EKOLOJİK YAKIT HÜCRESİ ENTEGRE YAPAY SULAK ALAN SİSTEMLERİNDE BİTKİLERİN BİYOELEKTRİK ÜRETME VE ATIK SU ARITMA PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS

Çağdaş SAZ

Eskişehir, 2017

EKOLOJİK YAKIT HÜCRESİ ENTEGRE YAPAY SULAK ALAN SİSTEMLERİNDE BİTKİLERİN BİYOELEKTRİK ÜRETME VE ATIK SU ARITMA PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Çağdaş SAZ

YÜKSEK LİSANS

Biyoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cengiz TÜRE

(İkinci Danışman: Araş. Gör. Dr. Onur Can TÜRKER)

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Aralık 2017

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Çağdaş SAZ' ın **"Ekolojik Yakıt Hücresi Entegre Yapay Sulak Alan Sistemlerinde Bitkilerin Biyoelektrik Üretme Ve Atık Su Arıtma Performanslarına Etkisinin Araştırılması"** başlıklı Yüksek Lisans Tezi, 25/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği" nin ilgili maddeleri uyarınca, Biyoloji Anabilim dalında Yüksek Lisans Yeterlik tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Cengiz TÜRE	
Üye	: Prof. Dr. Atila OCAK	
Üye	: Doç. Dr. M. Burçin MUTLU	

Enstitü Müdürü

ÖZET

EKOLOJİK YAKIT HÜCRESİ ENTEGRE YAPAY SULAK ALAN SİSTEMLERİNDE BİTKİLERİN BİYOELEKTRİK ÜRETME VE ATIK SU ARITMA PERFORMANSLARINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Çağdaş SAZ

Biyoloji Anabilim Dalı

Ekoloji Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, 2017

Danışman: Prof. Dr. Cengiz TÜRE

İkinci Danışman: Araş. Gör. Dr. Onur Can TÜRKER

Bu çalışmada, mikrokozm ölçekli tasarlanmış yapay sulak alan entegre ekolojik yakıt hücresi modülleri içerisindeki bitki örtüsünün atık suyun arıtım sürecine etkisi ve biyoelektrik üretim potansiyellerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma için arazi koşulları altında farklı türde bitki türlerine (*Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. (Typhaceae), *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae), *Juncus gerardii* Loisel. subsp. *gerardii* (Juncaceae) ve *Carex divisa* Hudson. (Cyperaceaea))sahip iki tekrarlı olarak 4 adet bitkili ve 1 adet bitkisiz kontrol modülü olmak üzere 5 adet (toplamda 10 adet) YSA-EYH modülü kurulmuş ve araştırmalar bu modüller üzerinden gerçekleştirilmiştir. YSA-EYH modülleri üzerinde 88 gün boyunca gerçekleştirilen biyoremediasyon ve biyoelektrik üretim potansiyeli deneyleri sonucunda, bitkili YSA-EYH modüllerinin bitkisiz YSA-EYH modülüne kıyasla daha yüksek arıtım verimliliğine sahip olduğu ve bitkili YSA-EYH modüllerinde ortalama KOİ, NH_4^+ ve toplam fosfor arıtım verimliliği sırasıyla, % 85-88, % 95-97 ve % 95-97 arasında değiştiği bulunmuştur. Bununla birlikte, en yüksek NO_3^- giderimi (% 63), bitkisiz kontrol modülünde olduğu saptanmıştır. Modüllerin ortalama çıkış voltajı, güç yoğunluğu ve kolumbik verimliliği sırasıyla 1,01±0,14 V, 7,47±13,7 mWatt/m^2 ve % 8,28±10,4 olan *Typha angustifolia* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modülünde tespit edilmiştir. Sonuçlar, YSA-EYH matrisinde bitki örtüsünün varlığının arıtım verimliliği ve biyoelektrik üretimi için yararlar sağladığını göstermektedir. Ayrıca, organik bileşiklerin biyolojik olarak parçalanmasından sorumlu olan ve anottan, katotta doğru elektron akışını katalize olan mikrobik etkenleri arttırdığını tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu tür sulak alan sistemleri tasarlayacak mühendislerin, arıtım verimliliğini ve biyoelektrik üretimini en üst düzeye çıkarmak için YSA-EYH modülünde bitkili yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi dizayn etmeleri önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay sulak alan, Ekolojik yakıt hücresi, Vejetasyon, Atık su arıtımı, Biyoelektrik üretimi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ECOLOGICAL FUEL CELL INTEGRATED ARTIFICIAL WETLAND PLANTS ON BIOELECTRICITY PRODUCTION AND WASTEWATER TREATMENT PERFORMANCE

Çağdaş SAZ

Department of Biology

Programme in Ecology

Anadolu University, Graduate School of Sciences, December, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Cengiz TÜRE

Co-Supervisor: R. A. Dr. Onur Can TÜRKER

In this study, it is aimed to determine the bioelectrical production potential and the effect of the plants cover on the treatment process of wastewater in the microcosm scale constructed wetland integrated ecological fuel cell modules. For the study under the terrain conditions, 4 modules with different plants(*Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. (Typhaceae), *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae), *Juncus gerardii* Loisel. subsp. *gerardii* (Juncaceae) and *Carex divisa* Hudson. (Cyperaceaea)) and 1 unplanted control module with 2 repeats (totaly 10 modules) have been designed. Experiments were carried out in these modules. Potential experiments of bioremediation and bioelectric production continued for 88 days. As a result, it has been determined that planted CW-EFC modules have higher treatment efficiency than unplanted control module. The average COD, NH_4^+ and total phosphorus removal efficiencies in planted CW-EFC modules were found to be 85-88 %, 95-97 % and 95-97 %, respectively. However, the highest NO_3^- removal (63 %) was found to be in the unplanted control module. The average output voltage, power density, and coulombic efficiency of the modules were determined in CW-EFC modules with *Typha angustifolia* of 1.01±0.14 V, 7.47±13.7 mWatt/m^2 and 8.28±10.4 %, respectively. The results show that the presence of plant cover in the CW-EFC matrix provides benefits for the yield efficiency and bioelectric production. It has also been found that organic compounds are responsible for the biodegradation and increase the microbial agents that catalyze electron flow towards to the anode. As a result, engineers designing such wetland systems are advised to design a constructed wetland ecological fuel cell in the CW-EFC module to maximize the treatment efficiency and bioelectricity production. As a result, engineers who design such wetland systems need to maximize the efficiency of their treatment and bioelectric production, it is recommended that the CW-EFC module design a planted constructed wetland ecological fuel cell.

Keywords: Constructed wetlands, Ecological fuel cell, Vegetation, Wastewater treatment, Bioelectric production.

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca, çalışmalarımın her aşamasında engin bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, yönlendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Cengiz TÜRE' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, ikinci danışman hocam Araş. Gör. Dr. Onur Can TÜRKER ve Anıl YAKAR' a teşekkürü bir borç bilirim.

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

Çağdaş SAZ

25/12/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait özgün bir çalışma olduğunu, çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan "bilimsel intihal tespit programı" yla tarandığını ve hiçbir şekilde "intihal içermediğini" beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Çağdaş SAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI ..... **i**
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ..... **ii**
ÖZET ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
GÖRSELLER DİZİNİ ..... **xvi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
2. MATERYAL VE METOD **8**
2.1. Araştırma Yeri 9
2.2. Yapay Sulak Alan – Ekolojik Yakıt Hücresi Entegre Modüllerinin Kurulumu 11
2.3. Kültür Periyodu 20
2.4. Atık Suların Hazırlanması Ve Giriş Dozlarının Ayarlanması 26
2.5. Su Analiz Yöntemleri 26
2.5.1. Fiziko- kimyasal analizler 26
2.5.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı analizleri 27
2.5.3. Amonyum ve nitrat analizleri 28
2.5.4. Toplam fosfor analizleri 28
2.6. Bitki Örneklerinin Analizleri 28
2.6.1. Bitki boylarının ölçülmesi ve nispi gelişim oranları (RGR) 29
2.6.2. Fotosentetik pigment analizi 29
2.6.3. Bitki azot analizi 29
2.6.4. Bitki biyomas analizi 29
2.6.5. Tahmini karbon stoğu analizi 30
2.7. Sediment Örneklerinin Analizleri 30
2.7.1. Fiziksel analiz 30

2.7.2. pH (Toprak reaksiyonu) analizi 30
2.7.3. Azot analizi 30
2.8. Biyoelektrik Verilerinin Ölçülmesi Ve İzlemesi 31
2.9. Verilerin İstatistiksel Analizleri Ve Hesaplamalarda Kullanılan Formüller 31
2.10. Araştırmalar Sırasında Kullanılan Cihazlar 33
3. BULGULAR 35
3.1. Su Analizleri 36
3.1.1. Fiziko-kimyasal ölçümler 36
3.1.1.1. pH 36
3.1.1.2. Elektriksel iletkenlik (EC) 40
3.1.1.3. Sıcaklık (ºC) 42
3.1.1.4. Redoks 45
3.1.1.5. Çözünmüş oksijen 48
3.1.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi 50
3.1.3. Amonyum (NH_4^+) giderimi 56
3.1.4. Nitrat (NO_3^-) giderimi 59
3.1.5. Toplam fosfor giderimi 63
3.2. Bitki Analizleri 67
3.2.1. Bitkilerin boyu ve nispi gelişim oranları (RGR) 67
3.2.2. Bitkilerin fotosentetik pigment miktarları 69
3.2.3. Bitkilerin azot ölçümleri 71
3.2.4. Bitki biyomas ölçümleri ve tahminî karbon stoğu 72
3.3. Sediment Analizleri 73
3.3.1. Sediment örneklerinin fiziksel ve kimyasal analizleri 73
3.3.2. Azot analizi 75
3.4. Biyoelektrik İzleme Ve Ölçme 75
4. . TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER 80
KAYNAKÇA 93
ÖZGEÇMİŞ

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3. 1. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde hayatta kalan bitki sayısı (H), ölü birey sayısı (Ö) ve hayatta kalma oranı 35

Çizelge 3. 2. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek en düşük, pH, EC, Sıcaklık, çözünmüş oksijen, redoks potansiyeli değerleri 39

Çizelge 3. 3. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek en düşük kimyasal oksijen ihtiyacı, amonyum, nitrat ve toplam fosfor değerleri.. 51

Çizelge 3. 4. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek en düşük kimyasal oksijen ihtiyacı, amonyum, nitrat ve toplam fosfor yüzde arıtım performansları..... 52

Çizelge 3. 5. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin ortalama bitki boyları, klorofil pigmentleri ve yüzde azot içerikleri 66

Çizelge 3. 6. Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin biyomas üretimleri ve C stokları 72

Çizelge 3. 7. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinden araştırma periyodu sonunda toplanan sediment örneklerine ait fiziksel ve kimyasal analizleri 74

Çizelge 3. 8. Araştırma periyodu boyunca yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin en yüksek, en düşük ve ortalama biyoelektrik üretim değerleri, en yüksek ve ortalama güç yoğunluğu değerleri, en yüksek ve ortalama akım yoğunluğu değerleri, ortalama kolumbik verimlilik değerleri..... 78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3. 1. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi 37

Şekil 3. 2. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi 37

Şekil 3. 3. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi 38

Şekil 3. 4. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi 38

Şekil 3. 5. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi 40

Şekil 3. 6. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi 41

Şekil 3. 7. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi 41

Şekil 3. 8. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi 42

Şekil 3. 9. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (ºC) değişimi 43

Şekil 3. 10. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (ºC) değişimi 43

Şekil 3. 11. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (ºC) değişimi 44
Şekil 3. 12. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (ºC) değişimi 44
Şekil 3. 13. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi 46
Şekil 3. 14. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi 46
Şekil 3. 15. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi 47
Şekil 3. 16. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi 47
Şekil 3. 17. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi 48
Şekil 3. 18. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi 49
Şekil 3. 19. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi 49

Şekil 3. 20. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi 50
Şekil 3. 21. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 53
Şekil 3. 22. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 54
Şekil 3. 23. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 54
Şekil 3. 24. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 55
Şekil 3. 25. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 55
Şekil 3. 26. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimliliği (%) 56
Şekil 3. 27. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 57

Şekil 3. 28. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 57
Şekil 3. 29. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 58
Şekil 3. 30. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 58
Şekil 3. 31. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 59
Şekil 3. 32. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama amonyum giderim verimliliği (%)..... 59
Şekil 3. 33. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 60
Şekil 3. 34. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 61
Şekil 3. 35. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 61

Şekil 3. 36. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 62
Şekil 3. 37. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 62
Şekil 3. 38. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama nitrat giderim verimliliği (%) .. 63
Şekil 3. 39. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 64
Şekil 3. 40. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 64
Şekil 3. 41. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 65
Şekil 3. 42. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 65
Şekil 3. 43. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi..... 66
Şekil 3. 44. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama nitrat giderim verimliliği (%) .. 66
Şekil 3. 45. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki bitki boy uzunlukları (cm)..... 68

Şekil 3. 46. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki nispi gelişim oranları 69
Şekil 3. 47. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama klorofil a değerleri 70
Şekil 3. 48. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama klorofil b değerleri 70
Şekil 3. 49. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama klorofil a+b değerleri 71
Şekil 3. 50. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinden araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki biyomasları 72
Şekil 3. 51. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinden araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki azot içerikleri (%) 73
Şekil 3. 52. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülününün biyoelektrik üretim değerleri (mV) değişimi 75
Şekil 3. 53. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülününün biyoelektrik üretim değerleri (mV) değişimi 76
Şekil 3. 54. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülününün biyoelektrik üretim değerleri (mV) değişimi 76
Şekil 3. 55. Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülününün biyoelektrik üretim değerleri (mV) değişimi 77

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2. 1. Anadolu Üniversitesi Yunusemre Kampüsü Uydu Görüntüsü 10
Görsel 2. 2. Çalışmanın gerçekleştiği alan 10
Görsel 2. 3. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin kurulacağı polyester düzenekler (45 cm×45 cm×40cm) 11
Görsel 2.4. Sentetik Atık suyun hazırlandığı su tankı (100 L)..... 12
Görsel 2.5. Sentetik atık suların modüllere verilmesini sağlayan peristaltik pompa .. 12
Görsel 2.6. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde kullanılan filtrasyon ve dolgu malzemeleri (a), kum (b), cam yünü (0,01 cm kalınlık) ve (c ve d) çakıl taşları (5 cm ve 1-3 cm) 13
Görsel 2. 7. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerine çakıl taşlarının yerleştirilmesi..... 14
Görsel 2. 8. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerine anot katmanının dolgu malzemesinin yerleştirilmesi 15
Görsel 2. 9. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerine anot elektrotlarının yerleştirilmesi..... 15
Görsel 2. 10. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde kullanılan anot (2 cmx8 cmx0,5 cm) ve katot elektrotları (2 cmx8 cmx1 cm)..... 15
Görsel 2. 11. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde kullanılan cam yününün yerleştirilmesi 16
Görsel 2. 12. Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde katot katmanının dolgu malzemesinin oluşturulması ve katot elektrotlarının yerleştirilmesi 16
Görsel 2. 13. Tez çalışmasında kullanılan bitkilerin toplandığı Balıkdamı göleti..... 17
Görsel 2. 14. Bitkisiz kontrol yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 (YSA-EYH 1) 18
Görsel 2. 15. *Typha angustifolia* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 (YSA-EYH 2) 18
Görsel 2. 16. *Typha latifolia* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 (YSA-EYH 3)..... 19
Görsel 2. 17. *Carex divisa* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 (YSA-EYH 4)..... 19

Görsel 2. 18. *Juncus gerardii* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 (YSA-EYH 5)..... 20
Görsel 2. 19. Kültür periyodu sonrasında bitkisiz kontrol yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 (YSA-EYH 1)..... 21
Görsel 2. 20. Kültür periyodu sonrasında *Typha angustifolia* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 (YSA-EYH 2)..... 22
Görsel 2. 21. Kültür periyodu sonrasında *Typha latifolia* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 (YSA-EYH 3)..... 23
Görsel 2. 22. Kültür periyodu sonrasında *Carex divisa* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 (YSA-EYH 4)..... 23
Görsel 2. 23. Kültür periyodu sonrasında *Juncus gerardii* bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 (YSA-EYH 5)..... 24
Görsel 2. 24. Çalışma alanın içerisinde kurulan yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modülleri 25
Görsel 2. 25. Taşınabilir çoklu su ölçüm cihazı (HACH HQ40D Multi-Parameter Taşınabilir pH Metre)..... 27

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

YSA : Yapay sulak alan

EYH : Ekolojik yakıt hücresi

YSA-EYH : Yapay sulak alan entegre ekolojik yakıt hücresi

KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı

EC : Elektriksel İletkenlik

RP : Redoks Potansiyeli

ÇO : Çözünmüş Oksijen

KV : Kolumbik verimlilik

NH_4^+ : Amonyum

NH_3^- : Nitrat

H_2SO_4 : Sülfürik asit

K_2SO_4 : Potasyum sülfat

Cu_2SO_4 : Bakır sülfat

Ca : Kalsiyum

Mg : Magnezyum

Na : Sodyum

K : Potasyum

N : Azot

P : Fosfor

°C **:** Santigrat derece

% : Yüzde

V : Volt

mV : Milivolt

I : Akım

R : Direnç

W : Güç

mWatt : Miliwatt

A : Akım

mA : Miliamper

Ω : Ohm

µS : Mikrosaniye

m : Metre

m^2 : Metrekare

m^3 : Metreküp

cm : Santimetre

cm^2 : Santimetrekare

mm : Milimetre

L : Litre

mL : Mililitre

g : Gram

mg : Miligram

H^+ : Proton

e^- : Elektron

h : Saat

1. GİRİŞ

21.yüzyılda dünyamızın yaşadığı zorlukların başında nüfusun hızlı bir şekilde artması, biyoçeşitliğin kaybı ve iklim değişikliği gibi konular gelmektedir (United Nations, 2009; Garcia, 2017). Ancak insanoğlunun yaşamını daha iyi standartlarda devam ettirebilmesi için doğal sermayeye dayanan ekolojik süreç ve döngülerin sürdürülebilirliğini sağlaması ve bunların devamlılığı için etkin stratejiler planlaması gerekmektedir (Gill ve ark., 2008; Garcia, 2017). Sürdürülebilirlik kavramının ülkelerin ve insanoğlunun politik ajandalarına girmesi sadece toplumların ekonomik varlığını devam ettirme kapasitesine değil aynı zamanda küresel çevrenin ve ekosistemin uzun vadeli korunmasını destekleme becerisini de göstermesi anlamına gelmektedir (Greaker ve ark., 2013; Figge ve ark., 2014; Gombert-Courvoisier ve ark., 2014; Garcia, 2017). Son yıllarda büyük önem kazanan ekolojik sürdürülebilirlik ilkesi ile şirketler yeşil stratejiler üretmek ve geliştirmek için yeni yollar arayışına girmişler, hatta hükümetler tarafından daha fazla teşvik edilmişlerdir (Kopnina, 2014; Klein ve ark., 2015, Garcia, 2017).

Ülkelerin geleneksel büyüme modeli, fosil yakıt kullanımına bağlı olduğundan sürdürülebilir değildir. Geleneksel olan bu model yerine, gelecekteki kalkınma modeli, yenilenebilir enerjileri ve ekolojik teknikleri benimseyen, aynı zamanda ekolojik ekonomi yaklaşımını temel alan kalkınma üzerine olmalıdır (Chen, 2015). Bu nedenle, her geçen gün sayıları hızla artmakta olan ülkeler ve uluslararası örgütler, yeşil büyümeyi hızla uygulamaya koymaktadır. Örneğin, UNESCAP (2005), OECD (2009), UNEP (2011), WB (2012) ve diğer uluslararası kuruluşlar, yeşil büyümeye yönelik girişimler ve beyanlar başlatmıştır. Güney Kore, ulusal yeşil büyüme stratejisini teşvik etmek için "*Yeşil Büyüme Temel Yasasını*" yürürlüğe koyarak, bu konuda diğer ülkelere liderlik yapmakta ve yeşil büyüme stratejisini ulusun öncelikli meselesi olarak görmektedir (Mathews, 2012). Ayrıca Birleşik Krallık, "*Yeşil Ekonomiye Geçişi Sağlama*" (HM Hükümeti, 2011) ve "*2013 Enerji Yasası*" (The Stationary Office, 2013) adlı ulusal stratejilerini açıklamıştır. Almanya, yeşil büyümenin uygulanmasında öncelikli olarak "*ekolojik modernizasyon*" konusuna odaklanmıştır (Jänicke, 2012). 2010'da Japonya, "*Düşük Karbonlu Toplumun*"' başarısını vurgulayan "*Yeni Büyüme Stratejisini*"' açıklamıştır (Jones ve Yoo, 2011; Guo ve ark., 2017). Tüm bu gelişmeler sırasında, ekonomistler, ekologlar ve politikacıların diyalogları aracılığıyla "*Ekolojik Ekonomi*" ya da "Y*eşil Ekonomi*" denilen yeni bir multi-disipliner alan ortaya çıkmıştır (Gendron,

2014; Ghisetti ve Rennigs, 2014; Loiseau ve ark., 2016). Ekolojik ekonominin kaşifi Robert Costanza'ya göre (1989) Ekolojik Ekonomi, en geniş anlamıyla, ekosistemler ve ekonomik sistemler arasındaki sürdürülebilirlik ilişkilerini ele almaktadır. Bu tanım, yıllar içerisinde gelişerek, bir ürünün üretimi ve tüketimi sırasında ekolojik dengenin bozulmadan devam edebilmesini amaçlayarak, sürdürebilirliği ön planda tutan ekonomik bir model olarak tanımlanmaya başlamıştır (Anderson ve M'Gonigle, 2012; Lo, 2013; Wicker ve Becken, 2013; D'Amatoa ve ark., 2017).

Her ne kadar insanlar arasında ekoloji ve mühendislik bilimlerinin birbirinden ayrı bilimler olduğu gibi bir algı bulunsa da, bu iki alanın bütüncül bir modeli olarak yeni ve etkili bir yaklaşım olan "*Ekolojik Mühendislik*" yaklaşımı, ekolojik ekonomi stratejilerine yön verecek bir multi-disipliner alan olarak ortaya çıkmıştır (Mitsch ve Jorgensen, 2003; Barot ve ark., 2012; Mitsch, 2012; Mitsch, 2014; Aronson ve ark., 2016; Mitsch ve Mander, 2017).

Ekolojik mühendislik, insanoğlunu doğal çevresi ile bütünleştiren, sürdürülebilir ekosistemlerin tasarımını gerçekleştiren (Mitsch, 1993; 2012; 2014; Mitsch ve Jørgensen, 2003; Aronson ve ark., 2016; Mitsch ve Mander, 2017), bütünleştirici bir model olarak da tanımlanmaktadır (Barot ve ark., 2012; Coombes ve ark., 2015; Mitsch ve Mander, 2017). Ekolojik mühendisliğin uğraştığı ve yoğunlaştığı konular arasında, ıslah edilen sulak alanlar, restore edilmiş nehir yatakları, taşkın alanları gibi nispeten küçük ölçekli ekosistemlerin sürdürülebilirliği, ve su havzalarının rehabilitasyonu gibi faaliyetler bulunmaktadır (Costanza ve ark., 1997; Costanza, 2012; Mitsch, 2012).

Günümüzde, yoğun sanayileşme ile birlikte hız kazanan nüfus artışı ve ekonomik gelişmeler ekolojik sistemlerde bulunan su kaynakları üzerinde giderek artan bir talebi de beraberinde getirmiştir (Mudakkar ve ark., 2013; Stuermer, 2017). Artan talep ile birlikte, temiz su kaynaklarına ulaşmama veya su kirliliğinin önlenememesi başta olmak üzere pek çok problem de ortaya çıkmıştır (Paredes ve ark., 2010; Kowalczak ve Kundzewicz, 2011). Ancak ekolojik mühendislik ilkelerinin büyük ölçekli peyzaj ve toplama alanlarına da rahatlıkla uygulanabilir bir yaklaşım olması, atık suların ekolojik sistem içerisinde ya arındırılması ya da yeniden değerlendirilebileceği fikrini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle ekolojik sistemlerde ortaya çıkabilecek atık suların büyük bir kısmı arındırılırken diğer bir bölümü de, günümüzde sulama suyu, enerji üretimi veya gübre olarak kullanılabilecek özellikte bulunmaktadır (Mudakkar ve ark., 2013; Stuermer, 2017).

Atık suyun arıtılması ve su kalitesinin arttırılması için, nitrifikasyon, denitrifikasyon, amonifikasyon ve adsorpsiyon gibi doğal saflaştırma mekanizmaları içeren sistemler tasarlanması gerekmektedir. İşte bu tür mekanizmalar taklit edilerek yapımı sağlanan "Doğal Arıtım Teknolojileri" dünyanın birçok noktasında atık suların arındırılması için tasarlanmıştır (Türker ve ark., 2014; Vymazal ve Brezinova, 2015; Türker ve Yakar, 2017). Ekolojik arıtma teknolojilerinden biri kabul edilen, Yapay Sulak Alanlar (YSA), atık sudan organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanılan cazip, ekonomik, çevre dostu, kullanımı kolay ve konvansiyonel arıtım sistemlerine alternatif sistemlerden biridir (Vymazal ve Kröpfelová, 2008; Vymazal, 2013; Wang ve ark., 2012; Lv ve ark., 2017; Ma ve ark., 2017). Bu nedenle, YSA sistemlerinin araştırılması ve kullanımı, son yıllarda dünya çapında popüler hale gelmiştir (Vymazal ve Kröpfelová, 2008). Hızla artan bu araştırmalar sonucunda, günümüzde dünya çapında yaklaşık 100.000'den fazla YSA arıtma sistemi kurulmuş ve günlük milyarlarca litre atık su arıtılması bu sistemler üzerinden yapılmaktadır. Yapay sulak alan arıtma teknolojilerin popüler hale gelmesinin en önemli faktör maliyetinin çok düşük olmasıdır. Bu bağlamda YSA' lar atık suların arıtılması, su kalitesinin iyileştirilmesi ve bunu düşük maliyet ile gerçekleştirmesi sebebiyle yenilikçi ve insanlara özgü ekosistem hizmetlerini temsil etmektedirler (Vymazal, 2007; Chen ve ark., 2012; Türker ve ark., 2014). Örneğin, geleneksel konvansiyel arıtım yöntemleri kullanılarak $1m^{3'}$evsel atık suyun arındırılması için tahmini olarak 571 ile 715 dolar arasında bir maliyeti ortaya çıkarken, YSA sistemi kullanılarak gerçekleştirilen $1m^{3'}$ lük arıtım maliyeti 186 ile 357 dolar arasında değişmektedir (Rousseau ve ark., 2004; Abou-Elela ve ark., 2013). Ayrıca, bu sistemlerin üzerinde yetişen çeşitli sulak alan bitkileri vasıtasıyla yararlı biyomas üretmeleri ve vahşi yaşam ortamını desteklemelerine yardımcı olması onları konvansiyonel atık su arıtım teknolojisine karşı çok daha avantajlı hale getirmektedir Bu nedenle yapay sulak alan (YSA) gibi sürdürülebilir atık su arıtma teknolojileri üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve bu sistemler evsel endüstriyel, tarımsal ve çeşitli metal kirleticilerin bulunduğu atık suların arıtılması için başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Yapay sulak alanlar (YSA), doğal koşullarda gerçekleşen tüm olayları daha kontrollü bir ortam içerisinde gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmış sistemlerdir (Matamoros, 2017). YSA sisteminin optimum bir tasarımını oluşturulurken, arıtım verimliliği maksimum, kullanılan alanın ise minimuma indirgenmesi gerekmektedir. Hidrolik bekletme süresi ve sıcaklık YSA' ların arıtım verimliliğini etkileyen ana

parametrelerdendir (Kuschk ve ark., 2003; Abou-Elela, 2013). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Su Temini ve Sanitasyon İşbirliği Konseyi sonuçlarına göre, gelişmekte olan ülkelerin kırsal bölge nüfusunun, arındırma hizmetlerine erişimi olmadığı bildirilmiştir (Massoud ve ark., 2009). 2010 yılı itibariyle Türkiye'de kullanılan atık su miktarının sadece % 76'sı arıtılmıştır. Boşaltılan atık suların, % 37,9' u ileri biyolojik, % 34,3' ü biyolojik, % 27,6'sı fiziksel ve % 0,2'si doğal (TUIK, 2012) arıtım yöntemleri kullanılarak tedavi edilmiştir. Kırsal alanlarda su kaynaklarının kalitesini artırma ve evsel atık su ile mücadele yöntemleri, Türkiye ve diğer ülkeler için son derece önemli ve bir o kadar da endişe yaratıcı bir konu olmuştur. YSA' ların uygulanması, geleneksel üçüncül ve ikincil evsel atık su arıtımından, tarımsal atıklar, endüstriyel atıklar, arazi dolum sızıntı suyunun yanı sıra şehir içi ve kırsal alanlardan çıkan atık suların arıtımına kadar pek çok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda, etkin atık su yönetimi, atık suyun ekolojik sistemlerdeki maliyet etkinliğini, daha az karmaşıklığını, çevre dostu olarak nasıl yer aldığına ve atık suların arıtılması sırasında insanların ikincil kazanımları nasıl elde edebileceklerini temel alan bütüncül bir yaklaşımı içermelidir. (Rasilainen ve ark, 2010; Türker ve ark., 2016a).

Biyo-elektrokimyasal Atık su Arıtma Metodolojileri (BAAM) ve ekolojik yakıt hücresi (EYH), son yıllarda gelişen, atık sular arıtılırken aynı zamanda organik kirleticiler içerisindeki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yenilikçi ve umut verici teknolojilerdir (Logan ve ark., 2006). Bu teknolojilerde, atık suyun biyolojik olarak parçalanabilir organik bileşikleri, istenmeyen atık olarak tanımlanmak yerine bir enerji kaynağı olarak tanımlar ve atık suyun mikrobiyal süreçten geçirildiği sırada arındırılması ve eş zamanlı olarak elektrik üretme esasına dayanmaktadır (Li ve ark., 2011; Mohan ve ark., 2011). Bütüncül özellikleri nedeniyle son zamanlarda dünya genelindeki araştırmacılar bu teknoloji gruplarına yoğun ilgi göstermişler ve özellikle EYH esasına göre çalışan sistemler dizayn ederek atık su arıtımı ve enerjinin geri kazanımı sağlamaya çalışmışlardır (Logan ve ark., 2006; Srikanth ve Mohan, 2012).

Tipik olarak, EYH modülü, bir katot ve anot bölgesi ve ayırıcı membrana sahip olan bir sistemdir (Logan ve ark., 2006; Li ve ark., 2011). Bir EYH modülünde, elektrojenik aktif bakteriler biyolojik olarak parçalanabilen atık su substratını biyoelektrik haline dönüştürebilirler (Yadav ve ark., 2012; Oon ve ark., 2015). Anot bölgesinde biyolojik olarak bozunabilir substrat oksidize olur ve mikroorganizmalarla uzaklaştırılırken, proton (H^+) ve elektronlar (e^-) salınarak ve katot bölgesine geçerler (Li ve ark., 2011). Bu işlemin

bir sonucu olarak, EYH modülleri anot bölgesinden katot bölgesine elektron transferi yoluyla biyoelektriksel bir akım oluşturur ve elektrot reaksiyonları meydana gelmektedir.

Sürdürülebilir bir atık su arıtma teknolojisi keşfetme arzusu, yapay sulak alanlar (YSA) ile ekolojik yakıt hücresi modüllerinin entegrasyonuna yol açmış ve bu entegrasyon son teknoloji ürünü olan hibrit bir teknolojinin (YSA-EYH) ortaya çıkmasına neden olmuştur (Yadav ve ark., 2012; Liu ve ark., 2014; Doherty ve ark., 2015a; Fang ve ark., 2015; Oon ve ark., 2016). Bu YSA-EYH tabanlı teknolojide, sulak alan yatağı içerisinde bulunan mikroorganizmalar organik maddelerin parçalanmasını sağlarken açığa çıkan serbest elektronlar EYH modülleri tarafından tutularak biyoelektrik üretimi gerçekleşmektedir. Bu çalışma prensibi, iki yenilikçi teknolojinin kilit özelliklerini bir araya getirmiştir (Yadav, 2010; Yadav ve ark., 2012; Fang ve ark., 2013; Villasenor ve ark., 2013; Zhao ve ark., 2013; Corbella ve ark., 2015; Doherty ve ark., 2015b; Oon ve ark., 2017; Wang ve ark., 2017).

Bir YSA- EYH modülünde, kimyasal enerji hem atık sulardaki organik madde içerisinden hem de bitkilerin kök salgıları içerisinde bulunan organik maddelerden karşılanır (Liu ve ark., 2013; Corbella ve ark., 2015). YSA-EYH' nin bu eşsiz operasyonel özelliği, konvansiyel arıtma teknolojilerin kullanılmasının maliyetli olduğu (ör: Köy ve kasabalarda) alanlarda hem biyolojik kirliliği önlemek hem de biyo-elektrik üretmek için uygun bir yaklaşım olarak görülmektedir (Oon ve ark., 2016; Oon ve ark., 2017). Bununla birlikte, YSA-EYH modüllerinin biyoelektrik üretme esnasındaki dezavantajları arasında ise, yüksek iç direnç, düşük elektrot performansı gibi özellikler sıralanabilir. Her ne kadar geleneksel EYH sistem konfigürasyonunda, yenilikçi elektrot modifikasyonu (Liu ve ark., 2011) veya özel mikrobiyal suşlarla aşılama gibi çeşitli yöntemlerle biyoelektrik performansı arttırılabilse de, bu yöntemlerin çoğu YSA-EYH sistemleri için geçerli değildir (Fang ve ark., 2017). Bu nedenle, YSA-EYH sistemlerin biyoelektrik üretme kapasitesinin arttırılabilmesi için sistem içerisindeki tüm biyolojik mekanizmaların iyi anlaşılması gerekmektedir.

Yapay sulak alanlarda bulunan bitkiler, kirleticilerin arınım mekanizmalarını etkileyerek sistemlerin toplam arıtma performanslarının belirlenmesin de önemli rol oynamaktadır (Chen ve ark., 2012). Bu bitkiler sadece atık sudaki kirleticileri doğrudan dokularına toplamakla kalmaz, aynı zamanda YSA' larda arıtım performansını arttıran çeşitli kimyasal ve biyolojik işlemleri de katalize ederler (Shelef ve ark., 2013). Son araştırmalar, bitki türlerinin çeşitliliğinin ve bitki örtüsünün devamlılığının, YSA

teknolojilerinin tasarım parametreleri ile kirletici uzaklaştırma işlemi arasındaki bağlantılarında önemli rol oynadığını ortaya koymuştur (Mesquita ve ark., 2013; Leto ve ark., 2013; Chen ve ark., 2014). Bu nedenle, YSA arıtım teknolojilerinde, arıtım optimizasyonunun sağlanması ve sistemlerin sürdürülebilirliğinin devam ettirilmesi açısından en uygun bitki seçiminin doğru şekilde yapılması gerekmektedir (Chen ve ark., 2012).

Literatür incelendiğinde YSA' lar da kullanılan ve "*biyo-mühendis*" bitki modeli olarak adlandırılan makrofitlerin farklı türlerinin kullanılması durumunda atık suların kalitesinin farklı oranlarda arttırıldığını vurgulayan birçok çalışma bulunmaktadır (Leto ve ark., 2013; Chen ve ark., 2014). Ancak, bir YSA-EYH modülün de, bitki vejetasyonu ve bitki tür çeşitliliğinin atık su arıtımı ve biyoelektrik üretimi esnasındaki rolü ortaya çıkarılmamıştır. Bu kapsamda, bu çalışmada elde edilecek sonuçlar ile literatürdeki bu tarz boşlukların doldurulması sağlanacaktır.

Bir YSA-EYH sisteminde yakıt kaynakları, atık sulardaki organik kirleticilerden ve bitki örtüsü matrisindeki bitkilerden salgılanan bitki depo salgılarından gelmektedir (Ong ve ark., 2010; Türker ve Yakar, 2017). Bu nedenle, YSA-EYH sistemlerinin arıtım ve biyoelektrik üretim performansı, mikroorganizmaların, bitki köklerinin ve kök salgılarının kombine etkisine dayanmaktadır. (Corbella ve ark., 2015; Oon ve ark., 2016). Bu bağlamda, bir YSA-EYH' nin aktif reaksiyon bölgesi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin mikroorganizmalar, bitkiler, kök salgıları ve kirletici maddeler arasındaki kompleks etkileşimler yoluyla gerçekleştiği rizosferdir. (Chen ve ark., 2012; Liu ve ark., 2013; Oon ve ark., 2016). Ayrıca, bitki vejetasyonun rizosferdeki bakteriler için daha fazla büyüme ve gelişme ortamı sağlayarak bakterilerin aktivitelerini arttırdığı tespit edilmiştir (Liu ve ark., 2013; Corbella ve ark., 2015). Bu perspektiften bakıldığında, YSA-EYH modüllerinde bitki vejetasyonunun bulunması biyoelektrik üretimiyle ilişkili mikroorganizmaların büyümesini ve aktivitesini destekleyerek daha fazla biyoelektrik üretimi sağlanabilir. Bununla birlikte, YSA-EYH sistemlerinde kullanılan her bitki türü, kendi kimyasal bileşimine, ekolojik isteklere, fizyolojik özelliklere sahip olduğu için bu tarz özellikler, YSA-EYH sistemlerinde biyolojik elektriğin yanı sıra YSA arıtma sistemlerinin arıtım performansını doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, uygun bitki örtüsünün seçilmesi, YSA-EYH sistemlerinde daha fazla biyoelektrik üretiminin sağlanması ve yüksek kirletici arıtım performansının elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, aynı dolgu malzemesi ve *Typha latifolia* L., *Typha*

angustifolia L. (Typhaceae), *Juncus gerardii* Loisel. subsp. *gerardii* (Juncaceae), ve *Carex divisa* HUDSON (Cyperaceae) olmak üzere dört farklı bitki türü kullanılarak yapay sulak alan modülleri oluşturulmuş ve bu sayede YSA-EYH sistemlerinde bitkilerin biyoelektrik üretme ve arıtım performansları üzerindeki etkileri ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, bu yüksek lisans tez çalışması birçok konu başlığını tek çatı altında, birbirleriyle ilişkili şekilde çalışmayı hedeflemektedir.

