

Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Elektro-Sulak Alan Ekosistem Tasarımı ile Sentetik Atık Sulardan Seraların Temiz Su ve Enerji İhtiyacının Sağlanması

Çağdaş SAZ¹, Cengiz TÜRE¹

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü Ekoloji Bilim Dalı

Özet

Nüfus artışı, hızlı sanayileşme, ülkelerin artan ekonomik talepleri küresel enerji ve su kaynaklarına olan talebi artırmaktadır. Son yıllarda dünyanın ana enerji kaynakları olan fosil yakıtların yenilenemez olması ve artan enerji talebi nedeniyle çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Başta temiz su kaynaklarına ulaşamama veya önlenemeyen su kirliliği olmak üzere pek çok sorun ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, bu sorunları en aza indirmeyi amaçlayan, ekolojik temelli, düşük maliyetli atık su ve enerji yönetimine sahip, atık suyun ekolojik arıtımı sırasında ikincil geri kazanım sunan bütüncül bir yaklaşıma sahip sürdürülebilir alternatif kaynaklara ihtiyaç vardır. Yeni bir yeşil teknoloji ürünü olan elektro-sulak alan ekosistemi (ESA) kavramı ortaya çıktı. ESA'lar, evsel, endüstriyel, belediye ve maden arıtımında kullanılan yapay sulak alanlar (CW) ile atık suyu arıtılırken organik kirleticilerdeki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen ekolojik yakıt hücresi (EYH) sistemlerinin kombinasyonu ile oluşturulan ekosistemlerdir. İki aşamadan oluşan çalışmanın temel amacı, organik kirliliğe sahip sentetik atık suların ESA sistemleri ile arıtılması ve minyatür seralar için özel olarak tasarlanmış saksılarda peyzaj bitkileri yetiştirmek ve saksılardan üretilen elektriklerle serayı aydınlatmaktır. Bu çalışma kapsamında laboratuvar ortamında hazırlanan sentetik atık sular ESA sistemleri ile arıtılmış ve aynı zamanda eko-elektrik enerjisi (1,6 V) üretilmiştir. Arıtılmış atık su, minyatür seralarda kurulu ESA sistemlerinin çalışma prensibi ile tasarlanmış özel saksıda peyzaj bitkilerinin yetiştirilmesinde kullanılmıştır. Tasarlanan saksılardan üretilen elektrik (17-18 V) minyatür serayı LED ışıklarla aydınlatmak için kullanıldı. ESA'nın doğaya entegrasyonu sağlanarak sadece seralar değil, biyolojik göletler, maden sahaları, arıtma tesisleri, yüksek alg ve yosun oluşumu gibi alanlarda oluşan atıkların da önüne geçilecektir. Ayrıca bu alanlardaki temel sorun olan bakım ve aydınlatma maliyetlerinin düşürülmesine de destek olacaktır. Sonuç olarak, oluşturulan teknoloji ile yenilenebilir enerji sektöründe ekolojik bir bakış açısıyla temiz enerji üretebilen yeni bir strateji kazanılmış olacaktır.

Abstract

Population growth, rapid industrialization, increasing economic demands of countries increase the demand for global energy and water resources. In recent years, interest in environmentally and economically sustainable alternative renewable energy sources has increased due to the fact that fossil fuels, which are the main energy resources of the world, are non-renewable and the increasing energy demand. Many problems have emerged, especially the inability to reach clean water resources or water pollution that cannot be prevented. In this context, there is a need for sustainable alternative resources that aim to minimize these problems, have an ecologically based, low-cost wastewater and energy management, and a holistic approach that offers secondary recovery during the ecological treatment of wastewater. The concept of the electro-wetland ecosystem (ESA), a new green technology product, has emerged. ESAs are ecosystems created by the combination of artificial wetlands (CW) used in domestic, industrial, municipal, and mine treatment and ecological fuel cell (EYH) systems that can convert chemical energy in organic pollutants into electrical energy while treating wastewater. The main purpose of the study, which consists of two stages, is to treat synthetic wastewater with organic pollution with ESA systems and to grow landscape plants in pots specially designed for miniature greenhouses and to illuminate the greenhouse

with electricity produced from pots. Within the scope of this study, synthetic wastewater prepared in the laboratory environment was treated with ESA systems and at the same time, eco-electrical energy (1.6 V) was produced. The treated wastewater was used in the cultivation of landscape plants in special pots designed with the working principle of ESA systems installed in miniature greenhouses. Electricity (17-18 V) produced from the designed pots was used to illuminate the miniature greenhouse with LED lights. By integrating ESA into nature, not only greenhouses, but also biological ponds, mining sites, treatment facilities, high algae, and algae growth will be prevented. It will also support the reduction of maintenance and lighting costs, which are the main problems in these areas. As a result, with the technology created, a new strategy will be gained in the renewable energy sector that can produce clean energy from an ecological perspective.

1. Giriş

Günümüzde, nüfus artışı ile hız kazanan sanayileşme ve ekonomik gelişmeler su kaynaklarına olan talebi de beraberinde getirmiştir (Mathuriya ve Sharma, 2010, WHO, 2012). Artan talep, yakıt rezervlerinin sürdürülebilirliği, iklim değişikliği, temiz su kaynaklarına erişimin kısıtlanması, su kirliliğinin önlenememesi başta olmak üzere pek çok çevresel sorunun ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Kundzewicz ve Kowalczak, 2014; Wang vd., 2017; Bose vd., 2018). Bu açıdan birbirleriyle karşılıklı karmaşık ilişkileri bulunan enerji ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanılması oldukça önem arz etmektedir (Fan vd., 2017; Azhari ve Loudyi, 2018; Karabulut vd., 2018).

Su ve enerji kaynaklarının üzerinde görülen olumsuz etkilerin en aza indirgenmesi için ekolojik yaklaşımları temel prensip olarak kullanan yeşil ekonomik ve sürdürülebilir modellere ihtiyaç duyulmaktadır (Mannan vd., 2018). Ekolojik ve ekonomik bir anlayış olan yeşil ekonomik modellerde enerji ve kaynak verimliliği artmakta ve olumsuz çevresel etkileri azaltan yatırımlar teşvik edilmektedir (UNEP, 2011). Yani, “düşük karbonlu, kaynak verimli ve sosyal olarak kapsayıcı” bir modeli teşkil etmektedir (Skea ve Nishioka, 2008; Ash, 2010). Böylece, yeşil ekonomiye geçiş, modern çevresel, ekonomik ve sosyal problemleri uyumlu bir şekilde ele almanın bir yolu olarak görülmektedir (Gibbs ve O'Neill, 2015).

İnsan nüfusunun artması ve ekonomik gelişme nedeniyle temiz suya olan talebin artmasıyla birlikte, büyük miktarda atık su üretilmektedir ve küresel olarak tüm atık suların %80'i arıtılmadan çevreye deşarj edilmektedir (WHO, 2006; Agarwal, 2005; UNWAP, 2017). Bu sorunların giderilmesi için pek çok atık su arıtma teknolojileri geliştirilip kullanılmasına rağmen, ekonomik kaygılar nedeniyle sürdürülebilir atık su arıtımı son yıllarda önem kazanmıştır (van Loosdrecht ve Brdjanovic, 2014; Güven vd., 2019).

Sürdürülebilir arıtma teknolojilerinden biri kabul edilen, Yapay Sulak Alanlar (YSA), doğal koşullarda gerçekleşen tüm olayları daha kontrollü bir ortam içerisinde gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmış, atık sulardan (evsel, endüstriyel, tarımsal gibi) organik ve inorganik kirlleticilerin uzaklaştırılmasında kullanılan konvansiyonel arıtım sistemlerine alternatif sistemlerden biridir (Vymazal, 2014; Lv vd., 2017; Ma vd., 2017). Bu nedenle, son yıllarda dünya çapında YSA ekosistemlerinin araştırılması ve kullanımı popüler hale gelmiştir (Vymazal ve Kröpfelová, 2008, Kadlec 2016). YSA ekosistemlerinin cazip, ekonomik, çevre dostu ve kullanımı kolay olmasının yanısıra ekosistemlerin üzerinde yetişen çeşitli sulak alan bitkileri vasıtasıyla yararlı biyomas üretmeleri ve vahşi yaşam ortamını desteklemelerine yardımcı olması YSA' ları daha avantajlı hale getirmektedir. YSA sisteminin optimum bir tasarımını oluşturulurken, arıtım verimliliği maksimum, kullanılan alanın ise minimuma indirgenmesi gerekmektedir.

Yakın gelecekte oluşabilecek enerji sıkıntısını gidermek için alternatif olarak görülen bir biyoelektrokimyasal sistem olan Yakıt Hücreleri (YH)'dir. YH' nin eş zamanlı olarak hem atık su arıtma ve hem de biyoelektrik üretme açısından büyük bir potansiyele sahip olması (Logan vd., 2006; Mohan vd., 2011; Villasenor vd., 2013) son zamanlarda su-enerji bağında en umut verici atık su arıtma teknolojilerinden biri olarak gösterilmesine neden olmuştur (Logan 2006; Mohan vd. 2008, Gupta vd., 2021)

Tipik bir MYH; anot, katot, proton değişim zarı (PEM) ve anot ile katodu birbirine bağlayan bir dış direnç olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Anot, organik substrat ile doldurulmuş anaerobik bölmede tutulmakta ve zıt yükü nedeniyle elektron toplayıcı görevi görmektedir (Chen vd., 2012). Katot ise yeterli oksijen sağlayacak şekilde aerobik koşullarda, yüksek redoks potansiyeline sahip bir elektron alıcısı görevi yapmaktadır. Substrat bozulduğunda, anot odasında elektronlar ve protonlar üretilmektedir (Logan vd., 2006). Elektronlar, ekzoelektrojenik bakteriler aracılığıyla anot üzerinde birikmekte ve dış direnç üzerinden katoda aktarılmaktadır (Lu vd., 2015). Protonlar (H^+) akışkan olan ortam yoluyla anot bölmesinden katot bölmesine taşınmaktadır (Liu vd., 2004). H^+ lar katot yüzeyindeki elektronlar ile birleşerek elektrik üretmektedir. Üretilen elektrik harici bir elektrik devresi yardımıyla ölçülebilmektedir (Logan vd., 2006).

