere*, **66**, 553-557.
- Dominguez-Tagle, C., Romero-Tertero, V.C. ve Delgado-Torres, A.M. (2011), "Boron removal efficiency in small seawater Reverse Osmosis systems", *Desalination*, **265**, 43–48.
- Driever, S.M., van Nes, E.H., Roijackers, R.M.M. (2005), "Groth limitation of *Lemna minor* due to high plant density", *Aqua. Bot.* **81**, 245-251.
- Dunne, E.J., Culleton, N., O'Donovan, G., Harrington, R. ve Olsen, A.E. (2005), "An integrated constructed wetlands to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water", *Ecol. Eng.*, **24**, 219-232.
- Dydo, P., Turek, M., Milewski, A. (2014), "Removal of boric acid, monoborate and boron complexes with polyols by reverse osmosis membranes" *Desalination*, **334**, 39-45.
- Engelhardt, K.A.M and Ritchie, M. E. (2002), "The Effect of Aquatic Plant Species Richness on Wetland Ecosystem Processes", *Ecology*, **83**, 2911-2924.
- Eraslan, F., İnal, A., Guneş, A. ve Alpaslan, M. (2007), "Impact of exogenous salicylic acid on the growth, antioxidant activity and physiology of carrot plants subjected to combined salinity and boron toxicity", *Scientia Horticulturae*, **113**, 120-128.
- Fernandes, J.P., Almeida, C.M.R., Pereira, A.C., Riberio, I.L., Reis, I., Carvalho, P., Basto, M.C.P., Mucha, A.P. (2015), "Microbial community dynamics associated with veterinary antibiotics removal in constructed wetlands microcosms" *Bioresource Technology*, **182**, 26-33.

- Fibbi, D., Doumet, S., Lepri, L., Checchini, L., Gonnelli, C., Coppini, E., Del Bubba, M. (2012), "Distribution and mass balance of hexavalent and trivalent chromium in a subsurface, horizontal flow (SF-h) constructed wetland operating as post-treatment of textile wastewater for water reuse" *Journal of Hazardous Materials*, **199-200**, 200-216.
- Figge, F., Hahn, T., Barkemeyer, R. (2014), "The If, How and Where of assessing sustainable resource use", *Ecological Economics*, **105**, 274-283.
- Filimonau, V., Dickinson, J., Robbins, D., Huijbregts, M.A.J. (2011), "Reviewing the carbon footprint analysis of hotels: Life Cycle Energy Analysis (LCEA) as a holistic method for carbon impact appraisal of tourist accommodation", *Journal of Cleaner Production*, **19**, 1917-1930.
- Fountoulakis, M.S., Terzakis, S., Chatzinotas, A., Brix, H., Kalogerakis, N. ve Manios, T. (2009), "Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment", *Science of The Total Environment*, **407**, 2996-3003.
- Freitas, L.P. ve Batabyal, A.A. (2007), "A stochastic model of waste management with on and off site storage" *Ecological Economics*, **61**, 1-5.
- Gambrell, R.P., DeLaune, R.D., and Patrick, W.,H., Jr. (1991), *Redox processes in soils following oxygen depletion*, in: *Plant Life Under Oxygen Deprivation*, M.B. Jackson, and D.D. Davies, eds., SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, 101-117.
- Garcia, J., Salas, J.J, Vymazal, J. (2013), "Research and innovation on ecotechnologies applied to improve wastewater treatment efficiency" *Ecol. Eng*, **50**, 1-4.
- Gattie, D.K., Kellam, N.N., Turk, H.J. (2007), "Informing ecological engineering through ecological network analysis, ecological modelling, and concepts of systems and engineering ecology" *Ecological Modelling*, **208**, 25-40.
- Gemici, Ü, Tarcan, G., Helvacı, C., Somay, A.M, (2008), "High arsenic and boron concentrations in groundwaters related to mining activity in the Bigadiç borate deposits (Western Turkey)", *Applied Geochemistry*, **23**, 2462-2476.

- Gendron, C. (2014), "Beyond environmental and ecological economics: Proposal for an economic sociology of the environment" *Ecological Economics*, **105**, 240-253.
- Gette-Bouvarot, M., Mermillod-Blondin, F., Lemoine, D., Delolme, C., Danjean, M., Etienne, L, Volatier, L. (2015), "The potential control of benthic biofilm growth by macrophytes -A mesocosm approach" *Ecol. Eng.*, **75**, 178-186.
- Ghisetti, C. ve Rennings, K. (2014), "Environmental innovations and profitability: how does it pay to be green? An empirical analysis on the German innovation survey" *Journal of Cleaner Production*, **75**, 106-117.
- Gombert-Courvoisier, S. Sennes, V., Ricard, M., Ribeyre, F. (2014), "Higher Education for Sustainable Consumption: case report on the Human Ecology Master's course (University of Bordeaux, France)", *Journal of Cleaner Production*, **62**, 82-88.
- Greaker, M., Stoknes, P.E, Alfsen, K.H, Ericson, T. (2013), "A Kantian approach to sustainable development indicators for climate change", *Ecological Economics*, **91**, 10-18.
- Grievea, C.M., Possa, J.A., Grattanb, S.R., Suarez, D.L. ve Smith T.E. (2010), "The combined effects of salinity and excess boron on mineral ion relations in broccoli", *Scientia Horticulturae*, **125**, 179–187.
- Gross, A. Shmueli, O., Ronen, Z., Raveh, E., (2007), "Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW)—a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households", *Chemosphere*, **66**, 916-923.
- Güler, E., Kaya, C., Kabay, N., Arda, M. (2015), "Boron removal from seawater: State-of-the-art review" *Desalination*, **356**, 85-93.
- Hallberg, K.B. ve Johnson, D.B., (2005) "Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine" *Science of the Total Environment*. **338**, 53-66.
- Harrington, R. ve McInnes, R. (2009), "Integrated Constructed Wetlands (ICW) for livestock wastewater management", *Bioresource Technology*. **100**, 5498-5005.