Yüksek Lisans Tezi olarak planlanan bu çalışma;

- Farklı bitki türlerine sahip yapay sulak alanlar oluşturmayı ve bu sulak alanlara ekolojik yakıt hücresi sistemlerinin entegrasyonunu sağlamayı,
- Oluşturulan YSA-EYH modüllerinin atık su içerisindeki fazla organik kirleticilerin arıtılması esnasında birim alanda ve birim hacimde ne kadar organik kirleticinin giderildiği ve ne kadar biyoelektrik üretilebileceğinin belirlenmesi,
- Bitki çeşitliliğinin ve vejetasyon yapısının YSA-EYH sitemlerinde atık suyun arıtılmasına ve biyoelektrik üretilmesine nasıl bir etkisinin olduğunun ortaya çıkarılmasını,
- Bitkili YSA-EYH sistemi ile bitkisiz kontrol sistem modüllerinin atık su giderimi ve biyoelektrik üretimini kıyaslayacak verilerin elde edilmesini amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Yüksek Lisans tez çalışması için Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü'nde farklı bitkilere sahip iki tekrarlı olarak 4 adet ve 1 adet bitkisiz kontrol modülü olmak üzere 5 adet (toplamda 10 adet) YSA-EYH modülü kurulmuş ve araştırmalar bu modüller üzerinden gerçekleştirilmiştir. Nisan 2016'da bitkilendirilme işleminden önce kurulumu tamamlanan YSA-EYH modüllerine ilk olarak ön kültür periyodu kapsamında 30 gün boyunca ikincil arıtım suyu verilerek çeşitli mikroorganizmaların modüllere aşılanması sağlanmıştır. Mayıs 2016 tarihinde modüllerde kullanılacak bitkiler (*Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. (Typhaceae), *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae), *Juncus gerardii* Loisel. subsp. *gerardii* (Juncaceae) ve *Carex divisa* Hudson. (Cyperaceaea)) Eskişehir ilinin Sivrihisar ilçesinin Balıkdamı gölü (39° 15′ 51″ N ile 31° 35′ 52″ E) çevresinden toplanmış ve bu bitkilerin rizomları kurulan YSA-EYH modüllerine dikkatli bir şekilde zaman kaybetmeden yerleştirilmiştir. Bitkilendirme işleminin ardından modüller üzerinde 75 gün süre ile 3:1 oranında seyreltilmiş ikincil arıtım suyu kullanılarak kültür periyoduna geçilmiştir. Bu periyot ile bitkilerin ortama uyum sağlama süreçlerinin hızlandırılması sağlanmıştır. Kültür periyodu içerisinde kurulan YSA-EYH modüllerinde *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae) bitkisinin çimlendirme başarısı % 20' nin altında olması sebebiyle *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae) bitkisi *Carex divisa* Hudson. (Cyperaceaea) bitkisi ile değiştirilerek deneyin devamlılığı sağlanmıştır.

Uyum süreçleri devam ederken modüller üzerinde gerçekleştirilecek olan sentetik atık suyun dozlarının hazırlanması için gerekli olan analizler yapılmış ve uygun dozlar tespit edilmiştir. 75 günlük kültür periyodu sona erdikten sonra sentetik atık suların sistemlere verilmesiyle kültür periyodu sona ermiş ve deneysel aşamaya geçilerek çalışma başlamıştır. Tez çalışmasının kültür periyodu sonrasındaki deney aşaması Ağustos-Ekim 2016 tarihleri arasında toplamda 88 gün boyunca devam etmiştir.

Deney periyodu boyunca sentetik atık su, her sisteme zamanlayıcı ile kontrol edilen bir peristaltik pompa yardımıyla verilmiştir. Sistemler, 21 mL/h' lik aynı hidrolik yükleme hızı altında çalıştırılmış ve gün içerisinde her 8 saatte bir olmak şartıyla 3 kez su örneklemesi yapılmıştır. Her örneklem öncesinde elektrik değerleri multimetre yardımıyla ölçülerek kayıt altına alınmış ve her örneklem sonrasında zaman kaybetmeden pH, iletkenlik, redoks, çözünmüş oksijen ve sıcaklık gibi fizikokimyasal parametreler

ölçülmüş ve bu parametrelerin farklı bitkilere sahip YSA-EYH modüllerindeki biyoelektrik üretme performansı ile ilgili etkileri değerlendirilmiştir. Bu parametrelerin yanı sıra her dört günde bir (hidrolik bekletme zamanı) modüllerden alınan su örnekleri homojen bir şekilde karıştırılıp süzülmüş ve bu karıştırılan su örneklerinin Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) , Amonyum (NH_4^+), Nitrat (NH_3^-) ve Toplam Fosfor analizleri yapılmıştır. Bu parametrelere göre farklı bitkilere sahip YSA-EYH modüllerinin biyoelektrik ve arıtım performansı ile ilgili etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca 4 günde bir her modülden sediment enzim aktiviteleri için sediment örnekleri, klorofil pigmentleri için bitki örnekleri alınmış ve bitkilerin boyları ölçülerek, nispi gelişme oranları hesaplanarak sayısal değerlere dönüştürülmüştür.

Tez çalışmasının son aşamasını oluşturan, YSA-EYH modüllerindeki bitkilerin hasat edilmesi, bitkilerin yaş ve kuru biyomaslarının ölçülmesi, bitki örneklerinin analizi için laboratuvar işlemlerinin yapılması (süzülme, kurutulma, öğütme, asitle sindirilme, tekrar süzülme), sediment analizleri için sediment örneklerinin toplanarak laboratuvar ortamına getirilmeleri tamamlanmış ve biyoelektrik ile diğer ölçülen parametreler arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasına çalışılmıştır.

2.1 Araştırma Alanı

Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü bahçesi (39°47’ N/ 30°29’E) içerisinde doğal iklim şartları altında tez çalışmasının deneysel aşaması gerçekleştirilmiştir. YSA-EYH modüllerinin bulunduğu alan seçilirken şu kriterler dikkate alınmıştır: (1) modüllere verilecek olan sentetik atık suyunun rahat bir şekilde hazırlanabilmesi, (2) depolanabilmesi ve (3) atık su örneklerinin hızlı bir şekilde analiz edilebilmeleri için laboratuvara olan mesafesi.



Görsel 2. 1. *Anadolu Üniversitesi Yunusemre Kampüsü Uydu Görüntüsü*



Görsel 2. 2. *Çalışmanın gerçekleştiği alan*

2.2. YSA-EYH Modüllerinin Kurulumu

Tez çalışması kapsamında kurulan mikrokozm ölçekli YSA-EYH modüllerinin her biri 45 cm uzunluğunda, 45 cm eninde ve 40 cm derinlikte polyester düzenekler olarak dizayn edilmiştir (Görsel 2.3). Hazırlanmış olan sentetik atık su 100 L polietilen giriş su tankında belli aralıklarla karıştırılarak saklanmıştır (Görsel 2.4). Atık su, bir zamanlayıcı tarafından kontrol edilen peristaltik pompa yardımıyla modüllere aktarılmıştır (Görsel 2.5). Peristaltik pompanın hidrolik yükleme hızı 21 mL/h olarak belirlenmiştir.



Görsel 2. 3. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin kurulacağı polyester düzenekler (45 cm×45 cm×40cm)*



Görsel 2. 4. *Sentetik Atık suyun hazırlandığı su tankı (100 L)*



Görsel 2. 5. *Sentetik atık suların modüllere verilmesini sağlayan peristaltik pompa*



a b



c d

Görsel 2. 6. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde kullanılan filtrasyon ve dolgu malzemeleri (a), kum (b), cam yünü (0,01 cm kalınlık) ve (c ve d) çakıl taşları (5 cm ve 1-3 cm)*

YSA-EYH modüllerinin yatak derinliği bitki kökleriyle su ile temasının homojen bir şekilde sağlanabilmesi amacıyla bitki köklerinin konumlandırılacağı yer, simülasyonlarda tespit edilmiş olup 15 cm olarak seçilmiştir.

Bu durum göz önünde bulundurularak gerçeğe uygun olarak tasarlanmış her bir YSA-EYH modülü en alttan yukarıya doğru üç katmandan oluşturulmuştur. Buna göre,

her modülde en altta filtrasyon sağlanması için 1-3 cm çapında 5 cm çakıl tabakası ve bu katmanın üstünde anot katmanının oluşturulması için 15 cm' lik dolgu malzemesi eklenmiştir. Bu anot bölgesinin içerisine her YSA-EYH modülü için modül yüzeyinin 20 cm altında olacak şekilde grafit tabanlı (2 cmx8 cm ve 0,5 cm kalınlık, 32 cm^2 toplam yüzey alanı) anot elektrodu yerleştirilmiştir. Anot katmanının üzerine, katot ve anot bölmelerini ayırmak için 0,01 cm kalınlığında geçirgen bir yapıda olan cam yünü serilmiştir. Cam yününün üzerinde bitki kök gelişiminin gerçekleşeceği, bitki rizomlarının desteklenmesi ve katot elektrodunun yerleştirilmesi amacıyla 15 cm yüksekliğinde dolgu malzemesi kullanılarak katot katmanı oluşturulmuştur. Yüksek elektriksel iletkenlik nedeniyle dikdörtgen şeklinde (2 cm×8 cm ve 1 cm kalınlığında) magnezyum katot seçildi ve her YSA-EYH modülü için sistem yüzeyinin 5 cm altında konumlandırıldı (Yadav ve ark., 2012). YSA-EYH modüllerinde kullanılan anot ve katot elektrotları simülasyonlarda belirlenen kablo uzunluklarına sahip dış yüzeyi yalıtımlı 0,70 mm kalınlığında bakır teller ile lehimlenerek elektrik ölçümlerinin alınabilmesi için ortam sağlanmıştır. En üst tabakaya ise filtrasyon sağlamak, sivrisinek oluşumu ve kokuyu önlemek amacıyla 5-8 cm çapında 5 cm yüksekliğinde çakıl tabakası serilerek YSA-EYH modüllerinin kurulumu tamamlanmıştır. Modüller oluşturulurken kullanılan çakıl taşları ve dolgu malzemesi toplanan kum Porsuk göleti çevresinden temin edilmiştir.



Görsel 2. 7. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerine çakıl taşlarının yerleştirilmesi*



Görsel 2. 8. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerine anot katmanının dolgu malzemesinin yerleştirilmesi*



Görsel 2. 9. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerine anot elektrotlarının yerleştirilmesi*



Görsel 2. 10. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde kullanılan anot (2 cmx8 cmx0,5 cm) ve katot elektrotları (2 cmx8 cmx1 cm)*



Görsel 2. 11. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde kullanılan cam yününün yerleştirilmesi*



Görsel 2. 12. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde katot katmanının dolgu malzemesinin oluşturulması ve katot elektrotlarının yerleştirilmesi*

YSA-EYH modüllerinin çıkış vanalarındaki tıkanma problemini önlemek amacıyla, modüllerin çıkış vanaları hazırlanan bir aparat yardımıyla çevrelenmiş ve bu aparat 5 cm yüksekliğinde 1-3 cm çapına sahip çakıl malzemenin içinde gömülü kalacak şekilde yerleştirilmiştir.

YSA-EYH modüllerinin bitkilendirilmesi için Eskişehir' in Sivrihisar ilçesinin 40 km kadar güneyinde bulunan Balıkdamı göleti (39° 15′ 51″ N ile 31° 35′ 52″ E) içerisinde doğal olarak yayılış gösteren ve YSA modüllerinde popüler sulak alan makrofitleri olan Typha latifolia L. (Turker ve ark., 2013; Ye ve ark., 2003), *Typha angustifolia* L., *Phragmites australis, Juncus gerardii* subsp. *gerardii ve Carex divisa* Hudson. (Cyperaceaea) bitkileri kullanılmıştır. Kullanılan makrofit bitkiler Balıkdamı göleti içerisinde çeşitli lokalitelerden toplanmış, budanmış ve rizom durumuna getirilerek YSA-EYH modüllerinin 15 cm yüzey derinliğinden başlayarak, her bir YSA-EYH modülünde 2 rizom arasında 15 cm aralık olacak şekilde (12 rizom/m^2'lik bir bitki yoğunluğunda) modüllere yerleştirilmiştir. Bitkilendirme sonrasında bitkilerin bulundukları YSA-EYH modülleri, *Typha latifolia* için: YSA-EYH 2, *Typha angustifolia* için: YSA-EYH 3, *Carex divisa* Hudson. için YSA-EYH 4, *Juncus gerardii subsp. gerardii* için: YSA-EYH 5 kısaltmaları kullanılarak numaralandırılmıştır.



Görsel 2. 13. *Tez çalışmasında kullanılan bitkilerin toplandığı Balıkdamı göleti*

Bununla birlikte bitkilerin, biyoelektrik üretimi ve su arıtım potansiyeline etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla bitkili YSA-EYH modülleri kurulum mantığına sahip bitkisiz YSA-EYH modülü kurularak YSA-EYH 1 olarak adlandırılmıştır. Araştırma

süresi boyunca bitkili YSA-EYH modüllerinde yapılan tüm analizler ve ölçümler oluşturulan bitkisiz YSA-EYH modülleri içinde gerçekleştirilmiştir. Kurulan tüm modüller 2 tekrarlı olarak oluşturularak çalışmanın sonuçlarının daha sağlıklı bir şekilde elde edilmesi sağlanmıştır.



Görsel 2. 14. *Bitkisiz kontrol yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 (YSA-EYH 1)*



Görsel 2.15. *Typha angustifolia bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 (YSA-EYH 2)*



Görsel 2. 16. *Typha latifolia bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 (YSA-EYH 3)*



Görsel 2. 17. *Carex divisa bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 (YSA-EYH 4)*



Görsel 2. 18. *Juncus gerardii bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 (YSA-EYH 5)*

2.3. Kültür Periyodu

Nisan 2016 tarihinde bitkilendirme işlemi gerçekleştirilmemiş YSA-EYH modülleri 30 gün boyunca düzenli aralıklarla endüstriyel atık su tesisinden alınan çamurlu ikincil arıtım suyu verilerek kültür aşamasına alınmıştır. Bu kültür periyodu ile çeşitli mikroorganizmaların modüllere aşılanmaları ve çoğalmalarının desteklenmesi hedeflenmiştir. Bu işlemde kullanılan endüstriyel atık su tesisinden alınan çamurlu suyun bileşiminde Ca, Mg, Na, K, N, P gibi temel mineralleri, biyolojik elektriğin üretimi, KOİ arıtımına yardımcı aktif mikroorganizmalar ve bitkiler için gerekli olan çeşitli mikro elementlerin bulunduğu düşünülmüştür.

Bu kültür periyodunun ardından YSA-EYH modüllerinin bitkilendirme aşaması tamamlanmış ve 75 gün sürecek yeni bir kültür periyoduna geçilmiştir. 75 günlük bu kültür periyodu süresince YSA-EYH modülleri, giriş su tankında hazırlanan 3:1 oranında seyreltilmiş ikincil arıtım suyu kullanılarak beslenmiştir. Bitkilendirme sonrasındaki gerçekleştirilen bu kültür periyodu ile bitki rizomlarının ortama uyum süreçlerinin hızlanması ve modüllerindeki mikroorganizmaların hızlı bir şekilde çoğalması teşvik edilmiştir.

Bununla birlikte, bitkilendirme işleminden sonra YSA-EYH modüllerinde bulunan bitki rizomlarının ilk 25 günlük kültür periyodu içerisinde hayatta kalma oranı (hayatta kalma başarısı) % 80'in altında kaldığı gözlenen bitki rizomları hemen sağlıklı bitki

rizomları ile yer değiştirilmiştir. Bu ilk 25 günlük periyod içerisinde *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Poaceae) bitkisinin hayatta kalma oranı (çimlenme başarısı) %20'nin altında olması sebebiyle *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. bitkisinin bulunduğu modüllerden bitki rizomları alınarak *Carex divisa* Hudson. (Cyperaceaea) bitkisinin rizomları ile değiştirilmiş ve çalışmanın devamlılığı *Carex divisa* Hudson. bitkisi ile sağlanmıştır.



Görsel 2. 19. *Kültür periyodu sonrasında bitkisiz kontrol yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 (YSA-EYH 1)*



Görsel 2. 20. *Kültür periyodu sonrasında Typha angustifolia bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 (YSA-EYH 2)*



Görsel 2. 21. *Kültür periyodu sonrasında Typha latifolia bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 (YSA-EYH 3)*



Görsel 2. 22. *Kültür periyodu sonrasında Carex divisa bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 (YSA-EYH 4)*



Görsel 2. 23. *Kültür periyodu sonrasında Juncus gerardii bitkisine sahip yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 (YSA-EYH 5)*



Görsel 2. 24. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modülleri*

2.4. Atık Suların Hazırlanması ve Giriş Dozlarının Ayarlanması

Uyum süreçleri devam ederken modüller üzerinde gerçekleştirilecek olan sentetik atık su dozlarının hazırlanması için gerekli olan analizler yapılmış ve uygun dozlar tespit edilmiştir. 75 günlük kültür periyodu sona erdikten sonra sentetik atık suların sistemlere verilmesiyle kültür periyodu sona ermiş ve deneysel aşamasına geçilerek çalışma başlamıştır. Çalışmada kullanılan sentetik atık su Liu ve ark. (2013) tarafından önerilen sentetik atık su oranları göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır. Bu sentetik atık suyun ana bileşimi, glikoz (0,20 g L^{-1}), NH_4CI (0,15 g L^{-1}), KCI (0,13 g L^{-1}), $NaHC0_3$ (3,13 g L^{-1}) ve 1 ml mikro element çözeltisi, litre başına 5,6 g $(NH_4)_2SO_4$, 2 g $MgSO_4.7H_2O$, 200mg $MnSO_4.2H_2O$, 3 mg H_3B0_3, 2,4 mg $CoCl_2.6H_2O$, 1 mg $CuCl_2.2H_2O$, 2 mg $NiCl_2.6H_2O$, 5 mg $ZnCl_2$, 10 mg $FeCl_3.6H_2O$ ve 0,4 mg $Na_2MoO_4.2H_2O$ olarak kullanılmıştır. Ayrıca, deney periyodu boyunca kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ), amonyum (NH_4^+), nitrat (NO_3^-) ve toplam fosfor konsantrasyonuna göre modifiye edilmiştir. Bu sentetik atık su giriş konsantrasyonları KOİ, NH_4^+, NO_3^- ve toplam fosfor parametreleri için sırasıyla 103-554 mg L^{-1}, 19,9-225,5 mg L^{-1}, 12,6-191,5 mg L^{-1} ve 10-29,8 mg L^{-1} arasında değişmektedir. Bu sentetik atık su hazırlanırken Türkiye'de bir yılda ikincil atık suda ve bazı kanalizasyonda kirletici seviyelerine benzeyen bileşim kullanılmıştır (Türker ve Yakar, 2017). Sentetik atık su sürekli olarak karıştırılan bir 100 L' lik polietilen depoda depolanmıştır. Hazırlanan sentetik atık su YSA-EYH modülleri içerisinde ortalama 12 gün boyunca bekletilerek modüllerin hidrolik bekletme süreleri 4 gün olarak ayarlandı. Bu aşamada modüller, 20,75 mL/h aynı hidrolik yükleme hızı altında çalıştırıldı ve gün içerisinde her 8 saatte bir günde 3 kez su örneklemesi yapılmıştır. Modüllerde gerçekleştirilen bu işlem Ekim 2016 sonunda vejetasyon sona erinceye kadar 88 gün süre ile devam ettirilmiştir.

2.5. Su Analiz Yöntemleri

YSA-EYH modüllerinden 2648 su örneğinin (8 giriş, 2640 çıkış) fiziko- kimyasal analizi 228 su örneğinin (8 giriş, 220 çıkış) KOİ, amonyum, nitrat, toplam fosfor analizleri olmak üzere toplam 2876 su örneğinin analizi yapılmıştır.

2.5.1. Fiziko-kimyasal analizler

YSA-EYH modüllerinin arıtım performanslarını değerlendirmek amacıyla günde 3 defa olacak şekilde örneklenen çıkış su numuneleri ile giriş suyu numunesi için öncelikle

fiziko- kimyasal su kalite parametrelerinden olan pH, elektriksel iletkenlik (EC), sıcaklık, redoks potansiyeli (RP) ve çözünmüş oksijen (ÇO) değerleri zaman kaybetmeden su örnekleri laboratuvara getirilip Whatman kağıdı yardımıyla süzüldükten sonra arazi şartlarında taşınabilir çoklu su ölçüm cihazı (HACH HQ40D multi-parameter taşınabilir pH Metre, pH + İletkenlik + Sıcaklık Ölçümü + Çözünmüş oksijen + redoks ölçer) ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Fiziko- kimyasal analizler çerçevesinde her bir parametre için 8 giriş (10 modül için) ve 2640 çıkış suyu (10 modül için) olmak üzere 2648 su örneği, beş parametre için 40 giriş, 13200 çıkış suyu örneği olmak üzere toplamda 13240 su örneğinin ölçümleri gerçekleştirilmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır.



Görsel 2. 25. *Taşınabilir çoklu su ölçüm cihazı (HACH HQ40D Multi-Parameter Taşınabilir pH Metre)*

2.5.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) analizleri

Her bir YSA-EYH modülünün kimyasal oksijen ihtiyacı(KOİ) konsantrasyonunu belirlemek için su örnekleri Whatman kağıdı ile süzüldükten sonra 1 ml örnek HACH LANGE KOİ, TNT 0/1500 mg/L O_2 kitine ilave edilerek HACH LANGE DRG 200 marka termoreaktör de 150 °C sıcaklıkta 120 dk yakma işlemi sonrasında KOİ konsantrasyonlarının okumaları kitlerle uyumlu bir kolorimetre (HACH DR / 890) ile belirlenmiştir. KOİ analizi deney periyodu boyunca her YSA-EYH modülünden dört günde bir olacak şekilde örneklem gerçekleştirilmiştir. Buna göre 8 giriş (10 modül için) ve 220 çıkış suyu (10 modül için) örneğinin analizi yapılmıştır. Çalışma süresi boyunca 10 modül için toplamda 228 analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler genellikle örnek alındığı anda yapılmaya çalışılmıştır. Fakat bunun mümkün olmadığı durumlarda örneklerin saklanması için su numunelerinin pH' ı sülfürik asit ile 2'ye düşürülmüştür. Bu işlem yardımıyla örnekler -20 °C sıcaklık altında 1 aya kadar saklanabilmektedir.

2.5.3. Amonyum ve nitrat analizleri

YSA-EYH modüllerinden örneklenen giriş ve çıkış su numuneleri amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) konsantrasyonu öncelikle laboratuvara getirilip Whatman kağıdı ile süzüldükten sonra arazi şartlarında taşınabilir çoklu su ölçüm cihazında (HACH HQ40D multi-parameter taşınabilir pH Metre, pH + İletkenlik + Sıcaklık Ölçümü + Çözünmüş oksijen + redoks ölçer) kullanılan amonyum elektrotu (INTELLICAL ISE amonyum elektrodu, 2406549) ve nitrat elektrotu (INTELLICAL ISE Nitrat elektrodu, 2984790) yardımı ile belirlenmiştir. Amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) konsantrasyonları anlık olarak deney süresince dört günde bir olacak şekilde her YSA-EYH modülü için gerçekleştirilmiştir. Amonyum ve nitrat ölçümleri bir YSA-EYH modülü için 30 (8 giriş, 22 çıkış), toplamda 228 örnek üzerinden değerlendirilmiştir.

2.5.4. Toplam fosfor analizleri

Her bir YSA-EYH modülünün toplam fosfor konsantrasyonunu belirlemek için su örnekleri Whatman kağıdı ile süzüldükten sonra 1 ml örnek HACH LANGE toplam fosfat TNT, 1,0-100 mg/L PO_4 kitine ilave edilerek HACH LANGE DRG 200 marka termoreaktör de 105 °C sıcaklıkta 30 dk yakma işlemi sonrasında toplam fosfor konsantrasyonlarının okumaları kitlerle uyumlu bir kolorimetre (HACH DR/890) ile belirlenmiştir. Toplam fosfor analizi deney periyodu boyunca her YSA-EYH modülünden dört günde bir olacak şekilde örneklem gerçekleştirilmiştir. Buna göre 8 giriş (10 modül için) ve 220 çıkış suyu (10 modül için) örneğinin analizi yapılmıştır. Çalışma süresi boyunca 10 modül için toplamda 228 analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler genellikle örnek alındığı anda yapılmaya çalışılmıştır. Fakat bunun mümkün olmadığı durumlarda örneklerin saklanması için su numunelerinin pH' ı sülfürik asit ile 2'ye düşürülmüştür. Bu işlem yardımıyla örnekler -20 °C sıcaklık altında 1 aya kadar saklanabilmektedir.

2.6. Bitki Örneklerinin Analizleri

YSA-EYH modüllerindeki bitkilerin bitki boyları deney periyodu boyunca her 4 günde bir ölçülerek ortalama bir yükseklik belirlendi ve kaydedildi. Deney periyodu süresince bitkilerde bir hastalık olmadığı gözlenerek kaydedildi. Bitkilerin boy ölçümünün ardından bitkilerin yapraklarından yeterli miktarda örnek alınarak klorofil analizleri gerçekleştirilerek klorofil a, klorofil b ve klorofil a+b ölçümleri hesaplandı.

Çalışmanın sona ermesinin ardından her bitkili YSA-EYH modülünün bitki örneklerinin kuru biyomaslarının belirlenmesi ve azot miktarının belirlenebilmesi için YSA-EYH modüllerinden bitkiler hasat edilmiştir.

2.6.1. Bitki boylarının ölçülmesi ve nispi gelişim oranları (RGR)

YSA-EYH modüllerinde bulunan bitkiler deney süresince her 4 günde bir şerit metre yardımıyla ölçülerek bitki boyları not edilmiştir.

2.6.2. Fotosentetik pigment analizleri

YSA-EYH modüllerinde bulunan olgun yapraklı bitkilerden 4 günlük periyotlar halinde alınan taze yaprak örneklerinin Wellburn (1994) metodu uygulanarak bitkilerin fotosentetik pigmentlerinin (klorofil-a ve klorofil-b) konsantrasyonları belirlenmiştir. Buna metoda göre, 0,5 gr fazla suyu alınmış yaş ve sağlıklı bitki örneği sıvı azotla toz haline getirildikten sonra 2ml'lk eppendorf alınmıştır. Bu toz halindeki yaprağın üzerine 1 ml % 80'lik aseton çözeltisi eklenmiş ve 1500 G'de 15 dk boyunca santrifüj edilmiştir. Santifuj işlemi sonrasında örneğin üste kalan süpernatant kısmı UV spektrofotometrede klorofil analizi yapılmıştır (Yang ve ark. 1998). UV spektrofotometrede okunan absorbans değerleri Porra ve ark. (1989) ve Holm (1954) tarafından hazırlanan formüllere göre Klorofil a, klorofil b ve klorofil a+b miktarları belirlenmiştir.

2.6.3. Bitki azot analizi

YSA-EYH modüllerinden hasat edilen bitkilerin azot analizleri Anadolu Üniversitesi Biyoloji Bölümü Bitki Ekolojisi laboratuvarında Kjeltec tam otomatik azot analiz cihazı kullanılarak, Semi-Micro Kjeldal yöntemine göre belirlenmiştir (Nielsen, 2003).

2.6.4. Bitki biyomas analizi

YSA-EYH modüllerinden hasat edilen bitki örnekleri Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Bitki Ekolojisi laboratuvarına getirilerek yıkanıp kurulandıktan sonra yer altı ve yer üstü yaş biyomasları analitik terazi yardımıyla tartılıp kaydedilmiştir. Bu işlemin ardından bu bitkilerin kuru biyomaslarının belirlenmesi amacıyla bitkiler 65 °C' de 48 saat etüvde bekletilme işlemi gerçekleştirilerek

kurutulduktan sonra tekrar analitik terazide tartılarak bitkilerin toprak altı ve toprak üstü kuru biyomasları hesaplanmıştır.

2.6.5. Tahmini karbon stoğu analizi

Birim hacimde birim alanda toplam biyomas üzerinden ton/hektar cinsinden tahmini olarak C stoğu miktarı, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli' nin (IPCC, 2006; Mason ve Bryant, 2017) yayınlamış olduğu rapor doğrultusunda hesaplanmıştır.

2.7. Sediment Örneklerinin Analizleri

2.7.1.Fiziksel analiz

Deney periyodu sonunda YSA-EYH modüllerinin sediment örneklerinden kullanılan dolgu maddesinin fiziksel analizleri *Bouyoucus Hidrometre* Y*öntemi* kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem, toprağı meydana getiren taneciklerin, birbirleri ile bağlantılarını ortadan kaldırarak Bouyoucus hidrometre ile ölçülmesi ve ölçülen değerlerden taneciklerin yüzde oranlarının belirlenmesi prensibine dayanmaktadır.

2.7.2. pH (Toprak reaksiyonu) analizi

YSA-EYH modüllerinden alınan sediment örneklerinin pH değerleri *1/2,5 Oranında Sediment/Su Yöntemi* kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem, saf su ilavesi ile sediment çözeltisine geçen H^+ iyonlarını pH ölçer kullanılarak berlirlenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu analiz sırasında pH ölçer olarak HACH HQ40D multi-parameter taşınabilir pH Metre ile ölçümler gerçekleştirilmiştir.

2.7.3. Azot analizi

Sediment örneklerindeki azot miktarı tayini Anadolu Üniversitesi Biyoloji Bölümü Bitki Ekolojisi laboratuvarında Kjeltec tam otomatik azot analiz cihazı kullanılarak, Semi-Micro Kjeldal yöntemine göre belirlenmiştir. (Nielsen, 2003) Bu analiz, sediment örneğinde bulunan azotun çeşitli işlemler uygulanarak çözeltiye geçirilip, asit ile titre edilmesiyle harcanan asit miktarından faydalanılarak azot miktarının hesaplanması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem özetlenecek olursa; hava kurusu yapılan sediment örnekleri 0,5 mm' lik elekten geçirildikten sonra analitik terazi kullanılarak 0,5 ila 1 g

arasında tartılır ve bu tartılan miktar tam olarak not edilmiştir. Daha sonra tartılan sediment örneği Kjeldahl tüplerine transfer edilmiştir.

Kör (şahit) olarak belirlenen tüplere örnek konulmaz. Her bir tüpün içerisine katalizör olarak görev yapacak 2 adet Bakır sülfat (Cu_2SO_4) + Potasyum sülfat (K_2SO_4) karışımı içeren tablet atılarak üzerlerine 12 ml konsantre sülfürik asit (H_2SO_4) ilave edilmiş ve tüpler Kjeldahl cihazının yakma ünitesine yerleştirilmiştir. Yakma işlemi sona erdiğinde örnek tüplerinde yeşil renk gözlenmelidir. Tüplerin oda sıcaklığına gelmeleri beklenir ve tam olarak soğuduğundan emin olunduktan sonra Kjeltec tam otomatik azot analiz cihazında ölçüm yapılarak sediment örneklerindeki azot miktarları tespit edilmiştir.

2.8. Biyoelektrik verilerinin ölçülmesi ve izlemesi

Her bir YSA-EYH modülünün için biyoelektrik üretim potansiyelleri ölçülürken Zhao ve arkadaşlarının (2013) kullanmış olduğu prosedür kullanılmıştır. Bu prosedüre göre, anot ve katotdan gelen teller harici bir dirence bağlanarak direncin iki ucu arasındaki potansiyel fark (V) dijital bir el multimetresi (Fluke 287 TRUE RMS) kullanılarak günde 3 defa olacak şekilde ölçülmüştür. Bu voltaj değeri ölçüldükten sonra akım (I), güç (W), akım yoğunluğu, güç yoğunluğu (Oon ve ark., 2015) gibi elektriksel parametreler formüller yardımıyla hesaplanmıştır. Çalışmanın 88. gününde Kolumbik verimliliği (KV) eğrisi 1 Ω' dan 580.000 Ω' a kadar harici dirençler kullanılarak Fluke 287 TRUE RMS dijital el multimetresi yardımıyla 15 dakikalık süreler içerisinde ölçülerek belirlenmiştir. (Doherty ve ark., 2015a; Doherty ve al., 2015b).

2.9. Verilerin istatistiksel analizleri ve hesaplamalarda kullanılan formüller

Çalışmayı istatistiksel açıdan değerlendirmek için, bir istatistiksel yazılım paketi olan SPSS programının 18.0 sürümü kullanılarak deney aşamasında elde edilen tüm veriler değerlendirilmiştir ve veriler arasındaki ilişkiler $p<0,05$ istatistiksel anlam düzeyinde yapılmıştır. Verilerin normalliği üzerine Shapiro-Wilks testi yapılmıştır. Her modül için, giriş ve çıkış sularının KOİ, NH_4^+, NO_3^- ve TP konsantrasyonları açısından arasındaki istatistiksel ilişkiler one-way ANOVA testi ile belirlendi. Ayrıca, farklı modüllerdeki biyoelektrik üretim performansları arasındaki istatistiksel farklılıkların belirlenmesi de one-way ANOVA testi ile analiz edilmiştir.

Her modülün KOİ, NH_4^+, NO_3^- ve toplam fosfor arıtım verimliliği aşağıdaki şekilde hesaplandı:

- ✓ Arıtım performansı (%) = $[(C_i - C_e) / C_i] \times 100$

Ci ve Ce, mg L^{-1} cinsinden giriş ve çıkış sularının KOİ, NH_4^+, NO_3^- ve toplam fosfor konsantrasyonudur.

Modüllerden elde edilen elektrik verileri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır:

Akım (I), Ohm yasasına göre belirlendi:

- ✓ I = V / R

burada V, hücre voltajına karşılık gelir ve R (Ω) harici dirençtir.

Güç (W), aşağıdaki formülle belirlenir:

- ✓ W = I x V

burada akıma (A) karşılık gelir ve V (V), hücre voltajıdır. Ayrıca, güç yoğunluğu, anodun yüzeyine (m2) göre güç ve akıma bölünerek hesaplanmıştır (Oon ve ark., 2015).

- ✓ Akım yoğunluğu = I/S
- ✓ Güç yoğunluğu = W/S

Burada S anot yüzey alanina karşılık gelmektedir.

Her modülün Kolumbic verimliliği (KV) aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- ✓ $\text{Koulumbik Verimlilik}(\%) = \frac{\text{MxI}}{\text{FxqxbΔKOİ}}$

formülü ile belirlenmiştir. (Doherty ve ark., 2015a; Doherty ve al., 2015b). Burada KV, kolumbik verimlilik(%), M, O2'nin molekül kütlesi (g O2 / mol O2), yani 32'dir. I akım (A), F Faraday sabiti (C / mol), 94,685'tir. q, akış oranı (L / s) iken b, O2 molü (mol e^- / mol O_2) başına verilen elektronların sayısıdır, bu da, 4'tür. ΔKOİ, giren madde ve atık madde (G / L) arasındaki KOİ' daki değişimi temsil eder. (Oon et al., 2016).

Tahmini karbon stoğu hesaplanırken; (IPCC 2006)

- ✓ $Cp=DMp$ x CF x 0.001 formülünden yararlanılmıştır.

Burada;

Cp: Alandaki karbon stoğu (t C ha^{-1})

DMp: Alandaki toplam kuru biyomas (t/ha)

CF: karbon fraksiyonu. IPCC Karbon Fraksiyonu varsayılan değeri 0.47 tC t^{-1} (IPCC 2006)

2.10. Araştırmalar sırasında kullanılan cihazlar

- Spektrofotometre
  - ✓ Shimadzu UV-2101 PC
- Tam Otomatik Azot Analiz (Kjeldahl) Cihazı
  - ✓ Foss Kjeltec 2300
  - ✓ Foss Digester 2020 (Yakma ünitesi)
- Ultra Saf Su Cihazı
  - ✓ Millipore ELIX Synthesis A10
- Saf Su Cihazı
  - ✓ Nüve NS 108
- Çalkalama 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 parametreli, pH, Elektriksel iletkenlik, sıcaklık, çözünmüş oksijen ve redoks ölçer

- ✓ HACH HQ40D multi-parameter
- Dijital Reaktör
  - ✓ HACH DRB 200
- Portatif Kalorimetre
  - ✓ HACH DR/890
- Peristaltik Pompa
  - ✓ THOMAS Peristaltik Pompa
- Multimetre

  Fluke 287 TRUE RMS

3. BULGULAR

Yapay sulak alan entegre ekolojik yakıt hücresi (YSA-EYH) modülleri üzerine biyoelektrik üretimi ve biyoremediasyon çalışmasına başlamadan önce gerçekleştirilen kültür periyodunun sonuna kadar YSA-EYH modüllerinde bulunan bitkilerin sağlık durumları incelenmiş ve bitki türlerinin hayatta kalma oranları belirlenerek (Çizelge 3.1) 88 gün devam edecek olan deney periyoduna geçilmiştir. Bu periyot içerisinde elde edilen sonuçlara göre, YSA-EYH modüllerinin bitkilendirmesi yapılıp, 3:1 oranında seyreltilmiş ikincil arıtım suyu ile kültür periyodu gerçekleştirildiği esnada YSA-EYH 4 modülünde bulunan *Phragmites australis* bitkisinin hayatta kalma oranı % 0 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç nedeniyle, YSA-EYH 4 modülündeki *Phragmites australis* bitki rizomları *Carex divisa* bitki rizomları ile değiştirilerek kültür periyodu içerisinde ortama uyum sağlamaları beklenmiştir. Bu süreç içerisinde eş zamanlı ve 2 tekrarlı olarak kurulan, *Typha angustifolia, Typha latifolia* ve *Juncus gerardii* bitki rizomları ile bitkilendirilerek YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 5 olarak isimlendirilen modüllerde bulunan bitkilerin hayatta kalma oranları % 100 olarak tespit edilmiştir. Herhangi bir sorun ile karşılaşılmaması sebebiyle, bu modüllerin aynı bitki rizomları ile devamlılığı sürdürülmüştür. Sonuçlar *Typha latifolia, Typha angustifolia, Carex divisa* ve *Juncus gerardii* türlerinin hem iklimsel hem de operasyonel koşullara uyum yeteneklerinin olduğunu göstermektedir. Buna karşılık olarak, *Phragmites australis* bitkisinin içeren YSA-EYH modüllerinde hayatta kalma oranının % 0 olması ise bu bitki türünün iklimsel ve operasyonel koşullara seçilen diğer bitki türlerinden daha az adaptasyon yeteneğine sahip olduğunu belirtmektedir.