Özellik açısından, CW yatağı, YH' nin aerobik ve anaerobik odalarına benzer şekilde ayrılmış üst aerobik ve alt anaerobik bölgelerden oluşur. Bu benzerlik nedeniyle son yıllarda EYH temeline dayanan birçok entegre süreç önerilmiş ve doğrulanmıştır (Li vd., 2014; Xu vd., 2017). YSA-EYH sistemleri "Elektro-sulak alan (ESA)" olarak adlandırılmaktadır (Zhang vd., 2017). ESA' lar boyalar (Oon vd., 2020), ağır metaller (Srivastava vd., 2020) gibi kirleticilerin arıtılması ve eş zamanlı biyoelektrik üretimi için teşvik edicidir. ESA ile yapılmış çalışmalar incelendiğinde daha çok atık arıtım stratejilerine yeni bakış açısı kazandırmaya yönelik olduğu görülmektedir.

Bu entegre sistemler ile besin maddeleri (Srivastava vd., 2020), boyalar (Fang vd., 2017), ağır metal (Srivastava vd., 2020), madencilik atıkları (Türker vd., 2017) ve petrol (Yang vd., 2016) gibi farklı kirleticilerin arıtılması ve eş zamanlı biyoelektrik üretimi açısından teşvik edici bir yetenek göstermiştir. ESA ile yapılmış çalışmalar incelendiğinde daha çok atık arıtım stratejilerine yeni bakış açısı kazandırmaya yönelik olduğu görülmektedir.

Ancak bu sistemlerden arıtılan suyun ya da üretilen elektriğin uygulanabilirliği veya kullanılabilirliği ile ilgili bir çalışma bulunmaktadır. Bunun yanında elektrojenik arıtma sistemini kullanan diğer sistemlerde (sediment mikrobiyal yakıt hücresi, bentik mikrobiyal yakıt hücresi) ise bu türden çalışmalar az da olsa bulunmakta olup, elde edilen elektrik enerjisinin nasıl kullanılabileceğini göstermektedir (Donovan vd., 2013, Karra vd., 2014; Alipanahi vd., 2019). Genel olarak elektrojenik arıtma sistemleri düşük güç üretme ve düşük çıkış potansiyelleri nedeniyle temel olarak kısıtlanmışlardır (Dumas vd., 2007; Nielsen vd., 2008). Bu kapsamda da araştırmacılar gücü arttırmak için daha büyük elektrotları denemişler ve farklı elektrot malzemeler kullanarak elde edilen akımı arttırmaya yönelik çalışmalar yapmışlardır (Aelterman vd., 2009; Logan, 2010; Gao vd., 2013; Gajda vd., 2018). Bu çalışmada önceki çalışmalarda kullanıldığımız biyo-elektrotları kullanarak hem arıtım verimliliğini arttırmayı hem de arıtımı sırasında üretilen biyoelektrik ile düşük güç gerektiren elektrik aletlerini (LED lamba, yangın ve ışık sensörü, nemölçer ve termometre vb.) çalıştırabilmesi araştırılmıştır. Bu kapsamda laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmanın ilk aşamasında, ESA sistemi aracılığıyla arıtılan sentetik atık su, seralar için ESA çalışma prensibi doğrultusunda tasarlanmış model tasarımına transfer edilerek seraların temiz su ve enerji ihtiyacının sağlanması hedeflenmiştir.

2. Materyal Metot

2.1. ESA Modüllerinin Kurulumu

Çalışma, ESTÜ Fen Fakültesi Bitki Ekolojisi laboratuvarında iklim kabini içerisinde kontrollü şartlar altında (25°C) gerçekleştirilmiştir. Elektro-sulak alan kurulumunun gerçekleştirileceği düzenek için 32×21×14 cm ve 10 L hacimli plastik kaplar kullanılmıştır. Her ESA aşağıdan yukarıya doğru 6 cm anot katmanı (A), 6 cm katot katmanı (K) ve 2 cm çakıl tabakası olmak üzere üç katmandan oluşmuştur. Modülün A ve K katmanları geçirgen seçici bir zar olan cam yünü (0,05 cm) ile birbirinden ayrılmıştır. Modüllerden alınacak su örnekleri için A bölümlerinin zemine yakın kısımlarına musluk entegre edilmiştir. Modüllerde dolgu malzemesi olarak zeolit bazlı filtrasyon ortamı (Yakar vd. 2018), biyoelektrotlar (anot 22×15×0,8 cm boyutunda karbon keçe, katot 2×8×1 cm boyutunda magnezyum plaka) kullanılmıştır. Anot elektrotu sistemin zemininde ve geçici seçici zara yakın bir şekilde, katot elektrotu ise oksijen ile temas edecek şekilde yüzeyde sabitlenmiştir. İletken titanyum kablo (0,5 mm) ile bağlanan biyoelektrotlar 1000Ω' luk bir dış dirence bağlanmış (Yakar vd., 2018; Saz vd., 2018) ve kapalı devre eko-elektrik üretim performansı ölçülmüştür. ESA modülü Eskişehir' in Sivrihisar ilçesinin 40 km kadar güneyinde bulunan Balıkdanı göleti (39° 15' 51" N ile 31° 35' 52" E) içerisinde doğal olarak yayılış gösteren ve YSA modüllerinde popüler sulak alan makrofiti olan *Juncus gerardii* subsp. *gerardii* bitkisi ile bitkilendirilmiştir. Bitki rizomları arasında 20 cm aralık olacak şekilde (12 rizom/m²'lik bir bitki yoğunluğunda) modüle yerleştirilmiştir.

Seralar için tasarlanan modül ise 50×50×10 cm boyutunda kesilen straforların birbirine su bazlı özel silikonlar ile yapıştırılmasıyla şekillendirilmiştir. Bu modül ESA ekosistemi kurulum prensibi benimsenerek hazırlanmıştır. Tasarlanan modülün ESA ekosisteminden farkları; anot (5×5×0,8 cm), katot (2×2×1 cm) ve dolgu malzemesi olarak torf kullanılmasıdır.

2.2. Kültür Periyodu

Bitkilendirme işlemi gerçekleştirilmemiş ESA 5 gün boyunca düzenli aralıklarla endüstriyel atık su tesisinden alınan çamurlu ikincil arıtım suyu verilerek ön kültür aşamasına alınmıştır. Bu ön kültür periyodu ile çeşitli mikroorganizmaların ESA' ya aşılmalrı ve çoğalmalarının desteklenmesi hedeflenmiştir.

Ön kültür periyodunun ardından 5 günlük kültür periyodu başlayacaktır. Kültür periyodunda, Maine ve vd., (2009)' nın kullandıkları yöntemden yararlanılarak içerisinde sistemlerdeki bitkilerin ve mikroorganizmaların büyümelerini teşvik etmek amacıyla arıtma tesisinden temin edilecek 3:1 oranında Hoagland solüsyonu ile seyreltilmiş ikincil arıtım suyu kullanılmıştır.

2.3. Atık Suyun Hazırlanması ve Giriş Dozunun Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan sentetik atık su önceki çalışmalarımızda da kullandığımız (Yakar vd., 2018; Saz vd., 2018) Liu vd. (2013) tarafından önerilen sentetik atık su oranları modifiye edilerek hazırlanmıştır. Bu sentetik atık suyun ana bileşimi, glikoz (0,20 g L⁻¹), NH₄Cl (0,15 g L⁻¹), KCl (0,13 g L⁻¹), NaHCO₃ (3,13 g L⁻¹) ve 1 ml mikro element çözeltisi, litre başına 5,6 g (NH₄)₂SO₄, 2 g MgSO₄.7H₂O, 200mg MnSO₄.2H₂O, 3 mg H₃B₃O₃, 2,4 mg CoCl₂.6H₂O, 1 mg CuCl₂.2H₂O, 2 mg NiCl₂.6H₂O, 5 mg ZnCl₂, 10 mg FeCl₃.6H₂O ve 0,4 mg Na₂MoO₄.2H₂O olarak kullanılmıştır. Ayrıca, deney periyodu boyunca kullanılan sentetik atık suyun giriş konsantrasyonu kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ), amonyum (NH₄⁺), nitrat (NO₃⁻) parametreleri için sırasıyla 300-400 mg L⁻¹, 20,9-25,5 mg L⁻¹, 12,6-21,5 mg L⁻¹ arasında değişmektedir. Hazırlanan sentetik atık su ESA modülünde 24 saatlik periyotlar ile bekletilmiş ve periyot sonunda 500 ml örneklenerek su analizleri gerçekleştirilmiştir. ESA' ya günlük dozlama yapmak amacıyla

500 ml giriş suyundan ilave edilmiştir. ESA' dan su almadan önce günlük buharlaşma miktarı kadar çeşme suyu sistemlere ilave edilmiştir. Bu çalışma prensibi 28 gün süre ile devam ettirilmiştir.