- Hasenmueller, E. A. ve Criss, R. E., (2013), "Multiple sources of boron in urban surface waters and groundwaters" *Science of the Total Environment*, **447**, 235-247.
- He, G., Yi, F., Zhou, S., Lin, J. (2014), "Microbial activity and community structure in two terrace-type wetlands constructed for the treatment of domestic wastewater" *Ecol. Eng.*, **70**, 198-205.
- Hearn, G., Collie, N., Lyle, P., Choi, J.H.J, Foth, M. (2014), "Using communicative ecology theory to scope the emerging role of social media in the evolution of urban food systems", *Futures*, **62**, 202-212.
- Hilal, N. Kim, G.J., Somerfield, C. (2011), "Boron removal from saline water: A comprehensive review", *Desalination*, **273**, 23-35.
- Hiremath, A.M., Pandey, S.K, Dinesh, K., Asolekar, S.R. (2014), "Ecological Engineering, Industrial Ecology and Eco-Industrial Networking Aspects of Ship Recycling Sector in India" *APCBEE Procedia*, **10**, 159-163.
- Ingebrigtsen, S. ve Jakobsen, O. (2012), "Utopias and realism in ecological economics — Knowledge, understanding and improvisation" *Ecological Economics*, **84**, 84-90.
- İpek, İ.Y., Kabay, N., Yüksel, M. (2013), "Modeling of fixed bed column studies for removal of boron from geothermal water by selective chelating ion exchange resins" *Desalination*, **310**, 151-157.
- Jansson, Å. (2013), "Reaching for a sustainable, resilient urban future using the lens of ecosystem services", *Ecological Economics*, **86**, 285-291.
- Jaunatre, R., Buisson, E., Dutroit, T. (2014), "Can ecological engineering restore Mediterranean rangeland afterintensive cultivation? A large-scale experiment in southern France" *Ecol. Eng.*, **64**, 202-212.
- Jing, Z., He, R., Hu, Y., Niu, Q., Cao, S., Li, Y.Y. (2015), "Practice of integrated system of biofilter and constructed wetland in highly polluted surface water treatment" *Ecol. Eng.*, **75**, 462-469.
- Kabay, N., Köseoğlu, P., Yapıcı, D., Yüksel, Ü., Yüksel, M. (2013), "Coupling ion exchange with ultrafiltration for boron removal from geothermal water-investigation of process parameters and recycle tests" *Desalination*, **316**, 17-12.

- Kadlec, R. H., Wallace, S. D. (2009), "Treatment Wetlands", second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kaltwasser, B.J. (1980), "Biogas-Regenerative Energieerzeugung durch anaerobe fermentation organischer Abfaelle in Biogasanlagen", Bauverlag, Berlin.
- Karabal, E., Yücel, M. ve Öktem, H.A. (2003), "Antioxidant responses of tolerant and sensitive barley cultivars to boron toxicity", *Plant Science*, **164**, 925-933.
- Karathanasis, A., Potter, C., Coyne, M. (2004), "Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater", *Ecol. Eng.*, **20**, 157–169.
- Kariminia, A., Ahmad, S.S., Hashim, R., "Assessment of Antarctic Tourism Waste Disposal and Management Strategies towards a Sustainable Ecosystem" *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **68**, 723-734.
- Kato, k., Inoue, T., Letsugu, H., Koba, T., Sasaki, H., Miyaji, N., Kitawaga, K., Sharma, P.K., Nagasawa, T. (2013), "Performance of six multi-stage hybrid wetland systems for treating high-content wastewater in the cold climate of Hokkaido, Japan" *Ecol. Eng.*, **51**, 256-263.
- Khan, S., Ahmad, I., M. Shah, M.T., Rehman, S. ve Khaliq, A. (2009) "Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater", *Journal of Environmental Management*, **90**, 3451-3457.
- Killham, K. (1994), *Soil Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kistler R. B., Helvacı, C. (1994), „Boron and Borates. In: Industrial Minerals and Rocks (Donald D. Carr editor) 6th Edition“. Society of Mining, Metalurgy and Exploration: Inc p. 171-186.
- Klein, L.R., Hendrix, W.G., Lohr, V.I., Kaytes, J.B., Sayler, R.D., Swanson, M.E., Elliot, W.J., Reganold, J.P. (2015), "Linking ecology and aesthetics in sustainable agricultural landscapes: Lessons from the Palouse region of Washington, U.S.A" *Landscape and Urban Planning*, **134**, 195-209.
- Kopnina, H. (2014), "Education for sustainable development (ESD) as if environment really mattered" *Environmental Development*, **12**, 37-46.