Çizelge 3. 1. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde hayatta kalan bitki sayısı (H), ölü birey sayısı (Ö) ve hayatta kalma oranı*

Modüller	Bitki Türleri					Hayatta Kalma Oranı (%)
	***Typha angustifolia* (H- Ö)**	***Typha latifolia* (H- Ö)**	***Phragmites australis* (H- Ö)**	***Carex divisa* (H- Ö)**	***Juncus gerardii* (H- Ö)**	
YSA -EYH 1	X	X	X	X	X	**X**
YSA -EYH 2	4 - 0	X	X	X	X	**100**
YSA -EYH 3	X	4 - 0	X	X	X	**100**
YSA -EYH 4	X	X	0 - 4	X	X	**0**
YSA -EYH 4	X	X	X	4 - 0	X	**100**
YSA -EYH 5	X	X	X	X	4 - 0	**100**

3.1. Su Analizleri

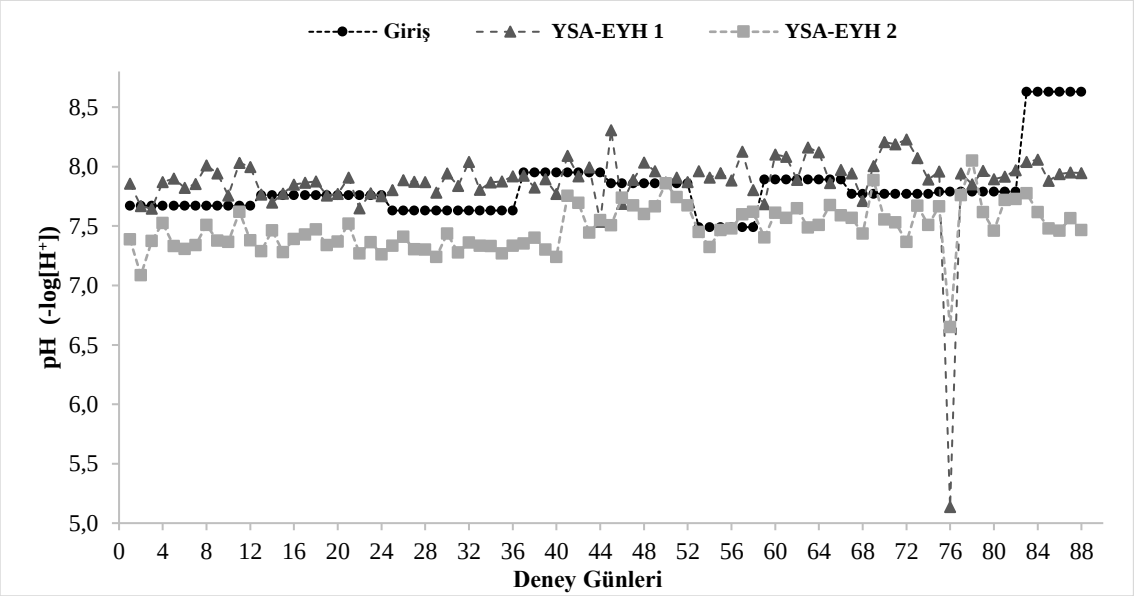
3.1.1. Fiziko-kimyasal ölçümler

3.1.1.1. pH

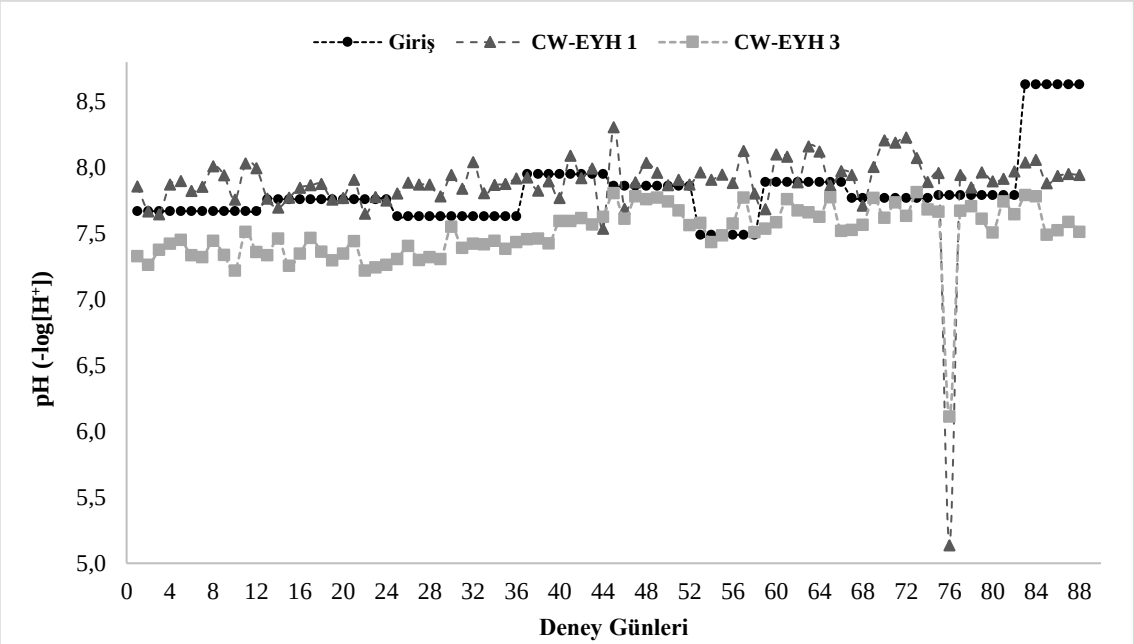
Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama pH değerleri (-log[H^+]) Çizelge 3.2' de gösterilmektedir.

Aynı zamanda, bitkili YSA-EYH modüllerinden elde edilen çıkış sularına ait her gün ölçülerek kayıt altına alınan pH değerlerinin bitkisiz YSA-EYH modülleri ve giriş suyu pH değerlerine göre değişimleri Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, ve Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, giriş suyu, YSA-EYH 1, YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5 modüllerinin çıkış suyu ortalama pH değerleri sırasıyla 7,81±0,25, 7,87±0,32, 7,47±0,19, 7,5±0,23, 7,56±0,15 ve 7,49±0,17 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, giriş suyu modüllere verildikten sonra bitkisiz kontrol (YSA-EYH 1) modülünden alınan çıkış suyu pH' sının diğer modüllere göre daha yüksek bir değerde seyrettiği ve suyun alkalinleştiği belirlenmiştir. Bu sonuca karşılık olarak, bitkili YSA-EYH modüllerinden çıkan suların

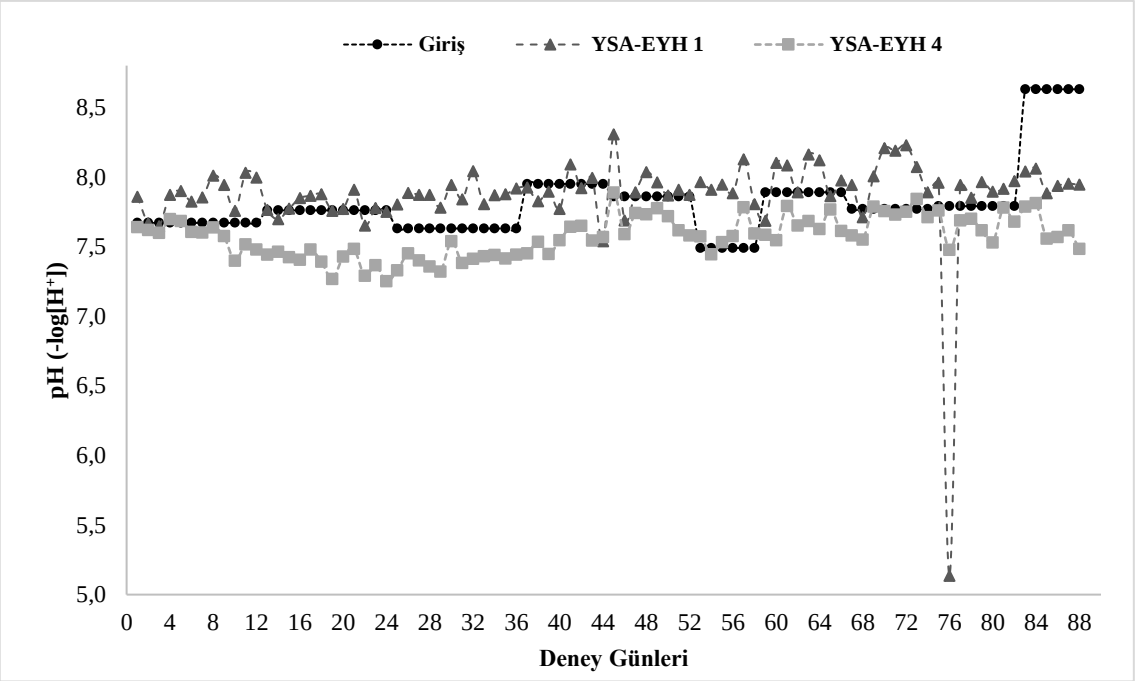
ortalama pH değerlerinin giriş suyunun pH değerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, one-way ANOVA istatistiksel analiz sonuçlarına göre, vejetasyon tipi veya deneyde kullanılan bitkilerin varlığından pH değerlerinin belirgin olarak etkilenmediğini belirten anlamlı bir farklılık bulunamamıştır ($p>0,05$).



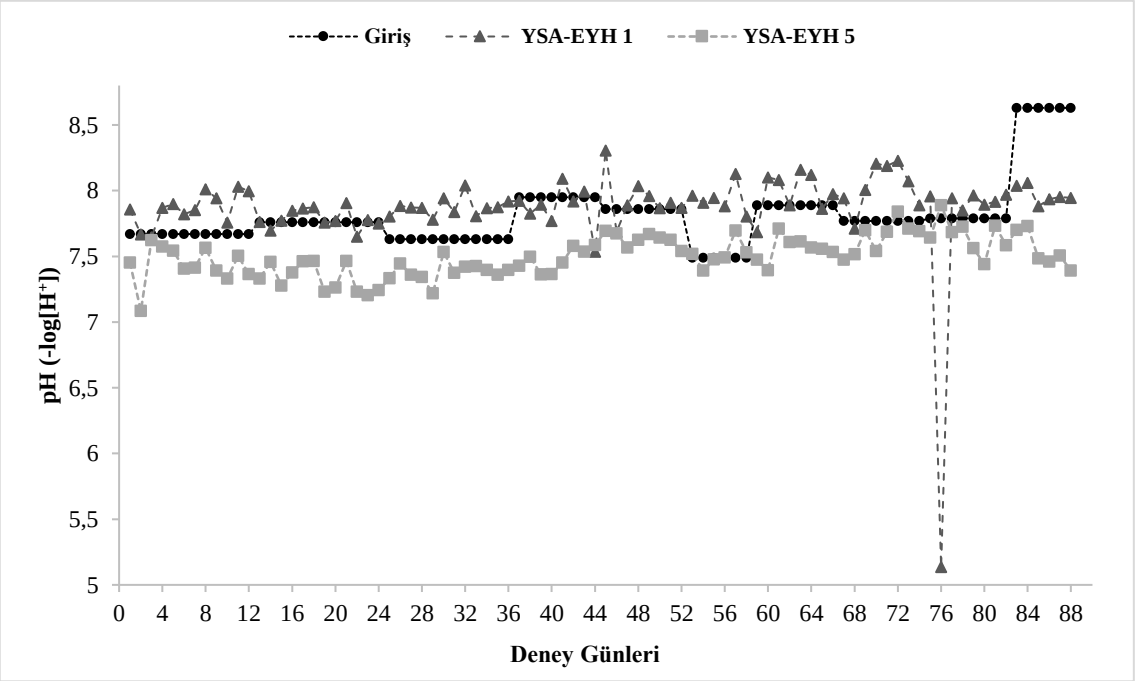
Şekil 3. 1. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi*



Şekil 3. 2. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi*



Şekil 3. 3. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi*



Şekil 3. 4. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre pH değişimi*

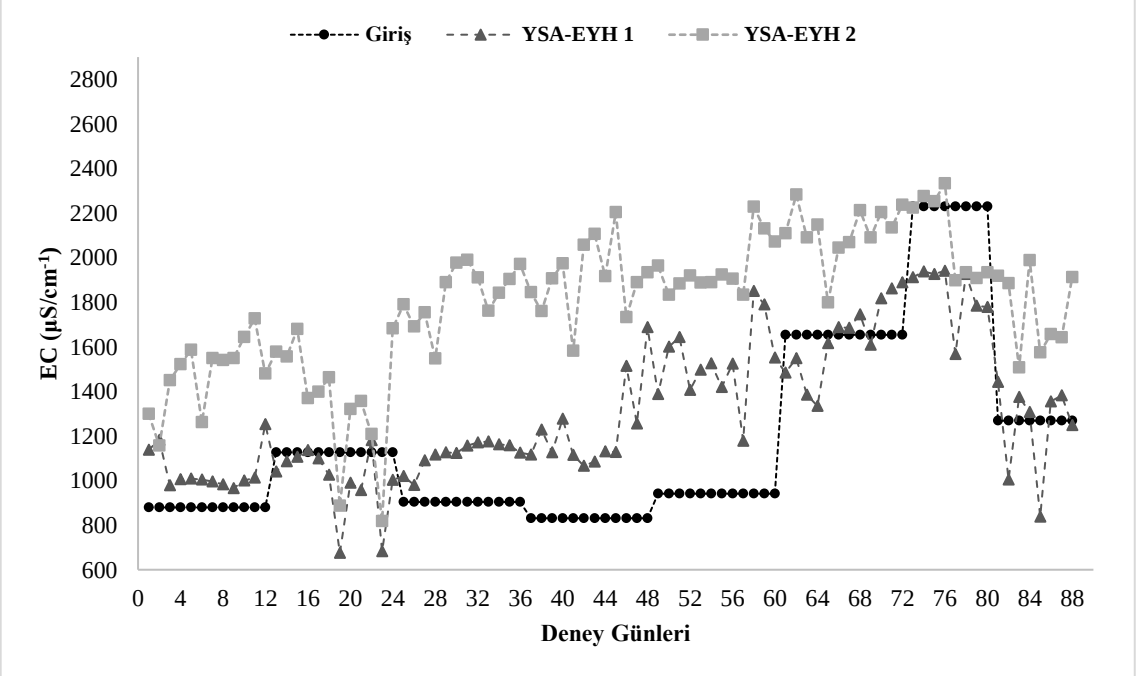
Çizelge 3. 1. *Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek en düşük, pH, EC, Sıcaklık, çözünmüş oksijen, redoks potansiyeli değerleri*

			YSA-EYH 1	YSA-EYH 2	YSA-EYH 3	YSA-EYH 4	YSA-EYH 5
pH	**(-log[H+])**	**Giriş**	7,81±0,25	7,81±0,25	7,81±0,25	7,81±0,25	7,81±0,25
		Çıkış Ortalama	7,87±0,32	7,47±0,19	7,5±0,23	7,56±0,15	7,49±0,17
		Çıkış En Yüksek	8,31	8,05	7,81	7,89	7,89
		Çıkış En Düşük	5,14	6,65	6,11	7,25	7,09
EC	**(µS cm^{-1})**	**Giriş**	1181±425	1181±425	1181±425	1181±425	1181±425
		Çıkış Ortalama	1362±615	1829±398	1803± 311	1880±361	1589± 279
		Çıkış En Yüksek	1941	2333	2836,16	2033,83	2816
		Çıkış En Düşük	675,08	817,83	847,93	850,8	984,58
Redoks	**(mV)**	**Giriş**	95,37±31,73	95,37±31,73	95,37±31,73	95,37±31,73	95,37±31,73
		Çıkış Ortalama	57,03±17	43,4±21	55±17,7	60,9±18,5	56,94±20,1
		Çıkış En Yüksek	127,9	139,6	120,22	145,95	143,27
		Çıkış En Düşük	21,43	-32,96	-8,05	37,81	-23,08
Sıcaklık	**(ºC)**	**Giriş**	22,5±2,3	22,5±2,3	22,5±2,3	22,5±2,3	22,5±2,3
		Çıkış Ortalama	19±6,2	18,9± 6,19	19±6,1	20,16±4,08	19,8±9,9
		Çıkış En Yüksek	30,47	29,4	29,32	29,05	29,07
		Çıkış En Düşük	6,22	6,23	6,3	6,33	6,4
Çözünmüş Oksijen	**(mg/L)**	**Giriş**	7,92±0,83	7,92±0,83	7,92±0,83	7,92±0,83	7,92±0,83
		Çıkış Ortalama	4,4±1	4,86±1,1	5±0,9	5,6±0,8	5,5± 0,9
		Çıkış En Yüksek	9,59	9,26	9,61	9,77	9,37
		Çıkış En Düşük	2,91	3,08	3,68	3,64	3,67

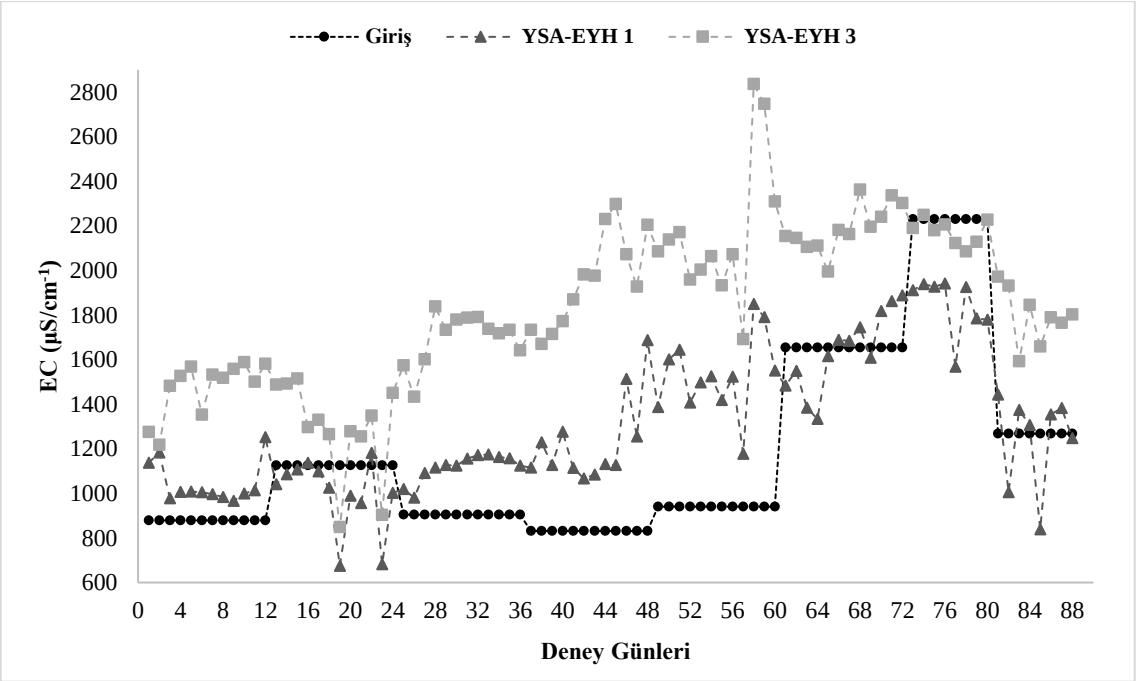
3.1.1.2. Elektriksel iletkenlik (EC)

Deney periyodu süresince YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama elektriksel iletkenliği (EC) (µS/cm^{-1}) değerleri Çizelge 3.2' de gösterilmektedir.

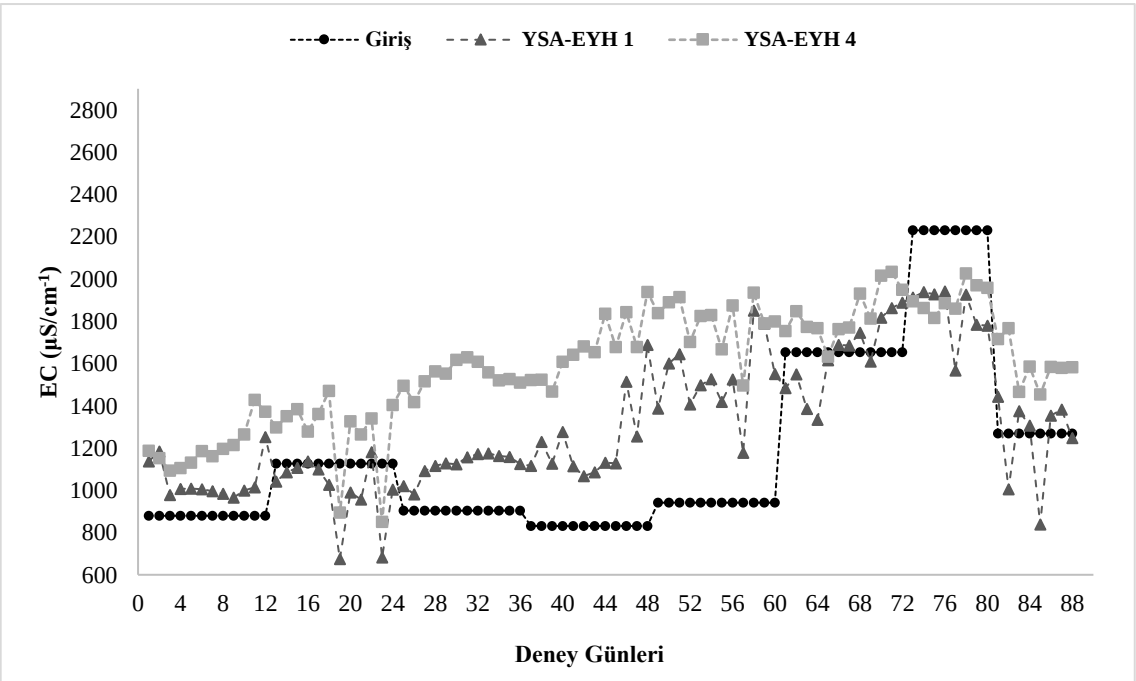
Bununla birlikte, bitkili YSA-EYH modüllerinden elde edilen çıkış sularına ait EC değerlerinin bitkisiz kontrol modülü ve giriş suyuna göre değişimi Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7, ve Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Deney süreci boyunca kullanılan giriş suyunun ortalama değeri 1181±425 µ/cm^{-1} iken YSA-EYH modüllerinden alınan çıkış sularının ortalama değerleri sırasıyla 1362±615, 1829±398, 1803±311, 1880±361 ve 1589±279 µ/cm^{-1}'dir. Bu sonuçlar ışığında, EC değerleri her modülde dalgalı bir seyir halinde olduğu gözlenmiş ve giriş suyunun EC değerinin bitkisiz kontrol ile bitkili YSA-EYH modüllerinden alınan çıkış sularına göre daha düşükken, bitkisiz kontrol modülünün EC değerinin de bitkili YSA-EYH modüllerinin çıkış değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. One-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldıktan sonra, bitkili ve bitkisiz yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modülleri arasında anlamlı bir fark belirlenmemiştir ($p>0,05$).



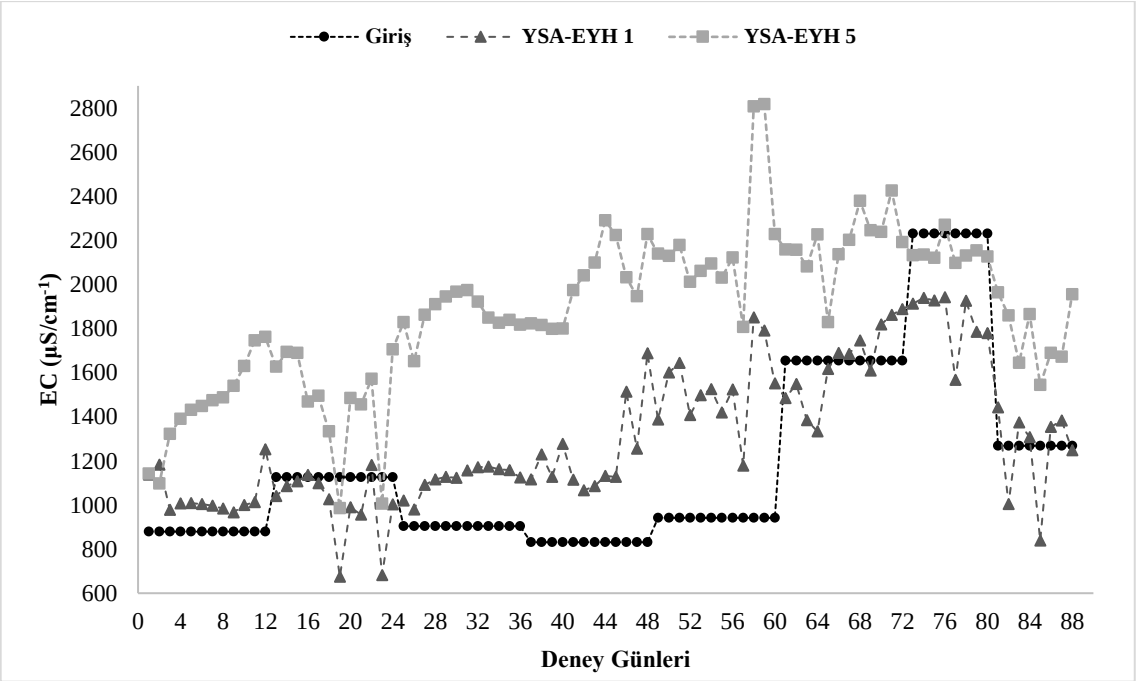
Şekil 3. 5. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi*



Şekil 3. 6. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi*



Şekil 3. 7. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi*

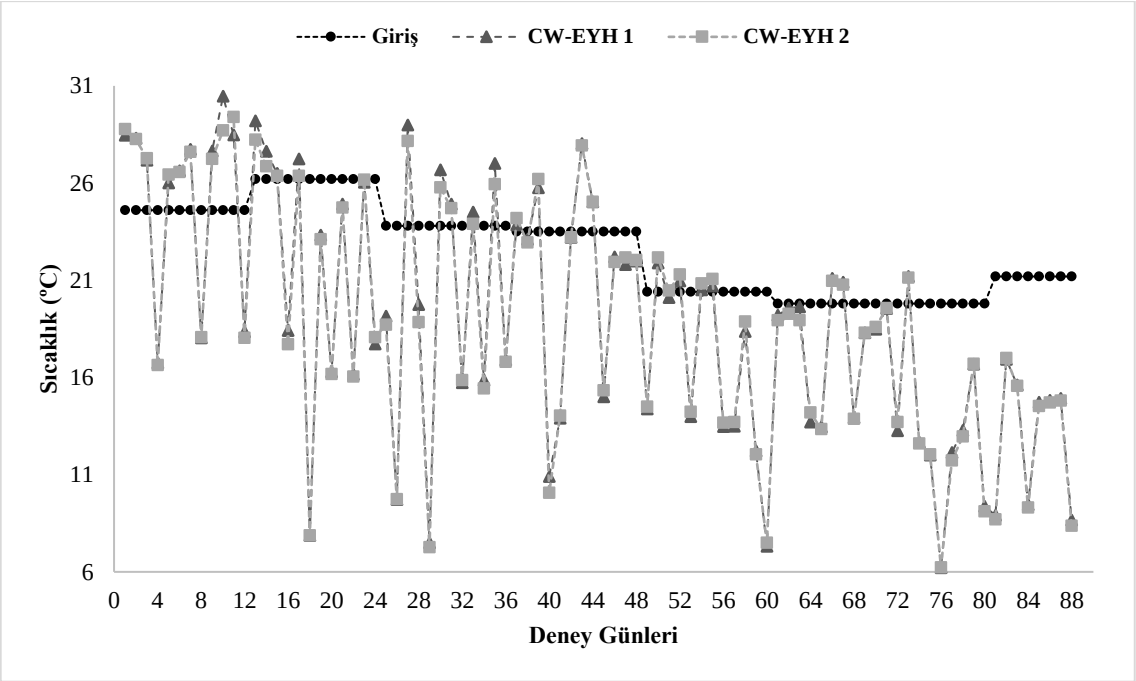


Şekil 3. 8. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre EC değişimi*

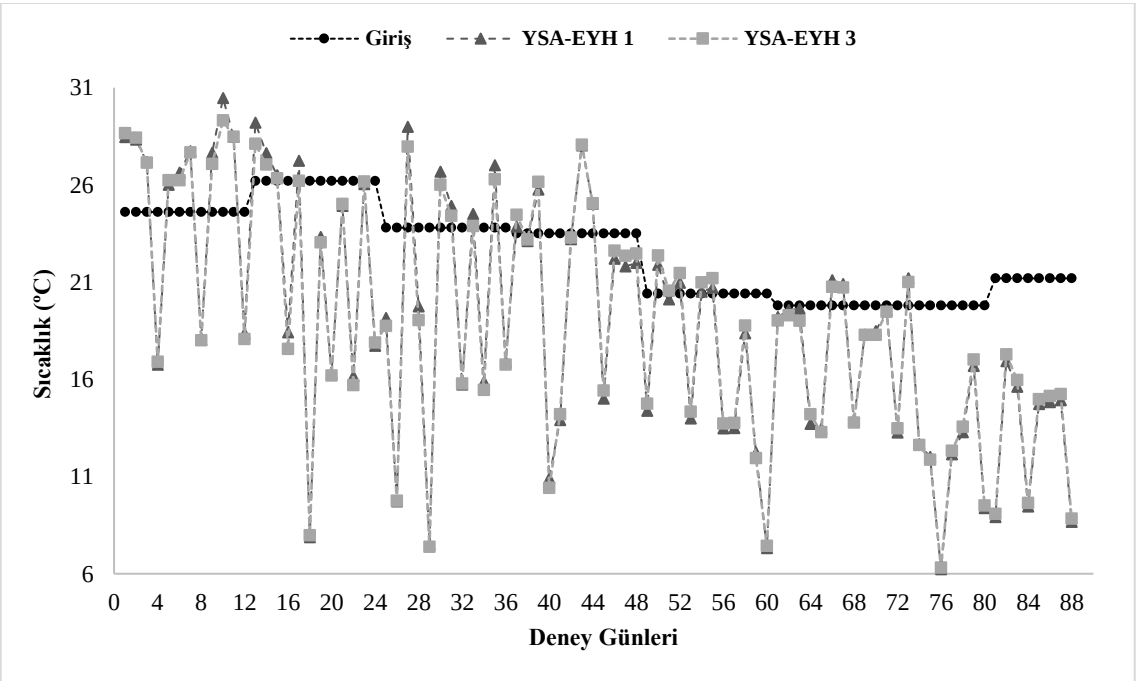
3.1.1.3. Sıcaklık (ºC)

Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama sıcaklık değerleri ile en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri (ºC) Çizelge 3.2' de gösterilmektedir.

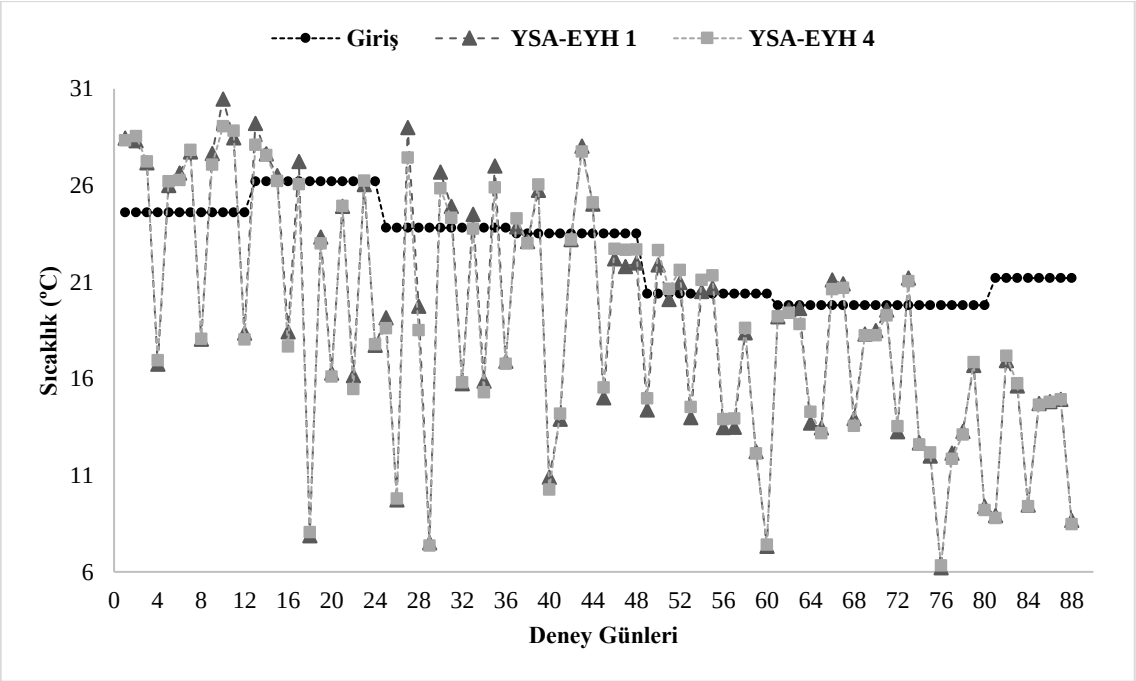
Ayrıca bitkili YSA-EYH modüllerinden (YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5) elde edilen çıkış sularının ortalama sıcaklık değerlerinin bitkisiz kontrol YSA-EYH modülünden (YSA-EYH 1) elde edilen çıkış sularına ve giriş suyu sıcaklık değerlerine göre değişimleri Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11, ve Şekil 3.12' de gösterilmektedir. Bu Çizelgedeki ortalama değerlere göre, giriş suyu sıcaklığı 22,5±2,3 ºC olarak ölçülmüşken, bitkisiz kontrol ve bitkili YSA-EYH modüllerinin ortalama sıcaklıkları sırasıyla 19±6,2, 18,9±6,19, 19±6,1, 20,16±4,08, 19,8±9,9 ºC olarak belirlenmiştir. Ortalama değerlere bakıldığında tüm modüllerin çıkış suyu sıcaklığının giriş suyu sıcaklığından düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, çevre şartlarının farklılığı sebebiyle tüm modüllerin çıkış sularında sıcaklık değişimleri gözlenmiş ve değişimin dalgalı bir seyir izlediği tespit edilmiştir.



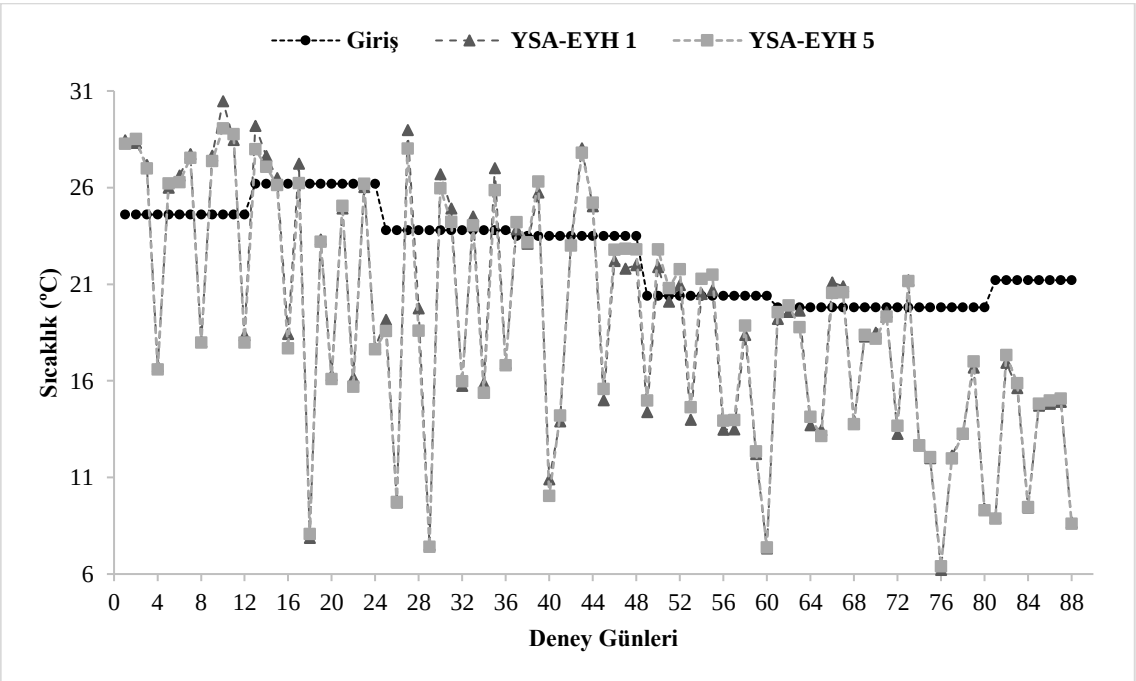
Şekil 3. 9. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (°C) değişimi*



Şekil 3. 10. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (°C) değişimi*



Şekil 3. 11. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (˚C) değişimi*

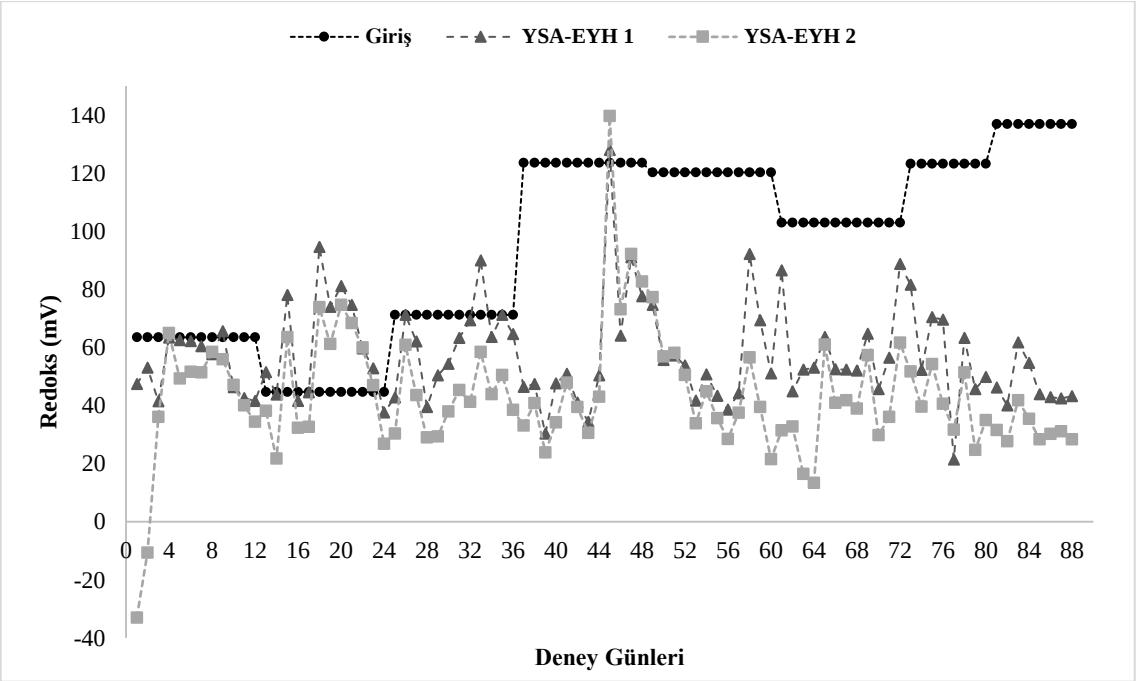


Şekil 3. 12. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre sıcaklık (˚C) değişimi*

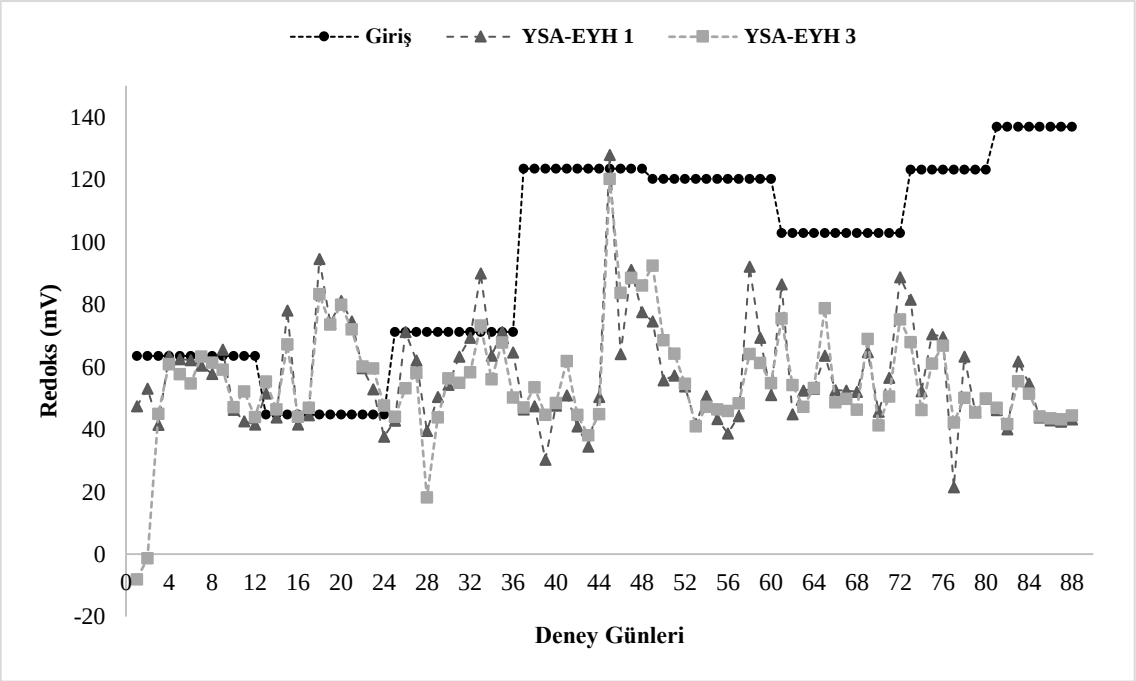
3.1.1.4. Redoks

Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama redoks değerleri ile en yüksek ve en düşük redoks değerleri (mV) Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

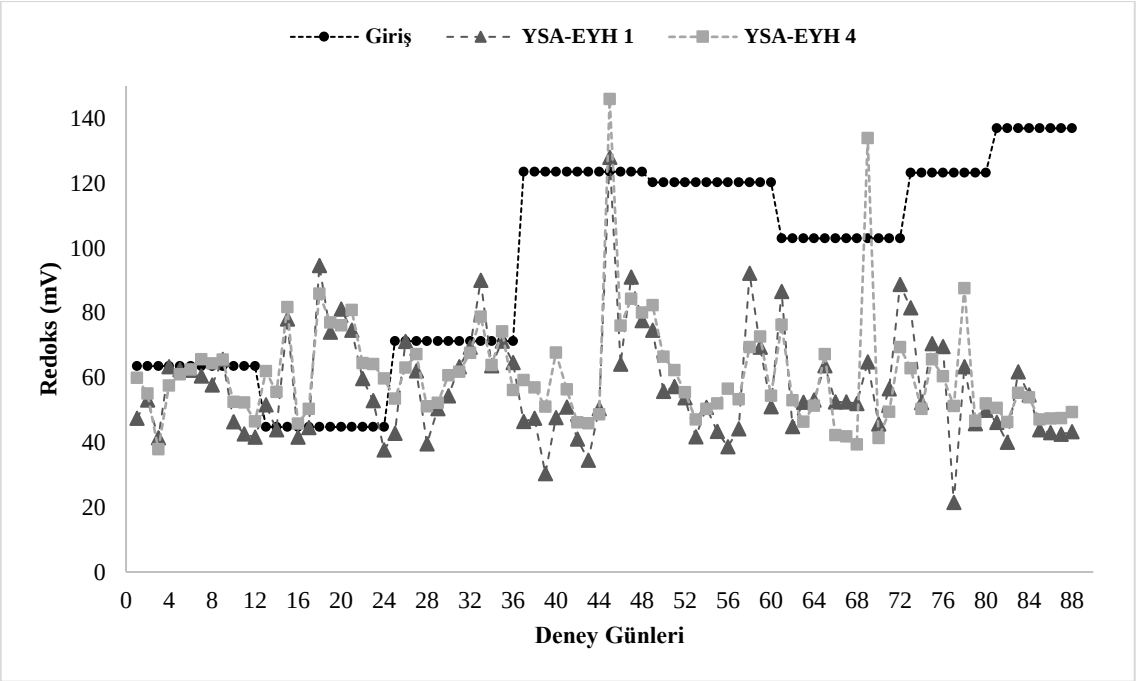
Bununla birlikte, YSA-EYH modüllerinden elde edilen çıkış sularına ait redoks değerlerinin bitkisiz kontrol grubu ve giriş suyu redoks değerlerine göre değişimi Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, ve Şekil 3.16' da gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bitkili ve bitkisiz YSA-EYH modüllerinden örneklenen su numunelerinin ortalama değerlerinin giriş suyuna göre daha düşük redoks potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Bitkili YSA-EYH modüllerinin ortalama redoks potansiyelleri ile bitkisiz YSA-EYH modülünün redoks potansiyeli karşılaştırıldığında *C. divisa* bitkisine sahip YSA-EYH 4 ve *T. latifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 3 modüllerinin bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünden daha yüksek redoks potansiyeline sahip olduğu diğer bitkili YSA-EYH modüllerinin ise bitkisiz kontrol modülünden düşük redoks potansiyellerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Çizelge 3.2 göz önüne alındığında, YSA- EYH modüllerinin giren ve çıkan suların ortalama redoks değerleri sırasıyla, 95,37±31,73, 57,03±17, 43,4±21, 55±17,7, 60,9±18,5 ve 56,9±20,1 olarak belirlenmiştir. Ortalama redoks potansiyeli değerlerine bakıldığında tüm modüllerin çıkış suyu redoks değerleri giriş suyu redoks değerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Bu verilere one-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldıktan sonra, bitkili ve bitkisiz YSA-EYH modülleri arasında anlamlı bir fark belirlenmiştir. ($p<0,05$).