2.4. Su Analiz Yöntemleri

2.4.1. Fiziko-kimyasal analizler

Aritım performanslarını değerlendirmek amacıyla her gün örneklenen çıkış su numuneleri ile giriş suyu numunesinin fiziko- kimyasal su kalite parametre (pH, elektriksel iletkenlik (EC), sıcaklık, redoks potansiyeli (RP) ve çözünmüş oksijen (ÇO)) değerleri su örnekleri zaman kaybetmeden Whatman kağıdı yardımıyla süzölmüş ve arazi şartlarında taşınabilir çoklu su ölçüm cihazı (HACH HQ40D multi-parameter taşınabilir pH Metre, pH + İletkenlik + Sıcaklık Ölçümü + Çözünmüş oksijen + redoks ölçer) ile ölçölerek ve kaydedilmiştir.

2.4.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı, Amonyum ve nitrat analizleri

ESA'dan örneklenen giriş ve çıkış su numunelerinin KOİ, amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) konsantrasyonları Whatman kâğıdı ile süzölmüştür. NH_4^+ ve NO_3^- konsantrasyonları 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 KOİ konsantrasyonları ise APHA (1999)'a göre belirlenmiştir. KOİ, NH_4^+ ve NO_3^- konsantrasyonları deney süresince dört günde bir olacak şekilde ölçölerek ve kaydedilmiştir.

2.5. Fotosentetik Pigment Analizleri

7 günlük periyotlarla ESA' lardaki bitkilerden toplanan örnekler Wellburn (1994) metodu uygulanarak fotosentetik pigmentlerinin (klorofil- a ve klorofil-b) absorbans değerleri UV spektrofotometrede ölçölmüş Porra vd. (1989) ile Holm (1954) tarafından hazırlanan formüllere göre Klorofil a, klorofil b ve klorofil a+b miktarları belirlenmiştir.

2.6. Eko-elektrik verilerinin ölçölmesi, izlemesi ve kullanılması

ESA' nın elektrotlarından gelen kablolar arasındaki kapalı devre potansiyel farkı (V) ve seralar için tasarlanan modölün açık devre potansiyel farkı (V) dijital el multimetresi (Fluke 287 TRUE RMS) kullanılarak ölçölmüştür. Seralar için tasarlanan modöldeki her bir hücre birbirine seri şekilde bağlanmıştır. Birbirine seri şekilde bağlanan hücrelerin boşta kalan A ve K kabloları LED ışıklara verilerek seranın aydınlatılması sağlanmıştır.

2.7. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışma sonucunda elde edilen veriler, IBM SPSS 22.0 programı ile istatistiksel açıdan değerlendirilmiştir.

3. Bulgular

3.1. Fiziko-kimyasal analizler

Ön kültür ve kültür periyotları sonrasında 28 gün süren ESA modöllerinin giriş ve çıkış sularının fiziko-kimyasal analizleri (pH, EC, Sıcaklık, ÇO, RP) Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma periyodu içerisinde Elektro-sulak alan ekosistemi giriş ve çıkış sularının ortalama, en yüksek ve en düşük, pH, EC, Sıcaklık, ÇO, RP değerleri

pH (-log[H+])	(-log[H+])	Giriş	7,73 ± 0,18
		Çıkış Ortalama	7,47 ± 0,15
Elektriksel İletkenlik	(µS cm-1)	Giriş	1086,29 ± 94,2
		Çıkış Ortalama	1640,29 ± 213,17

Redoks Potansiyeli	(mV)	Giriş	63,24 ± 11,99
		Çıkış Ortalama	66,48 ± 11,11
Sıcaklık	(°C)	Giriş	24,11 ± 0,73
		Çıkış Ortalama	22,76 ± 2,05
Çözünmüş Oksijen	(mg/L)	Giriş	7,32 ± 0,66
		Çıkış Ortalama	5,31 ± 0,55

ESA modülüne verilen giriş suyunun 28 günlük ortalama pH değeri 7,73±0,18, çıkış suyunun ortalama pH değeri ise 7,47±0,15 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, ESA modülünden çıkan suların ortalama pH değerlerinin giriş suyunun pH değerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, one-way ANOVA istatistiksel analizine göre ESA modülündeki bitkinin varlığının giriş ve çıkış sularının pH değerlerini arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır ($p>0,05$).

ESA modülüne verilen giriş suyunun 28 günlük ortalama EC değeri 1086,29±94,2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Giriş suyu sistemde 24 saat kaldıktan sonra örneklenen çıkış suyunun 28 günlük ortalama EC değeri 1640,29±231,17 $\mu\text{S cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, ESA modülünden çıkan suların ortalama EC değerlerinin giriş suyunun EC değerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, one-way ANOVA istatistiksel analizine göre ESA modülündeki bitkinin varlığının giriş ve çıkış sularının EC değerlerini arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır ($p>0,05$).

Kontrollü şartlar altında gerçekleştirilen çalışmada giriş suyu ortalama sıcaklığının 24,1±0,73 °C olduğu, her gün örneklenen çıkış suyu sıcaklık ortalamasının ise 22,76±2,05 °C olduğu hesaplanmıştır.

ESA modülüne verilen giriş suyunun 28 günlük ortalama redoks potansiyeli değeri 63,24±11,99 mV olarak hesaplanmıştır. Giriş suyu ESA modülünde 24 saat kaldıktan sonra örneklenen çıkış sularının ortalaması 66,48±11,11 mV olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, ESA modülünden çıkan suların ortalama redoks potansiyeli değerlerinin giriş suyunun redoks potansiyeli değerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, one-way ANOVA istatistiksel analizine göre ESA modülündeki bitkinin varlığının giriş ve çıkış sularının redoks potansiyeli değerlerini arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır ($p>0,05$).

Kontrollü şartlar altında ESA modülünde gerçekleştirilen çalışmanın giriş suyu ve çıkış suyu çözünmüş oksijen ortalama değerleri sırasıyla 7,32 ± 0,66 mg/L ve 5,31 ± 0,55 mg/L olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, one-way ANOVA istatistiksel analiz programında değerlendirildiğinde deneyde kullanılan bitkinin varlığından giriş ve çıkış suyu çözünmüş oksijen değerleri arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$).

3.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı, Amonyum ve Nitrat analizleri

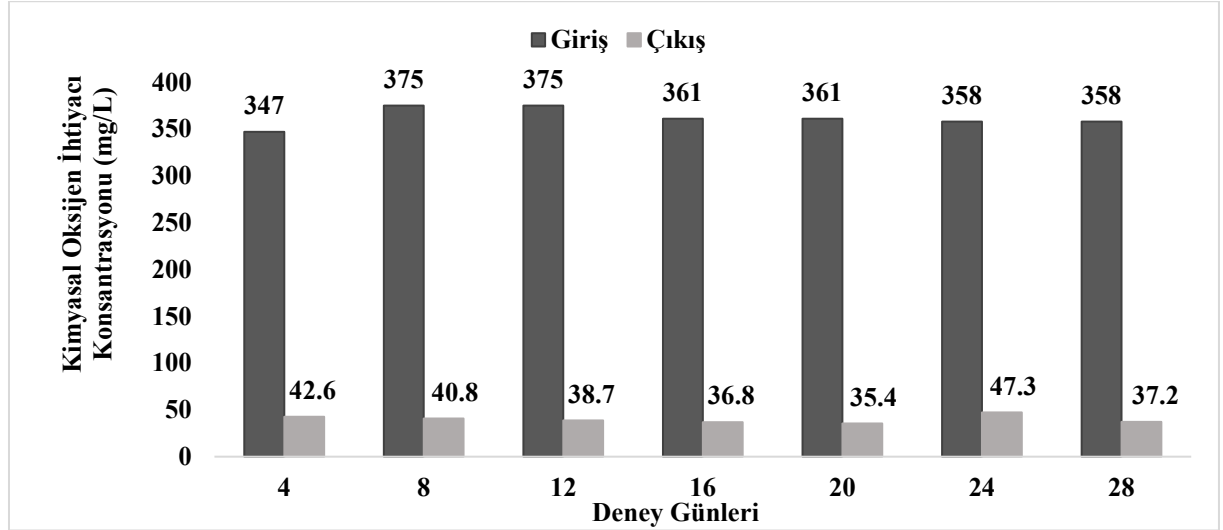
28 günlük çalışma periyodu içerisinde ESA modülünün giriş ve çıkış sularına ait kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) analiz sonuçlarının ortalama, en yüksek ve en düşük konsantrasyonu (mg/L) ve ortalama yüzde artım performansı değerleri Tablo 2' de gösterilmektedir.

