



Lemna minor 'un Belediye Atıksuyu Arıtımındaki Performansı

Hatice TEKOGUL^{1*} 

¹ Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi /Türkiye

*E-mail: hatice.tekogul@ege.edu.tr

Makale Bilgisi :

Geliş:
15/04/2024
Kabul Ediliş:
22/04/2024

Anahtar Kelimeler:

- Lemna minör
- Su mercçeği
- Atık su
- Arıtım
- Sucul bitkiler

Öz

Teknolojik gelişmeler, artan nüfus yoğunluğu, kentselleşme ve sanayileşmenin bir sonucu olarak meydana gelen çevresel sorunların en başında atık suların iyileştirilmesi gelmektedir. Son yıllarda da atık su arıtımında sucul bitkilerden olan *Lemna minor* kullanımı giderek artmıştır. Su mercimeğinin atık suların arıtılmasında kullanılmasının temel nedenleri arasında *L. minör* ile elde edilen biyokütlenin yüksek protein içermesi, üretim hızı ve düşük lif içeriği ile suyun iyileştirilmesi sonucu kaliteli bir ürün oluşturmak gelmektedir. Bu çalışmanın amacı; belediye atık suyunda *L. minor* sucul bitkisini kullanarak kirlenici uzaklaştırma kapasitesini tespit etmektir. Bu amaçla; 2022 yılında Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yetiştiricilik Bölümü Urla tesisi su bitkileri laboratuvarında 15 gün boyunca Hoagland besin ortamında zenginleştirilmiş su mercimeği kültüründen elde edilen *L. minor* örnekleri 1000 ml'lik plastik kap içerisine 5 cm yüksekliğinde toplam 250 ml hacimde olan atık su ile koyulmuştur. Kontrol grubunda ise sadece atık su kullanılmıştır. Denemeler belediye atık suyunda 3 tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Denemelerde su sıcaklığı $24\pm 1^\circ\text{C}$ de sabit tutulmuş olup aydınlatma olarak gün ışığı led lambalar ile 16:8 saat gece-gündüz foto periyodu kullanılmıştır. Deneme sonucunda giriş ve çıkış suyunda fizikokimyasal parametreler sırasıyla; pH (7,1-8,2 mg/L), KOİ (210-90 mg/L), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (79-58 mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (26-13 mg/L), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (16-9 mg/L) olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışma *L. minor*'un atık su arıtımında oldukça etkili olduğunu kanıtlamıştır.

Lemna Minor's Performance in Municipal Wastewater Treatment

Article Info

Received:
15/04/2024
Accepted:
22/04/2024

Keywords:

- Lemna minor
- Duckweed
- Wastewater
- Treatment
- Aquatic plants

Abstract

One of the foremost environmental issues arising from technological advancements, increasing population density, urbanization, and industrialization is the disposal of wastewater. In recent years, the use of the aquatic plant *Lemna minor* in wastewater treatment has been increasingly prevalent. Among the main reasons for using duckweed in wastewater treatment are its high protein content, rapid growth rate, and low fiber content, resulting in the production of a high-quality product by improving the water. This study aims to determine the pollutant removal capacity using *L. minor* aquatic plants in municipal wastewater. For this purpose, samples of *L. minor* obtained from enriched water lentil culture in Hoagland nutrient medium at the Aquatic Plants Laboratory of the Fisheries Faculty of Ege University in Urla facility for 15 days were placed in 1000 ml plastic containers with a total volume of 250 ml containing 5 cm height of wastewater. In the control group, only wastewater was used. Trials were conducted in triplicate in municipal wastewater. During the trials, the water temperature was maintained at $24\pm 1^\circ\text{C}$ and daylight LED lamps with a 16:8 hour light-dark photoperiod were used for illumination. At the end of the experiment, the physicochemical parameters of the inlet and outlet water were determined as follows: pH (7.1-8.2 mg/L), COD (210-90 mg/L), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (79-58 mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (26-13 mg/L), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (16-9 mg/L). The study demonstrated that *L. minor* is highly effective in wastewater treatment.

Atıf bilgisi/Cite as: Tekoğul, H. (2024). *Lemna minor*'s performance in municipal wastewater treatment. Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi, 10 (1), 59-67.