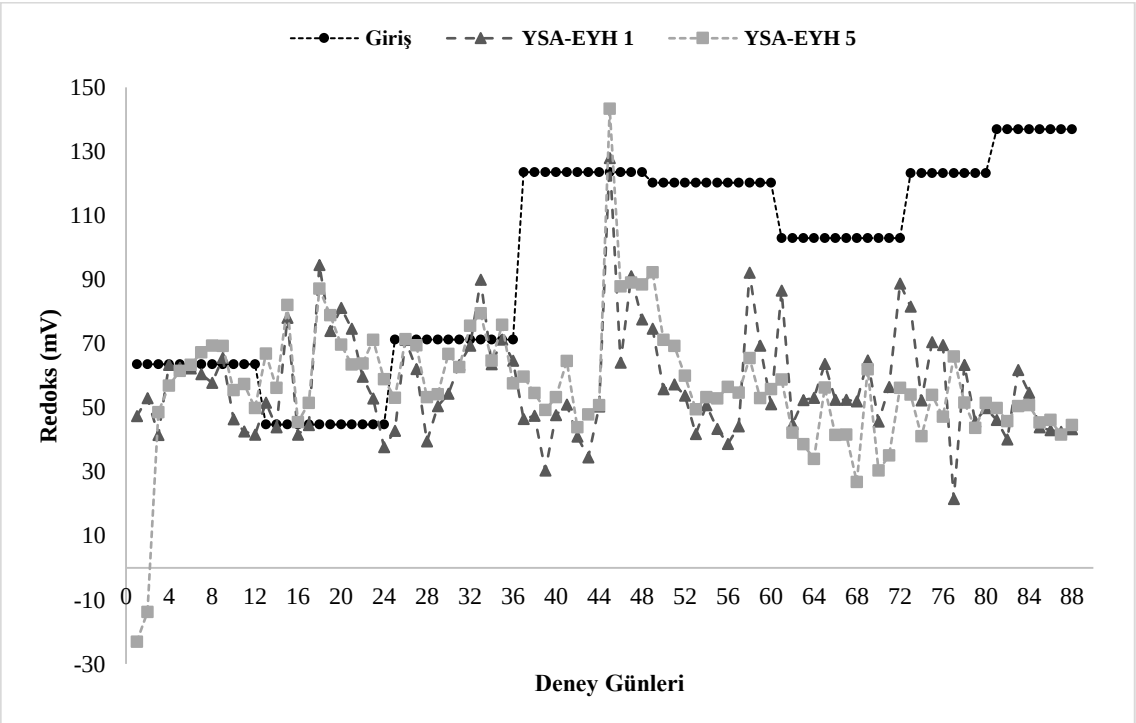
Şekil 3. 13. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi*



Şekil 3. 14. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi*



Şekil 3. 15. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi*

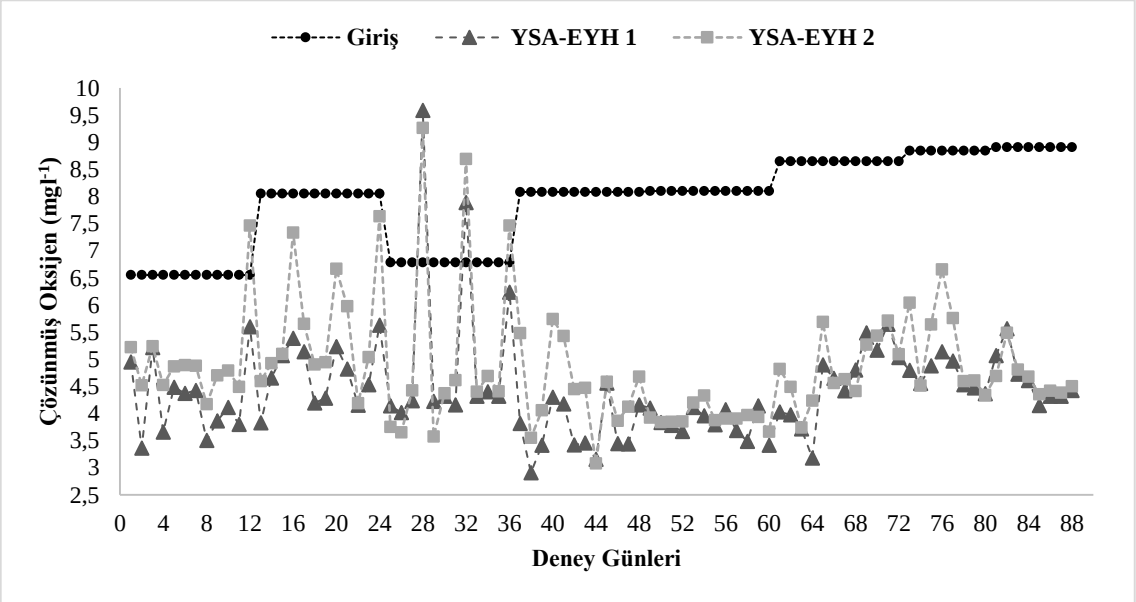


Şekil 3. 16. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre redoks (mV) değişimi*

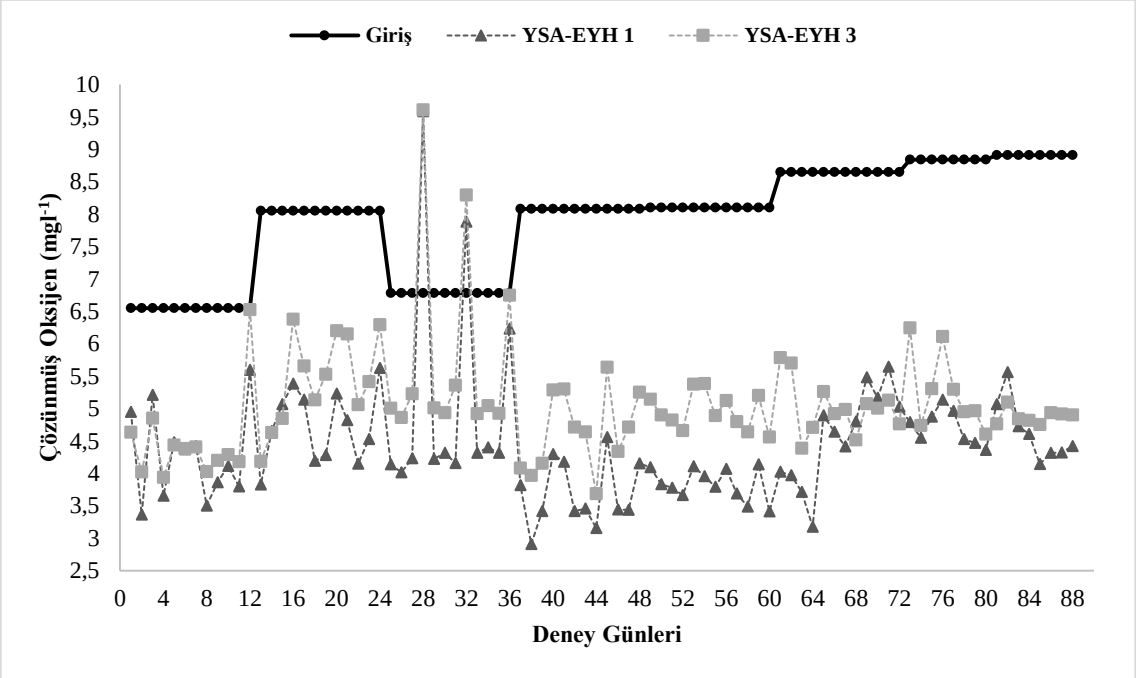
3.1.1.5. Çözünmüş oksijen

Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama çözünmüş oksijen değerleri ile en yüksek ve en düşük çözünmüş oksijen değerleri (mg/L) Çizelge 3.2' de gösterilmektedir.

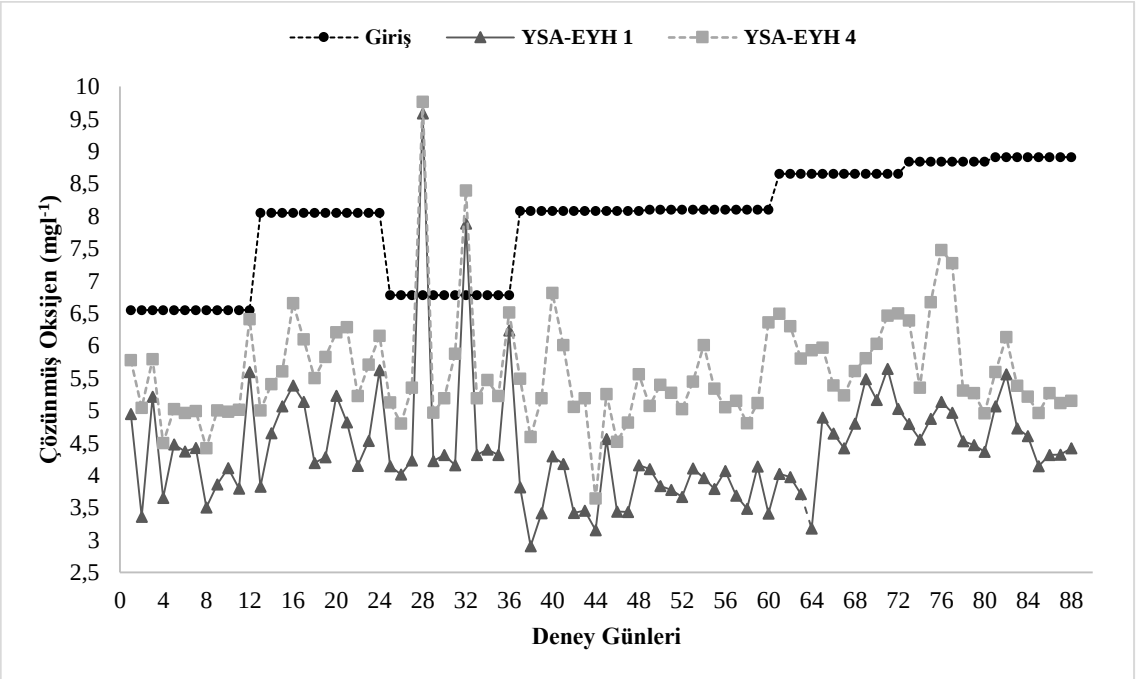
Bununla birlikte, yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait çözünmüş oksijen değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna ve giriş suyuna göre değişimi Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, ve Şekil 3.20' de gösterilmektedir. Sonuçlar göz önüne alındığında, YSA-EYH modüllerinin çıkış suyu ortalamasının giriş suyuna göre düşük olduğu tespit edilirken en küçük ortalama değerin bitkisiz kontrol modülünde bulunduğu ve tüm modüllerin ortalama çözünmüş oksijen değerlerinin giriş suyunun altında olduğu görülmektedir. YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış suyu ortalama değerlerinin sırasıyla 7,92±0,83, 4,4±1, 5,12±0,9, 5±0,9, 5,6±0,8 ve 5,5±0,9 mg/L olduğu görülmektedir. Bu çözünmüş oksijen verilerine göre, tüm modüllerin çıkış suyu ortalama değerleri giriş suyundan düşükken, bitkili YSA-EYH modüllerinin ortalama çözünmüş oksijen değerlerinin bitkisiz YSA-EYH modülünün çıkış suyu ortalama değerine göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu verilere one-way ANOVA istatistiksel analizi yapılmasıyla bitkili ve bitkisiz YSA-EYH modülleri arasında anlamlı bir fark belirlenmiştir. ($p<0,05$).



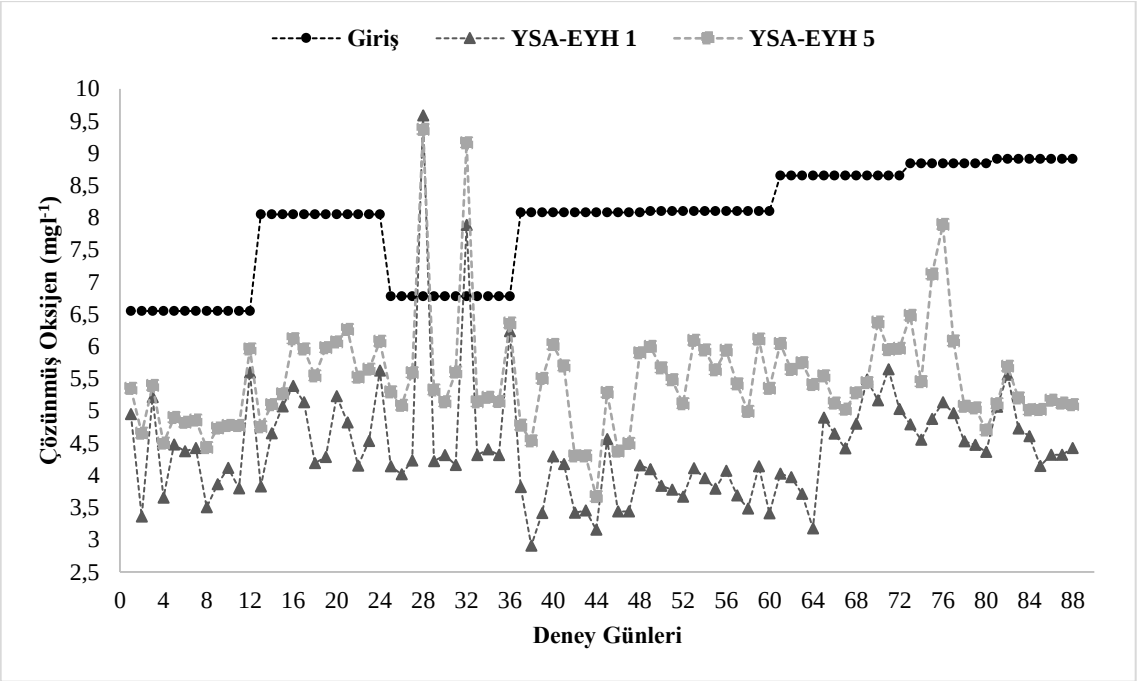
Şekil 3. 17. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi*



Şekil 3. 18. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi*



Şekil 3. 19. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi*



Şekil 3. 20. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre çözünmüş oksijen (mgl^{-1}) değişimi*

3.1.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi

88 günlük çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (KOİ),en yüksek ve en düşük kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) Çizelge 3.3, kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimliliği (%) ise Çizelge 3.4’ de gösterilmektedir.

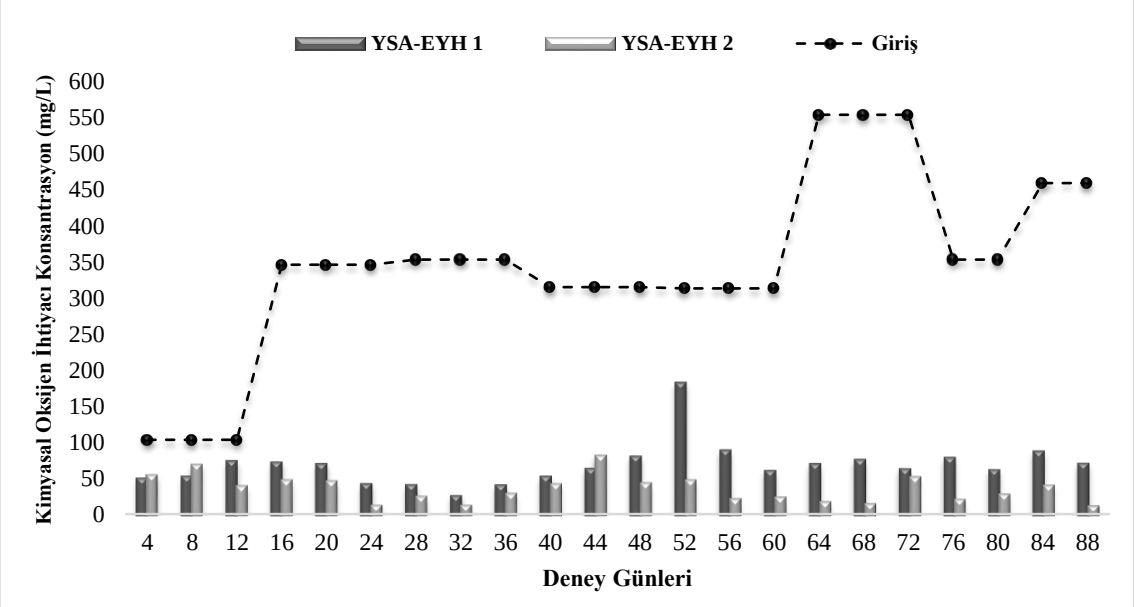
Çizelge 3. 1. *Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek en düşük kimyasal oksijen ihtiyacı, amonyum, nitrat ve toplam fosfor değerleri*

			YSA-EYH 1	YSA-EYH 2	YSA-EYH 3	YSA-EYH 4	YSA-EYH 5
Kimyasal Oksijen İhtiyacı Konsantrasyonu	**(mg/L)**	**Giriş**	344±143	344±143	344±143	344±143	344±143
		Çıkış Ortalama	67,9±30,3	34,3±19,3	30,06±88	29,2±17,9	29,5±21,8
		Çıkış En Yüksek	181	79	69	36	66
		Çıkış En Düşük	26	11	14	0	0
Amonyum	**(mg/L)**	**Giriş**	45,7±32,7	45,71±32,04	45,71±32,04	45,71±32,04	45,71±32,04
		Çıkış Ortalama	6,49±7,68	1,06±0,68	1,97±1,43	1,77±0,95	1,26±0,57
		Çıkış En Yüksek	29,06	2,42	4,22	4,06	1,97
		Çıkış En Düşük	1,37	0,23	0,71	0,91	0,34
Nitrat	**(mg/L)**	**Giriş**	25,08±16,5	25,08±16,5	25,08±16,5	25,08±16,5	25,08±16,5
		Çıkış Ortalama	9,46±6,68	11,18±3,15	10,42±4,3	11,34±0,85	11,21±2,07
		Çıkış En Yüksek	21,66	3,34	4,52	3,38	3,32
		Çıkış En Düşük	3,34	0,57	0,61	0,78	0,85
Toplam Fosfor	**(mg/L)**	**Giriş**	20,7±9,84	20,7±9,84	20,7±9,84	20,7±9,84	20,7±9,84
		Çıkış Ortalama	6,16±5,74	0,61±0,95	0,76±1,26	0,61±0,86	0,85±1,28
		Çıkış En Yüksek	19,65	3,5	4,15	3,05	4,9
		Çıkış En Düşük	0,7	0	0	0	0

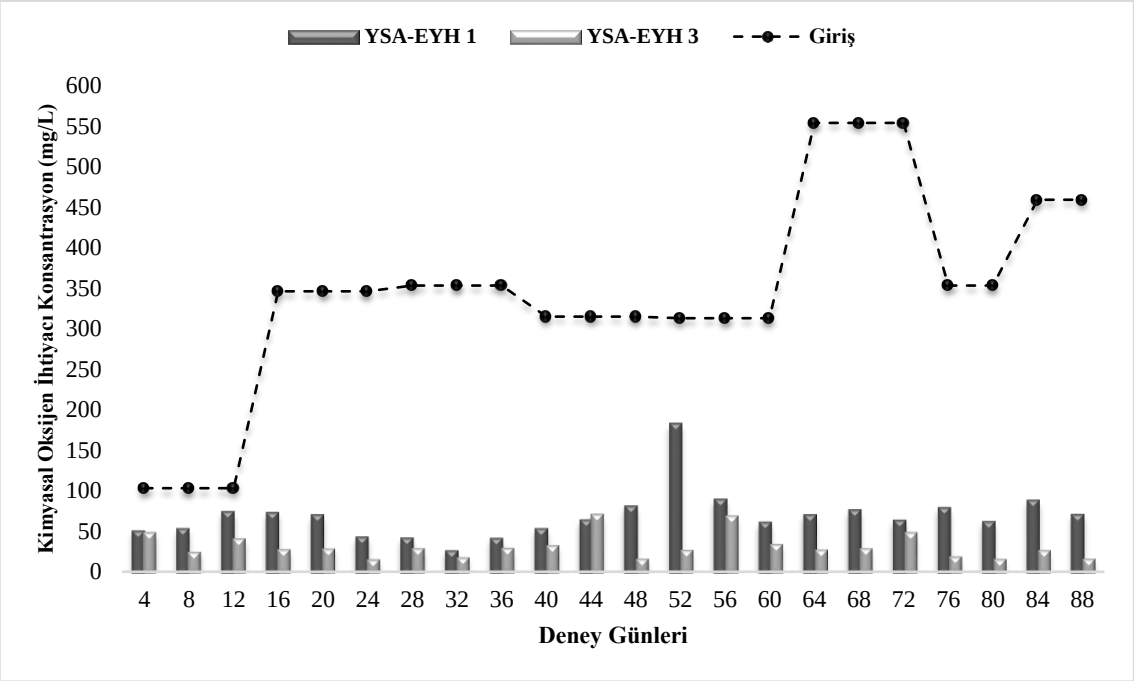
Çizelge 3. 1. *Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek en düşük kimyasal oksijen ihtiyacı, amonyum, nitrat ve toplam fosfor yüzde arıtım performansları*

			YSA-EYH 1	YSA-EYH 2	YSA-EYH 3	YSA-EYH 4	YSA-EYH 5
Kimyasal Oksijen İhtiyacı Giderim Verimliliği	**(%)**	**Çıkış Ortalama**	75,81±17,1	85,4±16,3	88,25±11,8	87,8±13,7	87,19±16,01
		Çıkış En Yüksek	92,78	97,60	96,73	100	100
		Çıkış En Düşük	28,64	34,95	54,37	48,54	36,4
Amonyum Arıtımı	**(%)**	**Çıkış Ortalama**	88,1±7,15	97,3±1,57	95,33±1,93	95,4±1,54	96,3±2,35
		Çıkış En Yüksek	93,78	99,31	98,74	98,39	99,22
		Çıkış En Düşük	66,76	96,63	92,71	92,72	91,54
Nitrat Arıtımı	**(%)**	**Çıkış Ortalama**	63,6±13,3	55,52±18,47	52,68±13,81	38,8±27,78	41,99±24,06
		Çıkış En Yüksek	71,14	98,13	97,52	97,72	97,86
		Çıkış En Düşük	18,40	81,01	67,40	75,67	76,06
Toplam Fosfor Arıtımı	**(%)**	**Çıkış Ortalama**	71,77±23,3	97,05±4,408	96,38±5,64	96,9±4,03	95±5,49
		Çıkış En Yüksek	93,46	100	100	100	100
		Çıkış En Düşük	22,33	86,17	83,60	87,94	80,63

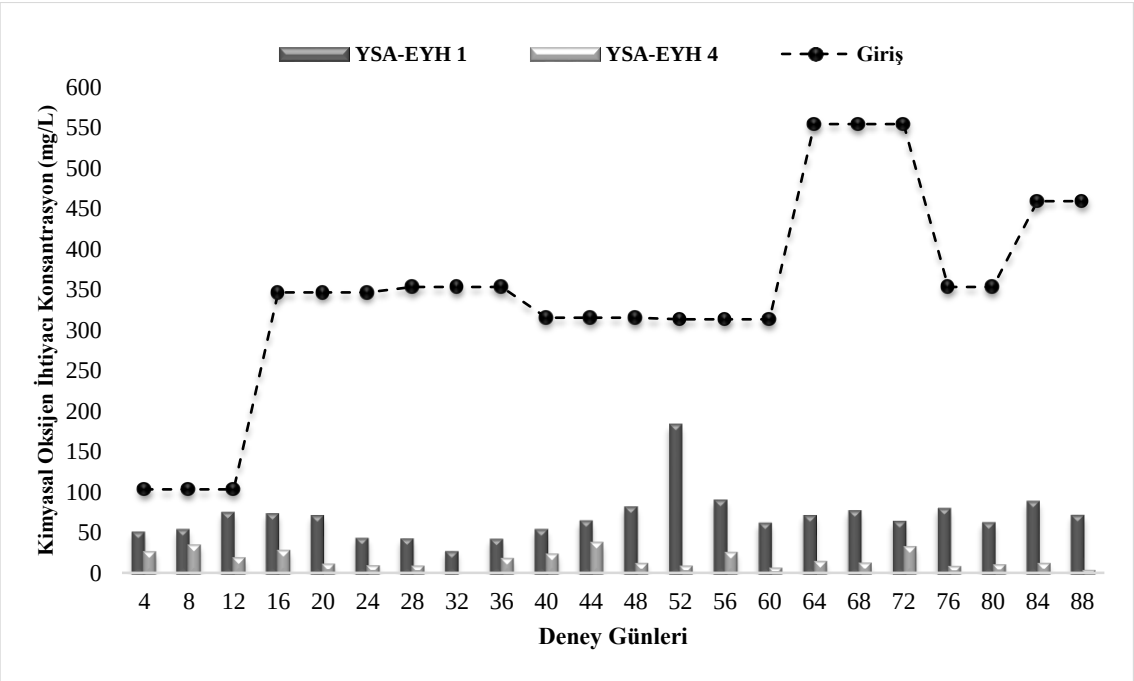
Bununla birlikte, yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna ve giriş suyuna göre değişimi Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23, ve Şekil 3.24' de kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimliliği performansları ise Şekil 3.26' da gösterilmektedir. Deney süresince giriş suyu 103 ila 554 mg/L^{-1} arasında ve 344,36±143 mg/L^{-1} ortalamaya sahipken, suyun sistemlere verildikten sonra bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünde ortalama % 75,81±17,1 oranında bir arıtım performansı ile bu değeri 67,9±30,3 mg/L değerine düşürdüğü görülmektedir. Bitkili modüller olan YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5 modüllerinde ise bu değer sırasıyla 34,3±19,3, 30,06±88, 29,2±17,9 ve 20,5±21,8 mg/L^{-1} olduğu görülmektedir. Bu değerlere karşılık olarak bitkili YSA-EYH modüllerinin ortalama giderim verimliliği performansları % 85,4±16,3, % 88,25±11,8, % 87,8±13,7 ve % 87,19±16,01 olarak sıralanmaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında, bitkili YSA-EYH modüllerinin çıkış suyu KOİ değerlerinin giriş ve bitkisiz kontrol modülünün çıkış suyu değerine göre daha düşük olduğu ve en iyi % giderim verimliliği performansınınYSA-EYH 3 modülünde gerçekleştiği belirlenmiştir. Deney verilerinin one-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldığında, giriş suyu KOİ konsantrasyonları ile tüm modüllerin çıkış suyu konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak önemli farklılıkların olduğunu göstermiştir ($p<0,05$).



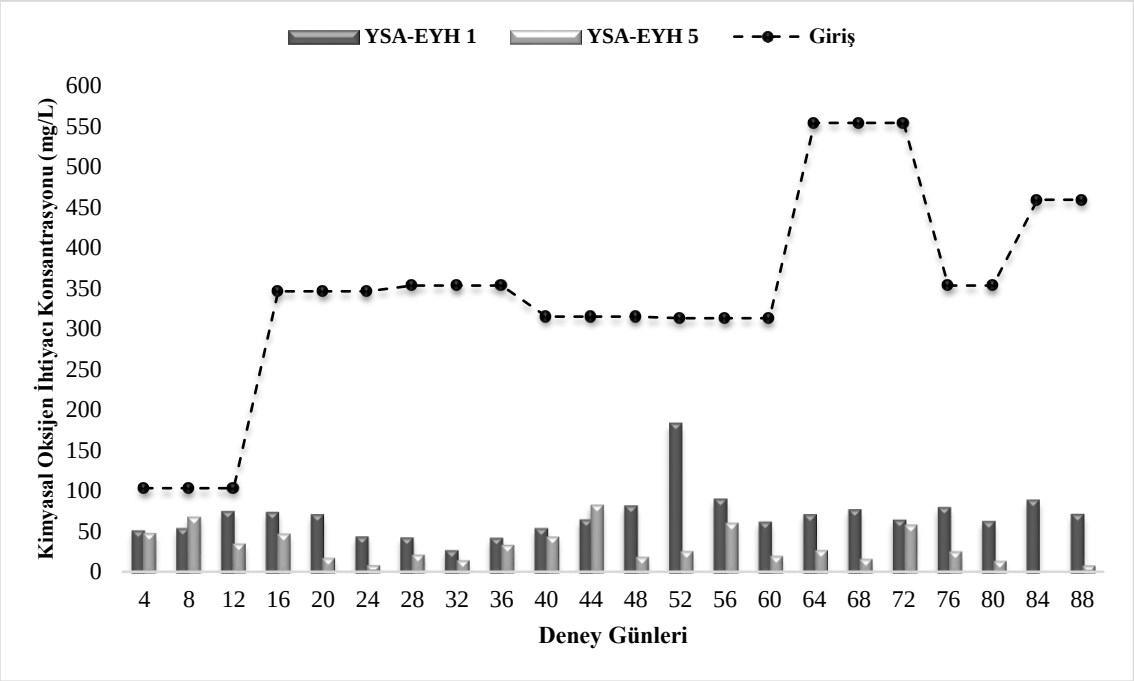
Şekil 3. 21. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



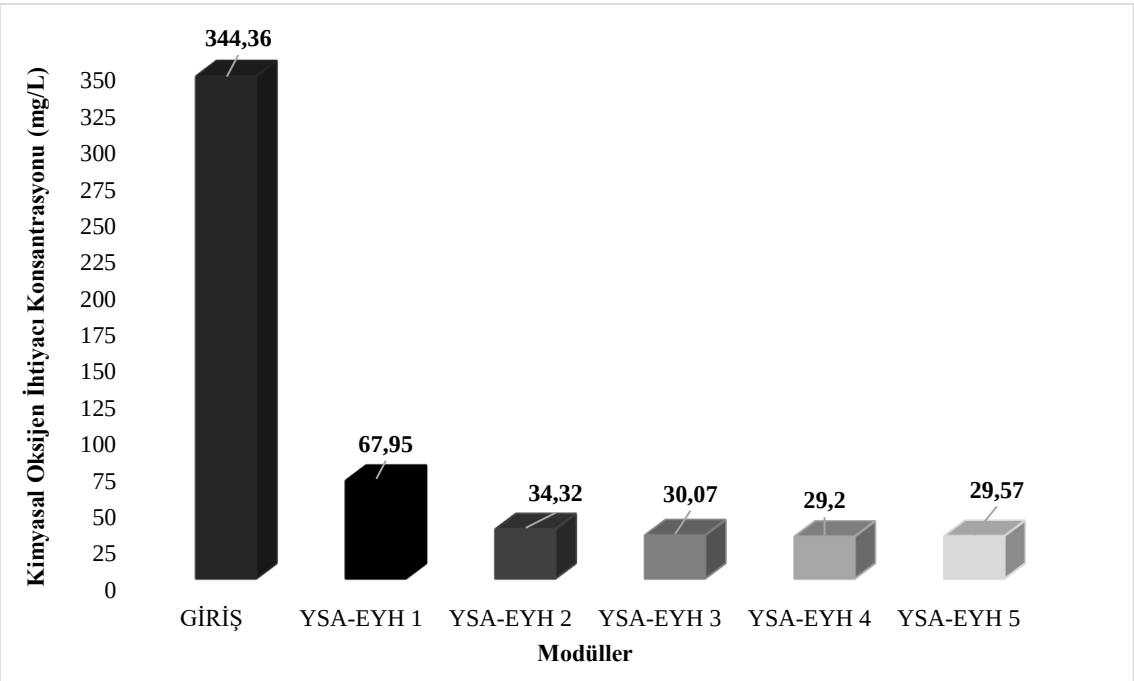
Şekil 3. 22. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



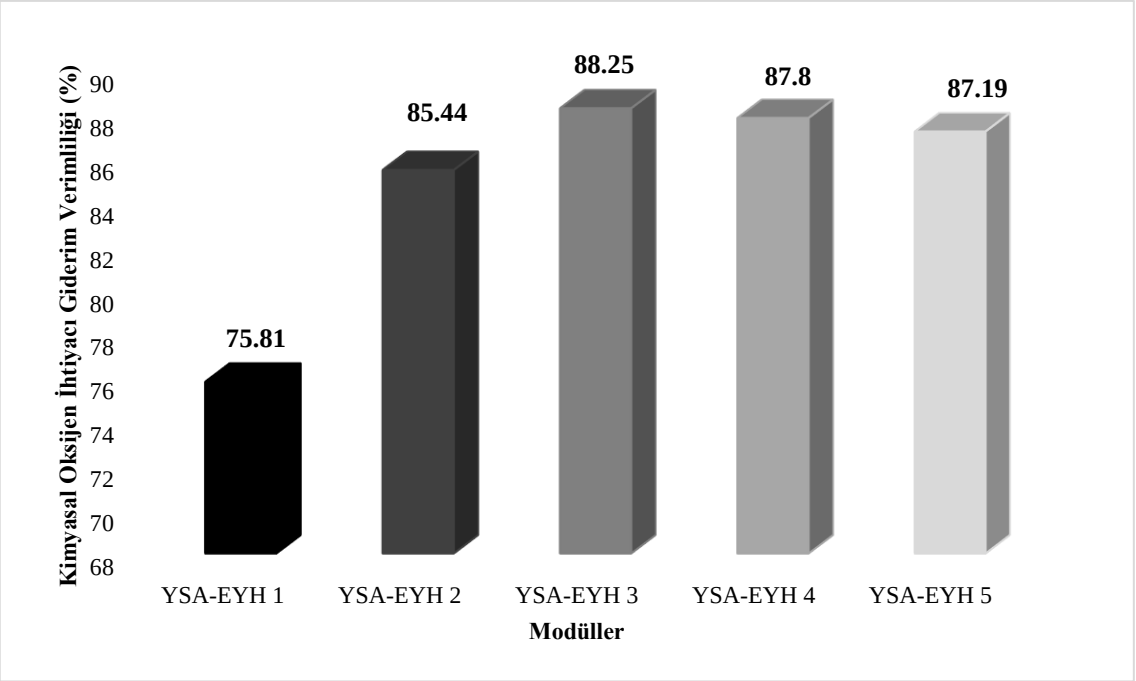
Şekil 3. 23. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 24. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 25. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



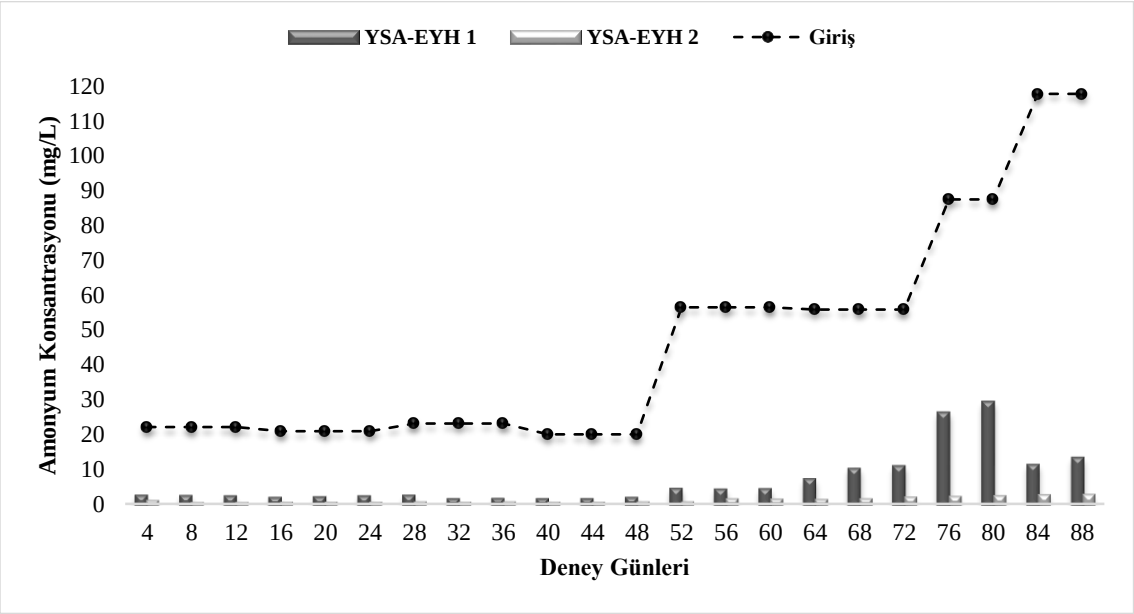
Şekil 3. 26. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı giderim verimliliği (%)*

3.1.3. Amonyum giderimi

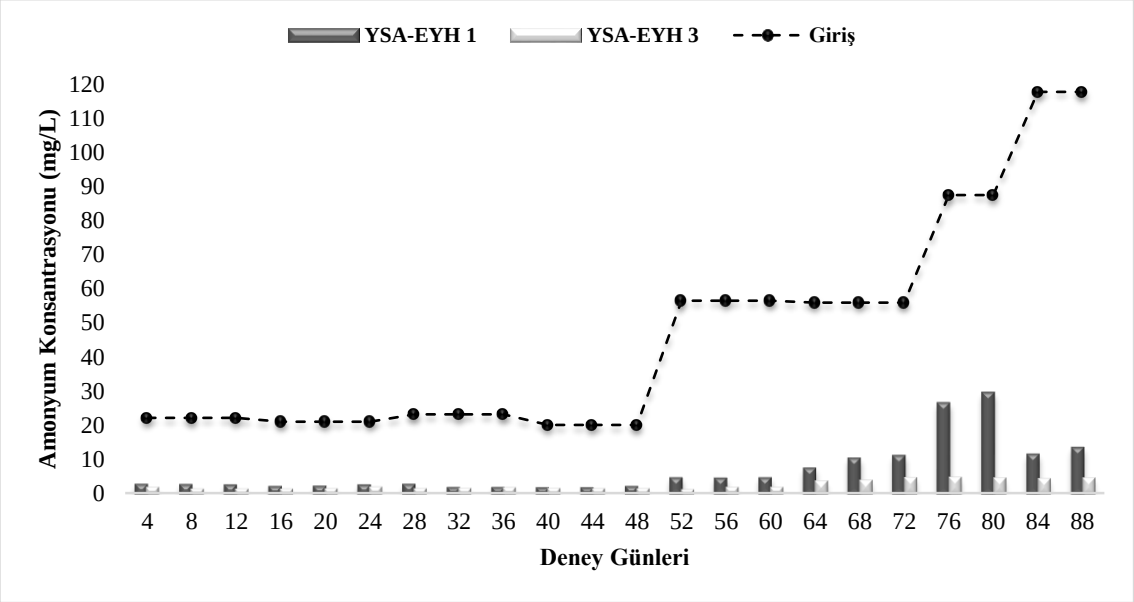
Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama amonyum giderim değerleri ile en yüksek ve en düşük amonyum konsantrasyonu değerleri (mg/L) Çizelge 3.3' de, amonyum giderim verimliliği (%) ise Çizelge 3.4' de gösterilmektedir.