- Korhonen, J. (2004), "Industrial ecology in the strategic sustainable development model: strategic applications of industrial ecology", *Journal of Cleaner Production*, **12**, 809-823.
- Koskiaho, J., Ekholm, P., Rätty, M., Riihimäki, J. ve Puustinen, M. (2003), "Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands-experiences under boreal conditions", *Ecol. Eng.*, **20**, 89-103.
- Kröpfelova, L., Vymazal, J., Švehla, J. ve Štichová, J. (2010), "Removal of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech Republic", *Environmental Pollution*, **157**, 1186-1194.
- Kumar, Chaudhuri, S., Maiti, S.K. (2013), "Soil Dehydrogenase Enzyme Activity in Natural and Mine Soil - A Review" *Middle-East Journal of Scientific Research*, **13**, 898-906.
- Kuyucak, N., Zimmer, M., (2004), "Natural Systems Successfully Treating Landfill Leachate", The ISWA Roma 2004 Conference, 17-21 October, Rome, Italy.
- Laurant, J., Bois, P., Wanko, A. (2015), "Systemic models of full-scale Surface Flow Treatment Wetlands: Determination by application of fluorescent tracers" *Chemical Engineering Journal*, **264**, 389-398.
- Lee, C., Fletcher, T.D, Sun, G, (2009), "Nitrogen removal in constructed wetland systems", *Eng. Life Sci.*, **9**, 11-22.
- Lee, W.L., Teal, J.M. ve Hinkle, R. (2005), "Designing large-scale wetland restoration for Delaware Bay", *Ecol. Eng.*, **25**, 231-239.
- Lesage, E., Rousseau, D.P.L., Meers, E., Tack, F.M.G. ve De Pauw, N. (2007), "Accumulation of metals in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in Flanders, Belgium" *Science of The Total Environment*, **380**, 102-115.
- Lesley, B, Daniel, H. ve Paul, Y. (2008), "Iron and manganese removal in wetland treatment systems: Rates, processes and implications for management", *Science of the Total Environment*, **394**, 1-8.
- Liang, W.T, Zhang, C.F, Peng, C.L., Lai, Z.L., Chen, D.F., Chen, Z.H. (2011), "Plant growth, community structure, and nutrient removal in monoculture and mixed constructed wetlands", *Ecol. Eng.*, **37**, 309-316.

- Lo, A.U. (2013), “Agreeing to pay under value disagreement: Reconceptualizing preference transformation in terms of pluralism with evidence from small-group deliberations on climate change” *Ecological Economics*, **87**, 84-94.
- Lynch, J., Fox, L.J., Owen, J.S., Sample, D.J. (2015), “Evaluation of commercial floating treatment wetland technologies for nutrient remediation of stormwater” *Ecol. Eng.*, **75**, 61-69.
- Maine, M.A., Suñe, N., Hadad, H., Sánchez, G. ve Bonetto, C. (2009), “Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland”, *Journal of Environmental Management*, **90**, 355-363.
- Marin, C.M.D-C. ve Oron, G. (2007), “Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: A potential method for the remediation of boron-polluted waters”, *Water Research*, **41**, 4579-4584.
- Mays, P.A. ve Edwards, G.S. (2001), “Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage” *Ecol. Eng.*, **16**, 487-500.
- Mi, Y., He, C., Bian, H., Cai, Y., Sheng, L., Ma, L. (2015) “Ecological engineering restoration of a non-point source polluted river in Northern China” *Ecol. Eng.*, **76**, 142-150.
- Middelburg, J.J. (2000), *The geochemical sulfur cycle, in: Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution. Principles and Engineering*, P.N.L. Lens, and L. Hulshoff Pol, eds., IWA Publishing, London, 33-46.
- Mitsch, W. J. ve Gosselink. J. G., (2000). “The value of wetlands: Importance of scale and landscape setting”, *Ecol. Econ.* **35**, 25–33.
- Mitsch, W.J. ve Gosselink, J.G. (2000), *Wetlands*, John Wiley and Sons, 3rd ed., New York.
- Mitsch, W.J. ve Jorgensen, S.E. (2003), “Ecological engineering: A field whose time has come” *Ecol. Eng.*, **20**, 363-377.
- Morari, F., Ferro, N.D., Cocco, E., (2015) “Municipal Wastewater Treatment with *Phragmites australis* L. and *Typha latifolia* L. for Irrigation Reuse. Boron and Heavy Metals”, *Water Air Soil Pollut*, **226**, 56.

- Murphy, R.J., Tolhurst, T.J., Chapman, M.G., Underwood, A.J. (2009), “Seasonal distribution of chlorophyll on mudflats in New South Wales, Australia measured by field spectrometry and PAM fluorometry” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **84**, 108–118.
- Murray-Gulde, C., Heatley, J.E., Karanfil, T., Rodgers Jr., J.H. ve Myers, J.E., (2003), “Performance of a hybrid reverse osmosis-constructed wetland treatment system for brackish oil field produced water”, *Water Research*, **37**, 705–713.
- Nable, R. O, Banuelos, G.S and Paul, J.G. (1997). “Boron Toxicity”, *Plant and Soil*, **193**, 181-198.
- Nadav, N., (1999), “Boron removal from seawater reverse osmosis permeate utilizing selective ion exchange resin”, *Desalination*. **124**, 131–135.
- Neal, C., Fox, K. K., Harrow, M. L., Neal, M., (1998), “Boron in the major UK rivers entering the North Sea”, *Science of the Total Environment*, **210–211**, 41–52.
- Neal, C., Williams, R.C., Bowes, M.J., Harrass, M.C., Neal, M., Rowland, P., Wickham, H., Thacker, S., Harman, S., Vincent, C. ve Jarvie, H.P. (2010), “Decreasing boron concentrations in UK rivers: Insights into reductions in detergent formulations since the 1990s and within-catchment storage issues”, *Science of the Total Environment*, **408**, 1374-1385.
- Njambuya, J., Stiers, I., Triest, L. (2011), “Competition between *Lemna minuta* and *Lemna minor* at different nutrient concentrations”, *Aquat. Bot*, **94**, 158-164.
- Nobre, A:M., Musango, J.K., de Wit, M.P., Ferreira, J.G. (2009), “A dynamic ecological–economic modeling approach for aquaculture management” *Ecological Economics*, **68**, 3007-3017.
- Nyquist, J. ve Greger, M. (2009), “A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage”, *Ecological Engineering*, **35**, 630-642.
- Odum, E.P. ve Barret, W. (2000), “Past management: An overview, in Professional society and ecologically based pest management. National Research Council Report. Washington, D.C: National Academy Press, 1-5.