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, artan nüfus yoğunluğu, kentselleşme ve sanayileşme çevresel sorunların artmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak dünya genelinde geleneksel atık su arıtma işlemleri ortaya çıkmıştır (Hastie, 1992). Bu merkezi arıtma sistemleri temel olarak fizikokimyasal ve biyolojik işlemleri içermekte olup yüksek teknoloji, uzman işgücü, enerji ve yoğun kimyasal işlemler içermektedir. Ancak bu tür arıtma sistemlerinin arıtma karmaşıklığındaki maliyetlerinin ileri seviyelere ulaştığı görülmektedir (Ciria vd., 2005). Bu nedenle dünya genelinde arıtım için sucul bitkilerden yararlanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda yapay sulak alanlar belediye atık sularının arıtımında popüler hale gelmiştir. Çevreden gelen besin maddelerini kullanan sucul bitkiler, bu alanlarda ötrofikasyonu azaltmak için kullanılmaktadır (Temel, 2017; Mitsch ve Jrgensen, 2003; Spieles ve Mitsch, 2000). Yeşil yeniden kazanım olarak bilinen fitoremediasyon, başta ağır metaller olmak üzere birçok toksik bileşeni uzaklaştırmak için kullanılan çevre dostu, etkili, ucuz ve kolay bir yöntem olup, çevresel restorasyon ve kirlilik kontrolü için kullanılmaktadır (Tekoğul, 2023c; Brasil vd., 2021; Karabas, 2019; Moragoda vd., 2022; Perera ve Yatawara, 2021; Tekoğul, 2021; Thakuria vd., 2023). Atık su arıtımında fitoremediasyon; genellikle mikroalgler ve çoğunlukla makrofitler kullanılarak yapılmaktadır.

Yapay sulak alan uygulaması; Sucul bitkiler ile atık sularda besin maddelerini potansiyel olarak yararlı ürünlere dönüştürmenin ve çevrenin besin kirliliğini önlemenin geleneksel arıtma sistemlerine göre oldukça ucuz alternatif bir teknolojisidir (Tekoğul, 2023a; Cheng vd., 2002). Ördek otu olarak da bilinen *Lemna minor* (su mercimeği); Bangladeş, İsrail, ABD ve diğer birçok ülkede belediye ve endüstriyel atık suların arıtılmasında kullanıldığı bilinmektedir. Ülkemizde de yapay sulak alanlar uygulamaları desteklenmiş ve Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü 2003 yılında kırsalda başlatılan projeler ile 174 köyde de çalışmaları devam etmektedir (MAF, 2023; Eremektar vd., 2005, Dipu vd., 2011; Culley vd., 1981; Oron, 1994). *L. minor* özellikle azot ve fosfor olmak üzere atık sudan çözünmüş besin maddelerini uzaklaştırabilir. Yaygın makrofit olan *L. minor*; Lemnaceae familyasına aittir. Bu sucul bitkiler dünyadaki en küçük çiçekli bitkilerdir ve hızlı çoğalma oranına sahiptir (Ekperusi vd., 2019). *L. minor* besin maddelerinin etkin bir şekilde uzaklaştırılması, biyokütle üretimi ve sudan organik ve inorganik toksik mikro kirliticilerin uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Gatidou vd., 2017; Iatrou vd., 2019). Su arıtımında su mercimeği kullanımı ile suyun iyileştirilmesinin sonunda, elde edilen biyokütle yüksek protein içermesi, üretim hızının yüksek olması ve düşük lif içeriği ile kaliteli bir ürün oluşmaktadır. Yüksek üretim hızı, çalışmalarda kullanımını kolaylaştırır. Son birkaç yıldır *L. minor* gibi sucul bitkilerin; azotun hızlı bir şekilde alımı nedeniyle azotun uzaklaştırılması için umut vaat eden bir yöntem olarak atık su arıtımında kullanılması da vurgulanmaktadır (Tekoğul, 2023b; Toyama vd., 2018; Sharma vd., 2015; Dipu vd., 2011).

L. minor'un atık su arıtımındaki performansları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Oron vd., (1987) sucul bitkilerin evsel atık sulardan amonyağın uzaklaştırılmasındaki performansını ve bunun N bileşiklerine dönüşümünü değerlendirmiştir. Culley vd. (1981) süt işletmelerinin atık sularını arıtmada, Skillicorn vd. (1993), Oron (1994), Hammoudo vd. (1995) evsel atıksuların arıtılmasında, Zhao (2022), Awuah (2004) atık stabilizasyon lagünleri, Paolacci (2022) balık kültürü sistemleri için su mercimeğinden faydalanmışlardır. Su mercimeği atıksulardaki besin maddelerini kullanarak büyük miktarda biyokütle üretmektedir. El-Kheir vd. (2007) su mercimeğinin (*Lemna gibba*) besin maddelerinin, çözünmüş tuzların, organik maddenin, ağır metallerin ve askıdaki katıların, yosun bolluğunun ve fekal koliform yoğunluklarının uzaklaştırılmasında çok etkili olduğunu bildirmişlerdir (Zhang ve Zhang, 2014; Topal, 2011). Su yüzeyini komple kaplayan bir su mercimeği tabakasının hem aerobik hem de anaerobik bakterilerle birlikte iş birliği yaparak; ortamda aerobik bölge, anoksik bölge ve aerobik bölge oluşturduğu belirtilmiştir (Skillicorn vd., 1993). Tchobanoglous ve Burton (1991) aerobik bölgede organik malzemelerin su mercimeği kökleri tarafından atmosferik oksijen kullanılarak aerobik bakteriler tarafından oksitlendiğini, Smith ve Moelyowati (2001) ise nitrifikasyon ve denitrifikasyonun anoksik bölgelerde gerçekleştiğini, burada organik azotun anoksik bakteriler tarafından amonyak ve ortofosfata parçalandığını, bunların da su mercimeği tarafından besin olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmanın amacı; belediye atık suyunda *Lemna minor* sucul bitkisini kullanarak besin uzaklaştırma kapasitesini tespit etmektir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Lemna minor tabanlı atıksu arıtımının prensibi