Bununla birlikte, YSA-EYH modüllerinden elde edilen çıkış sularına ait amonyum giderim değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna ve giriş suyuna göre değişimi Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 3.30' da gösterilmektedir. Şekil 3.31' e göre, YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış suyu ortalama değerleri sırasıyla 45,7±32,7, 6,49±7,68, 1,06±0,68, 1,97±1,43, 1,77±0,95 ve 1,26±0,57 (mg/L) olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, bitkili YSA-EYH modüllerinin bitkisiz YSA-EYH modülüne göre daha yüksek amonyum giderim verimliliği performansı gerçekleştirdiği belirlenmiştir. En yüksek amonyum giderim verimliliği performansının % 97,3±1,57 ile YSA-EYH 2 yani *T.angustifolia* bulunduran modülde gerçekleştiği, en düşük amonyum giderim verimliliği performansının ise % 88,1±7,15 ile bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünde olduğu tespit edilmiştir. YSA-EYH 2 yani *T.angustifolia* bulunduran modülü sırasıyla % 93,3±2,35 ile *J.gerardii* bulunduran YSA-EYH 5, % 95,33±1,93 ile *T.latifolia* bitkisi bulunduran YSA-EYH 3 ve % 95,4±154 ile *C.divisa* bitkisi bulunduran YSA- EYH 4

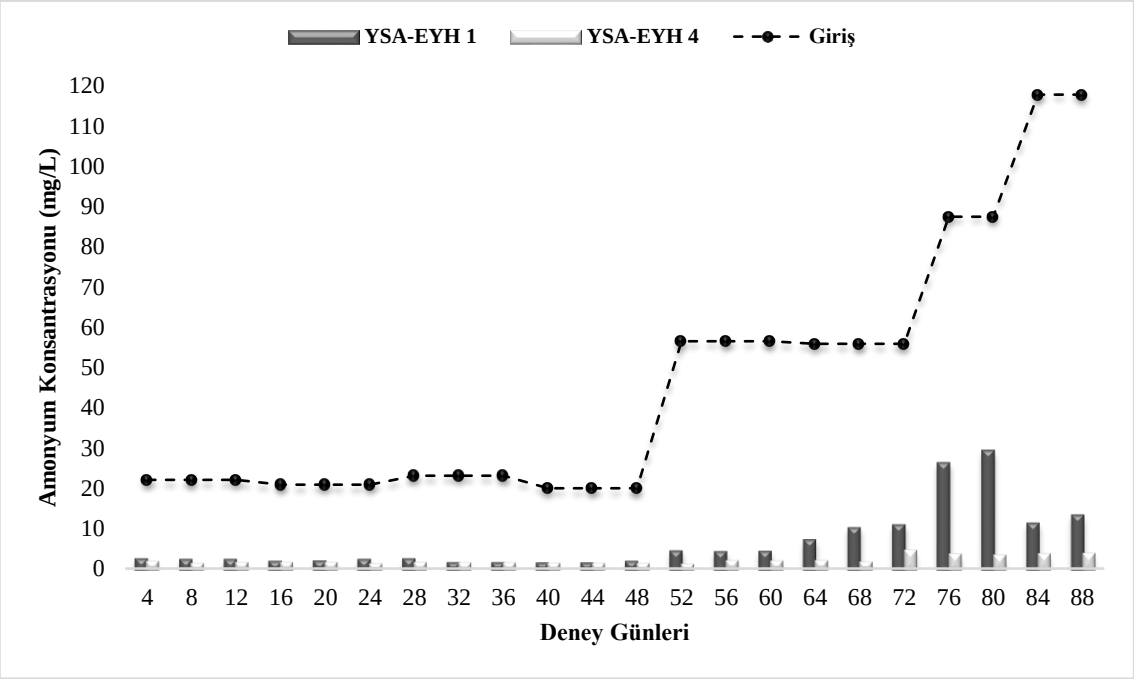
modüllerinin takip ettiği olduğu belirlenmiştir. Deney periyodu sonunda one-way ANOVA istatistiksel analiz programı ile yapılan analize göre. YSA-EYH modülleri arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$).



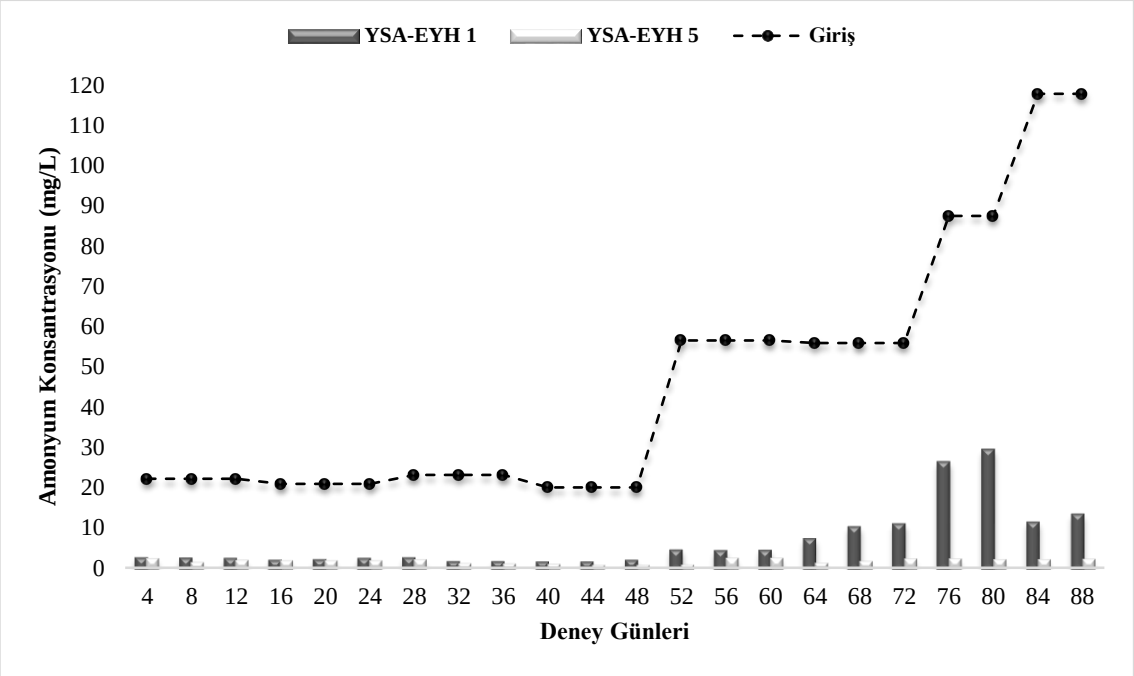
Şekil 3. 27. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



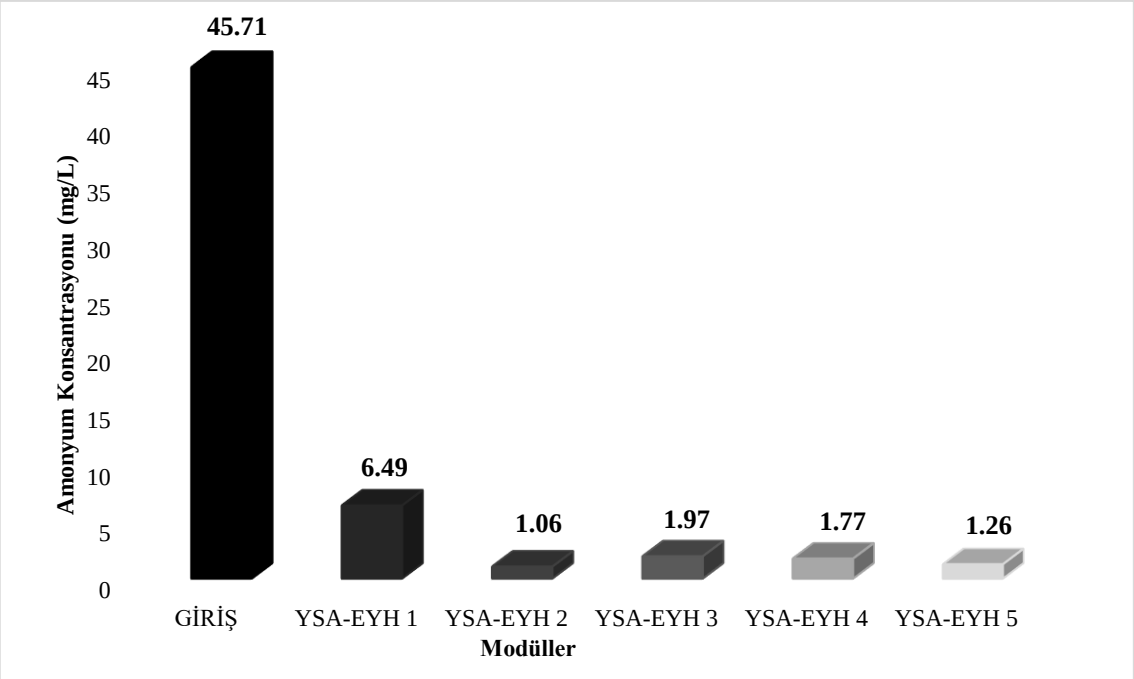
Şekil 3. 28. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



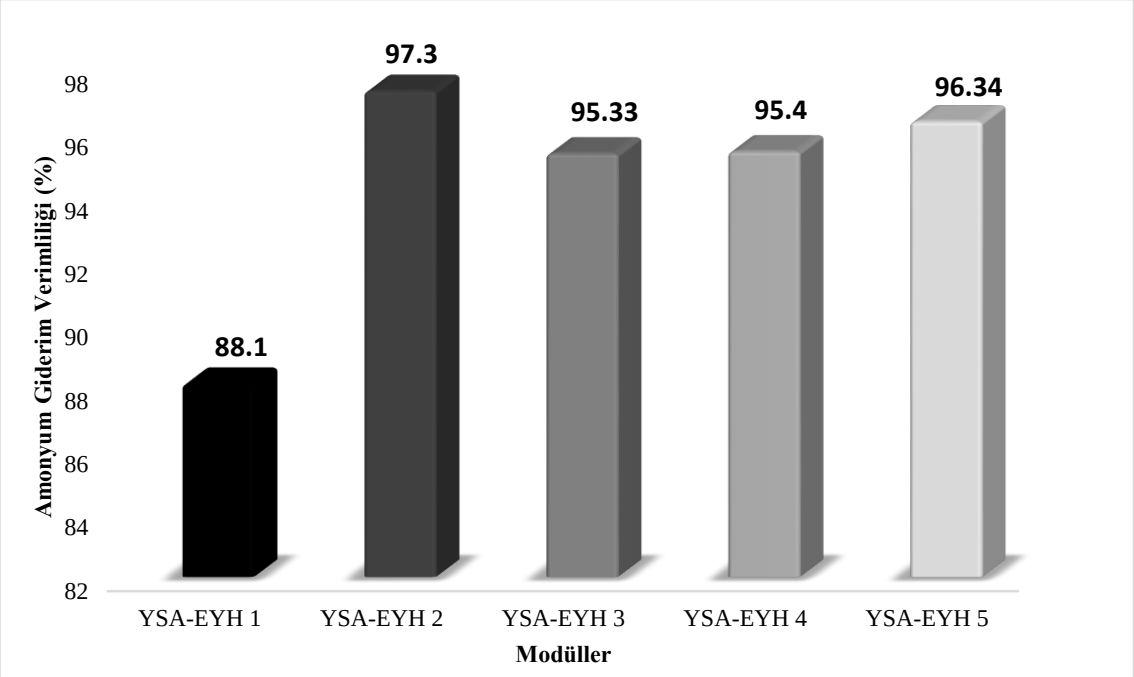
Şekil 3. 29. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 30. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama amonyum konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 31. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



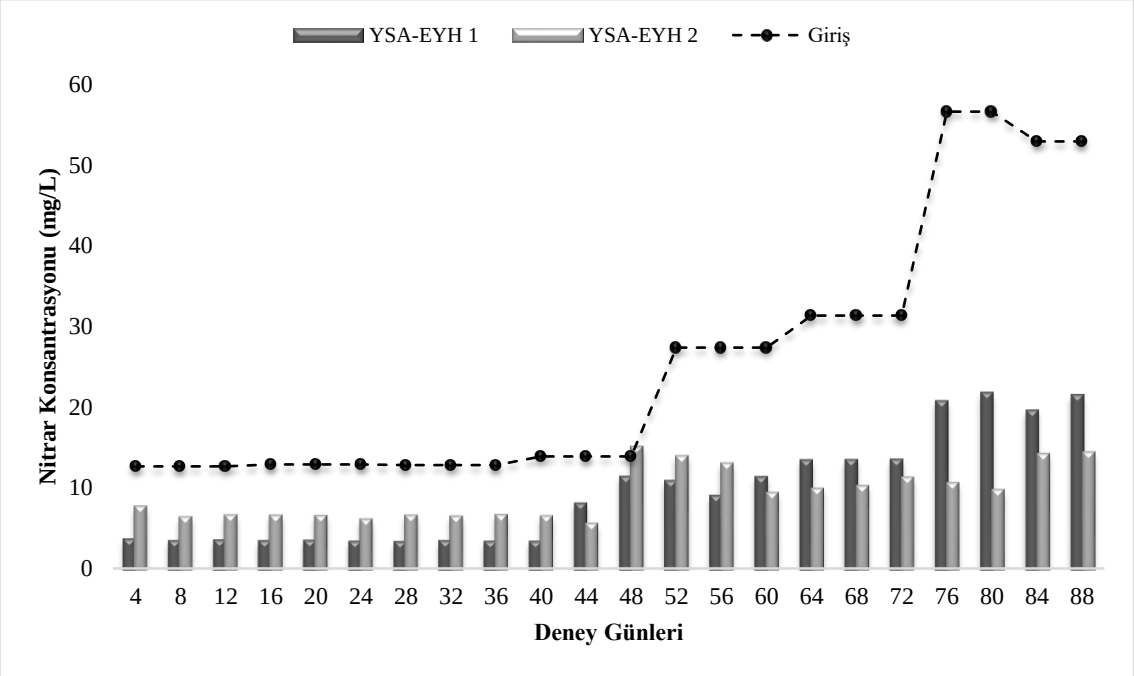
Şekil 3. 32. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama amonyum giderim verimliliği (%)*

3.1.4. Nitrat giderimi

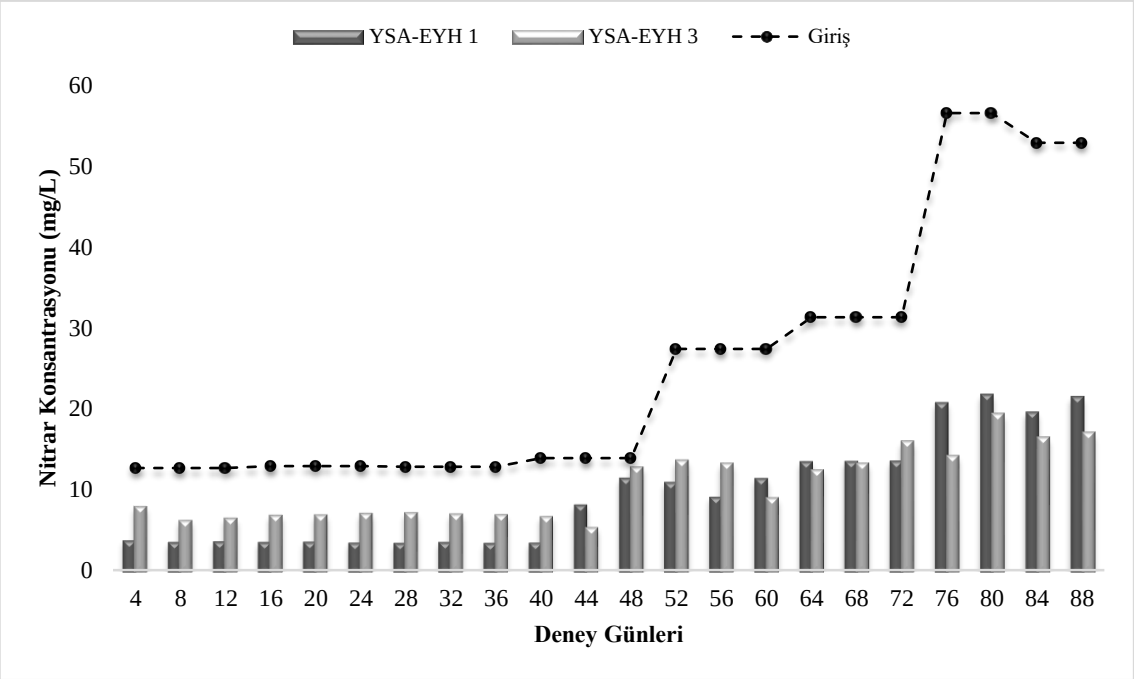
Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama nitrat giderim değerleri ile en yüksek ve en düşük nitrat konsantrasyonu

değerleri (mg/L) Çizelge 3.3’ de, nitrat giderim verimliliği (%) ise Çizelge 3.4’ de gösterilmektedir.

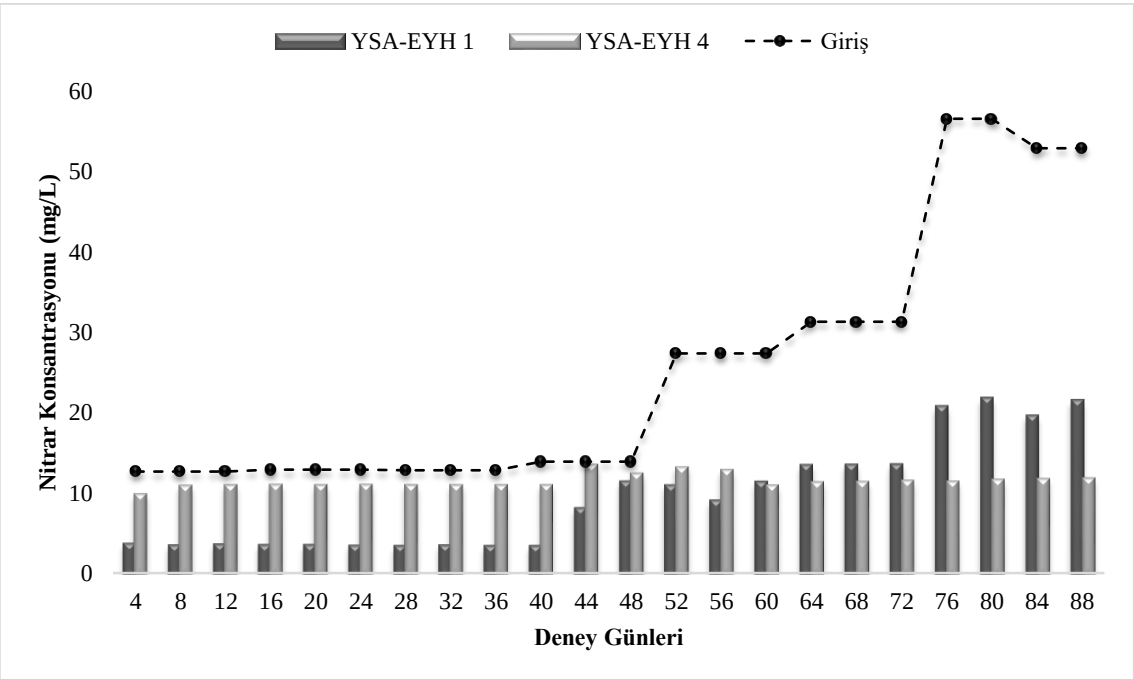
Bununla birlikte. YSA-EYH modüllerinden elde edilen çıkış sularına ait nitrat giderim değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna ve giriş suyuna göre değişimi Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35, Şekil 3.36’ da, nitrat giderim verimliliği performansları ise Şekil 3.38’ de gösterilmektedir. Şekil 3.12 ’a göre, giriş suyunun NO_3^- değeri 25,08±16,5mg/L olarak ölçülmüştür. YSA-EYH modüllerinden çıkan suların ortalama nitrat değerleri sırasıyla 9,46±6,68, 11,18±3,15, 10,42±4,3, 11,34±0,85 ve 11,21±2,07 mg/L olarak ölçülmüştür. Bu değerlere karşılık olarak, YSA-EYH modüllerin giderim verimliliği performansları sırasıyla % 63,6±13,3, % 55,52±18,47, % 52,68±13,8, % 38,8±27,78, % 41,99±24,06 olarak hesaplanmıştır. Deney periyodu süresince elde edilen sonuçlar ile one-way ANOVA istatistiksel analizi gerçekleştirildiğinde YSA-EYH modülleri arasında anlamlı bir fark belirlenmiştir (*p<0,05*).



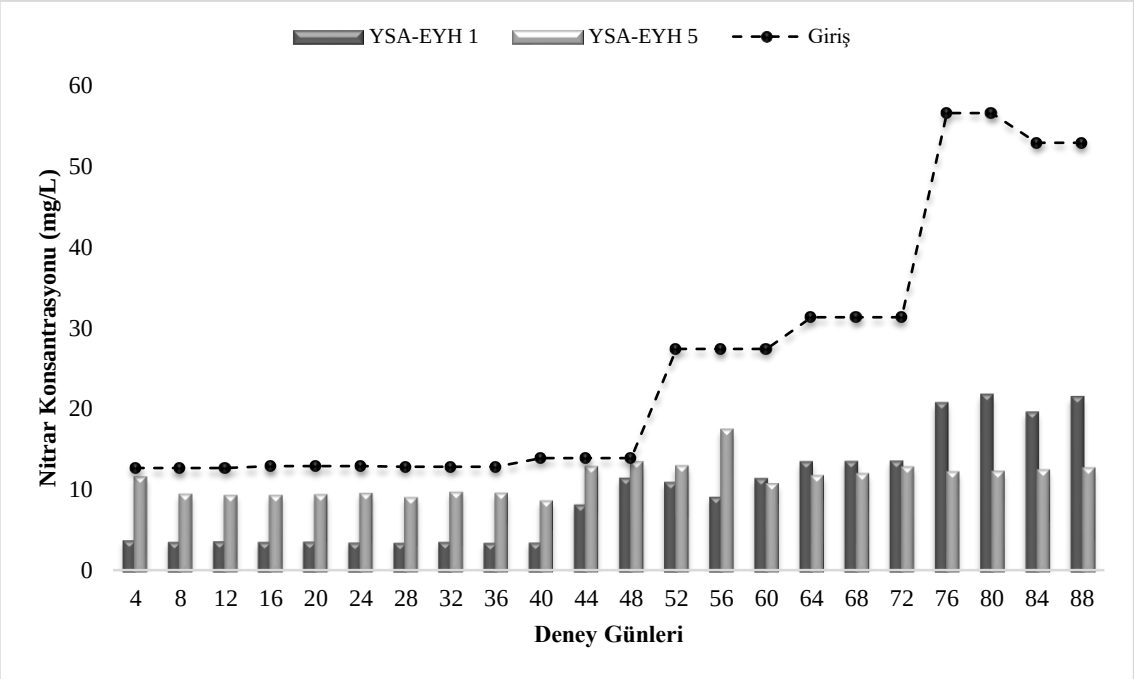
Şekil 3. 33. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



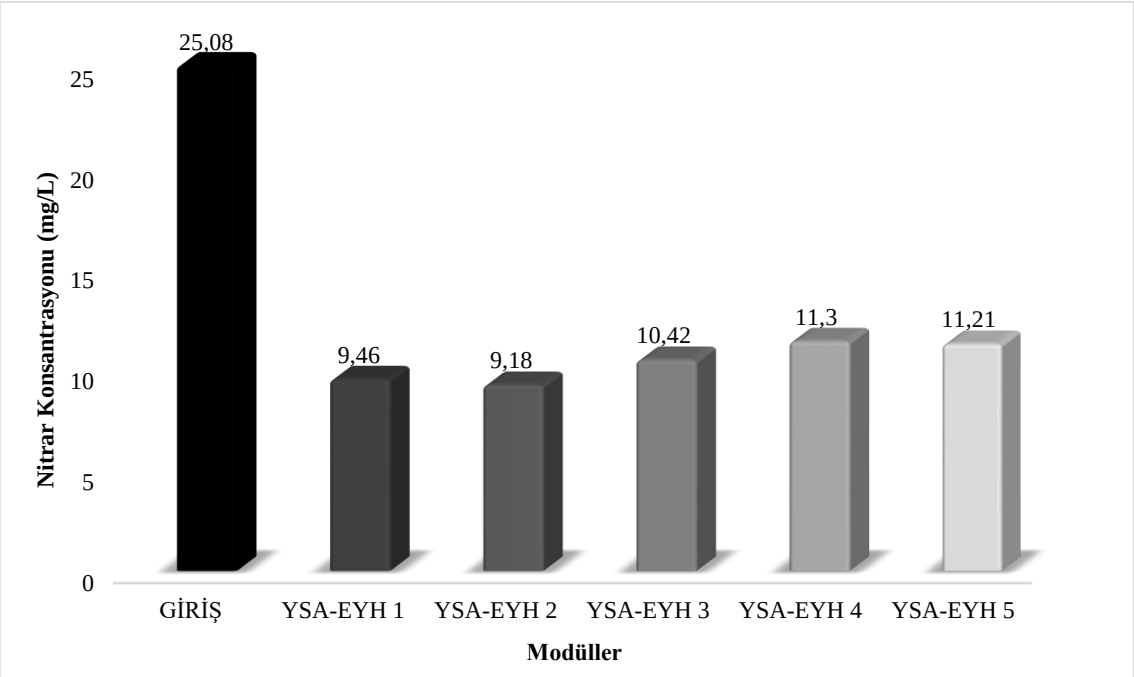
Şekil 3. 34. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



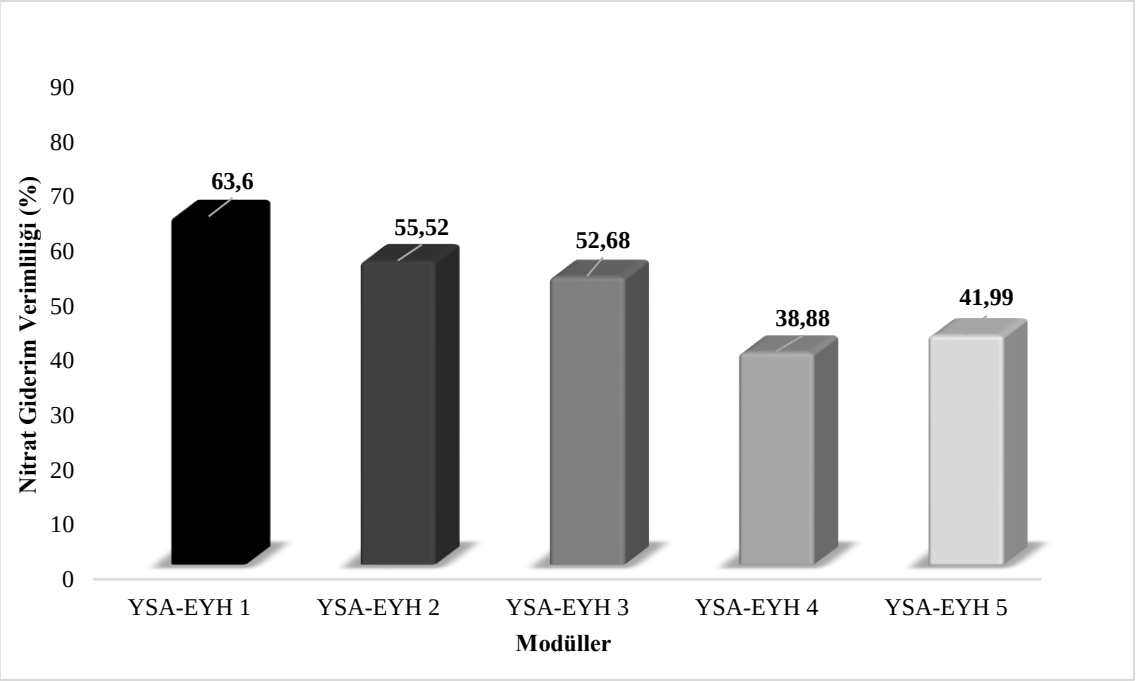
Şekil 3. 35. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 36. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 37. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama nitrat konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



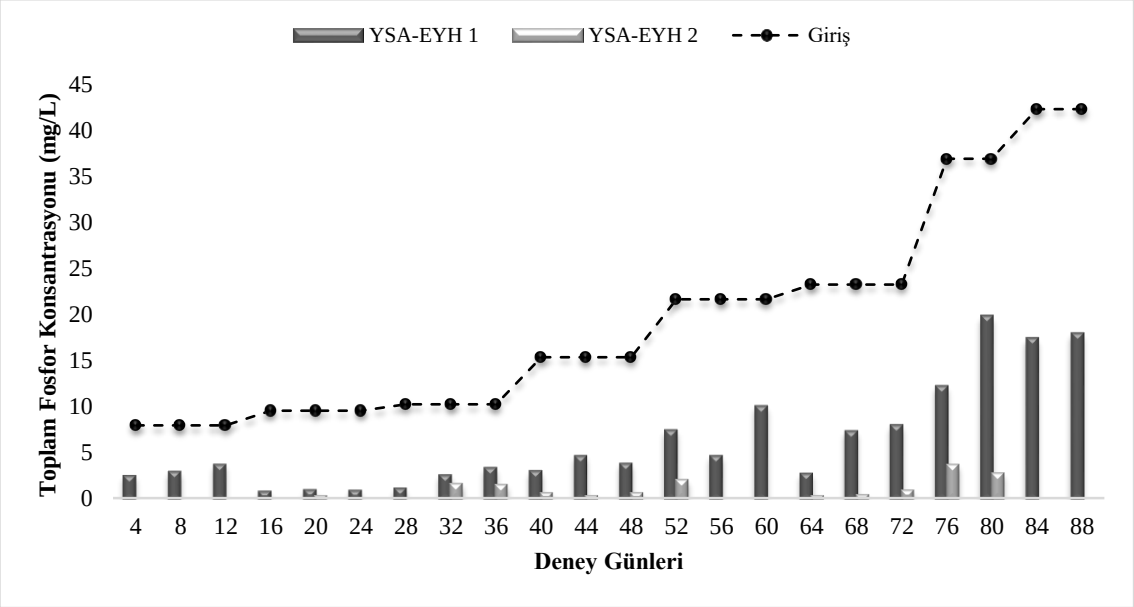
Şekil 3. 38. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama nitrat giderim verimliliği (%)*

3.1.5. Toplam fosfor giderimi

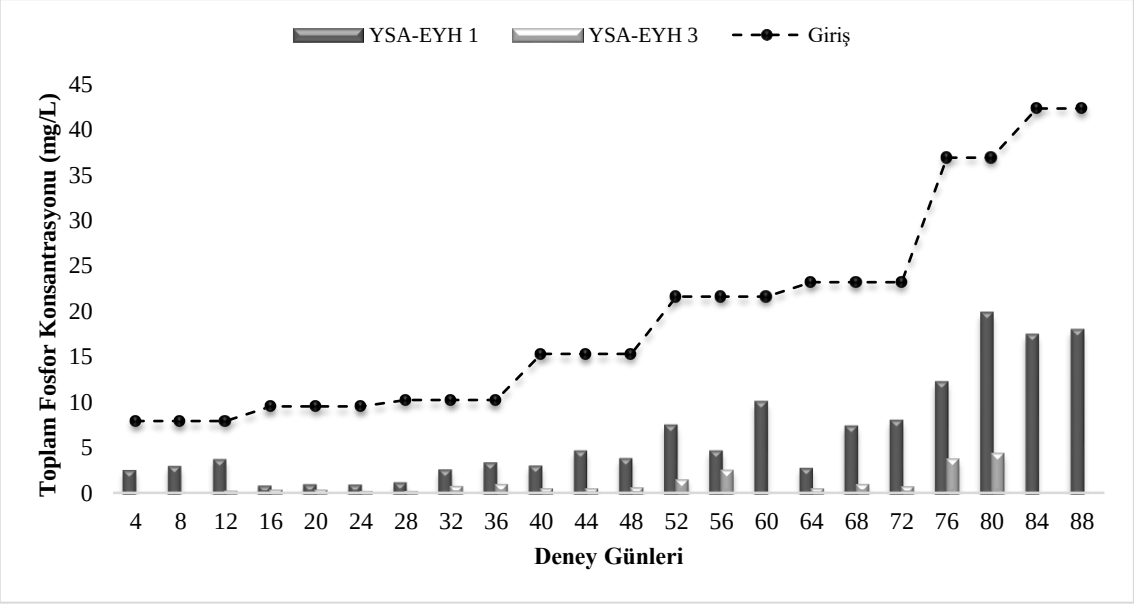
Çalışma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış sularına ait ortalama toplam fosfor giderim değerleri ile en yüksek ve en düşük toplam fosfor konsantrasyonu değerleri (mg/L) Çizelge 3.3'de, toplam fosfor giderim verimliliği (%) ise Çizelge 3.4' de gösterilmektedir.

Bununla birlikte. yapay sulak alanlardan elde edilen çıkış sularına ait amonyum giderim değerlerinin bitkisiz kontrol grubuna ve giriş suyuna göre değişimi Şekil 3.39, Şekil 3.40, Şekil 3.41, Şekil 3.42' de, toplam fosfor giderim verimliliği performansları ise Şekil 3.44' de gösterilmektedir Çizelge 3.3'e göre, YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış suyu konsantrasyonları sırasıyla 20,7±5, 74,6,16±5,74, 0,61±0,95, 0,76±1,26, 0,61±0,86 ve 0,85±1,28 mg/L olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, bitkili YSA-EYH modüllerinin bitkisiz YSA-EYH modülüne göre daha yüksek toplam fosfor giderim verimliliği performansı gerçekleştirdiği belirlenmiştir. En yüksek toplam fosfor giderim verimliliği performansının % 97,05±4,4 ile YSA-EYH 2 yani *T.angustifolia* bulunduran modülde gerçekleştiği, en düşük toplam fosfor giderim verimliliği performansının ise % 71,77±23,25 ile bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünde gerçekleştiği tespit edilmiştir. YSA-EYH 2 yani *T.angustifolia* bitkisi bulunduran modülü sırasıyla %96,9±4,03 ile *C.divisa* bitkisi bulunduran YSA-EYH 4 modülü, % 96,38±5,64 ile

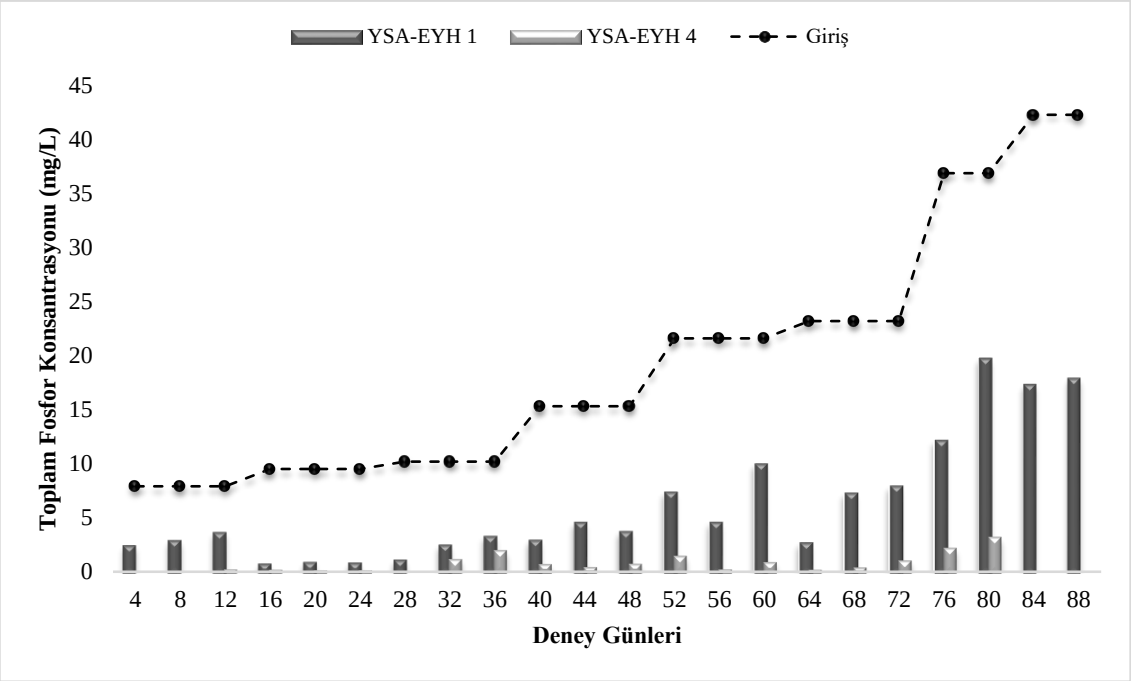
T.latifolia bitkisi bulunduran YSA-EYH 3 modülü ve % 95±5,49 ile *J.gerardii* bitkisi bulunduran YSA-EYH 5 modülü takip etmektedir. One-way ANOVA istatistiksel analizi gerçekleştirildiğinde, bitkili YSA-EYH modülleri ile bitkisiz kontrol modülü arasında anlamlı fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).