Tablo 2. Çalışma periyodu içerisinde ESA modülünün giriş ve çıkış sularının KOİ, NH_4^+ , NO_3^- konsantrasyonlarının ortalama, en yüksek ve en düşük değerleri ile ortalama yüzde artım performansları

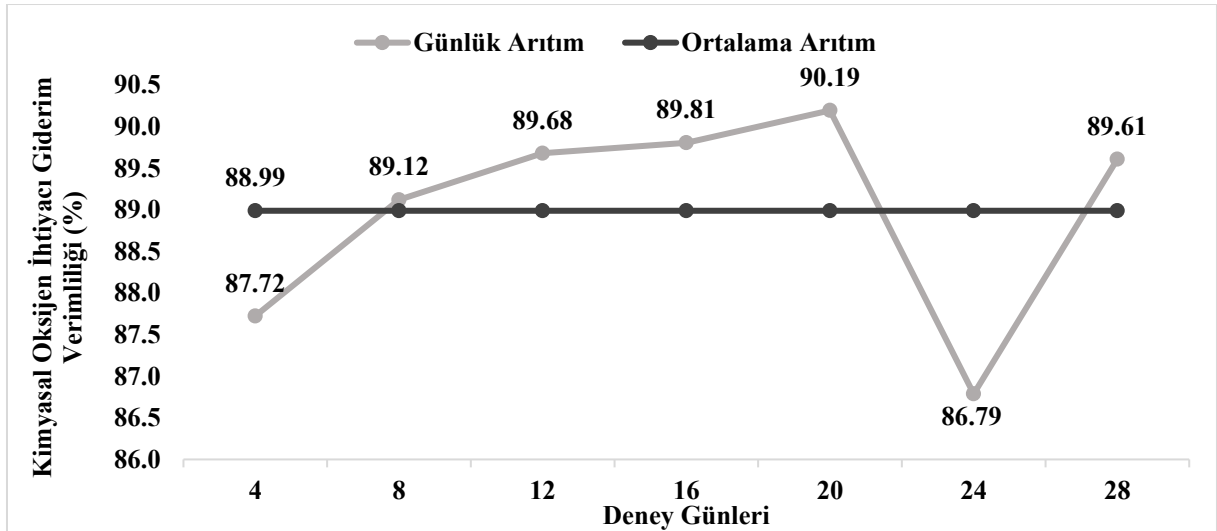
KOİ	(mg/L)	Giriş	362,14 ± 9,97
		Çıkış Ortalama	39,83 ± 4,11
		Yüzde Ortalama (%)	88,99 ± 1,25
NH_4^+ Konsantrasyonu	(mg/L)	Giriş	21,44 ± 1,35

		Çıkış Ortalama	5,31 ± 0,55
		Yüzde Ortalama (%)	93,34 ± 0,43
NO₃-Konsantrasyonu (mg/L)		Giriş	13,78 ± 1,06
		Çıkış Ortalama	1,02 ± 0,17
		Yüzde Ortalama (%)	92,58 ± 1,01

ESA modülünün çıkış sularına ait KOİ konsantrasyon değerlerinin giriş suyuna göre değişimi Şekil 1’ de ve KOİ giderim verimliliği performansı ise Şekil 2’ de gösterilmektedir. 28 günlük deney periyodunda giriş suyu 362,14±9,97 mg/L⁻¹ ortalamaya sahipken, suyun modüle verildikten sonra ortalama %88,99±1,25 oranında arıtım performansı ile bu değeri 39,83±4,11 mg/L seviyesine düşürdüğü görülmektedir. 28 günlük periyot içinde 4 günde bir ölçülen değerlerin en yüksek çıkış konsantrasyon değeri 47,30 mg/L⁻¹ iken, en düşük değerin 35,40 mg/L⁻¹ olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında, ESA modülünün çıkış suyu KOİ değerlerinin giriş değerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Deney verilerinin one-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldığında, giriş suyu KOİ konsantrasyonları çıkış suyu konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak önemli farklılıkların olduğunu göstermiştir ($p<0,05$).

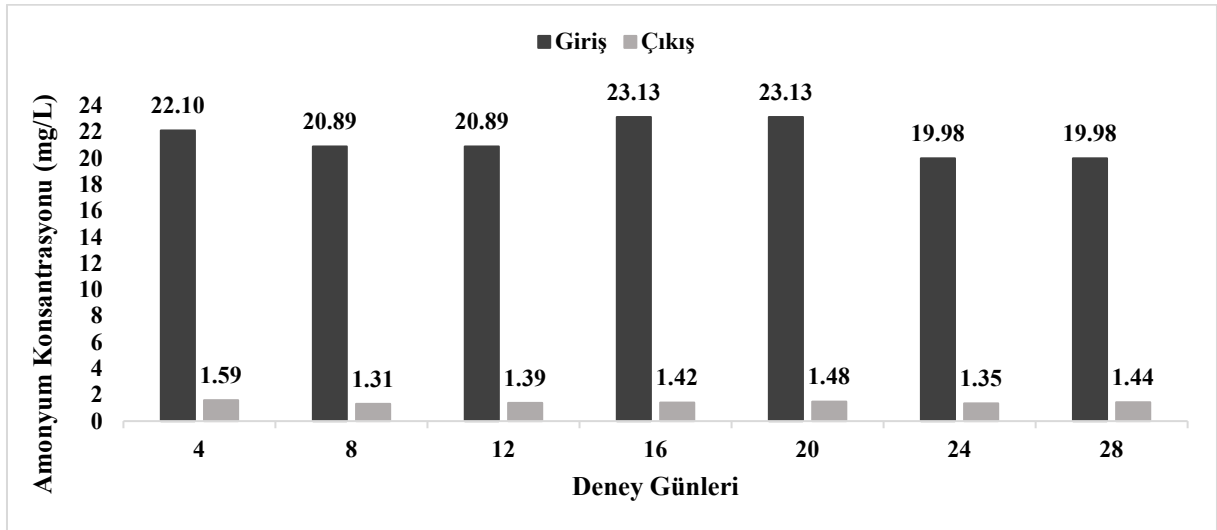


Şekil 1. ESA modülünün çıkış suyunun 28 günlük çalışma periyodu içerisindeki giriş suyuna göre KOİ konsantrasyonunun (mg/L) değişimi

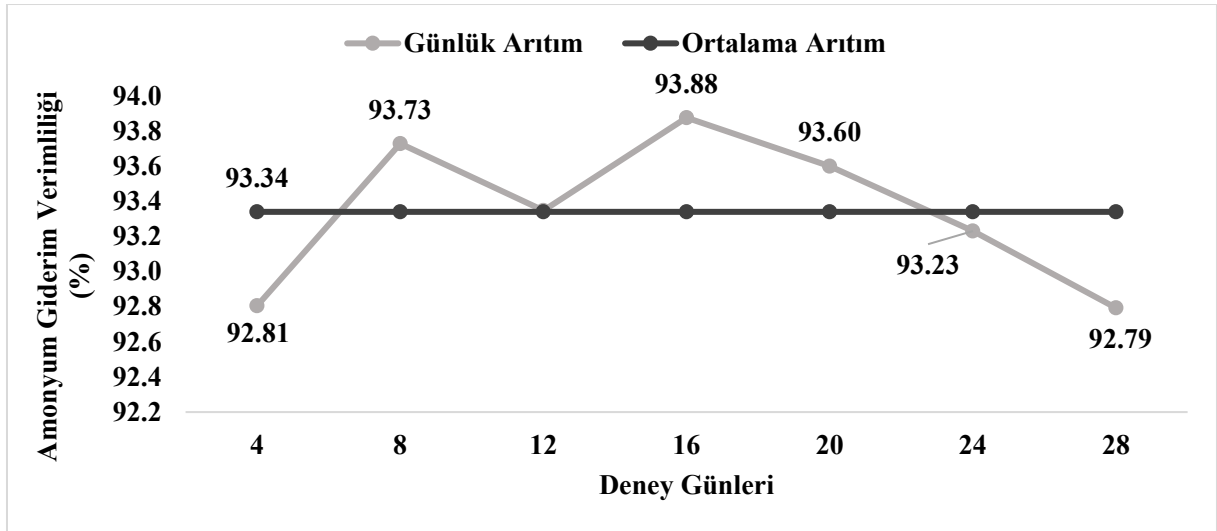


Şekil 2. ESA modülünün çıkış sularının 28 günlük çalışma periyodu içerisindeki ortalama KOİ giderim verimliliği (%)

ESA modülünün çıkış sularına ait NH_4^+ konsantrasyon değerlerinin giriş suyuna göre değişimi Şekil 3' de ve NH_4^+ giderim verimliliği performansı ise Şekil 3.4' de gösterilmektedir. 28 günlük deney periyodunda giriş suyu $21,44 \pm 1,35 \text{ mg/L}^{-1}$ ortalamaya sahipken, suyun modüle verildikten sonra ortalama $\%93,34 \pm 0,43$ oranında arıtım performansı ile bu değeri $5,31 \pm 0,55 \text{ mg/L}$ seviyesine düşürdüğü görülmektedir. 28 günlük periyot içinde 4 günde bir ölçülen değerlerin en yüksek çıkış konsantrasyon değeri $1,59 \text{ mg/L}^{-1}$ iken, en düşük değerin $1,31 \text{ mg/L}^{-1}$ olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında, ESA modülünün çıkış suyu NH_4^+ değerlerinin giriş değerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Deney verilerinin one-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldığında, giriş suyu NH_4^+ konsantrasyonları çıkış suyu konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak önemli farklılıkların olduğunu göstermiştir ($p < 0,05$).