Lemna minor; Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yetiştiricilik Bölümü Urla tesisi su bitkileri laboratuvarında 15 gün boyunca Hoagland besin ortamı ilave edilerek zenginleştirilmiş su mercimeği kültüründen elde edilmiştir (Hoagland ve Arnon, 1950) (Şekil 1).

Şekil 1. Su Ürünleri Fakültesi Yetiştiricilik Bölümü Urla tesisi su bitkileri yetiştirme tankı

Denemelerin gerçekleştirilmesi

Denemelerde 1000 ml'lik plastik kaplar kullanılmıştır. Kontrol grubuna sadece atık su diğer deneme grubuna 5 cm yüksekliğinde toplam 250 ml hacimde olan atık su ve *Lemna minor* ilave edilmiştir. Denemeler 3 tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Denemelerde kullanılacak İzmir Büyükşehir Belediye atık suyu arıtma tesisinin giriş bölümünden alınarak büyük hacimli daha önce kullanılmamış bir plastik kap içinde laboratuvara getirilmiştir ve kimyasal özellikleri analiz edilmiştir. Çizelge 1'de atık suyun fizikokimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Belediye atık suyunun fizikokimyasal özellikleri

Analitik yöntemler

Çalışmada deney gruplarının sıcaklıkları; 0,1 °C hassasiyetli termometre ile, pH; Orion 420 A pH metre ile, elektriksel iletkenlik (EC); YSI 30 iletkenlik ölçer ile, besinler (nitrit-azot, nitrat-azot, amonyum-azot, fosfat-fosfor); standard yöntemler ile tanımlanan HACH DR 2000 ile spektrofotometrik olarak, kimyasal oksijen ihtiyacı ise standart yöntemlere göre belirlenmiştir. Denemeler çalışma sonuna kadar merkezi ısıtma ile 24±1°C de sabit tutulmuştur. Denemelerde aydınlatma olarak gün ışığı led lambalar ile 16:8 saat gece-gündüz foto periyodu kullanılmıştır. Standart üretim amaçlı haftada bir ortam ilavesi yapılmış ve denemeler için su mercimekleri çoğaltılmıştır. Denemeler sırasında haftada bir ortam ilavesi yapılmıştır. Denemeler 15 gün süre ile yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Belediye atık suyundan kirleticilerin *L. minor* türü ile arıtılma performansının incelendiği bu çalışmada atık suyunun pH değeri 7,1 iken çıkış suyunda 8,2 olarak tespit edilmiştir (Şekil 2). Özengin ve Elmacı (2007) yapmış oldukları çalışmada belediye atıksuyunda pH değerini giriş suyunda 7,2, çıkışta ise 8,0 olarak saptamışlardır. Bal Krishna ve Polprasert (2008) pH değerinin giriş suyunda 7,5 olduğunu çıkış suyunda ise 8,4 olduğunu, Žaltauskaitė vd. (2014) ise giriş suyunda pH değerini 7,3 çıkış suyunda ise 7,4 olarak Devlamynck vd. (2021) yaptıkları çalışmada giriş suyunda pH değerini 7,0, çıkış suyunda ise 6,8 olarak, Tekoğul (2023b) giriş suyunda pH değerini 8,93, çıkış suyunda ise 8,18 olarak tespit etmişlerdir (Çizelge 2). pH değeri bizim çalışmamızda da diğerlerinde olduğu gibi çıkış sularında giriş suyununkinden fazla olarak saptanmıştır.

Şekil 2. Giriş ve çıkış suyunda fizikokimyasal değerler

Çizelge 2. Giriş ve çıkış suyundaki pH değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) çalışmamızda giriş suyunda 210 mg/L, çıkış suyunda ise 90 mg/L olarak belirlenmiş olup (Şekil 2) uzaklaştırma oranı %57,1 olarak saptanmıştır. Daha önce yapılmış olan bazı çalışmalarda giriş ve çıkış suyundaki KOİ değerleri sırasıyla; Özengin ve Elmacı (2007) 294 mg/L-64 mg/L, Selyarani (2015) 320 mg/L-85 mg/L, Bal Krishna ve Polprasert (2008) 274 mg/L-82 mg/L, Shah (2015) 130 mg/L-87 mg/L, Azeez ve Sabbar (2012) 480-323 mg/L, Leng (1999) 461 mg/L-323 mg/L, Gökyay ve Balcıgil (2017) 600 mg/L-156 mg/L olarak tespit etmişlerdir (Çizelge 3). Gökyay ve Balcıgil (2017) 600 mg/L giriş suyu değerinin değişik seyreltelerde %54-74 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklık, KOİ giderimini önemli ölçüde etkilemektedir. Sıcaklığın KOİ giderimi üzerindeki etkileri bitkilere ve zamana bağlı olarak değişmektedir. 4°C ve 24°C deki çalışmada 24°C de giderimin daha etkili olduğunu belirtmiştir (Allen vd., 2002).