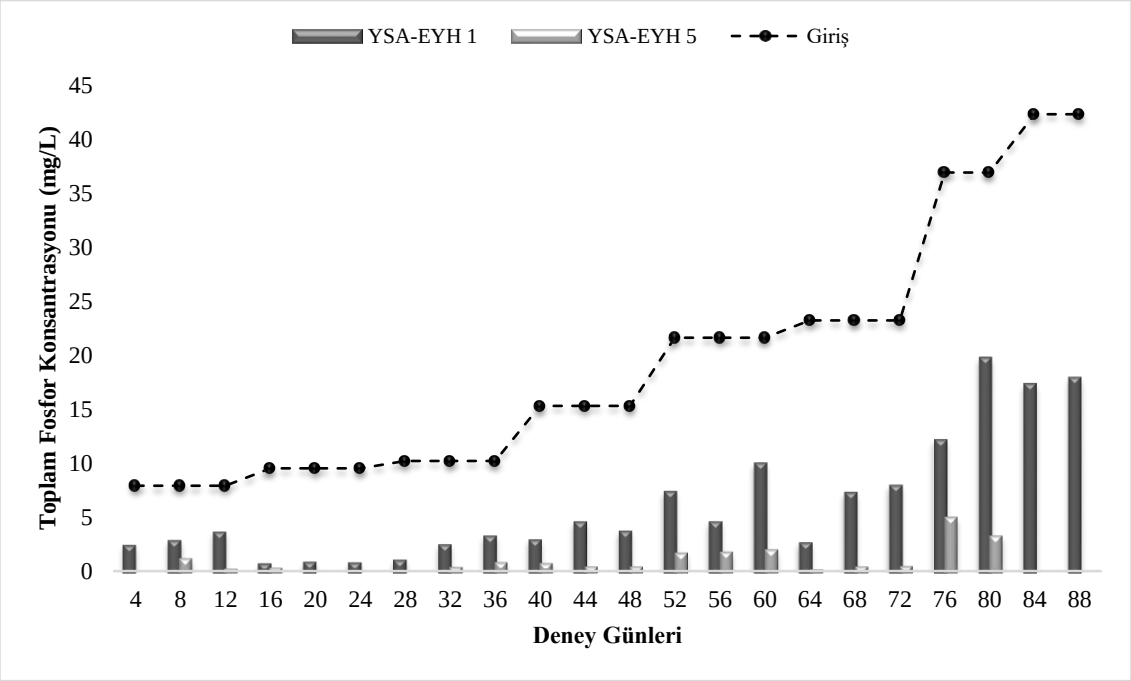
Şekil 3. 39. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



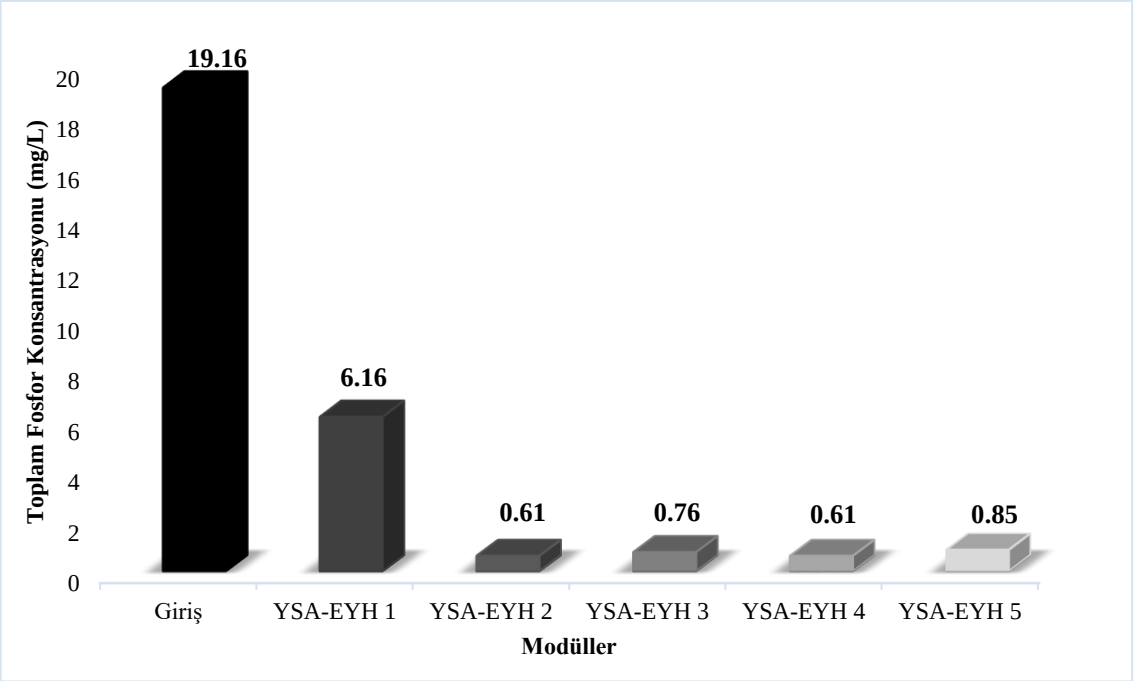
Şekil 3. 40. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



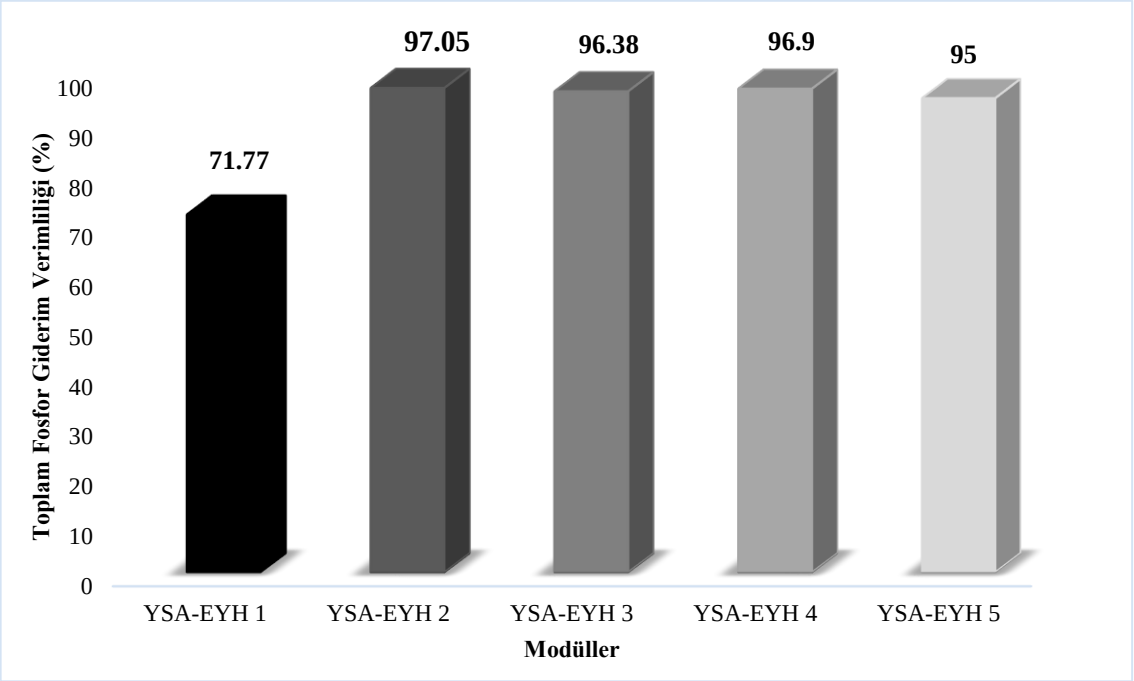
Şekil 3. 41. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 42. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülünün çıkış suyunun araştırma periyodu içerisindeki giriş ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülünün çıkış suyuna göre ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 43. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama toplam fosfor konsantrasyonu (mg/L) değişimi*



Şekil 3. 44. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin çıkış sularının araştırma periyodu içerisindeki ortalama toplam fosfor giderim verimliliği (%)*

3.2. Bitki Analizleri

3.2.1.Bitkilerin boyu ve nispi gelişim oranları (RGR)

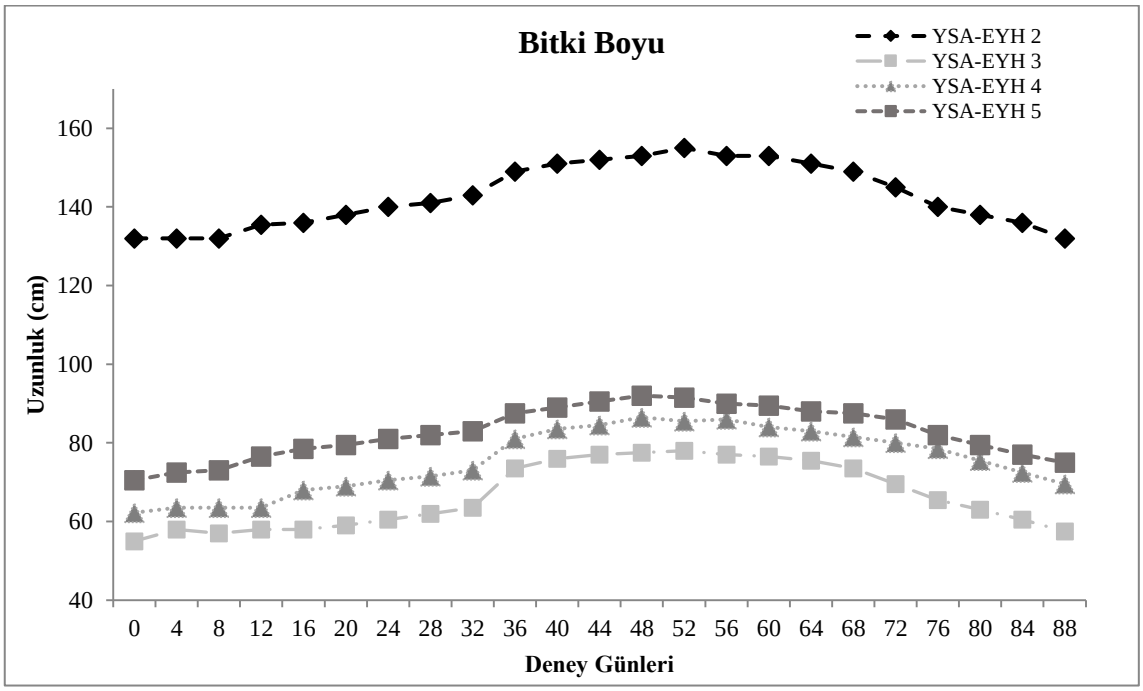
Araştırma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin ortalama bitki boyları (cm) Çizelge 3.5' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. *Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin ortalama bitki boyları, klorofil pigmentleri ve yüzde azot içerikleri*

			Yaprak	Gövde	Kök	Tüm Bitki
YSA-EYH 2	**Bitki Boyu**	**cm**	142,8±8,08	-	-	-
	Klorofil a	**µg L^{-1}**	15,2±1,3	-	-	-
	Klorofil b	**µg L^{-1}**	10,1±0,9	-	-	-
	Klorofil a+b	**µg L^{-1}**	3,51±2,7	-	-	-
	Azot	**(%)**	1,01	2,98	0,72	4,73
YSA-EYH 3	**Bitki Boyu**	**cm**	66,59±8,37	-	-	-
	Klorofil a	**µg L^{-1}**	18,5±0,3	-	-	-
	Klorofil b	**µg L^{-1}**	11,2±0,17	-	-	-
	Klorofil a+b	**µg L^{-1}**	3,3±1,62	-	-	-
	Azot	**(%)**	2,86	3,01	1,28	7,15
YSA-EYH 4	**Bitki Boyu**	**cm**	75,4±8,2	-	-	-
	Klorofil a	**µg L^{-1}**	18,8±2,5	-	-	-
	Klorofil b	**µg L^{-1}**	13,01±3,21	-	-	-
	Klorofil a+b	**µg L^{-1}**	4,69±3,29	-	-	-
	Azot	**(%)**	1,37	3,76	4,13	9,25
YSA-EYH 5	**Bitki Boyu**	**cm**	82,6±6,63	-	-	-
	Klorofil a	**µg L^{-1}**	19,2±6,4	-	-	-
	Klorofil b	**µg L^{-1}**	11,2±3,76	-	-	-
	Klorofil a+b	**µg L^{-1}**	3,13±1,91	-	-	-
	Azot	**(%)**	4,67	2,55	1,61	8,84

Buna göre, *T.angustifolia* bitkisi için 142,8±8,08 cm, *T.angustifolia* bitkisi için 66,5±8,37 cm, *C.divisa* bitkisi için 75,4±8,2 cm ve *Juncus gerardii* bitkisi için 82,6±6,63 cm olarak belirlenmiştir. Çalışma içerisinde YSA-EYH modüllerindeki *T.angustifolia, T.latifolia, C.divisa* ve *J.gerardii* bitkilerinin boy uzunluklarının sırasıyla 132-155 cm, 55-78 cm, 62,5-86,5 cm ve 70,5-92 cm arasında değiştiği gözlenmiştir. Modüllerdeki bitkilerin uzunluklarının deney periyodu içerisindeki değişimi Şekil 3.45' de gösterilmiştir. Bitki boyları için one-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldığında, YSA-

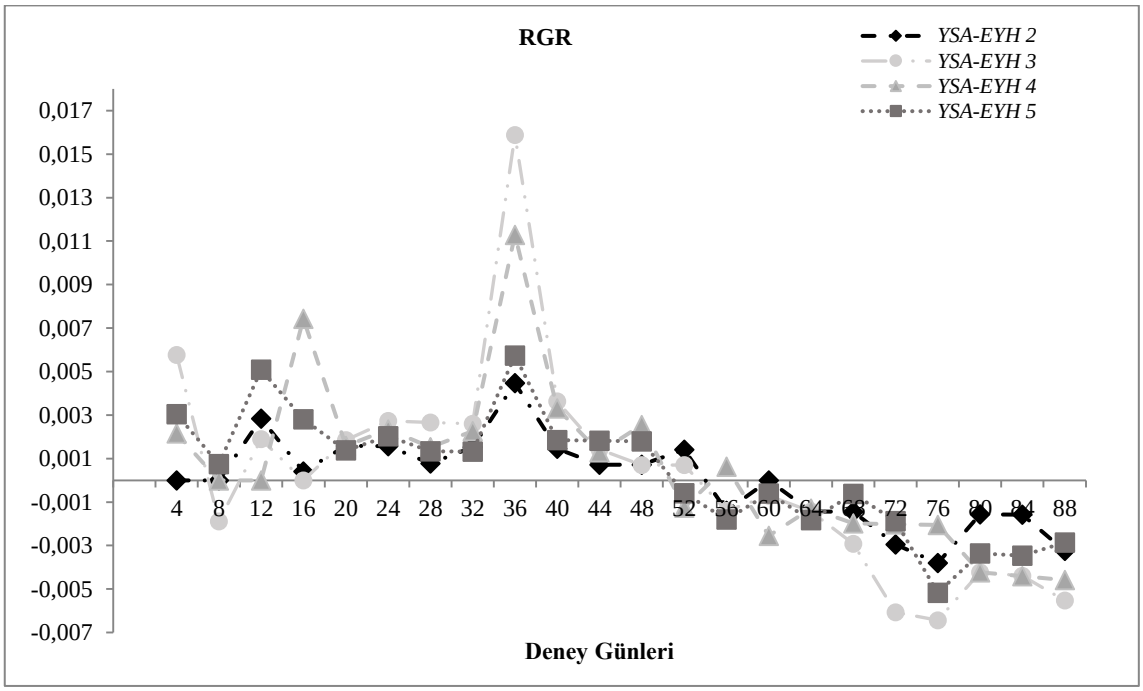
EYH modüllerinde büyüyen tüm makrofitlerin bitki boyları arasındaki önemli bir fark belirlenmiştir ($p < 0,05$). Ayrıca sulak alan modüllerindeki bitki türlerinin, yaz aylarında (Haziran, Temmuz ve Ağustos) maksimum bitki büyümesine ulaştığı gözlenmiştir. Bazı bitki yapraklarının Eylül ayından sonra hava sıcaklığının düşmesine bağlı olarak sarımsı hale geldiği gözlenmiştir.



Şekil 3. 45. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde bulunan bitkilerin araştırma periyodu içerisindeki bitki boy uzunlukları (cm)*

Araştırma periyodu boyunca YSA-EYH modüllerinde bulunan bitkilerin nispi gelişme oranları (RGR) Şekil 18' de gösterilmektedir. Araştırma periyodu boyunca YSA-EYH 2 *modülündeki T.angustifolia* bitkisinin RGR değerlerinin 56. güne kadar pozitif değerlerde olduğu ve RGR değerinin 0,004 ile 0,0003 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak 56. günden sonra RGR değeri negatif değerlerde ilerleyerek 0' ın altına düştüğü ve çalışma sonuna kadar bu eğilimini devam ettirdiği belirlenmiştir. YSA-EYH 3 modülü içerisinde bulunan *T.latifolia* bitkisinin RGR değerlerinin 56. güne kadar pozitif değerlerde olduğu ve RGR değerinin 0,016 ile 0,0006 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak bu günden sonra RGR değeri negatif değerlerde ilerleyerek 0' ın altına düştüğü ve çalışma sonuna kadar bu eğilimini devam ettirdiği belirlenmiştir. YSA-EYH 4 modülü içerisinde bulunan *C.divisa* bitkisinin RGR değerlerinin 48. güne kadar pozitif değerlerde olduğu ve RGR değerinin 0,011 ile 0,0006 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak bu

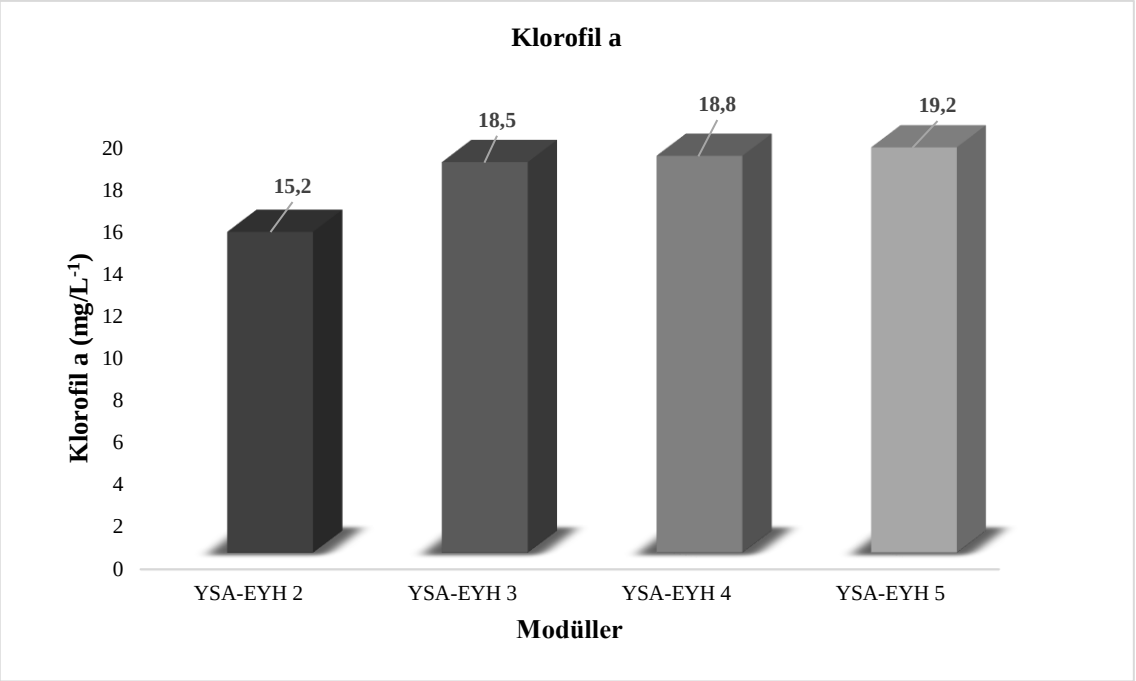
günden sonra RGR değeri negatif değerlerde ilerlediği ve çalışma sonuna kadar bu eğilimini devam ettirdiği belirlenmiştir. YSA-EYH 5 modülü içerisinde bulunan *J.gerardii* bitkisininde C.divisa bitkisinde olduğu gibi RGR değerlerinin 48. güne kadar pozitif değerlerde olduğu ve RGR değerinin 0,005 ile 0,0007 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak 48. günden sonra RGR değeri negatif değerlerde ilerleyerek 0' ın altında seyrettiği ve çalışma sonuna kadar bu eğilimini devam ettirdiği belirlenmiştir.



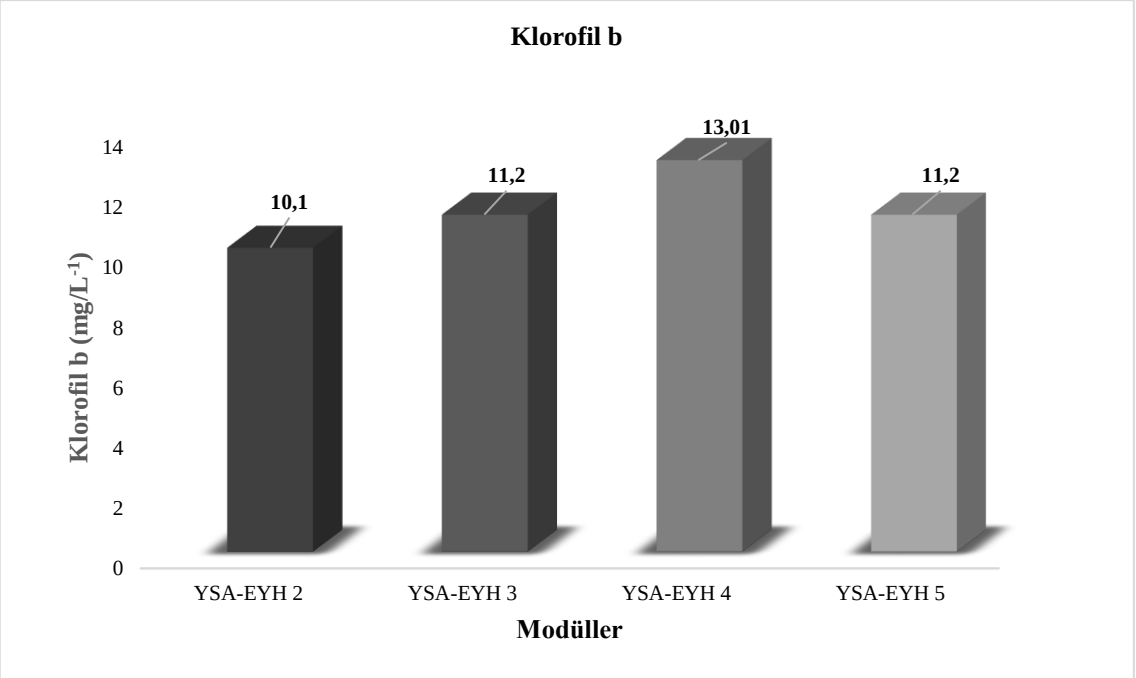
Şekil 3. 46. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde bulunan bitkilerin araştırma periyodu içerisindeki nispi gelişim oranları*

3.2.2. Bitkilerin fotosentetik pigment miktarları

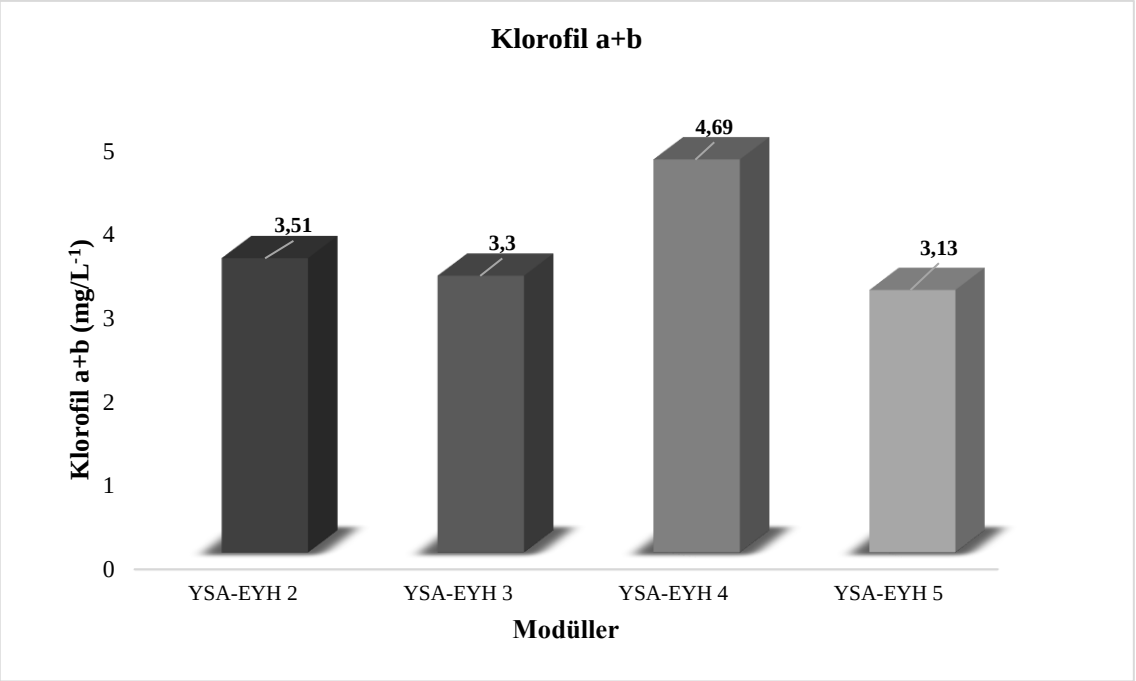
YSA-EYH modüllerindeki bitkilerin ortalama klorofil pigment konsantrasyonları (Klorofil a, b ve a+b) Çizelge 3.5' de gösterilmektedir. Çizelge 3.5' de görüldüğü gibi, modüllerin ortalama klorofil a ve b değerleri YSA-EYH 2 için 15,2±1,3 mg/L^{-1} ve 10,1±0,9 mg/L^{-1}, YSA-EYH 3 için 18,5±0,3 ve 11,2±0,17 mg/L^{-1}, YSA-EYH 4 için 18,8±2,5 mg/L^{-1} ve 13,01±3,21 mg/L^{-1} ve YSA-EYH 5 için 19,2±6,4 mg/L^{-1} ve 11,2±3,76 mg/L^{-1} olarak ölçülmüştür. ANOVA istatistiksel analizi ile YSA-EYH modüllerinin klorofil pigment konsantrasyonlarının nispeten birbirine benzer olduğu tespit edilmiştir ($p > 0,05$).



Şekil 3. 47. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde bulunan bitkilerin araştırma periyodu içerisindeki ortalama klorofil a değerleri*



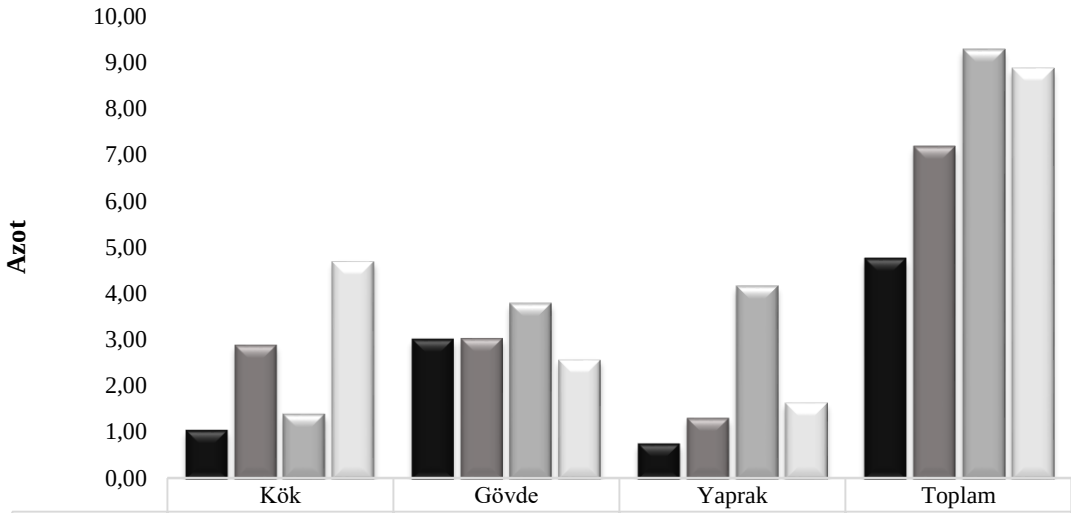
Şekil 3. 48. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde bulunan bitkilerin araştırma periyodu içerisindeki ortalama klorofil b değerleri*



Şekil 3. 49. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinde bulunan bitkilerin araştırma periyodu içerisindeki ortalama klorofil a+b değerleri*

3.2.3.Bitkilerin azot ölçümleri

Çalışma periyodu sonunda YSA-EYH modüllerine ait bitki organlarının azot içerikleri Çizelge 3.5' de gösterilmektedir. Bu Çizelgeye göre, YSA-EYH 2 ve YSA-EYH 3 modüllerindeki *T.angustifolia* ve *T.latifolia* bitkilerinin gövdesinin, kök ve yaprağından daha fazla azot içeriğine sahip olduğu, fakat YSA-EYH 4 modülündeki *C.divisa* bitkisinin yaprağının ve YSA-EYH 5 modülündeki *J.geradii* bitkisinin ise kökünün daha yüksek azot içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Modüllerden hasat edilen tüm bitkilerin azot içeriklerine bakıldığında ise, *C.divisa* bitkisinin en yüksek azot içeriğine sahip olduğu ve bu bitkiyi sırasıyla *J.gerardii*, *T.latifolia* ve *T.angustifolia* bitkilerinin takip ettiği belirlenmiştir.



	Kök	Gövde	Yaprak	Toplam
YSA-EYH 2	1,02	2,99	0,73	4,73
YSA-EYH 3	2,86	3,01	1,28	7,15
YSA-EYH 4	1,37	3,76	4,13	9,25
YSA-EYH 5	4,67	2,55	1,61	8,84

Şekil 3. 50. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinden araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki azot içerikleri (%)*

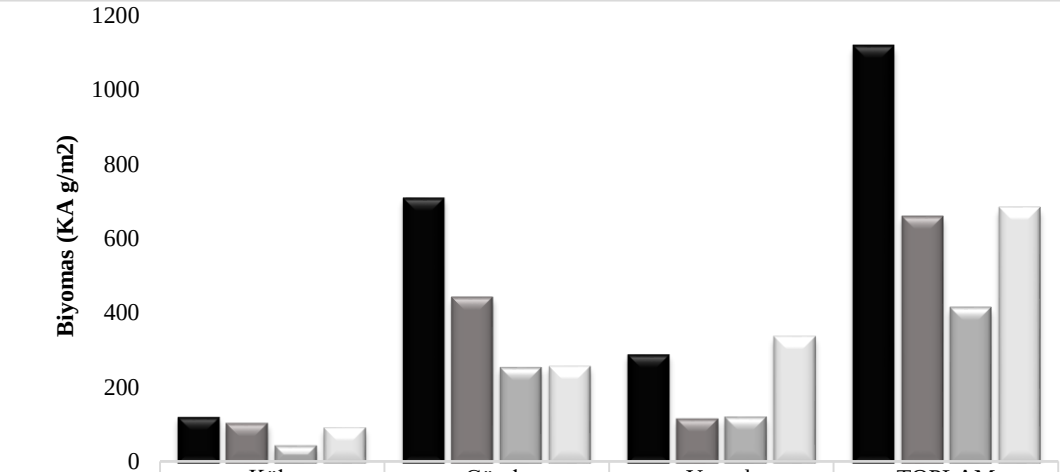
3.2.3. Bitki biyomas ölçümleri ve tahminî karbon stoğu

Çizelge 3.6. *Çalışma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin biyomas üretimleri ve C stokları*

			Yaprak	Gövde	Kök	Tüm Bitki
YSA-EYH 2	Biyomas Üretimi	KA g/m²	119,1	706,8	287,9	1113,9
	Biyomas Üretimi	KA kg/ha	1191	7068	2879	11139
	C Stoğu	KA t/ha	-	-	-	5,2353
YSA-EYH 3	Biyomas Üretimi	KA g/m²	102,2	439,7	113,6	655,5
	Biyomas Üretimi	KA kg/ha	1022	4397	1136	6555
	C Stoğu	KA t/ha	-	-	-	3,0808
YSA-EYH 4	Biyomas Üretimi	KA g/m²	41,2	250,3	118,2	409,7
	Biyomas Üretimi	KA kg/ha	412	2503	1182	4097
	C Stoğu	KA t/ha	-	-	-	1,9255
YSA-EYH 5	Biyomas Üretimi	KA g/m²	90,1	254,2	334,6	678,6
	Biyomas Üretimi	KA kg/ha	901	2542	3346	6786
	C Stoğu	KA t/ha	-	-	-	3,1894

YSA-EYH modüllerindeki deney periyodu süresince ürettikleri toplam toprak altı ve toprak üstü biyomasların Çizelge 3.6’ da gösterilmektedir. Şekil 51’ de YSA-EYH modüllerinin birbirlerine göre biyomasları gösterilmektedir. Çizelge 3.6 ve Şekil 50’ de

görüldüğü gibi bitki türlerinin biyomasları sırasıyla YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5 için 1113,9, 655,5, 1113,9, 409,7 ve 678,6 KA g / m^2 olarak belirlenmiştir. Bu noktada, YSA-EYH 2 modülündeki *T.angustifolia'* nın diğer bitki türlerine kıyasla daha fazla biyokütle ürettiği görülebilir. *T.angustifolia* bitkisini sırasıyla *J.gerardii, T.latifolia* ve *C.divisa* bitkilerinin takip ettiği görülmektedir.



	Kök	Gövde	Yaprak	TOPLAM
YSA-EYH 2	119,1	706,8	287,9	1113,9
YSA-EYH 3	102,2	439,7	113,6	655,5
YSA-EYH 4	41,2	250,3	118,2	409,7
YSA-EYH 5	90,1	254,2	334,6	678,6

Şekil 3. 51. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinden araştırma sonunda hasat edilen bitkilerin toprak altı, toprak üstü ve toplam bitki biyomasları*

Modüllerin tahmini C stoğu miktarları Çizelge 3.6' da verilmiştir. Bu verilere göre, *T.angustifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 2 modülü en fazla C stoğunu gerçekleştirirken, YSA-EYH 2 modülünü sırasıyla *J.gerardii* bitkisine sahip YSA-EYH 5, *T.latifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 3 ve *C.divisa* bitkisine sahip YSA-EYH 4 modülleri takip etmektedir.

3.3. Sediment Analizleri

3.3.1.Sediment örneklerinin fiziksel ve kimyasal analizleri

Deney periyodu sonunda YSA-EYH modüllerinden toplanan sediment örneklerinin pH değerlerine bakıldığında, *C.divisa* bitksine sahip YSA-EYH 4 modülünün 8,29 ile en

yüksek pH değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu modülü sırasıyla YSA-EYH 5, YSA-EYH 3, YSA-EYH 1 ve YSA-EYH 2 modülleri takip etmektedir.

YSA-EYH modüllerinden toplanan sediment örneklerinin EC değerlerine bakıldığında ise, *J.gerardii* bitkisine sahip YSA-EYH 5 modülünün 1436,5 µS cm^{-1} değeri ile en yüksek EC' ye sahip olduğu ve bu modülü sırasıyla YSA-EYH 3, YSA-EYH 2, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 1 modüllerinin takip ettiği belirlenmiştir.

YSA-EYH modüllerinden toplanan sediment örneklerinin redoks potansiyellerine bakıldığında ise, *J.gerardii* bitkisine sahip YSA-EYH 5 modülünün 108,4 mV değeri ile en yüksek redoks potansiyeline sahip olduğu ve bu modülü sırasıyla YSA-EYH 4, YSA-EYH 3, YSA-EYH 2 ve YSA-EYH 1 modüllerinin takip ettiği belirlenmiştir.

Çizelge 3.7. *Yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinden araştırma periyodu sonunda toplanan sediment örneklerine ait fiziksel ve kimyasal analizleri*

Modüller	pH	EC	Redoks	Toprak Fiziği			
				Kum	Kil	Toz	Toprak Bünyesi
	(-log[H+])	(µS cm^{-1})	(mV)	(%)	(%)	(%)	
YSA-EYH 1	8,06	762,5	91,85	90,68	5,21	3,94	Kum
YSA-EYH 2	8,03	1100,5	94,8	90,72	5,24	3,86	Kum
YSA-EYH 3	8,14	1355	100,28	90,7	5,25	3,91	Kum
YSA-EYH 4	8,29	958	101,25	90,69	5,23	3,89	Kum
YSA-EYH 5	8,2	1436,5	108,4	90,72	5,25	3,92	Kum

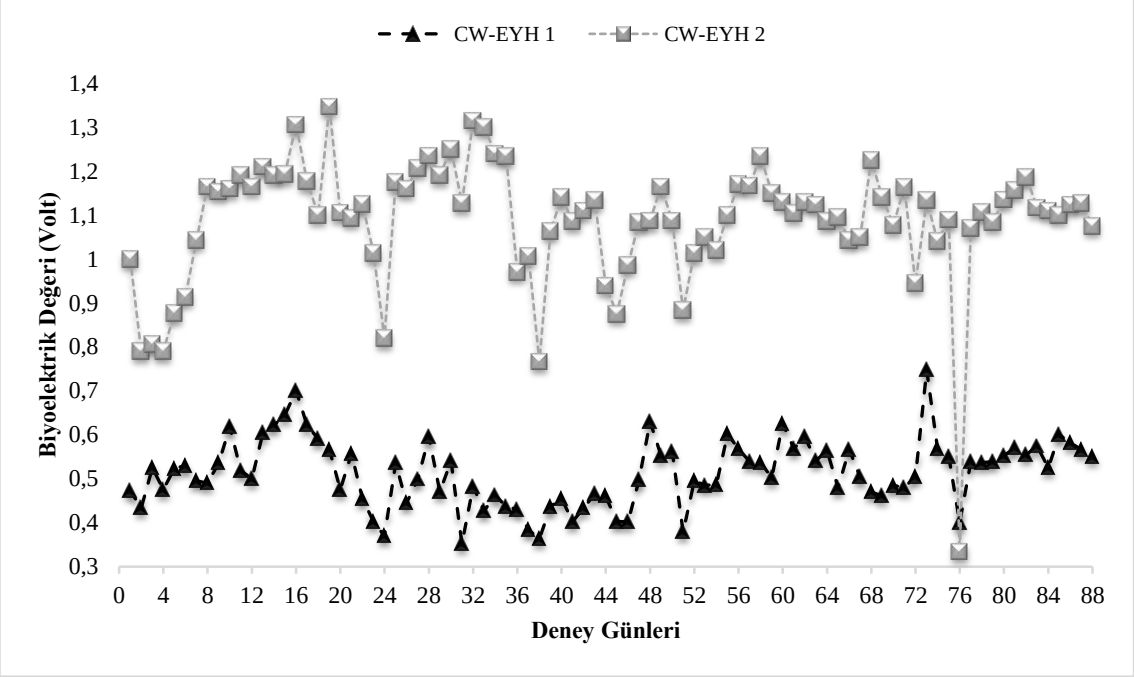
YSA-EYH modüllerinden toplanan sediment örneklerinin fiziksel özelliğine bakıldığında özelliklerine bakıldığında tüm modüllerde kullanılan dolgu malzemesinin kum bünyesine sahip topraklar grubunda yer aldığı belirlenmiştir. Çizelge 3.6' da sediment örneklerinin ayrıntılı kum, toz ve kil miktarları gösterilmektedir.