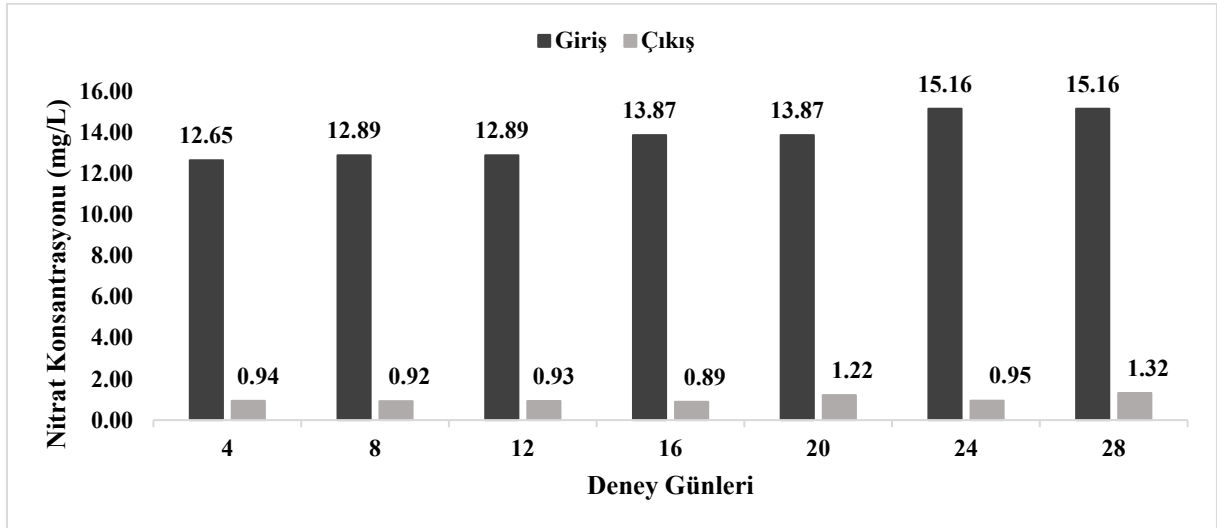


Şekil 3. ESA modülünün çıkış suyunun 28 günlük çalışma periyodu içerisindeki giriş suyuna göre NH_4^+ konsantrasyonunun (mg/L) değişimi

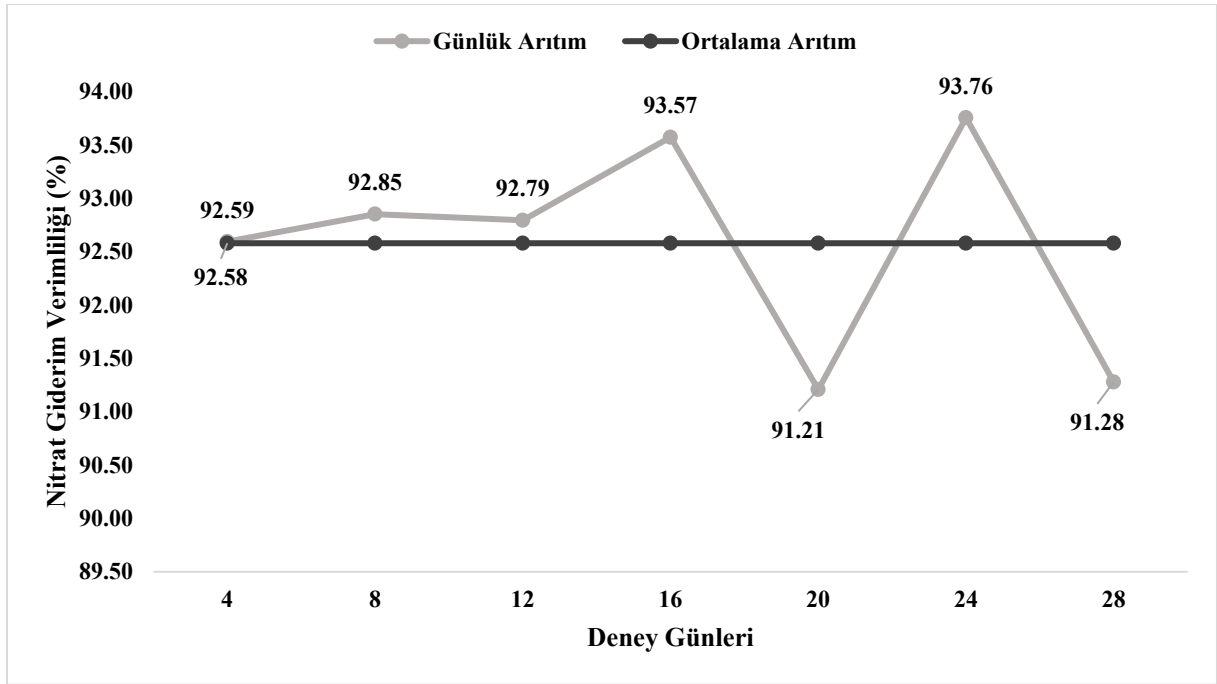


Şekil 4. ESA modülünün çıkış sularının 28 günlük çalışma periyodu içerisindeki ortalama NH_4^+ verimliliği (%)

ESA modülünün çıkış sularına ait NO_3^- konsantrasyon değerlerinin giriş suyuna göre değişimi Şekil 5’de ve NO_3^- giderim verimliliği performansı ise Şekil 6’da gösterilmektedir. 28 günlük deney periyodunda giriş suyu $13,78 \pm 1,06 \text{ mg/L}^{-1}$ ortalamaya sahipken, suyun modüle verildikten sonra ortalama $\%92,58 \pm 1,01$ oranında arıtım performansı ile bu değeri $1,02 \pm 0,17 \text{ mg/L}$ seviyesine düşürdüğü görülmektedir. 28 günlük periyot içinde 4 günde bir ölçülen değerlerin en yüksek çıkış konsantrasyon değeri $1,32 \text{ mg/L}^{-1}$, en düşük değerin $0,92 \text{ mg/L}^{-1}$ olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında, ESA modülünün çıkış suyu NO_3^- değerlerinin giriş değerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Deney verilerinin one-way ANOVA istatistiksel analizi yapıldığında, giriş suyu NO_3^- konsantrasyonları çıkış suyu konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak önemli farklılıkların olduğunu göstermiştir ($p < 0,05$).



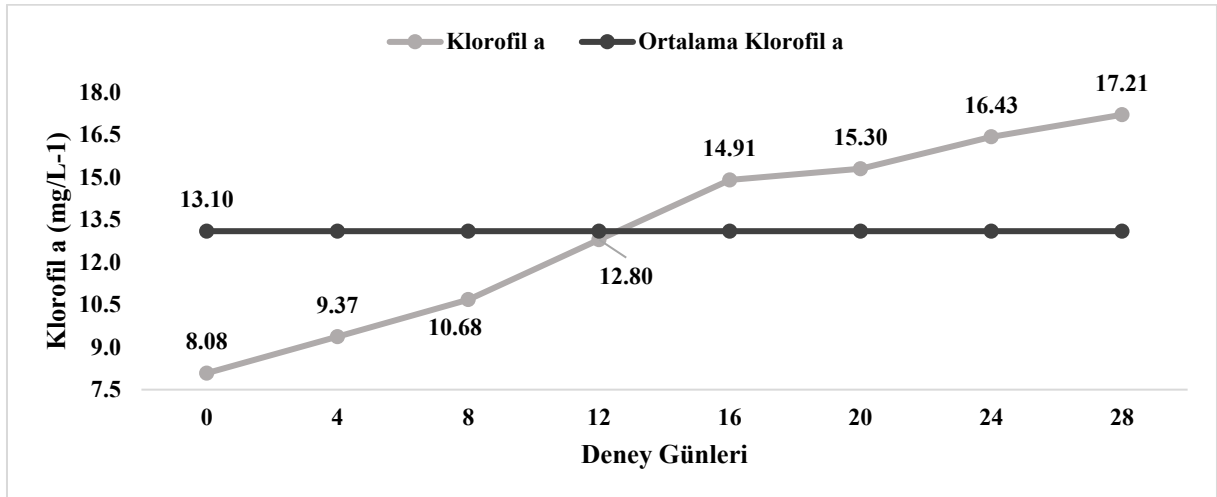
Şekil 5. ESA modülünün çıkış suyunun 28 günlük çalışma periyodu içerisindeki giriş suyuna göre NO_3^- konsantrasyonunun (mg/L) değişimi



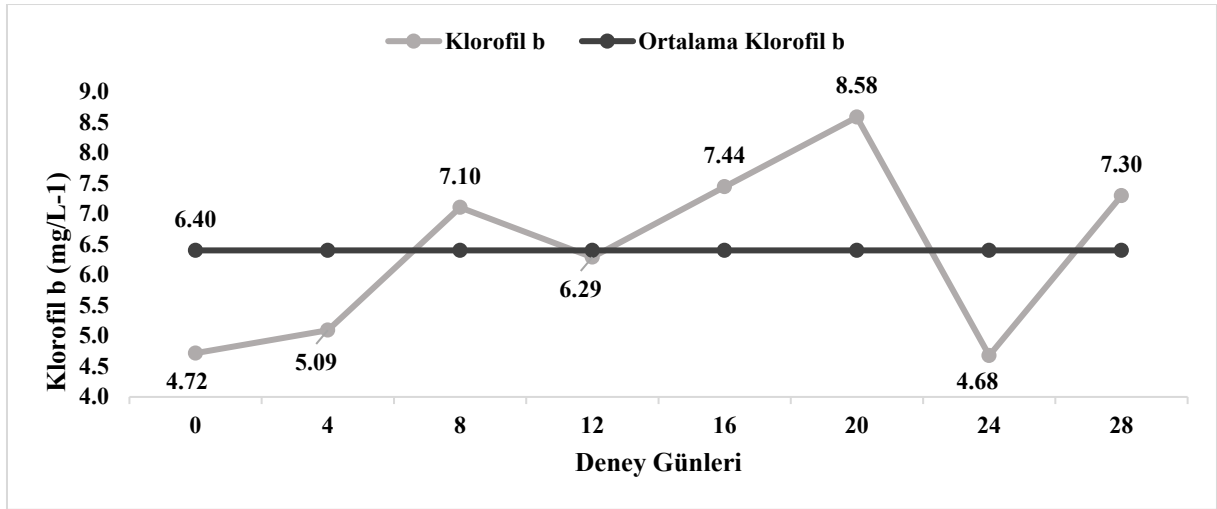
Şekil 6. ESA modülünün çıkış sularının 28 günlük çalışma periyodu içerisindeki ortalama NO_3^- giderim verimliliği (%)