Çizelge 3. Giriş ve çıkış suyundaki KOİ değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

NH₄⁺-N (mg/L) değeri çalışmamızda giriş suyunda 79 mg/l, çıkış suyunda ise 58 mg/l olarak belirlenmiş olup (Şekil 2) uzaklaştırma oranı %26,6'dır. N giderimi özellikle pH'a bağlıdır. Zimmo (2003) Su mercimeği sisteminde 5-7 pH arasında %26-33, 7-9 pH değerlerinde, %38-41 giderim vermişlerdir. Tekoğul (2023b) atık su arıtımında *L. minor*'u kullandığı çalışmada NH₄⁺-N değerini giriş suyunda 474,2 mg/L, çıkış suyunda ise 206,3 mg/L tespit etmiştir. Žaltauskaitė vd. (2014) giriş suyunda NH₄⁺-N değerini 88,34 çıkış suyunda ise 78,75 mg/l olarak saptamışlardır. Zhao vd. (2014) giriş suyunda NH₄⁺-N değerini 17,59 çıkış suyunda ise 5,98 mg/l olarak saptamışlardır (Çizelge 4). Azot (N), kentsel atık su, kentsel ve tarımsal alanlardan gelen yağmur suları ve çeşitli endüstriyel süreçlerin atık suları için önemli bir bileşendir (DeBusk, 1999).

Çizelge 4. Giriş ve çıkış suyundaki NH₄⁺-N değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

NO₃-N (mg/L) değeri çalışmamızda giriş suyunda 26 mg/l iken çıkış suyunda 13 mg/l olarak belirlenmiş olup (Şekil 2) uzaklaştırma oranı %50 olarak saptanmıştır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda giriş ve çıkış sularındaki NO₃-N değerleri sırasıyla; Bal Krishna ve Polprasert (2008) 27-16 mg/L, Azeez ve Sabbar (2012) 21-9 mg/L, Žaltauskaitė vd. (2014) 0,05-0,02 mg/L, Tekoğul (2023b) 33,68-28,87 mg/L olarak tespit etmişlerdir (Çizelge 5). Tarlan vd. (2005) 0,3 mg/L NO₃-N içeren giriş suyunda %90 giderim sağlamıştır.

Çizelge 5. Giriş ve çıkış suyundaki NO₃-N değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Redd ve De Busk (1985)'in sucul makrofitlerin besin giderme kapasitesi üzerine yaptığı araştırmada, N için %16-%75 arasında bir giderim oranını saptamışlardır. Körner ve arkadaşları (Körner vd., 1998) yapmış oldukları çalışmada su mercimeğinin başlangıçtaki azot alımının toplam azot girişinin %42'sini oluşturduğunu, geri kalan azot gideriminin nitrifikasyon-denitrifikasyon, buharlaşma ve çökeltme yoluyla yalnızca %16 olduğunu tespit etmişlerdir.

PO₄³⁻-P değeri çalışmamızda giriş suyunda 16 mg/L iken, çıkış suyunda 9 mg/L'dir (Şekil 2). Uzaklaştırma oranı %43,8 olarak saptanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde; Azeez ve Sabbar (2012) giriş suyunda PO₄³⁻-P değerini 7,01 mg/L, çıkış suyunda ise 4,9 mg/L olarak belirtmişlerdir. Žaltauskaitė vd. (2014) yaptıkları çalışmada giriş suyunda bu değeri 19,38 mg/L, çıkış suyunda ise 11,79 mg/L olarak saptamışlardır. Tekoğul (2023b) yapmış olduğu çalışmada giriş suyunda PO₄³⁻-P değerini 142,83 mg/L, çıkış suyunda ise 119,86 mg/L olarak tespit etmiştir. Redd ve De Busk (1985) sucul makrofitlerin besin giderme yeteneği üzerine yaptıkları çalışmada; P için %12-%73 arasında bir giderim oranını saptamışlardır (Redd ve DeBusk, 1985). Bu çalışmada, araştırmacılar su mercimeği ile kaplı doğal arıtmada, su mercimeği olmayan kontrol ortamına göre belirgin şekilde daha hızlı fosfor giderimi gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Fosfor (P), N gibi, önemli bir bitki besin maddesidir, bu nedenle