3.3.2.Azot analizi

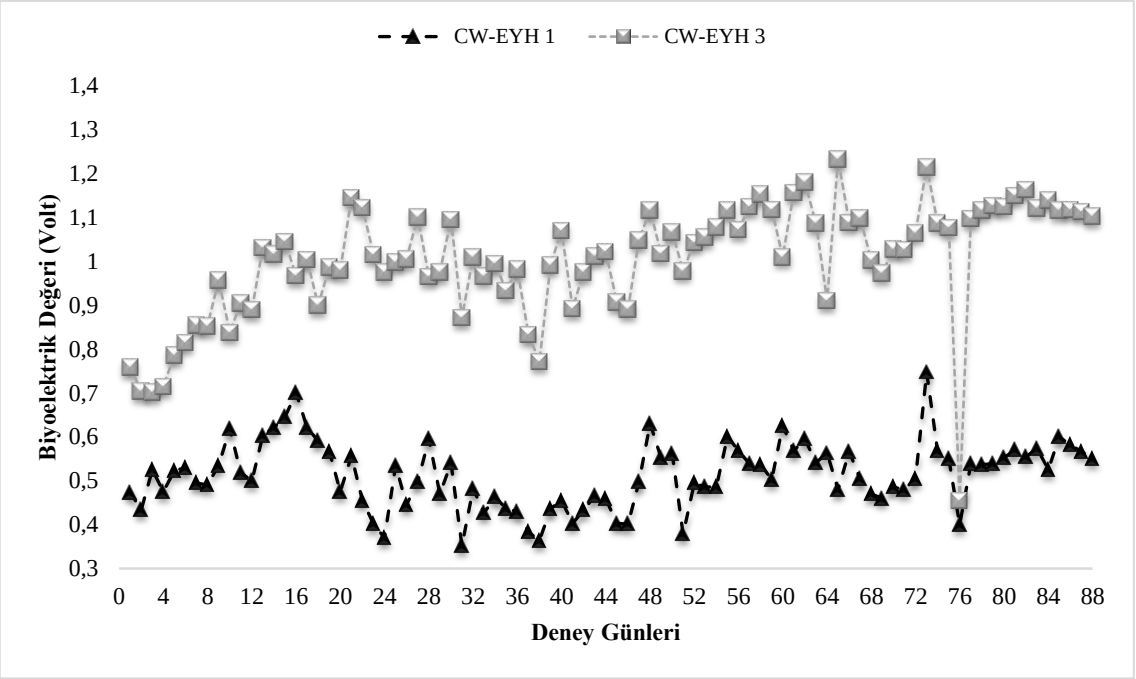
Araştırma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinden her dört günde bir toplanan sediment örneklerinin ortalama yüzde azot (%N) değerlerine bakıldığında *C.divisa* bitkisine sahip YSA-EYH 4 modülünün %0,1341' lik N değeri ile en yüksek toprak azot değerine sahip olduğunu, YSA-EYH 4 modülünü %0,1304' lük N değeri ile *T.angustifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 2 modülü, % 0,1289 N değeri ile *J.gerardii* bitkisine sahip YSA-EYH 5 modülü, % 0,1279 N değeri ile *T.latifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 3 modülü ve %0,1089 N değeri ile bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünün takip ettiği belirlenmiştir.

3.4. Biyoelektrik izleme ve ölçme

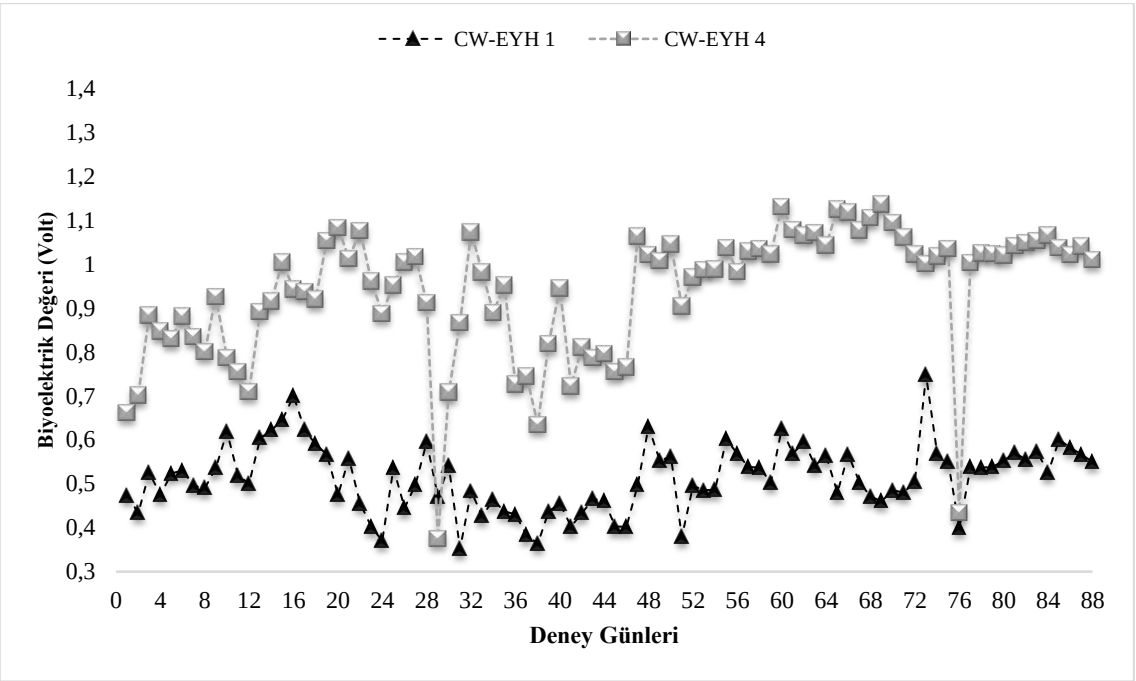
YSA-EYH modüllerinin deney süresi boyunca ortalama biyoelektrik üretimi, en yüksek ve en düşük biyoelektrik değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Ayrıca her bitkili YSA-EYH nin bitkisiz YSA-EYH ne göre biyoelektrik üretimi Şekil 3.27 arasında gösterilmiştir.



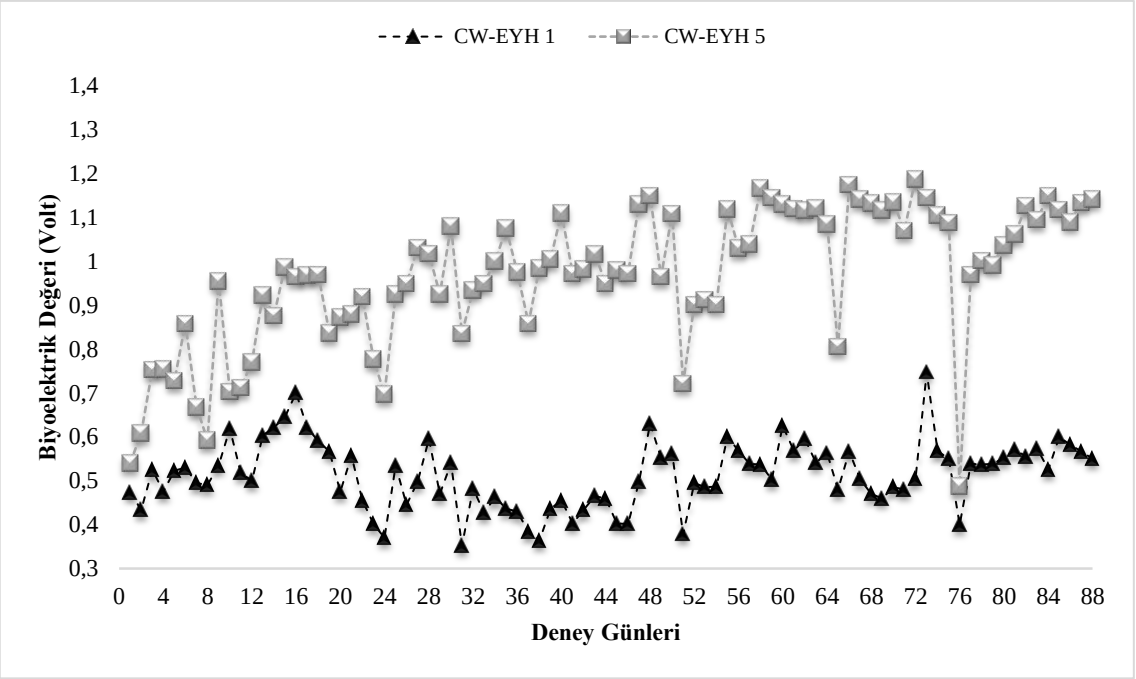
Şekil 3. 52. *Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 2 modülününün biyoelektrik üretim değerleri(mV) değişimi*



Şekil 3. 53. *Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 3 modülününün biyoelektrik üretim değerleri(mV) değişimi*



Şekil 3. 54. *Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 4 modülününün biyoelektrik üretim değerleri(mV) değişimi*



Şekil 3. 55. *Araştırma periyodu içerisinde yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 1 modülü ve yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi 5 modülününün biyoelektrik üretim değerleri(mV) değişimi*

1000Ω'luk harici direnç boyunca ölçülen bu değerlere göre ortalama 1.09±0.14 V değeri ile *T.angustifolia* bitkisine sahip olan YSA-EYH 2 modülünden en yüksek elektrik değerinin gözlendiği, bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünün ise 0.51±0.08 V değeri ile en düşük elektrik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. YSA-EYH 2 sistemini sırasıyla 1±0,13 V değeri ile *T.latifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 3 modülü. 0,97±0,16 V değeri ile *J. gerardii* bitkisine sahip YSA-EYH 5 modülü ve 0,94±0,15 V değeri ile *C.divisa* bitkisine sahip YSA-EYH 4 modülü takip etmektedir. Ortalama biyoelektrik üretimleri göz önüne alındığında, YSA-EYH 2 > YSA-EYH 3 > YSA-EYH 5 > YSA-EYH 4 > YSA-EYH 1 olarak sıralanmaktadır. Deney periyodu boyunca alınan verilerin one-way ANOVA istatistiksel analiz programı kullanılarak istatistiksel analizleri gerçekleştirildiğinde, bitkili YSA-EYH'leri ile bitkisiz YSA-EYH modülleri arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir. ($p < 0.05$). Araştırma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin en düşük ve en yüksek değerleri sırasıyla 0,35-0,75, 0,79-1,34, 0,7-1,24, 0,62-1,24 ve 0,57-1,19 olarak sıralanmaktadır.

YSA-EYH modüllerinin deney süresi boyunca ortalama ve en yüksek akım yoğunluğu değerlerine (mA/m^2) ait bulgular Çizelge 3.8'de verilmektedir.

Çizelge 3. 8. *Araştırma periyodu boyunca yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modüllerinin en yüksek, en düşük ve ortalama biyoelektrik üretim değerleri, en yüksek ve ortalama güç yoğunluğu değerleri, en yüksek ve ortalama akım yoğunluğu değerleri, ortalama kolumbik verimlilik değerleri*

Modüller	Biyoelektrik Değeri (V)			Güç Yoğunluğu (mWatt/m^2)		Akım Yoğunluğu (mA/m^2)		Kolumbik Verimlilik (%)
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama	En Yüksek	Ortalama	En Yüksek	Ortalama	Ortalama
YSA-EYH 1	0.75	0.35	0.51±0.08	8.39	1.89±2.37	19.8	10.6±7.72	4.64±5.84
YSA-EYH 2	1.34	0.79	1.09±0.14	63.1	7.47±13.7	49.8	25.2±20.01	8.28±10.4
YSA-EYH 3	1.24	0.7	1±0.13	59.5	4.12±9.06	48.9	17.1±16.2	6.07±8.42
YSA-EYH 4	1.24	0.62	0.94±0.15	14.8	4.19±4.49	38.5	22.9±19.4	6.13±5.68
YSA-EYH 5	1.19	0.57	0.97±0.16	13.1	1.91±2.71	21.6	11.4±8.6	6.57±6.84

YSA-EYH modüllerinin ortalama akım yoğunluğu değerleri ise YSA-EYH 1, YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5 modülleri için 10,6±7,72, 25,2±20,01, 17,1±16,2, 22,9±19,4 ve 11,4 + 8,6 mA / m^2 olarak sıralanmaktadır. YSA-EYH modüllerinin ortalama akım yoğunluğu değerleri göz önüne alındığında sıralama YSA-EYH 2> YSA-EYH 4> YSA-EYH 3> YSA-EYH 1 olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırma periyodu içerisinde tespit edilen en yüksek akım yoğunluğu 49,8 mA/m^2 ile YSA-EYH 2 modülünde belirlenirken, YSA-EYH 2 modülünü sırasıyla 48,9 mA/m^2 ile YSA-EYH 3 modülü, 38,5 mA/m^2 ile YSA-EYH 4 modülü, 21,6 mA/m^2 ile YSA-EYH 5 modülü ve 19,8 mA/m^2 ile YSA-EYH 1 modülleri takip etmektedir.

YSA-EYH modüllerinin deney süresi boyunca ortalama ve en yüksek güç yoğunluğu değerlerine (mWatt/m^2) ait bulgular Çizelge 3.8' de verilmiştir.

YSA-EYH modüllerinin en yüksek maksimum güç yoğunluğu değerleri YSA-EYH 1, YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5 modülleri için sırasıyla 8,39, 63,1, 59,5, 14,8 ve 13,1 mWatt / m^2 olarak belirlenmiştir. Bu verilere göre en yüksek maksimum güç yoğunluğu *T.angustifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 2 modülünde gözlenirken. YSA-EYH 2 modülünü sırasıyla, *T.latifolia* bitkisi ile YSA-EYH 3, *C.divisa* bitkisine sahip YSA-EYH 4, *J.gerardii* bitksine sahip YSA-EYH 5 ve bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülü takip etmektedir. YSA-EYH modüllerinin ortalama akım yoğunluğu değerleri ise YSA-EYH 1, YSA-EYH 2, YSA-EYH 3, YSA-EYH 4 ve YSA-EYH 5 modülleri için 1,89±2,37, 7,47±13,7, 4,12±9,06, 4,19±4,49 ve 1,91±2,71 mWatt / m^2 olarak belirlenmiştir.

Araştırma periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinin ortalama Kolumbik Verimlilik (%) değerlerine ait bulgular Çizelge 3.8' de verilmektedir.

Çizelge 3.8' ye göre YSA-EYH modüllerinin Kolumbik verimlilikleri karşılaştırıldığında *T.angustifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 2 modülünün % 8,28±10,4 değeri ile en yüksek Kolumbik Verimliliğe sahip olurken, bitkisiz kontrol modülü olan YSA-EYH 1 modülünün %4,64±5,84 ile en düşük değere sahip olduğu belirlenmiştir. YSA-EYH 2 modülünü sırasıyla %6,57±6,84, %6,13±5,68, %6,074±8,42 değerleri ile *J.gerardii* bitkisine sahip YSA-EYH 5, *C.divisa* bitkisine sahip YSA-EYH 4, ve *T.latifolia* bitkisine sahip YSA-EYH 3 modülleri takip etmektedir.

4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsanoğlu farkında olmadan çevresindeki bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalar ile kompakt ve kompleks bir ekosistem ağı oluşturmaktadır. Bu yapı, yaşamın devamlılığını sağlayan ekosistem hizmetlerinin önemli bir parçasıdır (Sagoff, 2011). Günümüzde teknoloji alanındaki gelişmeler, ekosistem hizmetlerinden bazılarının yerini alabilecek noktaya ulaşsa dahi, henüz birçok hizmetin yerini alabilecek ekolojik kökenli bir sistemi hayata geçirememiştir. Bu düşünceler ışığı altında, nüfusun ve sanayileşmenin hızla artmasının bir sonucu olarak ortaya çıkan su ve enerji sıkıntısının, yeşil teknoloji ürünü olan yapay sulak alan ekolojik yakıt hücresi modülleri kullanılarak azaltılması ya da engellenmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen bu yüksek lisans tez çalışmasında, 88 gün boyunca doğal çevre şartları altında literatüre uygun olarak modifiye edilmiş sentetik bir atık suyun, farklı vejetasyon yapısındaki YSA-EYH modüllerinden geçirilmesi sonucunda arındırılması ve bu biyolojik süreç ile eş zamanlı olarak biyoelektrik üretim potansiyelleri izlenmiştir. Tez çalışması içerisinde, ilk olarak YSA-EYH modüllerinde bulunan bitkilerin ve vejetasyon yapısının KOİ, NH_4^+, NH_3^-, toplam fosfor giderim performansları araştırılmıştır. YSA-EYH teknolojisinin ikincil kazanım ürünü olan biyoelektriğin üretimi ve araştırma sonunda hesaplanan tahmini karbon salınımında uygulanabilirliği bilimsel veriler yardımıyla tartışılmıştır. Bu biyolojik sürecin ikincil kazanım ürünü olan biyoelektrik ve araştırma sonunda hesaplanan tahmini karbon salınımının ülkemizde ve dünyada YSA-EYH teknolojisine uygulanabilirliği ile ilgili bilimsel veriler ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen verilerin, ülkemiz ve dünya literatüründe YSA-EYH konusunda gerçekleştirilecek yeni çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Sulak alan çevresinde yayılış gösteren bitki türlerinin tespit edildikten sonra biyoremediasyon kapasitelerinin belirlenmesi, su kirliliğinin yaratmış olduğu olumsuz etkilerin doğal yollar ile engellenmesi açısından önemli fikirler ortaya koymaktadır (Türker ve ark,. 2014). Bu nedenle, bu tez çalışmasında YSA-EYH modüllerinin bitkilendirilmesi için Eskişehir ilinin Sivrihisar ilçesinin Balıkdamı gölü (39° 15′ 51″ N ile 31° 35′ 52″ E) çevresinde bol miktarda yetişen bitkilerden olan *Typha latifolia, Typha angustifolia, Carex divisa* ve *Juncus gerardii* türleri kullanılmıştır.

YSA-EYH modüllerinin dört ana bileşeni; su, mikroorganizma, dolgu malzemesi ve bitki örtüsü olarak ortaya konmaktadır (Shelef ve ark. 2013; Oon ve ark. 2017). Bitkilerin toprak üstü yapılarının gözlenmesine karşın bitki gelişiminin bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir. Özellikle toprak altı yapısı olan kökün fiziksel yapısının filtrasyona olan etkisi son derece önemlidir. Ayrıca, bitki varlığı, dolgu malzemesinde bulunan mikroorganizma biyofilm gelişimi için yüzey alanını genişleterek kullanılabilirliği arttırmakta (Oon ve ark. 2017) ve biyoelektrik üretimine katkı sağlamaktadır (Oon ve ark. 2017).

YSA-EYH modüllerinde kullanılan bitkilerinin hayatta kalma oranlarına bakıldığında kültür periyodu sırasında YSA-EYH 4' de bulunan *P.australis* türü hariç tüm bitkilerin hayatta kalma oranının % 100 olduğu görülmektedir. Bu durum kültür periyodu içerisinde YSA-EYH modüllerinde kullanılan *T.latifolia, T.angustifolia, C.divisa* ve *J.gerardii* türlerinin hem iklimsel hem de operasyonel koşullara *P.australis* türünden çok daha iyi uyum sağladığını göstermektedir. Ayrıca, sulak alan modüllerindeki bitki türleri, yaz aylarında (Haziran, Temmuz ve Ağustos) maksimum bitki büyümesine ulaşırken, Eylül ayından sonra dış sıcaklığın düşmesine bağlı olarak bitkiler gelişimlerini durdurmuştur. Deney periyodu boyunca ortalama bitki boylarına bakıldığında *T.angustifolia* bitkisinin diğer bitki türlerine göre daha iyi gelişme gösterdiği belirlenmiştir. Bitki boyları için tek yönlü ANOVA istatistiksel analizi uygulandığında, YSA-EYH modüllerinde büyüyen tüm makrofitler arasında önemli farklılıklar görülmüştür ($p<0,05$). Bu sonuç, aynı dolgu malzemesi kullanılarak kurulan YSA-EYH modüllerinde yetiştirilen bitki türlerinin, atık su saflaştırma işlemi sırasında büyüme karakterlerini göstermektedir. Dolayısıyla sulak alan matrisinde farklı bitki türleri veya bitki örtüsü kullanımının, YSA-EYH modüllerinin biyolojik giderim performansının yanında biyoelektrik üretim performansını da etkilediğini belirtmektedir.

Deney periyodu boyunca türlerdeki fotosentetik pigmentlere bakıldığında, bitkilerin sağlıklı bir şekilde büyüme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. One-way ANOVA istatistiksel analizi ile YSA-EYH modüllerindeki bitkilerin klorofil pigment konsantrasyonlarının nispeten birbirine benzer olduğu bulunmuştur ($p>0.05$). Bu durum, bitki örtüsünün yapısı ile ilişkili operasyonel koşullar veya büyüme durumu gibi çeşitli nedenlerle açıklanabilmektedir (Türker ve ark. 2016).

Araştırma süresi sonunda modüllerin bitki biyomas sonuçlarına bakıldığında, YSA-EYH 2 modülündeki *T.angustifolia* bitkisinin diğer bitkilere kıyasla neredeyse iki kat fazla biyomas ürettiği tespit edilmiştir (Şekil 3.23). Bu sonuç, *T.angustifolia* bitkisinin diğer bitki türlerine göre YSA-EYH modüllerinde kullanılan dolgu malzemesi, iklim şartları ve sentetik atık suyun kompozisyonuna olan adaptasyon yeteneğinin yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Biyomas oranı YSA-EYH modülleri için son derece önemlidir. Çünkü sulak alan matrisindeki biyomas, katot katmanındaki oksijenin azalmasını hızlandırmakta ve katotun direncini azaltarak biyoelektrik üretimi arttırmaktadır (Fang ve ark. 2013). Ayrıca, sulak alan modülünde daha fazla biyomas üretimi modülün iç direncini düşürebildiği gibi hücre voltajını da arttırmaktadır. Bu durum daha fazla biyoelektrik üretimi anlamına gelmektedir. YSA-EYH 2 modülündeki *T.angustifolia* bitkisinin daha fazla biyomas üretmesi, hücre voltajının arttığını ve modülün iç direncini azaltarak biyoelektrik üretimini arttırabileceğini düşündürmektedir (Türker ve Yakar, 2017). Literatür incelendiğinde, araştırmacıların sıklıkla *T.latifolia* bitkisini kullandığı fakat *T.angustifolia* bitkisinin fazla tercih edilmediği belirlenmiştir (Ye ve ark. 2003; Türker ve ark. 20136a; Türker ve ark. 2016b, Türker ve Yakar, 2017). Bu bağlamda, yeni yapılacak çalışmalar için *T.angustifolia* bitkisinin *T.latifolia* bitkisine nazaran daha etkili olduğu ve çalışmalarda tercih edilebileceği bu çalışma ile literatürdeki yerini alacaktır.

Günümüzde her geçen gün karbon (C) salınımı artarken, yeşil ve sulak alanlar ise yok olmaktadır. Bu nedenle, karbon depolama da izlenecek etkin yol ekolojik ve ekonomik bileşenleri içermelidir (Patton ve ark., 2015). Sulak alanların, hava sıcaklıklarını ve enerji kullanımını etkileme ve dolayısıyla çok sayıda kentsel kaynaktan (örneğin; enerji santralleri) çıkan karbon emisyonlarını da azaltmak gibi yetenekleri bulunmaktadır (Nowak, 1993; Nowak ve ark., 2013). Bu özellikleri sebebiyle, sulak alanlar, yerel iklim, karbon döngüleri, enerji kullanımı ve iklim değişikliğini etkilemektedir (Abdollahi ve ark., 2000 ; Wilby ve Perry, 2006 ; Gill ve ark., 2007 ; Lal ve Augustine, 2012; Nowak ve ark., 2013). Karbon etkisini anlamanın, yıllık sera gazı emisyonları ve karbon yönetimi üzerine stratejilerin belirlenmesinde yardımcı olmaktadır (Heath ve ark., 2011; Nowak ve ark. 2013). Karbon birikimi sulak alanların kilit ekosistem hizmetlerinden biridir. Özellikle sulak alanlardaki bitki çeşitliliği karbon tutulumunun yanı sıra yaşam alanı ve floristik kalite gibi ekosistem hizmetleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Fakat yine de sulak alanlardaki bitki çeşitliliği

ve karbon tutulumu arasındaki ilişki ile ilgili literatürde çok fazla bilgi bulunmamaktadır (Means ve ark., 2016). Sulak alanlarda karbon tutulumu çoğunlukla toprakta gerçekleşirken, (Bridgham ve ark., 2006; Nahlik and Mitsch, 2010; Mitsch et al., 2012, 2013; Ahn and Jones, 2013; Bridgham et al., 2013; Lawrence ve Zedler, 2013; Neubauer, 2014; Means ve ark. 2016) vejetasyonun, topraktaki karbon tutma yeteneğini geliştirilmede önemli bir etkisi mevcuttur. Vejetasyonun bu etkisi, biyomas ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Örneğin, Typha türlerinin önemli miktarda biyomas ürettiği ve karbon depoladığı bilinmektedir. Ancak bu türlerin, istilacı ve agresif kolonizasyonundan dolayı karbon tutulumu üzerine geliştirilen projelerde istenmeyen vejetasyonun başında gelmektedir (Mitsch ve ark., 2012; Bernal ve Mitsch, 2013; Means ve ark. 2016). Bununla birlikte, yapılan çalışmalar incelendiğinde Juncus türlerinin ürettiği biyomas aracılığıyla etkili bir karbon depolama aracı olarak kullanıldığı görülmektedir (Hooker ve Stark, 2008; Tang ve ark., 2011; Gagnon ve ark., 2012; Means ve ark., 2016). Araştırma sonuçlarına bakıldığında da, bu ifadelerle paralel sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre, dizayn edilen YSA-EYH modülleri, küresel iklim değişikliğine karşı adaptasyon sürecini hızlandırmak amacıyla geliştirilmekte olan planlamaların önemli bir parçası olabilirler (Fischman ve ark., 2014; Patton ve ark., 2015)

YSA-EYH modüllerinden elde edilen çıkış sularının pH değişimleri incelendiğinde, değerlerin bitki kompozisyonuna göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bitkili YSA-EYH modülleri atık suyun pH değerini 7,81'den 7,47-7,56 aralığına düşürmüştür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, organik madde mineralizasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyonun pH değişimi üzerine önemli etkileri olduğu görülmektedir (Gray, 2004, Liu ve ark. 2011). Ayrıca, anaerobik koşulların varlığında organik materyallerin biyolojik olarak parçalanması ile yağ asitlerinin üretimi, pH'ı düşürme eğilimi göstermektedir (Ong ve ark. 2009; Yadav ve ark. 2012). Çalışma sırasında modüllere verilen organik madde miktarı KOİ konsantrasyonu ile paralel artış göstermektedir. Bu nedenle, kurulan mikrokozm ölçekli YSA-EYH modüllerinin anot katmanında anaerobik koşullara yakın şartlar oluşmuştur. Giriş ve çıkış suyu pH değeri arasında önemli bir fark ortaya çıkmıştır (Yadav ve ark. 2012). Literatüre göre, nitrifikasyon ve denitrifikasyonun gerçekleşebilmesi için pH değerlerinin 6,5 ile 9,5 aralığında olması gerekmektedir. Modüllerden alınan çıkış suyu pH değerleri incelendiğinde, nitrifikasyon ve denitrifikasyon basamaklarının gerçekleşebilmesi için uygun değerler olduğu görülmektedir. Bitkisiz YSA-EYH modülünün pH değerinin, bitkili

YSA-EYH modüllerine göre daha yüksek olması, solunum sırasında köklerden ortama salınan CO_2' nin pH düşüşünde etkisi olabileceği düşüncesini destekler niteliktedir. Sonuç olarak, modüllerde gerçekleşen fiziksel, kimyasal ve biyolojik mekanizmalar, suyun pH' sında değişikliğe sebep olmuştur. Bu değişiklik KOİ, NH_4^+, NO_3^- ve toplam fosfor giderim performanslarında ve biyoelektrik üretiminde farkların oluşmasını sağlamıştır.

YSA-EYH modüllerinin elektriksel iletkenlik (EC) değerleri incelendiğinde, giriş suyu konsantrasyonunun çıkış suyu konsantrasyonlarından düşük olduğu gözlenmiştir. Elde edilen verilerle one-way ANOVA istatistiksel analizi gerçekleştirildiğinde YSA-EYH modüllerinin giriş suyu ile çıkış suyu EC değerleri arasında anlamlı bir fark olmadığını belirlenmiştir ($p>0,05$). Bu sonuç, YSA-EYH modüllerindeki EC arıtma mekanizmasının fiziksel süreçlerle kontrol edildiğini ve bu süreçte vejetasyon etkisinin önemli olmayabileceğini düşündürmektedir. Bitkili YSA-EYH modüllerinin EC değerlerinin, bitkisiz YSA-EYH modülünden yüksek olmasının nedeni transprasyon ile EC arasında bir ilişkinin olmasıdır. Buna göre, YSA-EYH modüllerindeki vejetasyonlar, buharlaşmanın artmasını sağlayarak modüllerden suyun uzaklaştırılması ve böylelikle sudaki anyon ve katyonların derişimlerinin değişmesine neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak da, EC değerlerinde artış gerçekleşmektedir. Ancak bu sonuç, atık su içerisindeki düşük iyon konsantrasyonunun YSA-EYH modüllerinden üretilen biyoelektrik ile arasında ilişkinin düşük bir olasılık olduğunu gösterirken, NH_4^+, NO_3^- ve KOİ giderim performanslarını arttırabileceği ile ilgili önemli ipuçları bulunmaktadır.

YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış su sıcaklık değerlerinin nispeten aynı olduğu görülmektedir. Sıcaklık değişimi iklim şartları sebebiyle gerçekleşmiş ve sıcaklığın deney süresince giderim ve biyoelektrik üretim potansiyeli üzerine etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Redoks potansiyeli (ORP), biyolojik ve kimyasal prosesleri önemli derecede etkileyen biyolojik olmayan bir faktördür. Ayrıca ORP, sıvılarda atık su nitrifikasyonu ve denitrifikasyonunun izlenmesi için dolaylı bir parametredir (Ge ve ark., 2015, Caceres ve ark. 2017). Redoks potansiyeli ve çözünmüş oksijenin (ÇO) azalmasının, nitrifikasyonda rol oynayan bakterilerin oksijen kullanılabilirliği ile de ilişkisi olduğu tespit edilmiştir (Caceres ve ark. 2017). Ayrıca redoks potansiyelindeki pozitif değerler aerobik, negatif değerler ise anaerobik ortamın varlığını göstermektedir (Vymazal ve Kröpfelova, 2008). Buna ek olarak,

YSA-EYH modüllerindeki aerobik veya anaerobik ortamlardaki mikrobiyal aktiviteler redoks potansiyeli ve ÇO değeri ile sağlıklı bir şekilde tanımlanabilmektedir. Deney süresince YSA-EYH modüllerindeki ortalama redoks değerleri ve ortalama ÇO konsantrasyonları Çizelge 3.2' de gösterilmiştir. Bitkisiz YSA-EYH modülündeki ortalama redoks ve ÇO konsantrasyonu değeri 57,03 ± 17 mV ve 4,4 ± 1 olarak gözlenirken, bitkili YSA-EYH modüllerinde ortalama redoks değeri 43,4 ± 21 ila 60,9 ± 18,5 mV arasında değişmektedir. ÇO konsantrasyon değeri ise 4,86 ± 1,1 ile 5,6 ± 0,8 mg L^{-1} arasında değişiklik göstermektedir. Numunelerin redoks değerleri ve ÇO konsantrasyonlarının giriş ve çıkış değerleri arasında gözle görülür bir fark vardır. Bu fark one-way ANOVA istatistiksel analiz programı ile de kanıtlanmıştır ($p<0,05$). Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, bitkili YSA-EYH modüllerinin kök sistemlerinin sulak alan matrisine oksijen sağlaması sonucunda ortamın aerobik olması olağan bir sonuçtur. Üstelik bitkili YSA-EYH modülünde nispeten daha yüksek redoks değeri ve çözünmüş oksijenin varlığı organik maddenin tükenmesine bağlı olarak atık suyun NH_4^+ ve KOİ konsantrasyonuyla doğrudan etkileneceğini de göstermektedir (Oon ve ark. 2015). Bu nedenle, uzmanlar sulak alan modülleri tasarlarken bu görüşleri göz önünde bulundurmalıdır.

Tüm YSA-EYH modüllerinin ortalama giriş ve çıkış KOİ konsantrasyonları incelendiğinde, çıkış değerlerinin giriş değerinden düşük olduğu Çizelge 3.3 ve 3.4’ de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara one-way ANOVA istatistiksel analizi uygulandığında giriş suyu KOİ konsantrasyonları ile tüm modüllerin çıkış suyu konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak önemli farkların olduğunu görülmektedir ($p<0,05$). Bu sonuçlar, farklı vejetasyon tiplerine sahip YSA-EYH modüllerinin, organik maddeleri sentetik atık sudan uzaklaştırma yeteneğinin olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla YSA-EYH modüllerinin çevre dostu ve düşük maliyetli olması, atık sudan organik bazlı kirleticilerin uzaklaştırılması için etkili, alternatif bir seçenek olduğunu göstermektedir. Çizelge 3.4’de gösterildiği gibi, % KOİ giderim verimliliği, beş sulak alan modülü arasında YSA-EYH 3>YSA-EYH4≈ YSA-EYH 5>YSA-EYH 2>YSA-EYH 1 şeklinde bir ilişki hakimdir. Bu ilişki ile bitkili YSA-EYH modüllerinin bitkisiz kontrol YSA-EYH modülüne oranla daha yüksek KOİ giderim verimliliğine sahip olduğu gözlenmektedir. Bu sonuç, YSA-EYH modüllerinde bulunan bitki örtüsünün, bitkisiz kontrol YSA-EYH modülüne göre organik madde bozunması için daha iyi filtreleme kapasitesi oluşturduğunu göstermektedir. Öte yandan, bu

sonucun beklenmesinin sebebi, bitki örtüsüne sahip YSA-EYH modüllerinin, organik madde parçalanması ile ilişkili mikroorganizmalar için daha spesifik ve geniş bir yüzey alanı oluşturduğunun bilinmesidir. Ayrıca, bitki örtüsü bulunduğu ortamda karbon ve oksijen salınımını arttırarak, bitkili YSA-EYH modüllerini bitkisiz YSA-EYH modüllerine karşı daha avantajlı hale getirmektedir. Literatürde çeşitli çalışmalar incelendiğinde, bitki varlığının organik madde oranının azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Vymazal ve Kröpfelová 2009). Ayrıca, sulak alan matrisinde bulunan mikroorganizmalarında organik maddenin biyolojik ayrışmasına katkı sağladığı bilinmektedir (Chen ve ark., 2012). Sulak alandaki mikroorganizma miktarı ile bitki örtüsü arasındaki kuvvetli bir bağ vardır. Daha önce de bahsedildiği gibi, bitkilerin kökleri mikroorganizmalar için hem karbon kaynağı hem de geniş yüzey alanı sağlamaktadır. Öte yandan, modüllerin anot katmanlarındaki mikrobiyal bağlanma, KOİ giderim performansını etkilediği gibi modüllerden ikincil kazanım olarak yararlanılan biyoelektrik üretimini de etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında da, bitki örtüsüne sahip YSA-EYH modüllerinin anot katmanlarındaki mikrobiyal bağlanma, KOİ giderme performansını arttırdığı ve bitkisiz YSA-EYH modüle kıyasla daha fazla elektronun anottan katota geçerek biyoelektrik üretimini de arttırdığına yönelik önemli kanıtlar sunmaktadır. Çizelge 3.3' de görüldüğü üzere, aynı koşullar altında çalıştırılan bitkisiz ve bitkili YSA-EYH modülerinin çıkış sularının KOİ konsantrasyonları karşılaştırıldığında, bitkili YSA-EYH modülerinin bitkisiz YSA-EYH modülünün daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. One-way ANOVA istatistiksel analizi bitkili YSA-EYH modülleri ile bitkisiz YSA-EYH modülü KOİ konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak önemli fark olmadığını göstermektedir ($p > 0.05$). Bu sonuç, deney süresince organik madde de dahil olmak üzere daha düşük akış yükü ile ilişkili bir gösterge olabilir. Bu bağlamda, deney sırasında yüksek organik madde yüklemesi gerçekleştirilir ve uzun vadeli periyot sağlanırsa (Chen ve ark., 2012; Liu ve ark., 2013; Oon ve ark., 2017), bitkilerin KOİ giderimindeki rolünün daha sağlıklı irdelenmesi mümkün olacaktır. Açıkçası, bitki örtüsünün KOİ giderim mekanizmalarına olan etkisini derinlemesine anlamak için ileri çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Sulak alanlardaki azot giderimi temel olarak amonyaklaşma (organik nitrojenin (N) amonyuma (NH_4^+) dönüşümü), nitrifikasyon (NH_4^+' ün NO_2' ye yükseltilmesi ve bunu takiben NO_2' den NO_3^-' e oksidasyona kadar olan yol) ve temel denitrifikasyon (NO_3^-' ten

NO_2' ye NO' dan N_2O' ya N_2' ye indirgeme) aşamaları sonucunda gerçekleşmektedir (Zhang ve ark. 2010). Ayrıca, nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemi, sulak alan ortamlarında azot giderilmesinde önemli role sahiptir (Oon ve ark. 2017) Özellikle, nitrifikasyon işlemi sırasında azot yok olmaz sadece NH_4^+ NO_3^-dönüştürülür (Vymazal ve Březinová, 2015). Bu bağlamda, YSA-EYH modüllerinde azot giderme davranışını değerlendirmek için, farklı bitkilere sahip olan YSA-EYH modüllerinde amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) konsantrasyonu araştırılmıştır. Çizelge 3.3' de görüldüğü gibi, YSA-EYH modüllerinin çalışması sırasında giriş ve çıkış sularının amonyum konsantrasyonları arasında bir azalma yaşanmıştır. Bu değerler için, one-way ANOVA istatistiksel analiz programı ile yapılan analiz sonuçlarında anlamlı bir fark tespit edilmiştir ($p<0.05$). Tüm YSA-EYH modüllerinin giriş ve çıkış suyu amonyum giderim değerleri göz önüne alındığında, tüm modüllerin atık sudan NH_4^+ giderim yeteneğine sahip olduğunu ileri sürülmektedir. Öte yandan, Çizelge 3.3' de görüldüğü üzere, bitkili YSA-EYH modülerinde NH_4^+ giderim oranları bitkisiz YSA-EYH modülüne göre daha yüksektir. Fakat bitkili ve bitkisiz YSA-EYH modüllerinin verileri, one-way ANOVA istatistiksel analiz programı ile karşılaştırıldığında NH_4^+ giderim verimliliğinin açısından aralarında önemli bir fark olmadığı görülmektedir ($p>0.05$). Bu sonuçlara ek olarak, bitkili YSA-EYH modülerindeki NH_4^+ giderim oranlarının, bitkisiz YSA-EYH modülünden yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü NH_4^+'' un giderilmesi temelde oksijen varlığında meydana gelen nitrifikasyon işlemine bağlıdır. YSA-EYH modülleri içerisinde fotosentez sırasında makrofitler tarafından sağlanan ÇO, nitrifikasyon bakterileri tarafından gerçekleştirilen nitrifikasyon işlemi, organik maddenin biyolojik olarak parçalanması ve biyoelektrik üretimi için elektron alıcı olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak, vejetasyon varlığında makrofitler tarafından sağlanan ÇO ile iyi bir aerobik ortam oluşması sonucunda, NH_4^+'' ün tam nitrifikasyonuna daha uygun ortam sağlanmış olduğu anlaşılmaktadır. Oon ve ark. (2017)' na yaptığı çalışmaya göre modüllere ek havalandırma sağlandığı takdirde NH_4^+ giderim verimliliğinin arttığı görülmektedir. Bu çalışma bitki varlığında NH_4^+ gideriminin artmasını destekler niteliktedir. Tanner (1996)' nın çalışmasında, toplam azot giderimi bitki biyoması ile anlamlı doğrusal ilişki gösterdiği ispatlanmıştır. Bu çalışma içerisinde de, bitkilerin toplam biyomas oranları ile NH_4^+ giderimleri arasında ilişki olduğu ve fazla biyomasa sahip olan YSA-EYH 2 modülünün daha fazla NH_4^+ giderim performansına sahip olduğu görülmektedir. Toplam biyomas ile ortama

verilen ÇO oranı birbiriyle bağlantısı, ortamda nitrifikasyon bakterilerinin daha sağlıklı ve hızlı büyümesine yol açarak ortamı nitrifikasyon için elverişli hale getirmekte ve denitrifikasyon sürecini engellemektedir. Tüm bu verilere göre, bitkili YSA-EYH modüllerinin NH_4^+ giderim performansları, bitkisiz YSA-EYH modülden daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çalışma ile YSA-EYH modüllerinde nitrojen giderim yollarının ağırlıklı olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon olduğu sonucu da bir kez daha gözler önüne serilmiştir.