- Oertli, J.J. ve Grgurovic, E. (1975), "Effect of pH on the absorbtion of boron by excized barley noots", *Agron. Journal*, **67**, 278.
- O'Hara, P.A. (2009), "Political economy of climate change, ecological destruction and uneven development", *Ecological Economics*, **69**, 223-234.
- Okay, O., Güçlü, H., Soner, E., Balkaş, T. (1985), "Boron pollution in the Simav River, Turkey and various methods of boron removal", *Water Research*, **19**, 857-862.
- Ong, S-A., Uchiyama, K., Inadama, D., Ishida, Y. ve Yamagiwa, K. (2010) "Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants", *Bioresource Technology*, **101**, 7239-7244.
- Overall, R.A. ve Parry, D.L. (2004), "The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland fitler" *Environmental Pollution*, **132**, 307-320.
- Özdemir, M., Kıpçak, İ., (2010), "Recovery of boron from borax sludge of boron industry", *Min eng*, **23**, 685-690.
- Palmer, M.A., Filoso, S., Faneli, R.M. (2014), "From ecosystems to ecosystem services: Stream restoration asecolgical engineering" *Ecol. Eng*, **65**, 62-70.
- Pandey, V.C. ve Singh, N. (2014). "Fast green capping on coal fly ash basins through ecological engineering" *Ecol. Eng*, **73**, 671-675.
- Papadakis, I.E., Dimassi, K.N., Bosabalidis, A.M., Therios, I.N., Patakas, A. ve Giannakoula, A. (2004), "Effects of B excess on some physiological and anatomical parameters of 'Navelina' orange plants grafted on two rootstocks", *Environmental and Experimental Botany*, **51**, 247-257.
- Pedescoll, A., Corzo, A., Alvarez, E., Garcia, J., Puigagut, J. (2011), "The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation" *Water Research*, **45**, 3579-3589.
- Pei, Y., Tian, Z., Yang, Z., Zhang, K. (2009), "Housing development as an application of ecological engineering on streamside" *Ecol. Eng*, **35**, 1190-1199.

- Pelenc, J. ve Ballet, J. (2015), “Strong sustainability, critical natural capital and the capability approach” *Ecological Economics*, **112**, 36-44.
- Peltzer, D.A., Köchy, M. (2001), “Competitive effects of grasses and woody plants in mixed grass prairie”, *Journal of Ecology*, **89**, 519-527.
- Picard, C.R, Fraser, L.H. and Steer, D. (2005), “The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms”, *Bioresource technology*, **96**,1039-1047.
- Pickett, S.T.A., Boone, C.G., McGrath, B.P., Cadenasso, M.L., Childers, D.L., Ogden, L.A, McHale, M., Grove, J.M. (2013), “Ecological science and transformation to the sustainable city”, *Cities*, **32**, 10-20.
- Reddy, K.R. ve D’Angelo E. M. (1997), “Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands”, *Water Sci. Technol.*, **35**, 1–10.
- Reid, R. (2010), “Can we really increase yields by making crop plants tolerant to boron toxicity?”, *Plant Science*, **178**, 9-11.
- Rezai, A., Taylor, L., Mechler, R. (2013), “Ecological macroeconomics: An application to climate change” *Ecological Economics*, **85**, 69-76.
- Robbins, W.A., Xun, L., Jia, J., Kennedy, N., Elashoff, D.A. ve Ping, L. (2010), “Chronic boron exposure and human semen parameters”, *Reproductive Toxicology*, **29**, 184-190.
- Saeed, T., Afrin, R., Al Muyeed, A., Sun, G. (2012), “Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh” *Chemosphere*, **88**, 1065–1073
- Sartaj, M., Fernandes, L., (2006). “Adsorption of boron from landfill leachate by peat and the effect of environmental factors”, *J. Environ. Eng. Sci.* **4**, 19-28.
- Sciall, A. R., Bonde, J.P., Brüske-Hohlfeld, I., Culver, B.D., Li, Y. ve Sullivan, F.M. (2010), “An overview of male reproductive studies of boron with an emphasis on studies of highly exposed Chinese workers”, *Reproductive Toxicology*, **29**, 10-24.
- Simonnot, M.O, Castel, C., Nicolaie, M., Rosin, C., Sardin, M.L., Jauffret, H., (2000), “Boron removal from drinking water with a boron selective resin: is the treatment really selective”, *Water Research*, **34**, 109–116.

- Sohsalam, P., Englande, A.J. ve Sirianuntapiboon, S. (2008), "Seafood wastewater treatment in constructed wetland: Tropical case", *Bioresource Technology*, **99**, 1218–1224.
- Spash, C.L. (2012), "New foundations for ecological economics" *Ecological Economics*, **77**, 36-47.
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R.A. ve Moormann H. (2003), "Effects of Plants and Microorganisms in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment", *Biotechnology Advances*, **22**, 93– 117.
- Stueber, A. M., Criss, R.E. (2005), "Origin and transport of dissolved chemicals in a karst watershed, southwestern Illinois". *J Am Water Works Assoc.* **41**, 267–290.
- Tejeda, M., Gonzalez, J.L., Garcia-Martinez, A.M. ve Parrado, J. (2008), "Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield", *Bioresource Technology*, **99**, 1758-1767.
- Teychene, B., Collet, G., Gallard, H., Croue, J-P. (2013), "A comparative study of boron and arsenic (III) rejection from brackish water by reverse osmosis membranes" *Desalination*, **310**, 109-114.
- Tu, K.L., Nghiem, L.D. ve Chivas, A.R. (2010), "Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications", *Separation and Purification Technology*, **75**, 87–101.
- Türe, C. ve Bell, R.W. (2004), "Plant Distribution and its Relationship to Extractable Boron in Naturally-Occuring High Boron Soils Turkey", *Israel Journal of Plant Science*, **52**, 125-132.
- Türker, O.C. (2011), *Çözünmüş Yüksek Bor İçeriğine Sahip Suların Küçük Ölçekte Oluşturulacak Ekilmiş Sulak Alanlar Sistemiyle Giderilebilirliğinin Araştırılması* Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 2010.
- Türker, O.C., Böcük, H., Yakar, A., (2013a), "The phytoremediation ability of a polyculture constructed wetland to treat boron from mine effluent" *Journal of Hazardous Materials*, **252-253**, 132-141.