çevreye P eklenmesi genellikle göllerin ötrofikasyonuna neden olmaktadır. Sucul makrofit sistemlerinden fosforun uzaklaştırılması bitki alımı, mikrobiyal immobilizasyon, çöken bitki dokusu içine, altta yatan sedimentler tarafından tutulma ve su sütununda çökme nedeniyle olmaktadır (Anonim, 1998). Atık sularındaki fosfor; ortofosfat, polifosfat veya organik fosfor olarak bulunmakta olup (Surampalli vd., 1997) bu da biyotransformasyon, adsorpsiyon, çökme, sedimentasyon, mineralleşme ve hidroliz gibi süreçlerden etkilenmektedir (Dotch ve Gerald, 1995).

Yüksek seviyelerdeki N ve P'nin doğal su kütlelerimizin zenginleşmesine ve ötrofikasyona neden olduğu bilinmektedir. Besin maddeleri (N, P) genellikle bitki biyokütlesinde birikir ve hasat yoluyla uzaklaştırılır (Gregory, 1999). Amonyakın su mercimeği alımı, nitrifikasyon denitrifikasyonu, amonyak sıyırma ve alg ve mikrobiyal asimilasyon yoluyla giderilebildiği belirtilmiştir (Al-Nozaly vd., 2000). Azot, su içinde var olabilen çeşitli formlardan oluşur, bunlar arasında parçacıklı ve çözülmüş organik N, amonyum, nitrit ve nitrat bulunur. Bu çeşitli formlar, azot döngüsü içinde birbirleri için kaynaklar veya son ürünler olarak dönüşebilir ve hizmet edebilir (Dotch ve Gerald, 1995). Atıksularda bulunan azot ve fosfor bileşikleri alıcı ortamlarda alg patlamalarına, oksijen kaybına, balık ölümlerine, biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açmakta olup insan ve hayvanların sağlığı açısından da olumsuz etki yaratmaktadır. Bu nedenle atıksu deşarjlarında fiziko-kimyasal (sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen, iletkenlik, azot ve fosfor) parametrelerin sınır değerler içinde olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir (Coşkun vd., 2018). Sonuç olarak son yıllarda atıksulardan kirleticilerin artılmasında sucul bitkilerden yararlanma çok gündemde olup çalışmamızda da diğer çalışmalarda olduğu gibi sudaki kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında *Lemna minor* sucul bitkisinin oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Sulak alan ekosistemlerinde çevrenin temizlenmesinde ve iyileştirilmesinde lemna, sudaki kirleticileri emerek veya parçalayarak ötrofikasyonu azaltır. Bu süreçte su bitkileri kirli suyun geri dönüşümü ve çevre sağlığı açısından etkili bir çevreci yaklaşımdır.

Fitoremediasyon sonucunda su bitkilerinden elde edilen biyokütle hayvan yemi, gübre, peyzaj, biyoenerji üretimi ve biyokütle yakıtı olarak elektrik veya ısı üretmek amacıyla kullanılabilir. Bu tür kullanımlar fitoremediasyonun çevresel iyileştirme sürecinin yalnızca bir kısmını temsil eder. Ortaya çıkan biyokütle çok yönlü bir ekonomik kazanç sağlar. Sonuç olarak, fitoremediasyon sürecinde kullanılan bitkilerin etkinliği birçok faktöre bağlıdır ve her durumda özelleştirilmiş bir yaklaşım gerekebilir. Bitkilerin kullanımı, temizleme işlemiyle ilişkili kirletici maddelerin türüne, bitkilerin yetiştirildiği ortama ve bitkilerin ekonomik veya ekolojik değerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, fitoremediasyon projeleri genellikle dikkatli bir planlama ve uygulama gerektirir.

ETİK STANDARTLARA UYUM

Çıkar Çatışması Beyanı:

Çalışma tek kişi tarafından gerçekleştirilmiştir.

Araştırmacıların Katkı Oranı:

Araştırma tek kişi tarafından gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Allen WC, Hook PB, Biederman JA, Stein OR. (2002). Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation, *Journal of Environmental Quality*, 31(3), 1010-1016.
- Al-nozaly F, Alaerts G, Veenstra S. (2000). Performance of duckweed covered sewage lagoons-II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity, *Water Research*, 34(10), 2734-2741.
- Anonim. (1998). Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. United States environmental protection agency office of research and development.
- Awuah E, Oppong-Peprah M, Lubberding HJ, Gijzen HJ. (2004). Comparative performance studies of water lettuce, duckweed, and algal-based stabilization ponds using low-strength sewage, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 67(20-22), 1727-1739.
- Azeez NM, Sabbar AA. (2012). Efficiency of duckweed (*Lemna minor* L.) in phytotreatment of wastewater pollutants from Basrah oil refinery, *Journal of Applied Phytotechnology in Environmental Sanitation*, 1(4), 163-172.
- Brasil YL, Silva AF, Gomes RF, Amaral MC. (2021). Technical and economic evaluation of the integration of membrane bioreactor and air-stripping/absorption processes in the treatment of landfill leachate, *Waste Management*, 134, 110-119.
- Cheng J, Bergmann BA, Classen JJ, Howard JW, Yamamoto YT. (2002). Nutrient removal from swine lagoon liquid by *Lemna minor*. *Am Soc Agriculture Engineering*, 45, 1003-1010.
- Ciria MP, Solano ML, Soriano P. (2005). Role of Macrophyte *Typha latifolia* in a Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Assessment of Its Potential as a Biomass Fuel, *Biosystems Engineering*, 92(4), 535-544.