Çizelge 3.3' de görüldüğü gibi, YSA-EYH modüllerine giren atık suyun NO_3^- konsantrasyonu modüllerden alınan atık suların NO_3^- konsantrasyonlarına göre daha yüksektir. Deney periyodu süresince elde edilen NO_3^- verileri ile one-way ANOVA istatistiksel analizi gerçekleştirildiğinde giriş suyu ile modüllerden çıkan atık suyun NO_3^- konsantrasyonları arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$). Sonuçlara bakıldığında, bitkili YSA-EYH modüllerinden alınan suların NO_3^- konsantrasyonlarının bitkisiz YSA-EYH modülünün NO_3^- konsantrasyon değerlerinden yüksek olduğu ve buna bağlı olarak yüzde giderim performanslarının da bitkisiz YSA-EYH modülünden düşük olduğu tespit edilmiştir. Bitkili YSA-EYH modüllerinde NO_3^- konsantrasyonunun giderek arttığının görülmesi, bitki köklerinden oksijenin matrikse salındığını ve sulak alan matrisindeki mikrobiyal denitrifikasyonu engellediğini göstermektedir. Bilindiği gibi, denitrifikasyon ototrofik ve heterotrofik denitrifikasyon olarak gerçekleşmektedir. Ototrofik denitrifikasyon işlemlerinde, su elektrolizinden üretilen hidrojen bir elektron donörü olarak görev yapmaktadır. Bu esnada, NO_3^- bir elektron alıcısı gibi davranmaktadır. Heterotrofik denitrifikasyonda ise, organik madde bir elektron vericisi olarak görev yapmakta ve daha sonra nitratı nitrojen gazı haline dönüştürmektedir (Xu ve ark. 2017). Bununla birlikte, modüllerde anot elektrodu olarak grafitin seçilmesi, organik maddelerin oksidasyonunu kolaylaştırmıştır. Ayrıca üretilen elektronlar, katotu, ototrofik denitrifikasyon için ise anotu bir elektron verici olarak kullanmıştır (Xu ve ark. 2017). Grafitin anot olarak kullanımı ve modüllerin matrisindeki bitki köklerinin kombinasyonunun, mikroorganizmaların büyümesine ve yüzey alanının genişleyerek sayılarının hızla artmasına neden olduğu ve yüzey alanının genişlemesi sebebiyle özellikle nitrifikasyon ve denitrifikasyon işleminde nitrifikatörlerin ve denitrifikatörlerin büyümesine karşı pozitif yönde etki sağladığı da ileri sürülebilir. Bu nedenle, yüksek NO_3^- giderim verimlilikleri, bitkili YSA-EYH modülünde

grafit anotu kullanılarak elde edilebilir. Bununla birlikte, bitkili YSA-EYH modülleri matrisindeki nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemlerinde elektrotların rolü üzerine daha ileri çalışmalar yapılmalıdır. NH_4^+ ve NO_3^- giderim verilerinden çıkan sonuçların hepsi, atık suyun içindeki NH_4^+ ve NO_3^{-}un, modüllerin matrisinden biyolojik olarak uzaklaştırıldığını ve uygun operasyon sağlandığı takdirde bir YSA-EYH modülünden daha yüksek NH_4^+ ve NO_3^- giderimi elde edilebileceğini göstermektedir.

Bir sulak alan matrisindeki toplam fosfor giderimi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik mekanizmalar tarafından desteklenmektedir. Fosfor giderimi esas olarak filtrasyon ortamı, bitkiler ve bakterilerin kombinasyonunun etkisi ile kontrol edilmektedir (Lu ve ark. 2016). Bir yapay sulak alan modülünün fosfor giderim performansı, modülde kullanılan bitki örtüsüne ve bitki türlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, doğru bitki seçimi, fosfor giderimi için çok önemlidir. Çizelge 3.3' de görüldüğü gibi, bitkili YSA-EYH modüllerindeki toplam fosfor giderimi bitkisiz YSA-EYH modülüne oranla daha yüksektir. One-way ANOVA istatistiksel analizi, bitkili YSA-EYH modülleri ile bitkisiz YSA-EYH modülü arasında anlamlı fark göstermektedir ($p<0.05$). Bu sonuca dayanarak, bitkili YSA-EYH modüllerinde yüzey alanının nispeten büyük olduğunu ve giderim sırasında bitkisiz YSA-EYH modülünün matrisinde daha fazla fosfor bulunduğunu düşünülmektedir. Buna bağlı olarak, YSA-EYH modüllerinde bitki örtüsünün varlığının, atık sudaki fosforun adsorpsiyonu için hidrolik iletkenliğini azaltmış ve böylece daha iyi fosfor giderimi sağlanmıştır. Çeşitli çalışmalardan elde edilen veriler de bu olguyu desteklemektedir. Çünkü, su bitkilerinin atık sudan dokularına kadar fosforun alınmasında önemli bir kapasiteye sahip olduğu bilinmektedir (Vymazal, 2007; Lu ve ark., 2016). Ayrıca anaerobik koşullar, fosfor salınımı sonucunda sudaki fosfor konsantrasyonunu arttırmaktadır (Reed ve ark., 1998; Vymazal, 2001). Bu durum deney süresince gözlenen redoks potansiyelleri ile toplam fosfor giderimi arasında bir bağ ortaya koymaktadır. Bu sonuca göre, YSA-EYH 2 modülünde daha fazla arıtım olması bu olguyu desteklemektedir. Tüm bunlara ek olarak, hava sıcaklıkları ve mevsimlerinde toplam fosfor giderimi üzerine etkisi bulunmaktadır. Yaz aylarında düşük toplam fosfor giderim oranı görülmesinin sebebi, yüksek sıcaklığın mikrobik fosfor biriktirme süreçleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmasıdır (Kadlec, 2016). Tüm bu bilgiler ışığında, bitkili YSA-EYH modüllerinin toplam fosfor giderimi için yapılacak çalışmalarda kullanılabileceği önerilmektedir.

Farklı bitki vejetasyonlarına sahip YSA-EYH modüllerden biyoelektrik üretimini belirlemek amacıyla voltaj değerlerinin karşılaştırmalı günlük ölçümleri yapılmış ve bitki örtüsünün YSA-EYH modüllerinin biyoelektrik üretimi üzerine etkisi araştırılmıştır. One-way ANOVA istatistiksel analiz sonuçları, deney süresince bitkili YSA-EYH modülleri ile bitkisiz kontrol YSA-EYH modüllerinin biyoelektrik üretim potansiyelleri arasında önemli farkların olduğunu göstermektedir ($p<0,05$). Bu sonuçlar, YSA-EYH modüllerinin matrislerindeki bitki örtüsünün varlığının biyoelektrik üretimi üzerine mutlak bir etkisi olduğunu göstermektedir. Çünkü, bitkisiz YSA-EYH modülünün biyolelektrik üretim potansiyeli, bitkili YSA-EYH modüllerinin biyolelektrik üretim potansiyelinden daha azdır. Bu durumdan yola çıkarak, biyoelektrik üretmek amacıyla bitkili YSA-EYH modüllerinin matrislerinin, bitkisiz YSA-EYH modülünün matrisine kıyasla özellikle sucul ekosistemlerin anaerobik ortamlarında bol miktarda bulunan elektrojenik bakteri türlerince (*Geobakter* spp., gibi (Logan ve ark., 2007) daha zengin olduğu tespiti rahatlıkla yapılabilmektedir. Buna göre, sulak alan matrisindeki bitki örtüsü, modülün anot katmanına ulaşan biyolojik olarak bozunabilir organik maddenin varlığını arttırmaktadır. Buna ek olarak, YSA-EYH modülünün biyoelektrik üretiminin de daha verimli hale gelmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca, atık su bir YSA-EYH modülü içerisinde modülün tabanından yukarı doğru hareket etmektedir. Buna bağlı olarak, bitkili YSA-EYH modülleri için daha uzun bir hidrolik bekletme süresi, atık su YSA-EYH modülü matrisinde katot bölmesine ulaşmadan önce organik maddenin daha fazla parçalanmasına izin verecektir. Tüm bunlara ek olarak, bitkili YSA-EYH modülleri bitkisiz YSA-EYH modülü ile karşılaştırıldığında organik asitlerin oksitlenmesinden daha fazla H^+ (proton) ve e^- (elektron) üretildiğini, dolayısıyla bitki varlığının deney periyodu boyunca voltaj artışına katkıda bulunduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca, bitki örtüsü varlığı bir taraftan biyoelektrik üretimine katkı sağlarken, diğer taraftan da ortamdaki kirleticilerin giderimine katkı sağlamaktadır. Bu nedenlerle, mühendislerin tasarladıkları YSA-EYH modüllerinden biyoelektrik üretimini en üst düzeye çıkarmaları için bitkili YSA-EYH modülü dizayn etmeleri ve en fazla biyoelektrik üretim verimliliğine sahip olan *T.angustifolia* bitkisini tercih etmelerinin daha doğru bir yol olduğunu önermekteyiz.

Bilindiği gibi güç yoğunluğu akım yoğunluğu ile ilişkilidir. Şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen maksimum güç ve akım yoğunlukları

araştırılmış ve güç yoğunlukları sırasıyla, Yadav ve ark. (2012) 15,73 mW m^{-2} , Zhao ve ark. (2013) 9,4 mW m^{-2} , Liu ve ark. (2013) 12,42 mW m^{-2} ve Fang ve ark. (2013) 8,98 mW m^{-2} olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda anot yüzey alanı ve anot yerinin güç ve akım yoğunluğuna etkileri araştırılmıştır. Fakat bitki çeşitliliğinin güç ve akım yoğunluğuna olan etkisi henüz çalışılmamıştır. Yapılan bu çalışma ile bitki örtüsünün güç ve akım yoğunluğuna etkisi araştırılarak literatürdeki bu boşluk doldurulmak istenmektedir. Çizelge 3.8' e bakıldığında, en yüksek değerimizin 7,47±13,7 MWa ve 25,2 ± 20,01 mA/m^2olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç diğer yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında oldukça önemlidir. Buna göre, YSA-EYH modülü matrisindeki bitki örtüsünün güç ve akım yoğunluğuna etkisi açıkça görülmektedir. Bu durumun, bitkili YSA-EYH modüllerinin ve bitkisiz kontrol modülünün iç direncinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna göre, iç direnç, ekolojik yakıt hücresi cihaz verimliliğinde sınırlayıcı faktörlerden biri olarak tanımlanmakta ve bitki örtüsünün, YSA-EYH modüllerinde biyoelektrik üretimi sırasında taşıma sınırlaması, kinetik ve ohmik parametrelere olumlu şekilde etkilenebileceğini göstermektedir (Liu ve al., 2013; Oon ve ark., 2015). Ayrıca, deney süresince bitkili ve bitkisiz YSA-EYH modüllerinde farklı organik substrat bozunum hızı olduğu sonucuna varılabilir. Bu nedenle, bitki örtüsüne sahip YSA-EYH modüllerinde daha fazla organik substrat bozunum hızı, anottan katottaki elektron akışını, kontrol modülüne kıyasla olumlu bir şekilde etkilemektedir. Bu nedenle, mühendisler bitkili YSA-EYH modüllerindeki yüksek biyolojik bozunma potansiyelinin olumlu etkisini artan biyoelektrik üretimi ile maksimize ederek modüllerin uygulama alanlarını genişletebilirler.

Çalışmada sonunda ölçülen ortalama kolombik verimlilik değerleri, literatür ile karşılaştırıldığında tıpkı güç ve akım yoğunluğu gibi ortalama bir değere sahiptir. Yapılan çalışmalarda, atık sudaki mikroorganizmaların bolluğunun kolombik verimliliği azalmasında etkili olduğu bulunmuştur. Logan ve arkadaşları (2006) , kolombik verimliliğin azaltılmasının rekabetçi süreçler ve mikrobiyal büyümeden kaynaklanabileceğini bildirmiştir. Mikroorganizmaların elektrodu elektron alıcısı olarak kullanamamasının sebebi, fermantasyon veya metanogenez gibi diğer işlemler için substratı elektron alıcı olarak kullanması düşünülmektedir. Bu ifadeden yola çıkarak, kolombik verimliliğin deney periyodu sonuna denk gelen Ekim ayı içerisinde ve vejetasyon süreci sonlandığında yapıldığı düşünülürse deneyin erken evrelerinde kolombik verimliliğin fazla olması olası bir sonuçtur.

Yine de bu sonuçlar hem bitkisiz YSA-EYH hem de bitkili YSA-EYH modüllerindeki mikroorganizmaların doğrudan katottan elektron transferini gerektirmediğini göstermektedir. Ayrıca, farklı bitki türleri ile kurulan YSA-EYH modüllerinin farklı koulumbik verimliliklerine sahip olması bitki çeşitliliğinin koulumbik verimlilik üzerindeki etkisini göstermektedir.

Bu deney, bitki örtüsünün YSA-EYH modüllerinde atık su arıtımı ve biyoelektrik üretimine olan etkisine olan araştırmanın bir sonucudur. Bitkili YSA-EYH modülleri, bitkisiz YSA-EYH modülü ile karşılaştırıldığında KOİ, NH_4^+, toplam fosfor giderimi ve biyoelektrik üretimi açısından daha etkilidir. Bu bitkilerden *T.angustifolia* bitkisine sahip YSA-EYH modülü, biyoeletrik üretiminin (0.94-1 V) yanı sıra yüksek KOİ (% 85-88), NH_4^+ (% 95-97) ve toplam fosfor (% 95-97) çıkarma verimliliğine sahiptir; modüller arasında sadece bitkisiz YSA-EYH modülünden NO_3^- giderimi (% 63) sırasında en yüksek verim alınmıştır. Buna bağlı olarak, bitkili YSA-EYH modülleri mikroorganizmalara daha spesifik bir alan sağlamaktadır. Ayrıca, organik bileşiklerin biyolojik olarak parçalanmasından ve anottan katotta doğru elektron akışında katalizör faaliyetlerini arttırmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma ile mühendislerin YSA-EYH modüllerinde giderim verimliliğini ve biyoelektriği en üst düzeye çıkarmak için bitkili YSA-EYH modülü kullanılabileceğini hatta *T.angustifolia* bitkisinin en uygun bitki olduğu düşüncesini önermekteyiz.

KAYNAKÇA

Abdollahi, K.K., Ning, Z.H., Appeaning, A., (2000). Global Climate Change and the Urban Forest. *Baton Rouge*, 31-44.

Abou-Elela, S.I., Golinielli, G., Abou-Taleb, E.M., Hellal, M.S. (2013). Municipal wastewater treatment in horizontal and vertical flows constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 61, 460-468.

Ahn, C., Jones, S. (2013) Assessing organic matter and organic carbon contents in soils of created mitigation wetlands in Virginia. *Environmental Engineering Research*, 18(3), 151-156.

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.

Aronson, J., Clewell, A., Moreno-Mateos, D. (2016). Editorial: Ecological restoration and ecological engineering: Complementary or indivisible?. *Ecological Engineering*, 91, 392-395.

Banaszak, J.E., Reed, D.T., Rittmann, B.E. (1998). Ecosystem management: what is it really? *Landscape and Urban Planning,* 40, 9-20.

Barot, S. Lata, J-C, Lacroix, G. (2012). Meeting the relational challenge of ecological engineering within ecological Sciences. *Ecological Engineering*, 45, 13-23.

Bernal, B., Mitsch, W. J. (2013). Carbon Sequestration in Two Created Riverine Wetlands in the Midwestern United States. *Journal of Environmental Quality*, 42, 1236-1244.

Bridgham, S.D., Cadillo-Quirox, H., Keller, J.K., Zhuang, Q.(2013) Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 19,1325-1346.

Bridgham, S.D., Megonigal, J.P, Keller, J.K, Bliss, N., Trettin, C. (2006). The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 26(4), 889-916.

Cáceres, R., Malińska, K., Marfàa, O. (2017). Nitrification within composting: A review. *Waste Management,* In Press, Corrected Proof, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.049.

Chen, S. (2015). The evaluation indicator of ecological development transition in China's regional economy. *Ecological Indicators*, 51, 42-52.

Chen, Y., Wen, Y., Zhou, Q., Vymazal, J. (2014). Effects of plant biomass on nitrogentransformation in subsurface-batch constructed wetlands: A stable isotope andmass balance assessment. *Water Research,* 63, 158–167.

Chen, Z., Wu, S., Braeckevelt, M., Paschke, H., Kästner, M., Köser, H., Kuschk, P., (2012). Effect of vegetation in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating sulphate rich groundwater contaminated with a low and high chlorinated hydrocarbon. *Chemosphere,* 89, 724-731.

Contanza, R. (2012). Ecosystem health and ecological engineering" *Ecological Engineering,* 45, 24-29.

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. *Ecological Engineering,* 77, 314-323.

Corbella, C., Guivernau, M., Viñas, M., Puigagut, J. (2015). Operational, design and microbial aspects related to power production with microbial fuel cells implemented in constructed wetlands. *Water Research,* 84, 232-242.

Costanza, R. (1989). Model goodness of fıt - a multıple resolutıon procedure. *Ecological Modelling,* 47, 199-215.

Costanza, R. (2012). Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering,* 45,24-29.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M.,Hannon, B.,Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G.,Sutton, P., van den Belt M., (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature,* 387, 253-260.

D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, K., Leskinen, P., Matthies, B. D., Toppinen, A., (2017). Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production,* 168, 716-734.

Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., Liu, R. (2015a). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland–Microbial fuel cells. *Water Research,* 85, 38-45.

Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Wang, W. (2015b). Nutrient and organics removal from swine slurry with simultaneous electricity generation in an alum sludge-based constructed wetland incorporating microbial fuel cell technology. *Chemical Engineering Journal,* 266, 74-81.

Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (2006). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC):IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*, 4.

Fang, Z., Cao, X., Li, X.X., Wang, H., Li, X.N. (2017). Electrode and azo dye decolorization performance in microbial-fuel-cell-coupled constructed wetlands with different electrode size during long-term wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 238, 450-460.

Fang, Z., Song, H. L., Cang, N., Li, X.N. (2015). Electricity production from Azo dye wastewater using a microbial fuel cell coupled constructed wetland operating under different operating conditions. *Biosensors & Bioelectronics*, 68, 135-141.

Fang, Z., Song, H-L., Cang, N., Li, X-N. (2013). Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresource Technology,* 144, 165-171.

Figge, F., Hahn, T., Barkemeyer, R. (2014). The If, How andWhere of assessing sustainable resource use. *Ecological Economics,* 105, 274-283.

Fischman, R.L., Meretsky, V.J., Babko, A., Kennedy, M., Liu, L., Wambugu, M. (2014). Planning for adaptation to climate change: Lessons from the U.S. National Wildlife Refuge System. *BioScience*, 64, 993-1005.

Gagnon, V., Chazarenc, F., Koiv, M., Brisson, J. (2012). Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland. *Water Research,* 46, 5305-5315.

Garcia, D.A. (2017). Green areas management and bioengineering techniques for improving urban ecological sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 30, 108-117.

Ge, S.. Wang, S., Yang, X., Qiu, S., Li, B., Peng, Y. (2015). Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review. *Chemosphere,* 140, 85-98.

Gendron, C. (2014). Beyond environmental and ecological economics: Proposal for an economic sociology of the environment. *Ecological Economics*, 105, 240-253.

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.

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., Pauleit, S., Theuray, N., Lindley, S. J. (2008). Characterising the urban environment of UK cities and towns: A template for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 87, 210-222.

Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S., (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment* 33 (1), 115-133.

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.

Gray, D. R., 2004, The gypsy moth life stage model: landscape-wide estimates of gypsy moth establishment using a multi-generational phenology model. *Ecological Modelling,* 176, 155-171.

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.

Guo, L. L., Qu, Y., Tseng, M. L. (2017). The interaction effects of environmental regulation and technological innovation on regional green growth performance. *Journal of Cleaner Production,* 162, 894-902.

Heath, L.S., Smith, J.E., Skog, K.E., Nowak, D.J., Woodall, C.W. (2011). Managed forest carbon estimates for the U.S. Greenhouse Gas Inventory 1990-2008. *Journal of Forestry,* 5, 167-173.

HM Government. (2011). Enabling the transition to a green economy: Government and business working together.

Hooker, T. D., Stark, J. M. (2008). Soil C and N cycling in three semiarid vegetation types: Response to an in situ pulse of plant detritus. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 2678-2685.

Jänicke, M. (2012). Green growth: from a growing eco-industry to economic sustainability. *Energy Policy*, 48, 13-21

Jones, R.S., Yoo, B. (2011). Japan's new growth strategy to create demand and jobs. *Economics Department Working Papers,* 24, 61-90.

Kadlec, R. H. (2016). Large Constructed Wetlands for Phosphorus Control: A Review. *Water*, 8, 243-279.

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.

Kundzewicz, Z. W., Kowalczak, P. (2014). Water-related conflicts in urban areas in Poland. Hydrologıcal Scıences Journal-Journal Des Scıences Hydrologıques, 56, 588-596.

Lal, R., Augustine, B. (2012). Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. *Springer,* New York, 385.

Lawrence, B.A., Zedler, J.B. (2013). Carbon sequestration by Carex stricta tussocks: a restorable ecosystem service? *Wetlands*, 33, 483-493.

Leto, C., Tuttolomondo, T., Bella, S.L., Leone, R. (2013). Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland phytoremediation of treated urban wastewater wity Cyperus alternifolius L. and Typha latifolia L. ın the west of Sicily (Italy). *Ecological Engineering,* 61, 282–291.

Li, W-W., Sheng, G-P., Liu, X.W., Yu, H-Q. (2011). Recent advances in the separators for microbial fuel cells. *Bioresource Technology,* 102, 244-252.

Liu, L., Zhao, X.H., Zhao, N., Shen, Z., Wang, M., Guo, Y.Z., Xu, Y.B. (2013). Effect of aeration modes and influent COD/N ratios on the nitrogen removal performance of vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 57, 10-16.

Liu, S.T., Song, H.L., Li, X.N., Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal Of Photoenergy*, 10 pages.

Liu, S.T., Song, H.L., Wei, S.Z., Yang, F., Li, X.N. (2014). Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow

constructed wetland - Microbial fuel cell systems. *Bioresource Technology,* 166, 575-583.

Liu, X.W., Sun, X.F., Huang, Y.X., Sheng, G.P., Wang, S.G., Yu, H.Q. (2011). Carbon nanotube/chitosan nanocomposite as a biocompatible biocathode material to enhance the electricity generation of a microbial fuel cell. *Energy & Environmental Science,* 4, 1422-1427.

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.

Logan, B., Cheng, S., Watson, V., Estadt, G. (2007).Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology,* 41, 3341-3346.

Logan, B.E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology,* 40, 5181-5192.

Loiseau, E., Saikku, L., Antikainen, R., Droste, N., Hansjürgens, B., Pitkänen, K., Leskinen, P., Kuikman, P.,Thomsen, M. (2016). Green economy and related concepts: An overview. *Journal of Cleaner Production,* 139,361-371.

Lv,T., Carvalho, P.N., Zhang, L., Zhang, Y., Button, M., Arias, C.A., Weber, K.P., Brix, H. (2017). Functionality of microbial communities in constructed wetlands used for pesticide remediation: influence of system design and sampling strategy. *Water Research,* 110, 241-251.

Ma. Na., Wang, W., Gao, J., Chen, J. (2017) Removal of cadmium in subsurface vertical flow constructed wetlands planted with Iris sibirica in the low-temperature season. *Ecological Engineering,* 109 (A), 48-56.

Mason, C. F. ve Bryant, R. J., 2017, "Production, Nutrient Content and Decomposition of Phragmites Communis Trin. and Typha angustifolia L.. *Journal of Ecology*, 63, 71-95.

Massoud, M.A., Tarhini,A., Nasr, J.A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Envıronmental Management,* 90, 652-659.

Matamoros, V.,Rodriguez, Y.,Bayona, J. M., (2017), Mitigation of emerging contaminants by full-scale horizontal flow constructed wetlands fed with secondary treated wastewater, *Ecological Engineering*, 99, 222-227.

Mathews, A.J. (2012). Green growth strategies. *Korean İnitiatives*, 44, 761-769.

Means, M. M., Ahn, C., Korol, A. R., Williams, L. D., (2016), Carbon storage potential by four macrophytes as affected by planting diversity in a created wetland, *Journal of Environmental Management*, 165, 133-139.

Megonigal, J.P., Keller, J.K., Bliss, N.B., Trettin, C. (2006). The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 26, 889-916.

Mitsch, W. J., (1993). Ecologıcal Engıneerıng - A Cooperatıve Role Wıth The Planetary Lıfe Support System. *Environmental Science & Technology*, 27, 438-445.

Mitsch, W. J., (2014). Unifying a city with its natural riverine environment for the benefit of both: Extending Ohio's only wetland of international importance to a much larger river ecosystem corridor. *Ecological Engineering*, 72,138-142.

Mitsch, W. J., Zhang, L., Stefanik, K. C., Nahlik, A. M., Anderson, C. J., Bernal, B., Hernandez, M., Song, K., (2012). Creating Wetlands: Primary Succession, Water Quality Changes, and Self-Design over 15 Years. *Bioscience*, 62, 237-250.

Mitsch, W.J. (2012). What is ecological engineering?. *Ecological Engineering*, 45, 5-12.

Mitsch, W.J. ve Jorgensen, S.E. (2003). Ecological engineering: A field whose time has come. *Ecological Engineering*, 20, 363-377.

Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, U., Zhang, L., Anderson, C.J., Jorgensen, S.E., Brix, H. (2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28, 583-597.

Mitsch, W.J., Mander, U. (2017). Editorial: Ecological engineering of sustainable landscapes. *Ecological Engineering*, 108, 351-357.

Mohan, S.V., Mohanakrishna, G., Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102, 7036-7042.

Mudakkar, S.R., Zaman, K., Khan, M.M., Ahmad, M. (2013). Energy for economic growth, industrialization, environment and natural resources: Living with just enough. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 25, 580-595.

Nahlik, A.M, Mitsch, W.J. (2010) Methane emissions from created riverine wetlands. *Wetlands*, 30(4),783-793.

Neubauer, S.C. (2014) On the challenges of modeling the net radiative forcing of wetlands: reconsidering Mitsch et al. 2013. *Landscape Ecology,* 19,571-577.

Nielsen, J.P. (2003). Evaluation of malting barley quality using exploratory data analysis. II. The use of kernel hardness and image analysis as screening methods. *Journal of Cereal Science*. 38, 247-255.

Nowak, D.J. (1993). Atmospheric carbon reduction by urban trees. *Journal of Environmental Management.* 37, 207-217.

Nowak, D.J., Greenfield, E.J., Hoehn, R.E., Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution,* 178, 229-236.

Oliveira, J.A.P.O., Doll, C.N.H., Moreno-Peñaranda, R., Balaban, O. (2014). Urban Biodiversity and Design. *Global Environmental Change,* 1, 461-468.

Ong, S.A., Uchiyama, K., Inadama, D., Ishida, Y., Yamagiwa, K. (2010). Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants. *Bioresource Technology,* 101, 7239-7244.

Ong, S.A., Uchiyama, K., Inadama, D., Yamagiwa, K. (2009). Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland. *Journal of Hazardous Materials,*165, 696-703.

Oon, Y. S.,Ong, S. A.,Ho, L. N.,Wong, Y. S.,Oon, Y. L.,Lehl, H.,Thung, W. E. (2017). Microbial fuel cell operation using nitrate as terminal electron acceptor for simultaneous organic and nutrient removal. *International Journal of Environmental Science and Technology,* 14, 2435-2442.

Oon, Y.L., Ong, S.A., Ho, L.N., Wong, Y.S., Dahalan, F.A., Oon, Y.S., Lehl, H.K., Thung, W.E. (2016). Synergistic effect of up-flow constructed wetland and microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. *Bioresource Technology,* 203, 190-197.

Oon, Y.L., Ong, S.A., Ho, L.N., Wong, Y.S., Oon, Y.S., Lehl, H.K., Thung, W.E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology,* 186, 270-275.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2009). Declaration on Green Growth, Paris.

Paredes, J., Andreu, J., Solera, A. (2010). A decision support system for water quality issues in the Manzanares River (Madrid, Spain). *Science of the Total Environment,* , 408, 2576-2589.

Patton, D., Bergstrom, J. C., Moore, R., Covich, A. P. (2015). Economic value of carbon storage in US National Wildlife Refuge wetland ecosystems, *Ecosystem Services*, 16, 94-104.

Rasilainen, K., Eilu, P., Halkoaho, T., Iljina, M., Karinen, T. (2010). Quantitative mineral resource assessment of undiscovered PGE resources in Finland. *Ore Geology Reviews,* 38, 270-287.

Rousseau, D.P.L., Vanrolleghem, P.A., De Pauw, N. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Water Research,* 38, 1484-1493.

Sagoff, M. (2011). The quantification and valuation of ecosystem services, *Ecological Economics,* 70, 497-502.

Shelef, O., Gross, A., Rachmilevitch S. (2013). Role of plants in a constructed Wetland: current and new perspectives. *Water*, 5, 405-419

Srikanth, S., Mohan, S.V. (2012), Change in electrogenic activity of the microbial fuel cell (MFC) with the function of biocathode microenvironment as terminal electron accepting condition: Influence on overpotentials and bio-electro kinetics. *Bioresource Technology,* 119, 241-251.

Stuermer, M. (2017). Industrialization and the demand for mineral commodities. *Journal of International Money and Finance,* 76, 16-27.

Tang, Y.S.,Wang, L., Jia, J.W., Fu, X.H., Le, Y.Q., Chen, X.Z., Sun, Y. (2011). Response of soil microbial community in Jiuduansha wetland to different successional stages and

its implications for soil microbial respiration and carbon turnover. *Soil Biology & Biochemistry, 43*, 638-346.

Tanner, C.C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems - A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*, 7, 59-83.

The Stationery Office Energy Act (2013). http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2013/32/pdfs/ukpga_20130032_en.pdf

Türker, O.C., Bocuk, H., Yakar, A. (2013). 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., Ture, C., Bocuk, H., Yakar, A. (2014). Constructed Wetlands As Green Tools for Management of Boron Mıne Wastewater. *International Journal of Phytoremediation*, 16,537-553

Türker, O.C., Yakar, A., (2017). A hybrid constructed wetland combined with microbial fuel cell for boron (B) removal and bioelectric production. *Ecological Engineering*, 102, 411-421.

Türker, O.C.,Ture, C.,Bocuk, H., Yakar, A. (2016). Phyto-management of boron mine effluent using native macrophytes in mono-culture and poly-culture constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 94, 65,74.

Tüker, O.C., Türe, C., Böcük, H., Çiçek, A., Yakar, A. (2016a). Role of plants and vegetation structure on boron (B) removal process in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 88,143-152.

Türker, O.C., Türe, C., Böcük, H., Yakar, A., Chen, Y. (2016b). Evaluation of an innovative approach based on prototype engineered wetland to control and manage boron (B) mine effluent pollution. *Environment Science and Pollution Research*, 23, 19302-19316.

Türker, O.C., Vymazal, J., Türe, C. (2014). Constructed Wetlands for Boron Removal-A Review., *Ecological Engineering*, 64, 350-359.

U.S. Environmental Protection Agency. (2010). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2008. Office of Atmospheric Programs, Washington, DC.

UNEP (2011). Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication UNEP, Nairobi.

UNESCAP (2005) Bulletin: A Summary Report of the Fifth Ministerial Conference on Environment and Development in Asia and the Pacific International Institute for Sustainable Development (IISD). Seoul.

United Nations, 2009 United Nations – Department of Economic and Social AffairsWorld urbanization prospects: The 2009 revision United Nations, New York.

Villasenor, J., Capilla, P., Rodrigo, M.A., Canizares, P., Fernandez F.J. (2013). Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland – microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Research,* 47 (17). 6731-6738

Vymazal, J. (2001). Editorial: Types of constructed wetlands for wastewater treatment: Their potential for nutrient removal, 1-93

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment,* 380, 48–65

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., Brezinova, T. (2015). The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: A review. *Environment International,* 75, 11-20.

Vymazal, J., Kröpfelová, L. (2008). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the Total Environment,* 407, 3911-3922.

Wang, J. F., Song, X. S., Wang, Y. H., Bai, J. H., Bai, H., Yan, D. M., Cao, Y., Li, Y. H., Yu, Z. L., Dong, G. Q. (2017). Bioelectricity generation, contaminant removal and bacterial community distribution as affected by substrate material size and aquatic macrophyte in constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 245, 372-378.

Wang, W.L., Gao, J.Q., Guo, X., Li, W.C., Tian, X.Y., Zhang, R.Q. (2017). Long-term effects and performance of two-stage baffled surface flow constructed wetland treating polluted river. *Ecological Engineering,* 49, 93-103.

WB (2012). Inclusive Green Growth: the Pathway to Sustainable Development WB, Washington DC.

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.

Wilby, R.L., Perry, G.L.W. (2006). Climate change, biodiversity and the urban environment: a critical review based on London UK. *Physical Geography*, 30 (1), 73-98.

Xu, L, Zhao, Y.Q, Wang, T.Y., Liu, R.B.,Gao, F. (2017). Energy capture and nutrients removal enhancement through a stacked constructed wetland incorporated with microbial fuel cell. *Water Scıence And Technology,* 76,28-34.

Yadav, A.K. (2010). Design and development of novel constructed wetlands cum microbial fuel cell for electricity production and wastewater treatment. In: Proceedings of 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control (IWA).. 4–10th October 2010, Venice, Italy.

Yadav, A.K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., Mishra, B.K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*, 47, 126-131.

Yang, Y.L., Lu, J.L., Yu, H.K., Yang, X.L. (2016) Characteristics of disinfection by-products precursors removal from micro-polluted water by constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 93,262-268.

Ye, Z. Lin, Q., Whiting, S., De Souza, M., Terry, N. (2003). Possible use of constructed wetland to remove selenocyanate, arsenic, and boron from electric utility wastewater. *Chemosphere*. 52 (9), 1571-1579.

Zhang, C.B., Wang, J., Liu, W.L., Zhu, S.X., Liu, D., Chang, S.X.,. Chang, J., Ge Y. (2010). Effects of plant diversity on nutrient retention and enzyme activities in a full-scale constructed wetland. *Bioresource Technology*, 101 (6), 1686-1692.

Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., Hu, Y., (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: batch and continuousflow trials. *Chemical Engineering Journal*, 229, 364-370.

Zhao, Y.X., Tong, S., Zhang, B.G., Feng, C.P., Chen, N., Hao, C.B., Pu, J.Y., Zhao, L.W. (2013). Characteristics of heterotrophic/biofilm-electrode autotrophic denitrification for nitrate removal from groundwater. *Bioresource Technology*, 148, 121–127.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çağdaş SAZ

Yabancı Dil : İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı : Eskişehir/1990

E-Posta : cagdassaz@gmail.com

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

2016, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü

2015,Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Laborant ve Veteriner Sağlık Programı (Sınavsız İkinci Üniversite)

2015, Anadolu Üniversitesi Pedogojik Formasyon Programı

2016, Yapay Sulak Alan Sisteminden Elde Edilen İkincil Atık Suların Ekofizyolojik Etkilerinin Araştırılması. Anadolu Üniversitesi BAP, Pr. No: 1706F383 (Araştırmacı)

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

Türker, O.C., Türe, C., Yakar, A., **Saz, Ç.,** (2017), Engineered wetland reactors with different media types to treat drinking water contaminated by boron (B), Journal of Cleaner Production, 168, 823-832.

2016, Ulusal Çevre Kongresi, Poster, Türker, O.C., Türe, C., Yakar, A., **Saz Ç.,** Gündüz, Ö,F. Farklı Tipte Yapay Sulak Alan Sistemlerindeki Dehidrogenaz Üreaz ve Fosfotaz Enzim Aktivitelerinin Araştırılması, Marmaris, Muğla.

2017, 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN), Sözlü Sunum, Işık, G., Türker, O.C., Yakar, A., **Saz, Ç.,** Türe, C. Role of *Carex divisa* Huds. on Boron (B) Removal Process in a Constructed Wetland, Side, Antalya.

2017, 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN), Sözlü Sunum, **Saz, Ç.,** Türe, C., Türker, O.C., Yakar, A. Effets of Macrophytes in CW-MFC for Wastewater Treatment and Bioelectric Production, Side, Antalya.

2017, VIII. International Symposium on Ecology and Environmental Problems (ISEEP), Sözlü Sunum, Yakar, A., Türe, C., Türker, O.C., **Saz, Ç.** Investigation of Different Filling Materials on Wastewater Treatment and Bioelectric Production Constructed Wetland Coupled With Microbial Fuel Cell, Çanakkale.

2017 VIII. International Symposium on Ecology and Environmental Problems (ISEEP), Poster, Yakar, A., Türe, C., Türker, O.C., **Saz, Ç.** Effects of Different Media Types on Sediment Enzyme Activities in Microcosm-Scale Constructed Wetlands, Çanakkale.