- Türker, O.C., Türe, C, Böcük, H., Yakar, A., 2013b, “Constructed Wetlands as Green Tools for Management of Boron Mine Wastewater” *Int. J. of Phytoremediation*, **16**, 537-553.
- Türker, O.C., Vymazal, J., Türe, C. (2014), “Constructed Wetlands for Boron Removal-A Review”, *Ecol. Eng*, **64**, 350-359.
- Tuttolomondo, T., Licata, M., Leone, R., La Bella, S. (2015), “Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Arundo donax* L. and *Cyperus alternifolius* L. – Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy)” *Ecol. Eng*, **74**, 79-92.
- Vasudevan, S., Lakshmi, J., Sozhan, G. (2013), “Electrochemically assisted coagulation for the removal of boron from water using zinc anode” *Desalination*. **310**, 122–129.
- Vymazal, J. (2013), “The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development” *Water Research*, **47**, 4795-4811.
- Vymazal, J. (2014), “Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review” *Ecol. Eng*, **73**, 724-751.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L. (2008), “Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow”, Springer, Dordrecht.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L., Švehla, J., Chrástný, J. ve Štíchová, J. (2009) “Trace elements in *Phragmites australis* growing in constructed wetlands for treatment of municipal wastewater. *Ecological Engineering*, **35**, 303-309.
- Wagner, J. (2011), “Incentivizing sustainable waste management” *Ecological Economics*, **70**, 585-594.
- Wang, Q., Lu, L., Wu, X., Li, Y. ve Lin, J. (2003), “Boron influences pollen germination and pollen tube growth in *Picea meyeri*”, *Tree Physiology*, **23**, 345-351.
- Weigelt, A. ve Jolliffe, P. (2003). “Indices of plant competition” *Journal of Ecology*, **91**, 707-720.
- Weinstein, M.P., ve Day, J.W. (2014), “Editorial: restoration ecology in a sustainable world”, *Ecol. Eng*, **65**, 1-8.

- Wellburn, A. R. (1994), "The spectral determination of chlorophyll a and chlorophyll b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution", *Journal of Plant Physiology*, **144**, 307-313.
- Wicker, P. ve Becken, S. (2013), "Conscientious vs. ambivalent consumers: Do concerns about energy availability and climate change influence consumer behaviour?" *Ecological Economics*, **88**, 41-48.
- Wolska, J. ve Bryjak, M. (2013), "Methods for boron removal from aqueous solutions: A review", *Desalination*, **310**, 18-24.
- Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R. (2014), "Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review" *Water Research*, **57**, 40-55.
- Wu, H., Zhang, J., Li, P., Zhang, J., Xi, H., Zhang, B. (2011), "Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China", *Ecol. Eng.* **37**, 560–568.
- Wyness, A.J., Parkman, R.H. ve Neal, C. (2003), "A summary of boron surface water quality data throughout the European Union", *Science of the Total Environment*, **314-316**, 255-269.
- Yang, B. ve Li, M-H. (2010), "Ecological engineering in a new town development: Drainage design in The Woodlands, Texas" *Ecol. Eng.* **36**, 1639-1650.
- Ye, Z., Lin, Z., Whiting, S., de Souza, M. ve Terry, N. (2003) "Possible use of constructed wetland to remove selenocyanate, arsenic, and boron from electric utility wastewater", *Chemosphere*, **52**, 1571-1579.
- Yeh, T.Y., Chou, C.C. ve Pan, C.T. (2009), "Heavy metal removal within pilot-scale constructed wetlands receiving river water contaminated by confined swine operations", *Desalination*, **249**, 368-373.
- Yilmaz, A.E., Boncukcuoglu R., Kocakerim, M. M., (2007), "A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution" *J. Hazardous Mater.* **149**, 475-481.

- Younger, P.L. ve Henderson, R. (2014), “Synergistic wetland treatment of sewage and mine water: Pollutant removal performance of the first full-scale system” *Water Research*, **55**, 74-82.
- Zehnder, A.J.B. (1980), *The carbon cycle*, in: *The Handbook of Environmental Chemistry*, Volume 1, Part B, *The Natural Environment and the Biogeochemical Cycles*, O. Hutzinger, ed., Springer Verlag, Berlin, 83-110.
- Zhang, C.B., Wang, J., Liu, W.L., Zhu, S.X., Ge, H.L., Chang, S.X., Chang, J., Ge, Y. (2010), “Effects of plant diversity on microbial biomass and community metabolic profiles in a full-scale constructed wetland”, *Ecol. Eng.*, **36**, 62–68.
- Zhang, Z., Rengel, Z., Meney, K. (2007), “Growth and resource allocation of *Canna indica* and *Schoenoplectus validus* as affected by interspecific competition and nutrient availability”, *Hydrobiologia*, **589**, 235-248.