- Coşkun Ç, Pulatsü S, Coşkun T. (2018). Evsel atıksulardan Azot ve Fosforun Biyolojik Giderilme Yöntemleri, *KİFMD*, 2, 53-63.
- Culley DD, Rejmankova E, Kvet Jand Fry JB. (1981). Production, chemical quality, and use of duckweed (Lemnaceae) in aquaculture, waste management, and animal feeds. *J. World Maric. Soc*, 12(2), 27-49.
- Dotch MS, Gerald JA. (1995). Screening level model for estimating pollutant removal by wetlands, *Wetlands research program technical report*, WRP-CP-9.
- Dipu S, Kumar AA, Thanga VSG. (2011). Phytoremediation of dairy effluent by constructed wetland technology, *The environmentalist*, 31, 263-278.
- Ekperusi AO, Sikoki FD, Nwachukwu EO. (2019). Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective, *Chemosphere*, 223, 285e309. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.025>.
- EL-Kheir WA, Gahiza Ismail, Farid Abou EL-Nour, Tarek Tawfik, Doaa H. (2007). Assessment of the efficiency of Duckweed (*Lemna gibba*) in wastewater treatment, *International Journal of agriculture & Biology*, 2007; 5:681-687.
- Eremektar G, Tanık A, Övez S, Orhon D, Arslan Alaton İ, Gürel M. (2005). Türkiye’de doğal arıtma uygulamaları ve projeleri. Medaware Projesi. Ankara.
- Hammouda O, Gaber A, Abdel-Hameed MS. (1995). Assessment of effectiveness of treatment of wastewater contaminated aquatic system with *Lemna gibba*, *Enzyme and Microbial Technology*, 17:317-323.
- Hastie BA. (1992). The use of aquatic plants in wastewater treatment: a literature review, 0141.
- Hoagland DR, Arnon DI. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California agricultural experiment station, 347(2nd edit).
- Iatrou EI, Kora E, Stasinakis AS. (2019). Investigation of biomass production, crude protein and starch content in domestic wastewater treatment systems planted with *L. minor* and *L. gibba*, *Environmental Technology*, 40, 2649e2656. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1448002>.
- Gatidou G, Oursouzidou M, Stefanatou A, Stasinakis AS. (2017). Removal mechanisms of benzotriazoles in duckweed *Lemna minor* wastewater treatment systems, *Sci. Total Environ*, 596e597, 12e17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.051>.
- Gökyay O, Balcıgil M. (2017). Ham Ve Sentetik Atıksularda Su Mercimeği (*Lemna Minor L.*) Kullanılarak Karbon Ve Besi Maddelerinin Gideriminin İncelenmesi Ve Karşılaştırılması, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 29(4), 124-130.
- Gregory DR. (1999). Community based technologies for domestic wastewater treatment and reuse: Options for urban agriculture. International development research centre cities feeding people series report 27.
- Karabas H. (2019). Removal of heavy metal pollution in soil and water by phytoremediation method. *Apelasyon*, 69. <http://apelasyon.com/Yazi/1034-toprak-ve-sulardaki-agir-metal-kirliliginin-fitoremediasyon-yontemiyle-giderilmesi>.
- Körner S, Lyatuu GB, Vermaat JE. (1998). The influence of *Lemna gibba L.* on the degradation of organik material in duckweed-covered domestic wastewater, *Water Research*, 32: 3092-3098.
- Krishna KB, Polprasert C. (2008). An integrated kinetic model for organic and nutrient removal by duckweed-based wastewater treatment (DUBWAT) system, *Ecological engineering*, 34(3), 243-250.
- Leng RA. (1999). Duckweed: A tiny aquatic plant with enormous potential for agriculture and environment.
- MAF. (2023). Ministry of Agriculture and Forestry) General Directorate of Water Management's "Screened Artificial Wetland Pilot Project to Improve the Quality of Water Returning from Irrigation" <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/PROJELER/sygm%20tamamlanan%20projeler.pdf>
- Moragoda MAIA, Kumarage KDAN, Weerakoon GMPR, Mowjood MIM. (2022). Investigation on the performance of multistacked floating wetlands for leachate treatment in a controlled environment. Proceedings of the 11th International Conference on Sustainable Built Environment (Kandy, Sri Lanka), pp. 657–667.
- Mitsch WJ, Jrgensen SE. (2003). Ecological engineering and Ecosystem restoration, Wiley, 0-471-33264-X, 424 pages.
- Oron G, Porath D, Jansen H. (1987). Performance of duckweed species *Lemna gibba* on municipal water for effluent renovation and protein Production, *Biotechnology and Bioengineering*, 29:258-267.
- Oron G. (1994). Duckweed culture for wastewater renovation and biomass Production, *Agric Water Management*, 26(1- 2), 27-40.