3.3. Fotosentetik Pigment Analizleri

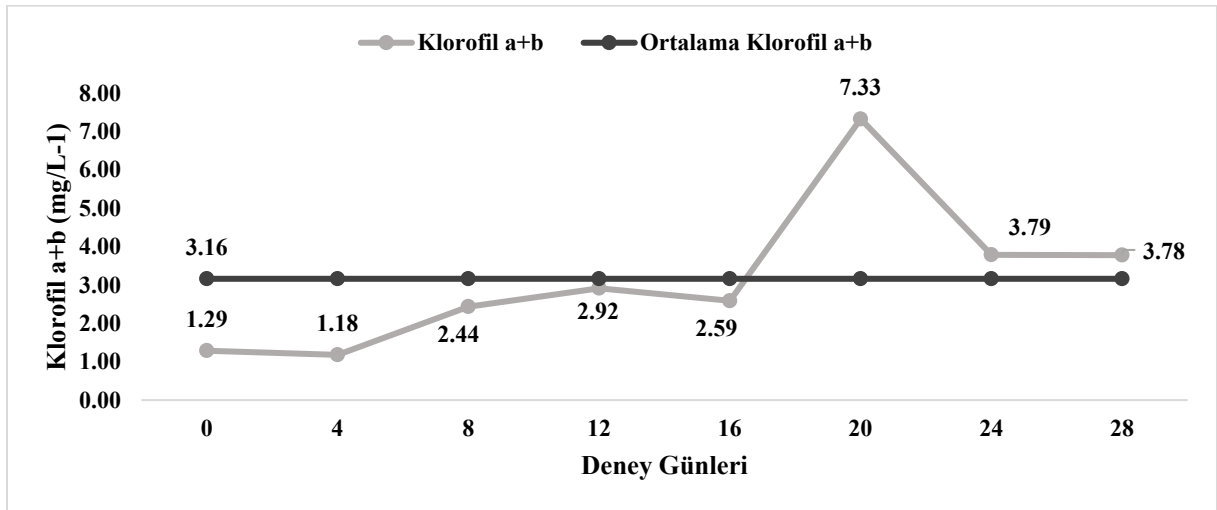
ESA modülündeki bitkilerin ortalama klorofil pigment konsantrasyonları (Klorofil a, b ve a+b) Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da görülmektedir. ESA modülündeki *J. gerardii* bitkisinin ortalama klorofil a, b ve klorofil a+b değerleri sırasıyla 13,1, 6,4, ve 3,16 mg/L^{-1} olarak ölçülmüştür. Klorofil a konsantrasyonunda 28 günlük periyot içerisinde sürekli bir artış trendi gözlenirken, klorofil b ve klorofil a+b konsantrasyon değerlerinde dalgalı bir seyir gözlenmiştir.



Şekil 3.7. ESA modülünde bulunan *J. gerardii* bitkisinin araştırma periyodu içerisindeki ortalama ve 4 günlük klorofil a değerleri



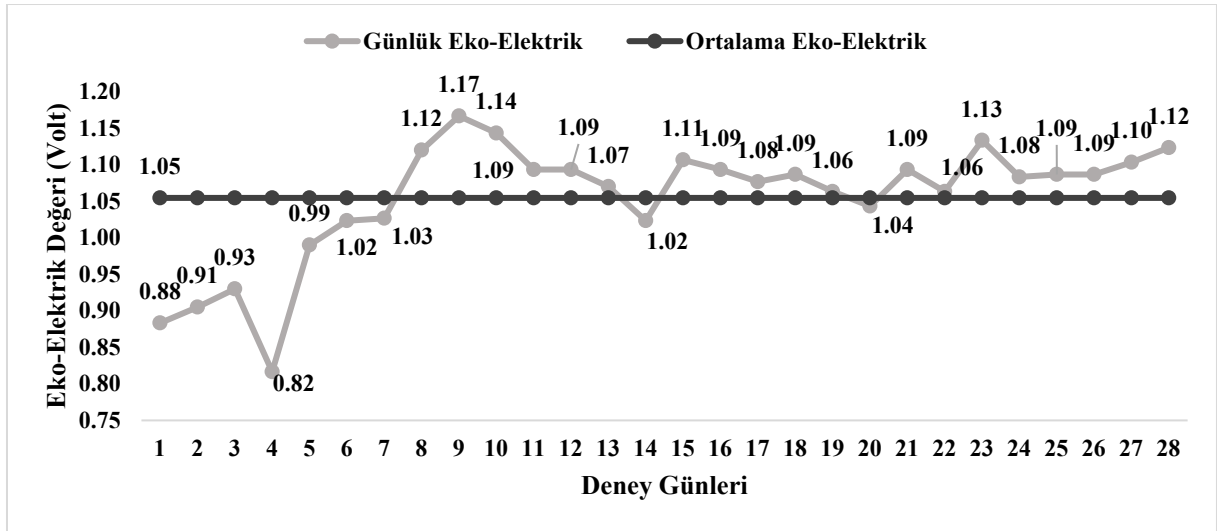
Şekil 3.8. ESA modülünde bulunan *J. gerardii* bitkisinin araştırma periyodu içerisindeki ortalama ve 4 günlük klorofil b değerleri



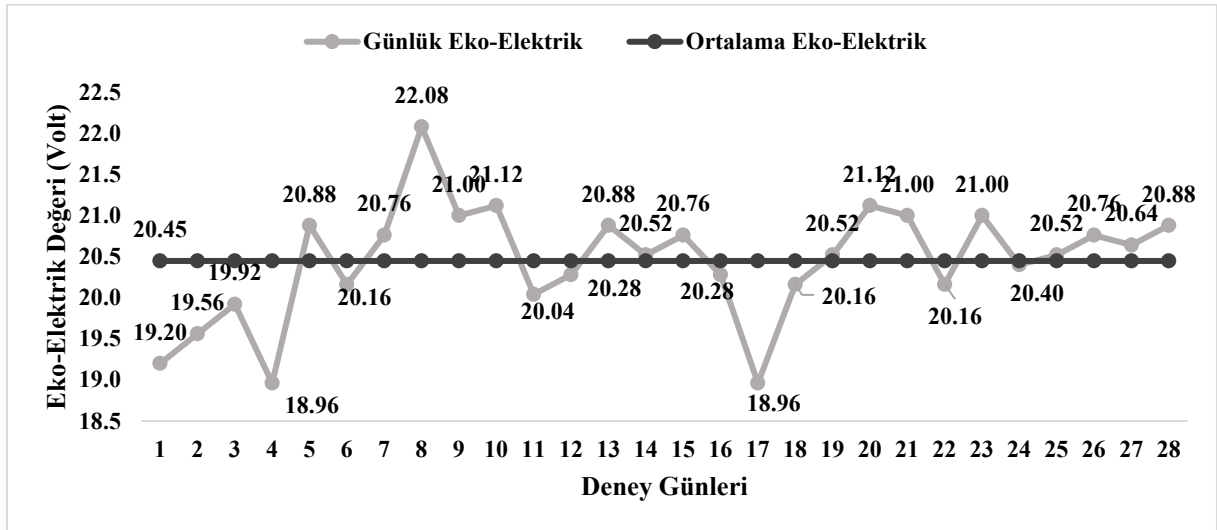
Şekil 3. 9. ESA modülünde bulunan *J. gerardii* bitkisinin araştırma periyodu içerisindeki ortalama ve 4 günlük klorofil a+b değerleri

3.4. Eko-elektrik verilerinin ölçülmesi, izlemesi ve kullanılması

Araştırma periyodu içerisinde ESA modülünün kapalı devre günlük eko-elektrik üretim değerleri (Volt) değişimi Şekil 3.10'da seralar tasarlanan ESA modülünün açık devre günlük eko-elektrik üretim değerleri (Volt) değişimi ise ŞEKİL 11'de verilmiştir. ESA modülü ve seralar için tasarlanan ESA model tasarımlarının her ikisinde de eko-elektrik üretim performansının deney başlangıcına göre arttığı görülmektedir.