EK-1 Sıcaklık ve basınç faktörleri verileri

| | | S I C A K L I K | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| B A S I N Ç | 660 | 1.629 | 1.618 | 1.611 | 1.603 | 1.594 | 1.587 | 1.582 | 1.573 | 1.565 | 1.556 | 1.550 | 1.541 | 1.532 | 1.523 | 1.515 | 1.507 | 1.498 | 1.490 | 1.480 | 1.471 | 1.461 |
| | 661 | 1.631 | 1.621 | 1.614 | 1.605 | 1.596 | 1.590 | 1.584 | 1.576 | 1.567 | 1.559 | 1.552 | 1.543 | 1.534 | 1.526 | 1.518 | 1.509 | 1.500 | 1.492 | 1.483 | 1.473 | 1.464 |
| | 662 | 1.634 | 1.623 | 1.616 | 1.608 | 1.599 | 1.592 | 1.587 | 1.578 | 1.570 | 1.561 | 1.555 | 1.546 | 1.537 | 1.528 | 1.520 | 1.512 | 1.502 | 1.495 | 1.485 | 1.475 | 1.466 |
| | 663 | 1.636 | 1.626 | 1.619 | 1.610 | 1.601 | 1.595 | 1.589 | 1.581 | 1.572 | 1.564 | 1.557 | 1.548 | 1.539 | 1.530 | 1.523 | 1.514 | 1.505 | 1.497 | 1.487 | 1.478 | 1.468 |
| | 664 | 1.639 | 1.628 | 1.621 | 1.613 | 1.604 | 1.597 | 1.592 | 1.583 | 1.575 | 1.566 | 1.560 | 1.551 | 1.542 | 1.533 | 1.525 | 1.517 | 1.507 | 1.499 | 1.480 | 1.480 | 1.471 |
| | 665 | 1.641 | 1.631 | 1.624 | 1.615 | 1.606 | 1.600 | 1.594 | 1.586 | 1.577 | 1.569 | 1.562 | 1.553 | 1.544 | 1.535 | 1.527 | 1.519 | 1.510 | 1.502 | 1.492 | 1.482 | 1.473 |
| | 666 | 1.644 | 1.633 | 1.626 | 1.618 | 1.609 | 1.602 | 1.597 | 1.588 | 1.580 | 1.571 | 1.564 | 1.555 | 1.546 | 1.538 | 1.530 | 1.521 | 1.512 | 1.504 | 1.494 | 1.484 | 1.475 |
| | 667 | 1.646 | 1.636 | 1.629 | 1.620 | 1.611 | 1.605 | 1.599 | 1.591 | 1.582 | 1.574 | 1.567 | 1.558 | 1.549 | 1.540 | 1.532 | 1.524 | 1.514 | 1.506 | 1.497 | 1.487 | 1.478 |
| | 668 | 1.649 | 1.638 | 1.632 | 1.623 | 1.614 | 1.607 | 1.601 | 1.593 | 1.584 | 1.576 | 1.569 | 1.560 | 1.551 | 1.543 | 1.535 | 1.526 | 1.517 | 1.509 | 1.499 | 1.490 | 1.480 |
| | 669 | 1.651 | 1.641 | 1.634 | 1.625 | 1.616 | 1.610 | 1.604 | 1.595 | 1.587 | 1.579 | 1.571 | 1.563 | 1.553 | 1.545 | 1.537 | 1.528 | 1.519 | 1.511 | 1.501 | 1.492 | 1.482 |
| | 670 | 1.654 | 1.644 | 1.637 | 1.628 | 1.619 | 1.612 | 1.606 | 1.598 | 1.589 | 1.581 | 1.574 | 1.565 | 1.556 | 1.547 | 1.539 | 1.531 | 1.521 | 1.513 | 1.504 | 1.496 | 1.485 |
| | 671 | 1.695 | 1.646 | 1.639 | 1.630 | 1.621 | 1.615 | 1.609 | 1.600 | 1.592 | 1.584 | 1.576 | 1.568 | 1.558 | 1.550 | 1.542 | 1.533 | 1.524 | 1.516 | 1.506 | 1.497 | 1.487 |
| | 672 | 1.639 | 1.649 | 1.642 | 1.633 | 1.624 | 1.617 | 1.611 | 1.603 | 1.594 | 1.586 | 1.579 | 1.570 | 1.561 | 1.552 | 1.544 | 1.536 | 1.526 | 1.518 | 1.508 | 1.499 | 1.489 |
| | 673 | 1.661 | 1.651 | 1.644 | 1.635 | 1.626 | 1.620 | 1.614 | 1.605 | 1.597 | 1.588 | 1.581 | 1.572 | 1.563 | 1.555 | 1.547 | 1.538 | 1.529 | 1.520 | 1.511 | 1.501 | 1.492 |
| | 674 | 1.663 | 1.654 | 1.647 | 1.638 | 1.629 | 1.622 | 1.616 | 1.608 | 1.599 | 1.591 | 1.584 | 1.575 | 1.566 | 1.557 | 1.549 | 1.540 | 1.531 | 1.523 | 1.513 | 1.504 | 1.494 |
| | 675 | 1.666 | 1.656 | 1.649 | 1.640 | 1.631 | 1.625 | 1.619 | 1.610 | 1.602 | 1.593 | 1.586 | 1.577 | 1.568 | 1.559 | 1.551 | 1.543 | 1.533 | 1.525 | 1.515 | 1.506 | 1.496 |
| | 676 | 1.669 | 1.659 | 1.652 | 1.643 | 1.634 | 1.627 | 1.621 | 1.613 | 1.604 | 1.596 | 1.588 | 1.580 | 1.570 | 1.562 | 1.554 | 1.545 | 1.536 | 1.527 | 1.518 | 1.508 | 1.499 |
| | 677 | 1.671 | 1.661 | 1.654 | 1.646 | 1.637 | 1.630 | 1.624 | 1.615 | 1.606 | 1.598 | 1.591 | 1.582 | 1.573 | 1.564 | 1.556 | 1.547 | 1.538 | 1.530 | 1.520 | 1.511 | 1.501 |