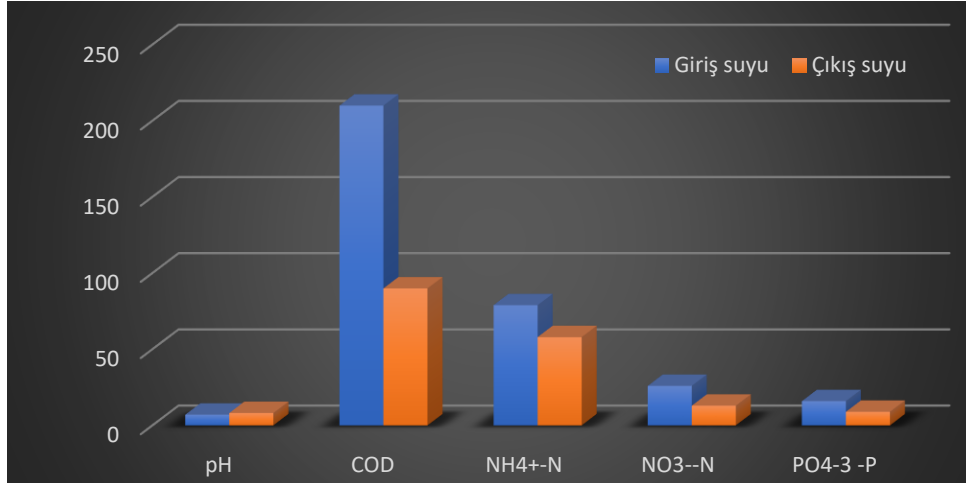
- Özengin N, Elmaci A. (2007). Performance of Duckweed(Lemna minor L.) on different types of wastewater treatment, *Journal of Environmental Biology*, 28(2), 307-314.
- Perera KRS, Yatawara M. (2021). Phytoremediation of partially treated MSW leachate by selected free floating and emergent macrophytes in subsurface vertical flow constructed wetlands, *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101928.
- Paolacci S, Stejskal V, Toner D, Jansen MA. (2022). Wastewater valorisation in an integrated multitrophic aquaculture system; assessing nutrient removal and biomass production by duckweed species, *Environmental Pollution*, 302, 119059.
- Porath D, Pollock J. (1982). Ammonia stripping by duckweed and its feasibility in circulating aquaculture, *Aquatic Botany*, 13(2), 125-131.
- Redd KR, DeBusk WF. (1985). Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes, *Journal of Environmental Quality*, 14, 459-462.
- Skillicorn P, Spira W, Journey W. (1993). Duckweed aquaculture. A new aquatic farming system for developing countries. The World Bank; Washington DC, USA.
- Smith MD, Moelyowati I. (2001). Duckweed based wastewater treatment (DWWT): design guidelines for hot climates, *Water science and technology*, 43(11), 291-299.
- Surampalli RY, Tyagi RD, Karl O, James A. (1997). Heidman. Nitrification, denitrification and phosphorus removal in sequential batch reactors, *Bioresource Technol.*, 61, 151-157.
- Thakuria A, Singh KK, Dutta A, Corton E, Stom D, Barbora L, Goswami P. (2023). Phytoremediation of toxic chemicals in aquatic environment with special emphasis on duckweed mediated approaches, *International Journal of Phytoremediation*, 25(13), 1699-1713.
- Toyama T, Hanaoka T, Tanaka Y, Morikawa M, Mori K. (2018). Comprehensive evaluation of nitrogen removal rate and biomass, ethanol, and methane production yields by combination of four major duckweeds and three types of wastewater effluent, *Biores. Technol.* 250, 464e473. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.054>.
- Selvarani AJ, Padmavathy P, Srinivasan A, Jawahar P. (2015). Performance of Duckweed (Lemna minor) on different types of wastewater treatment, *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2(4), 208-212.
- Sharma S, Singh B, Manchanda VK. (2015). Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water, *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 946-962.
- Shah M, Hashmi HN, Ghumman AR, Zeeshan M. (2015). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(3), 18-25.
- Speiles DJ, Mitsch WJ. (2000). The Effects of Season and Hydrologic and Chemical Loading on Nitrate Retention in Constructed Wetlands: A Comparison of Low- and High-Nutrient Riverine Systems, *Ecological Engineering*, 14 (2000) 77-91.
- Tarlan E, Gür K, Yılmaz Z. (2005). S.Ü. Kampüs atık sularının karakterizasyonu ve su mercimeği (Lemna minor L.) ile arıtılabilirliği, *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, 20, 4-12.
- Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. (1991). Wastewater engineering. Management, 7(1), 4.
- Tekoğul H. (2021). Lemna Minor (Duckweed) and Its Uses". Visional Studies in Agricultural and Aquatic Science II. Tolon, M. T., & Yücel, B. (Eds.). Akademisyen Books. 71-88.
- Tekoğul H. (2023a). Phytoremediation Eco-Friendly Use Of Aquatic Plants In Wastewater Treatment". *Advancements In Aquaculture: Sustainable Practices, Innovations, And Applications*. Aysun, K. & Karataş, A. P. D. B.(Eds) İksad Publication-159-192
- Tekoğul H. (2023b). Wastewater Treatment of Solid Waste Leachate and Production of Proteinaceous Biomass Using Duckweed Vegetation (Lemna minor), *Journal of Coastal Research*, 39(2), 296-302.
- Tekoğul H. (2023c). Treatment of leachate solid wastewater and protein-rich biomass production using Ceratophyllum demersum (Linnaeus, 1753). *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*.
- Temel FA. (2017). Use of artificial wetlands in the treatment of industrial wastewater. Dicle University Faculty of Engineering, *Engineering Journal*, 8(1), 213-226.
- Topal M, Karagözoğlu B, Öbek E, Topal, EIA. (2011). Bazı su mercimeklerinin nutrient gideriminde kullanımı, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(2): 12-28.
- Wolverton BC. (1979). Engineering design data for small vascular aquatic plants wastewater treatment systems. In: Proc. EPA Seminar on Aquaculture Systems for wastewater treatment, EPA 430/9-80-006,