Şekil 3. 10. Araştırma periyodu içerisinde ESA modülünün kapalı devre günlük eko-elektrik üretim değerleri (Volt) değişimi



Şekil 3. 11. Araştırma periyodu içerisinde seralar tasarlanan ESA modülünün açık devre günlük eko-elektrik üretim değerleri (Volt) değişimi

4. Tartışma ve Sonuç

İnsanlar, bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalar birlikte kompakt, kompleks ve sosyal bir ekosistem ağı oluşturmaktadır. Bu ağ, yaşamın devamlılığını sağlayan ekosistem hizmetlerinin önemli bir parçasıdır (Sagoff, 2011). Endüstri 4.0 devrimini yaşadığımız bu günlerdeki teknolojik gelişmeler, ekosistem hizmetlerinden bazılarının yerini alabilecek noktaya ulaşsa da henüz birçok hizmetin yerini alabilecek ekolojik kökenli yeşil sistemleri hayata geçirebilecek boyuta gelememiştir. Bu düşünceler ışığı altında, nüfus artışı ve sanayileşmenin sonucunda ortaya çıkan su ve enerji sıkıntısının, yeşil teknoloji ürünü olan ESA modülleri kullanılarak azaltılması ya da engellenmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada, 28 günlük süreçte kontrollü şartlar altında literatüre uygun olarak modifiye edilmiş sentetik atık suyun, *J.gerardii* bitkisi ile bitkilendirilmiş ESA modülünden geçirilmesi sonucunda artırılması ve biyolojik süreç ile eş zamanlı olarak eko-elektrik üretim potansiyeli izlenmiştir. Ayrıca ESA modülünde artırılan

suyun seralar için tasarlanan ESA model tasarımına transfer edilmesi ile çeşitli peyzaj bitkilerinin yetiştirilmesi ve peyzaj bitkileri için gerekli olan ışığın tasarlanan ESA modelinden karşılanması sağlanmıştır. Çalışmada, ilk olarak *J.gerardii* bitkisi bulunan ESA modülünde üretilen eko-elektriğinde etkisiyle KOİ, NH_4^+ , NH_3 giderim performansları araştırılmış ve ikincil kazanım ürünü olan eko-elektriğin üretimi tartışılmıştır. İkinci aşamasında ise ESA modülünde artıran suların tarımsal anlamda kullanılabildiği gösterilmiş ve seralar için tasarlanan modül ile birlikte seraların enerji ihtiyaçlarının ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen veriler ışığında, tasarlanan ESA ile özellikle belediye, üniversite gibi bünyesinde peyzaj bitkisi yetiştiren kurumların atık sularını seralarda değerlendirilerek, atık suların yakıt kaynağı olarak tekrar değerlendirilebileceği, kaynak verimliliğinin, döngüsel ekonomi modelinin uygulanabileceği yeni nesil bir atık-enerji yönetim stratejisi ülkemize ve dünyaya kazandırılmış olacaktır.

Su, mikroorganizma, dolgu malzemesi ve bitki örtüsü ESA modülünün dört ana bileşeni olarak gösterilmektedir (Shelef vd., 2013; Oon vd., 2017; Saz vd., 2018). Bitkilerin varlığının bir bütün olarak gerekmektedir. Özellikle toprak altı yapısı olan kökün fiziksel yapısının filtrasyona etkisi, ortamda bulunan mikroorganizma biyofilm gelişimi için yüzey alanını genişleterek kullanılabilişliğini arttırması (Oon vd., 2017; Saz vd., 2018) ve eko-elektrik üretimine katkı sağlamaktadır; (Oon vd., 2017; Saz vd., 2018).

28 günlük çalışma süresince bitkinin fotosentetik pigment sonuçları incelendiğinde bitkilerin sağlıklı bir şekilde büyüme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır.

ESA modülünden elde edilen çıkış sularının pH değişimleri incelendiğinde, bitki varlığı sayesinde atık suyun ortalama pH değerini 7,73'den 7,47' ye düşürmüştür. Literatür incelendiğinde, organik madde mineralizasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyonun pH değişimi üzerine önemli etkileri olduğu görülmektedir (Gray, 2004, Liu vd., 2011). Ayrıca nitrifikasyon ve denitrifikasyonun olaylarının gerçekleşebilmesi için pH değerlerinin 6,5 ile 9,5 aralığında olması gerektiği literatürde belirtilmiştir (Saz vd., 2018). Modülden alınan çıkış suyu pH değerleri incelendiğinde, nitrifikasyon ve denitrifikasyon basamaklarının gerçekleşebilmesi için uygun değerler olduğu görülmektedir.

ESA modülünün çıkış sularının elektriksel iletkenlik (EC) değerleri incelendiğinde, çıkış suyu konsantrasyonunun giriş suyu konsantrasyonlarından yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, ESA modülündeki EC arıtma mekanizmasının fiziksel süreçlerle kontrol edildiğini, bu sürecin vejetasyon ve üretilen eko-elektriğin elektriksel alanın etkisinde önemli olmayabileceğini düşündürmektedir.

Redoks potansiyeli (ORP), biyolojik ve kimyasal prosesleri önemli derecede etkileyen faktördür. Ayrıca ORP, atık su nitrifikasyonu ve denitrifikasyonunun izlenmesi için önemli bir parametredir (Ge vd., 2015, Cáceres vd., 2017). Redoks potansiyeli ve çözünmüş oksijenin (ÇO) azalmasının, nitrifikasyonda rol oynayan bakterilerin oksijeni kullandığı ile de ilişkisi olduğu belirlenmiştir (Cáceres vd., 2017). Ayrıca redoks potansiyelindeki pozitif değerler aerobik, negatif değerler ise anaerobik ortamın varlığının tespitinde kullanılmaktadır (Vymazal ve Kröpfelova, 2008). Buna ek olarak, ESA modülündeki aerobik veya anaerobik ortamlardaki mikrobiyal aktiviteler redoks potansiyeli ve ÇO değeri ile tanımlanabilmektedir. ESA modülünün giriş ve çıkış suyu redoks değerleri ve ÇO konsantrasyon değerlerinde gözle görülür bir fark vardır. Bu sonuçlar doğrultusunda, bitkinin kök sistemlerinin ESA matrisine oksijen sağlaması sonucunda ortamın aerobik olması beklenen sonuçtur. Üstelik bitki varlığında nispeten daha yüksek redoks değeri ve çözünmüş oksijenin değerlerine ulaşılması organik maddenin tükenmesine bağlı olarak atık suyun NH_4^+ ve KOİ konsantrasyonu ile doğrudan etkileneceğini de göstermektedir (Oon vd., 2015; Saz vd., 2018). Bu nedenle, uzmanlar ESA modülü tasarlarlarken bu görüşleri göz önünde bulundurmalıdır.

ESA modülünden elde edilen çıkış sularının KOİ , NH_4^+ ve NO_3^- konsantrasyonları incelendiğinde, tüm parametrelerin giriş ve çıkış konsantrasyonları arasında önemli farkların olduğunu görülmektedir. Bu farklılıklar, ESA modülündeki bitki varlığının ve üretilen eko-elektrik kaynaklı elektriksel alanın, organik maddeleri sentetik atık sudan uzaklaştırma yeteneğinin olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla ESA modülünün çevre dostu ve düşük maliyetli olması, atık sudan organik bazlı kirleticilerin uzaklaştırılması için etkili, alternatif ve ekolojik seçenek olduğunu göstermektedir. Sulak alanlardaki azot giderimi temel olarak amonyaklaşma, nitrifikasyon ve temel denitrifikasyon aşamalarından oluşmaktadır (Zhang vd., 2010). Nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçleri sulak alanlarda azot giderilmesinde önemli bir role sahiptir (Oon vd., 2017) Özellikle, nitrifikasyon işlemi sırasında azot yok olmaz sadece NH_4^+ NO_3^- dönüştürülür (Vymazal ve Březinová, 2015). Bu bağlamda, ESA modülünün azot giderme davranışını değerlendirebilmek için, ESA modülünün amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-) giderim verimliliği de KOİ ile beraber araştırılmıştır. Literatür incelendiğinde bitkinin varlığının KOİ , NH_4^+ ve NO_3^- giderimi üzerinde önemli etkisi olduğu Saz vd., (2018) tarafından belirlenmiştir. Ancak Oon vd., (2017)' nın çalışmasına göre bitkiye ilaveten modüllere ek havalandırma sağlanması durumunda NH_4^+ giderim verimliliğinin tespit edilmiştir. Saz vd., (2018)' nın çalışmasında bitki köklerinden matrikse oksijenin saldığı ve sulak alan matrisindeki mikrobiyal denitrifikasyonu engellediğini belirtilmiştir. Ototrofik denitrifikasyon sırasında su elektrolizinden üretilen hidrojen elektron donörü görevi alırken NO_3^- de bir elektron alıcısı gibi davranmaktadır. Heterotrofik denitrifikasyonda ise, organik madde elektron vericisi görevi görürken nitratı nitrojen gazına dönüştürmektedir (Xu vd., 2017). Bununla birlikte, ESA modülündeki anot elektrodu olarak karbon keçenin varlığı, organik maddelerin oksidasyonunu kolaylaştırmıştır. Ayrıca üretilen elektronlar, katotu ototrofik denitrifikasyon için ise anotu bir elektron verici olarak kullanmıştır (Xu vd., 2017). Karbon keçenin anot olarak kullanımı ve modülün 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.

ESA modülünün yüksek eko-elektrik üretim değerleri incelendiğinde literatüre göre daha yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Bu durumun sebeplerinden biri bitkinin varlığı diğeri ise ve seçilen biyoelektrotların etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu durumdan yola çıkarak, literatürdeki çalışmalarda eko-elektrik üretmek amacıyla bitkili ESA modüllerinin matrislerinin, bitkisiz ESA modüllerinin matrisine kıyasla özellikle sucul ekosistemlerin anaerobik ortamlarında bol miktarda bulunan elektrojenik bakteri türlerince (*Geobakter* spp., gibi (Logan vd., 2007) daha zengin olduğu tespiti yapılmıştır (Saz vd., 2018). Buna ek olarak katot elektrotu olarak seçilen magnezyumun saflık derecesi ve elektriksel iletkenliğinin de etkisiyle daha yüksek eko-elektrik üretiminin sağlanması olağan bir sonuçtur.