| | 678 | 1.674 | 1.664 | 1.657 | 1.648 | 1.639 | 1.632 | 1.626 | 1.618 | 1.609 | 1.601 | 1.593 | 1.584 | 1.575 | 1.567 | 1.558 | 1.550 | 1.540 | 1.532 | 1.523 | 1.513 | 1.503 |
| | 679 | 1.676 | 1.667 | 1.659 | 1.652 | 1.642 | 1.635 | 1.628 | 1.620 | 1.611 | 1.603 | 1.596 | 1.587 | 1.578 | 1.569 | 1.561 | 1.532 | 1.543 | 1.534 | 1.525 | 1.515 | 1.506 |
| 680 | 1.679 | 1.669 | 1.662 | 1.653 | 1.644 | 1.637 | 1.631 | 1.622 | 1.611 | 1.606 | 1.598 | 1.589 | 1.580 | 1.572 | 1.563 | 1.554 | 1.545 | 1.537 | 1.527 | 1.518 | 1.508 | |
| 681 | 1.681 | 1.672 | 1.664 | 1.656 | 1.647 | 1.640 | 1.633 | 1.625 | 1.616 | 1.608 | 1.600 | 1.592 | 1.582 | 1.574 | 1.566 | 1.557 | 1.548 | 1.539 | 1.530 | 1.520 | 1.510 | |
| 682 | 1.684 | 1.674 | 1.667 | 1.658 | 1.649 | 1.642 | 1.636 | 1.627 | 1.619 | 1.610 | 1.603 | 1.594 | 1.585 | 1.576 | 1.568 | 1.559 | 1.550 | 1.542 | 1.532 | 1.522 | 1.513 | |
| 683 | 1.686 | 1.677 | 1.669 | 1.662 | 1.652 | 1.645 | 1.638 | 1.630 | 1.621 | 1.613 | 1.605 | 1.596 | 1.587 | 1.579 | 1.570 | 1.562 | 1.552 | 1.544 | 1.534 | 1.525 | 1.515 | |
| 684 | 1.689 | 1.679 | 1.672 | 1.663 | 1.654 | 1.647 | 1.641 | 1.632 | 1.624 | 1.615 | 1.608 | 1.599 | 1.590 | 1.581 | 1.573 | 1.564 | 1.555 | 1.546 | 1.537 | 1.527 | 1.518 | |
| 685 | 1.691 | 1.682 | 1.674 | 1.666 | 1.657 | 1.650 | 1.643 | 1.635 | 1.626 | 1.618 | 1.610 | 1.601 | 1.592 | 1.584 | 1.575 | 1.566 | 1.557 | 1.549 | 1.539 | 1.529 | 1.520 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| BASINÇ | 686 | 1.694 | 1.684 | 1.677 | 1.668 | 1.659 | 1.652 | 1.646 | 1.637 | 1.629 | 1.620 | 1.612 | 1.604 | 1.594 | 1.586 | 1.577 | 1.569 | 1.560 | 1.551 | 1.541 | 1.532 | 1.522 |
| | 687 | 1.696 | 1.687 | 1.679 | 1.671 | 1.662 | 1.655 | 1.648 | 1.640 | 1.631 | 1.623 | 1.615 | 1.606 | 1.597 | 1.588 | 1.580 | 1.571 | 1.562 | 1.553 | 1.544 | 1.534 | 1.525 |
| | 688 | 1.699 | 1.689 | 1.682 | 1.673 | 1.664 | 1.657 | 1.650 | 1.642 | 1.633 | 1.625 | 1.617 | 1.608 | 1.599 | 1.591 | 1.582 | 1.574 | 1.564 | 1.556 | 1.546 | 1.537 | 1.527 |
| | 689 | 1.701 | 1.692 | 1.684 | 1.676 | 1.667 | 1.660 | 1.653 | 1.644 | 1.636 | 1.627 | 1.620 | 1.611 | 1.602 | 1.593 | 1.585 | 1.576 | 1.567 | 1.558 | 1.548 | 1.539 | 1.529 |
| | 690 | 1.704 | 1.695 | 1.687 | 1.678 | 1.670 | 1.662 | 1.656 | 1.647 | 1.638 | 1.630 | 1.622 | 1.613 | 1.604 | 1.596 | 1.587 | 1.578 | 1.569 | 1.560 | 1.551 | 1.541 | 1.532 |
| | 691 | 1.706 | 1.697 | 1.689 | 1.681 | 1.672 | 1.665 | 1.658 | 1.649 | 1.641 | 1.632 | 1.624 | 1.616 | 1.607 | 1.598 | 1.589 | 1.581 | 1.572 | 1.563 | 1.553 | 1.544 | 1.534 |
| | 692 | 1.709 | 1.700 | 1.692 | 1.683 | 1.674 | 1.667 | 1.660 | 1.652 | 1.643 | 1.635 | 1.627 | 1.618 | 1.609 | 1.600 | 1.592 | 1.583 | 1.574 | 1.565 | 1.556 | 1.546 | 1.536 |
| | 693 | 1.711 | 1.702 | 1.694 | 1.685 | 1.677 | 1.670 | 1.663 | 1.654 | 1.646 | 1.637 | 1.629 | 1.620 | 1.612 | 1.603 | 1.594 | 1.585 | 1.576 | 1.567 | 1.558 | 1.548 | 1.539 |
| | 694 | 1.714 | 1.705 | 1.697 | 1.688 | 1.680 | 1.672 | 1.665 | 1.657 | 1.648 | 1.640 | 1.632 | 1.623 | 1.614 | 1.605 | 1.597 | 1.588 | 1.579 | 1.570 | 1.560 | 1.551 | 1.541 |
| | 695 | 1.716 | 1.707 | 1.699 | 1.691 | 1.682 | 1.675 | 1.668 | 1.659 | 1.652 | 1.642 | 1.634 | 1.625 | 1.616 | 1.608 | 1.599 | 1.590 | 1.581 | 1.572 | 1.563 | 1.553 | 1.543 |
| | 696 | 1.719 | 1.710 | 1.702 | 1.693 | 1.684 | 1.677 | 1.670 | 1.662 | 1.653 | 1.645 | 1.636 | 1.627 | 1.619 | 1.610 | 1.601 | 1.593 | 1.583 | 1.574 | 1.565 | 1.555 | 1.546 |
| | 697 | 1.721 | 1.712 | 1.704 | 1.696 | 1.687 | 1.680 | 1.672 | 1.664 | 1.656 | 1.647 | 1.639 | 1.630 | 1.621 | 1.612 | 1.604 | 1.595 | 1.586 | 1.577 | 1.567 | 1.558 | 1.548 |
| | 698 | 1.724 | 1.715 | 1.707 | 1.698 | 1.689 | 1.682 | 1.675 | 1.667 | 1.658 | 1.650 | 1.641 | 1.633 | 1.623 | 1.615 | 1.606 | 1.597 | 1.588 | 1.579 | 1.570 | 1.560 | 1.550 |
| | 699 | 1.726 | 1.723 | 1.709 | 1.701 | 1.692 | 1.685 | 1.677 | 1.669 | 1.660 | 1.652 | 1.644 | 1.635 | 1.626 | 1.617 | 1.609 | 1.600 | 15.901 | 1.561 | 1.572 | 1.562 | 1.553 |
| | 700 | 1.729 | 1.720 | 1.712 | 1.703 | 1.694 | 1.687 | 1.680 | 1.671 | 1.663 | 1.654 | 1.646 | 1.637 | 1.628 | 1.620 | 1.611 | 1.602 | 1.593 | 1.584 | 1.574 | 1.565 | 1.555 |
| | 701 | 1.731 | 1.723 | 1.714 | 1.706 | 1.697 | 1.690 | 1.682 | 1.674 | 1.665 | 1.657 | 1.649 | 1.640 | 1.631 | 1.622 | 1.613 | 1.604 | 1.595 | 1.586 | 1.577 | 1.567 | 1.557 |
| | 702 | 1.734 | 1.725 | 1.717 | 1.708 | 1.700 | 1.692 | 1.685 | 1.676 | 1.668 | 1.659 | 1.651 | 1.642 | 1.633 | 1.624 | 1.616 | 1.607 | 1.598 | 1.589 | 1.579 | 1.569 | 1.560 |
| | 703 | 1.736 | 1.728 | 1.719 | 1.711 | 1.702 | 1.695 | 1.687 | 1.679 | 1.670 | 1.662 | 1.653 | 1.645 | 1.636 | 1.627 | 1.618 | 1.609 | 1.600 | 1.591 | 1.581 | 1.572 | 1.562 |
| | 704 | 1.738 | 1.730 | 1.722 | 1.713 | 1.705 | 1.697 | 1.690 | 1.681 | 1.673 | 1.664 | 1.656 | 1.647 | 1.638 | 1.629 | 1.621 | 1.612 | 1.602 | 1.593 | 1.584 | 1.574 | 1.564 |
| | 705 | 1.741 | 1.733 | 1.724 | 1.716 | 1.707 | 1.700 | 1.692 | 1.684 | 1.675 | 1.667 | 1.658 | 1.649 | 1.640 | 1.632 | 1.623 | 1.614 | 1.605 | 1.596 | 1.586 | 1.576 | 1.567 |
| | 706 | 1.744 | 1.735 | 1.727 | 1.718 | 1.710 | 1.702 | 1.695 | 1.686 | 1.677 | 1.669 | 1.661 | 1.652 | 1.643 | 1.634 | 1.625 | 1.616 | 1.607 | 1.596 | 1.588 | 1.579 | 1.569 |
| | 707 | 1.746 | 1.738 | 1.729 | 1.721 | 1.712 | 1.705 | 1.697 | 1.689 | 1.680 | 1.672 | 1.663 | 1.654 | 1.645 | 1.637 | 1.628 | 1.619 | 1.609 | 1.600 | 1.591 | 1.581 | 1.571 |
| | 708 | 1.749 | 1.740 | 1.732 | 1.723 | 1.715 | 1.707 | 1.699 | 1.691 | 1.682 | 1.674 | 1.665 | 1.657 | 1.648 | 1.639 | 1.630 | 1.621 | 1.612 | 1.603 | 1.593 | 1.583 | 1.574 |
| | 709 | 1.751 | 1.743 | 1.735 | 1.726 | 1.717 | 1.710 | 1.702 | 1.693 | 1.685 | 1.676 | 1.668 | 1.659 | 1.650 | 1.641 | 1.633 | 1.623 | 1.614 | 1.605 | 1.595 | 1.586 | 1.576 |
| 710 | 1.754 | 1.745 | 1.737 | 1.728 | 1.720 | 1.712 | 1.704 | 1.696 | 1.687 | 1.679 | 1.670 | 1.661 | 1.652 | 1.644 | 1.635 | 1.626 | 1.617 | 1.607 | 1.598 | 1.588 | 1.579 | |
| 711 | 1.756 | 1.748 | 1.740 | 1.731 | 1.722 | 1.715 | 1.707 | 1.698 | 1.690 | 1.381 | 1.673 | 1.664 | 1.655 | 1.646 | 1.637 | 1.628 | 1.619 | 1.610 | 1.600 | 1.591 | 1.581 | |
| 712 | 1.759 | 1.750 | 1.742 | 1.733 | 1.725 | 1.717 | 1.709 | 1.701 | 1.692 | 1.684 | 1.675 | 1.666 | 1.657 | 1.649 | 1.640 | 1.631 | 1.621 | 1.612 | 1.603 | 1.593 | 1.583 | |
| 713 | 1.761 | 1.753 | 1.745 | 1.736 | 1.727 | 1.720 | 1.712 | 1.703 | 1.695 | 1.686 | 1.678 | 1.669 | 1.660 | 1.651 | 1.642 | 1.633 | 1.624 | 1.614 | 1.605 | 1.595 | 1.586 | |
| 714 | 1.764 | 1.756 | 1.747 | 1.738 | 1.730 | 1.722 | 1.714 | 1.706 | 1.697 | 1.689 | 1.680 | 1.671 | 1.662 | 1.653 | 1.644 | 1.635 | 1.626 | 1.617 | 1.607 | 1.596 | 1.588 | |

EK-2 Toprak fiziği üçgeni