Şekil 12. ESA sera modülünün yapım aşaması ve modülün işleyişi

ESA modülünden arıtılan suların ikincil bir kazanç olarak değerlendirilmesi amacıyla ESA temelli sera modeli tasarlanmış ve seradaki peyzaj bitkilerinin büyümesi için gerekli ışık model tasarımından sağlanmıştır. Küçük ESA modüllerinin birbirine seri bağlanması ile elde edilen bu tasarım ortalama 20,45 volt eko-elektrik üretmiş ve üretilen eko-elektrik ile LED ışıklar yakılarak seranın aydınlatma sağlanmıştır. Tasarlanan bu model ile atık suların çevre dostu, ikincil bir atık üretmeden yeniden kullanılabilirliği ve temiz enerjiye dönüştürülebilirliği, su, enerji ve üretim açısından yüksek verimlilik sağlayan (1m^2 sera alanında 2,28 kat fazla verim, 26 kat daha az su tüketimi ve ek olarak biyoelektrik enerjisi kazanımı) döngüsel ekonomi modelinin uygulandığı bir atık-enerji yönetim stratejisi kazanılmış olacaktır. Belediye, üniversite gibi bünyesinde peyzaj bitkisi yetiştiren kurumlar başta olmak üzere ESA' ların doğaya entegrasyonunun sağlanması ile biyolojik gölet, maden sahası, parklar, refüjler gibi alanların ya da dikey duvar uygulama alanlarının hem sulama ihtiyaçlarının karşılanması hem de sağlanan peyzaj uygulamasının yansırı üretilen eko-elektrik ile çevre aydınlatmalarının gerçekleştirilmesi sağlanabilecektir.

5. Kaynaklar

- Aelterman, P., Versichele, M., Genettello, E., Verbeken, K., Verstraete, W., (2009). Microbial fuel cells operated with iron-chelated air cathodes. *Electrochim. Acta*, 5424, 5754-5760.
- Agarwal, S.K. (2005). *Water Pollution*. APH Publishing Corporation, New Delhi.
- Alipanahi, R., Rahimnejad, M., Najafpour, G., (2019). Improvement of sediment microbial fuel cell performances by design and application of power management systems. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44(31),169-6965-16975.
- Ash, N. (2010). *Ecosystems and human well-being: a manual for assessment practitioners*. Island Press.
- Azhari, M.E., Loudyi, D. (2019). Analysis of the water-energy nexus in central Oum Er-Rbia sub-basin - Morocco. *International Journal of River Basin Management*, 17 (1), 13-24.
- Bose, D., Dhawan, H., Kandpal, V., Gopinath, M. (2018). Sustainable power generation from sewage and energy recovery from wastewater with variable resistance using microbial fuel cell. *Enzyme and Microbial Technology*, 118, 92-101.
- Cáceres, R., Malińska, K., Marfāa, O. (2017). Nitrification within composting: A review. *Waste Management*, 72, 119-137.

- Chen, Z., Huang, Y. chao, Liang, J. hong, Zhao, F., Zhu, Guan, Y. (2012). "A novel sediment microbial fuel cell with a biocathode in the rice rhizosphere." *Bioresource Technology*, 108, 55-59.
- Donovan, C., Dewan, A., Heo, D., Lewandowski, Z., Beyenal, H., (2013). Sediment microbial fuel cell powering a submersible ultrasonic receiver: New approach to remote monitoring. *J. Power Sources* 233,79-85.
- Dumas, C., Mollica, A., Féron, D., Basséguy, R., Etcheverry, L., Bergel, A., (2007). Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials. *Electrochim. Acta*, 52(2),468-473.
- Fan, J.L., Hu, J.W., Kong, L.S., Zhang, X. (2017). Relationship between energy production and water resource utilization: A panel data analysis of 31 provinces in China. *Journal of Cleaner Production*, 167, 88-96.
- Fang, Z., Cao, X., Li, X., Wang, H., Li, X. (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.
- Gajda, I., Greenman, J., Santoro, C., Serov, A., Melhuish, C., Atanassov, P., Ieropoulos, I.A., (2018). Improved power and long term performance of microbial fuel cell with Fe-N-C catalyst in airbreathing cathode. *Energy*, 144,1073-1079.
- Gao, X., Zhang, Y., Li, X., Ye, J., (2013). Novel graphite sheet used as an anodic material for high-performance microbial fuel cells. *Mater. Lett.*
- 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.
- Gibbs, D., O'Neill, K. (2015). Building a green economy? Sustainability transitions in the UK building sector. *Geoforum*, 59, 133-145.
- 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.
- Gupta, S., Srivastava,P., Patil, S. A., Yadav, A. K. (2021). A comprehensive review on emerging constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: Potential applications and challenges, *Bioresource Technology*, 320 (B), 124376.
- Güven, H., Dereli, R.K., Özgün, H., Erşahin, N.E., Öztürk, İ. (2019). Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 145-168.
- Kadlec, R. H. (2016). Large Constructed Wetlands for Phosphorus Control: A Review. *Water*, 8, 243-279.
- Karabulut, A.A., Crenna, E., Sala, S., Udias, A. (2018). A proposal for integration of the ecosystem-water-food-land-energy (EWFLE) nexus concept into life cycle assessment: A synthesis matrix system for food security. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3874-3889.
- Karra, U., Muto, E., Umaz, R., Kölln, M., Santoro, C., Wang, L., Li, B., (2014). Performance evaluation of activated carbon-based electrodes with novel power management system for long-term benthic microbial fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, 39(36),21847-21856.
- Kundzewicz, Z. W., Kowalczak, P. (2014). Water-related conflicts in urban areas in Poland. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 56, 588-596.
- 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, H., Ramnarayanan, R., Logan, B.E. (2004). "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell." *Environmental Science & Technology*, 38, 7, 2281–2285.
- 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, 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.
- 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., (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nat. Rev. Microbiol.* 7, 375–381.
- 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.
- 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, 17, 5181– 5192.
- Lu, L., Xing, D., Ren, Z.J. (2015). "Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell." *Bioresource Technology*, 195, 115-121.
- 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.
- Maine, M.A., Suñe, N., Hadad, H., Sánchez, G., Bonetto, C., (2009). Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. *Journal of Environmental Management*, 90, 355-363.
- Mannan, M., Al-Ansari, T., Mackey, H.R., Al-Ghamdi, S.G. (2018). Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on lifecycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 193, 300-314.
- Mathuriya, A. S.ve Sharma, V. N., (2010). Treatment of brewery wastewater and production of electricity through microbial fuel cell technology, *International Journal of Biotechnology & Biochemistry*, 6, 71-80.
- 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
- Nielsen, M.E., Reimers, C.E., White, H.K., Sharma, S., Girguis, P.R., (2008). Sustainable energy from deep ocean cold seeps. *Energy Environ. Sci.* 1, 584-593.

- 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. 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., Teoh, T.-P., Lehl, H.K., Thung, W.-E. (2020). "Constructed wetland–microbial fuel cell for azo dyes degradation and energy recovery: Influence of molecular structure, kinetics, mechanisms and degradation pathways." *Science of The Total Environment*, 720, 137370.
- 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.
- Sagoff, M. (2011). The quantification and valuation of ecosystem services, *Ecological Economics*, 70, 497-502.
- Saz, Ç., Türe, C., Türker, O.C., Yakar, A., (2018). Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell CW-MFC treating synthetic wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25(9):8777-8792.
- Shelef, O., Gross, A., Rachmilevitch S. (2013). Role of plants in a constructed Wetland: current and new perspectives. *Water*, 5, 405-419
- Skea J, Nishioka S. (2008). Policies and practices for a low-carbon society. *Climate Policy*, 8, S5-S16.
- Srivastava, P., Abbassi, R., Kumar Yadav, A., Garaniya, V., Kumar, N., Khan, S.J., Lewis, T., 2020a. "Enhanced chromium(VI) treatment in electroactive constructed wetlands: Influence of conductive material. " *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121722.
- Türker OC, 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.
- UNEP (2011). Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication. United Nations Environment Programme.
- UNWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2017). The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. Paris.
- van Loosdrecht, M.C.L., Brdjanovic, D. (2014). Anticipating the next century of wastewater treatment. *Science*, 344, 1452.
- 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. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecological Engineering*, 73, 724-751.
- 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.
- 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, H., Zhu, Q.L., Zou, R., Xu, Q. (2017). Metal-Organic Frameworks for Energy Applications. *Chem*, 2 (1), 52-80.
- 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.
- WHO (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2: wastewater use in agriculture.
- WHO, (2012). World Health Day 2012- Ageing and Health, World Health Organization Toolkit for Event Organizers.
- 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 Science And Technology*, 76, 28-34.
- 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 Science And Technology*, 76, 28-34.
- Yakar, A., Türe, C., Türker, O.C., Vymazal, J., Saz, Ç., (2018). Impacts of various filtration media on wastewater treatment and bioelectric production in up-flow constructed wetland combined with microbial fuel cell UCW-MFC. *Ecol. Eng.* 117, 120-132.
- Yang, Q., Wu, Z., Liu, L., Zhang, F., Liang, S., (2016). Treatment of oil wastewater and electricity generation by integrating constructed wetland with microbial fuel cell. *Materials Basel*. 9(11)885
- 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.
- Zhang, S., Song, H.L., Yang, X.L., Huang, S., Dai, Z.Q., Li, H., Zhang, Y.Y., (2017). “Dynamics of antibiotic resistance genes in microbial fuel cell-coupled constructed wetlands treating antibiotic-polluted water.” *Chemosphere*. 178, 548-555.