- Yılmaz Z, Kemal GÜR, Tarlan E. (2005). Sü Kampüs Atıksularının Karakterizasyonu Ve Su Mercimeği (*Lemna Minor L.*) İle Arıtılabilirliği, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 20(4), 1-10.
- Žaltauskaitė J, Sujetoviene G, Cypaite A, Auzbikaviciute A. (2014). Lemna minor as a tool for wastewater toxicity assessment and pollutants removal agent. In Environmental engineering. Proceedings of the international conference on environmental engineering. ICEE (Vol. 9, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
- Zhao Y, Fang Y, Jin Y, Huang J, Bao S, He Z, Zhao H. (2014). Effects of operation parameters on nutrient removal from wastewater and high-protein biomass production in a duckweed-based (*Lemna aequinoctialis*) pilot-scale system, *Water science and technology*, 70(7), 1195-1204.
- Zhao Y, Tu Q, Yang Y, Shu X, Ma W, Fang Y, Duan C. (2022). Long-term effects of duckweed cover on the performance and microbial community of a pilot-scale waste stabilization pond, *Journal of Cleaner Production*, 371, 133531.
- Zimmo O. (2003). Nitrogen transformations and removal mechanisms in algal and duckweed waste stabilisation ponds. Wageningen University and Research.
- Zhang J, Zhang Y. (2014). Hydrothermal liquefaction of microalgae in an ethanol–water co-solvent to produce biocrude oil, *Energy & Fuels*, 28(8), 5178-5183.

Şekiller



Şekil 1. Su Ürünleri Fakültesi Yetiştiricilik Bölümü Urla tesisi su bitkileri yetiştirme tankı



Şekil 2. Giriş ve çıkış suyunun fizikokimyasal değerler

Çizelgeler

Çizelge 1. Belediye atık suyunun fizikokimyasal özellikleri

Fizikokimyasal özellikler	Değer
Ph	7,1
KOI (mg/L)	210
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	79
NO ₃ -N (mg/L)	26
PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)	16

Çizelge 2. Giriş ve çıkış suyunun pH değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Araştırmacılar	Giriş suyunun pH	Çıkış suyunun pH
Özengin ve Elmacı (2007)	7,20	8,00
Bal Krishna ve Polprasert (2008)	7,50	8,40
Žaltauskaitė vd. (2014)	7,30	7,40
Devlamynck vd. (2021)	7,00	6,80
Tekoğul (2023b)	8,93	8,18
Bu çalışmada	7,10	8,20

Çizelge 3. Giriş ve çıkış suyundaki KOİ değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Araştırmacılar	Giriş suyunda KOİ	Çıkış KOİ	suyunda Giderim % KOİ
Özengin ve Elmacı (2007)	294	64	%84
Selvarani (2015)	320	85	%73
Bal Krishna ve Polprasert (2008)	274	82	%78
Shah (2015)	130	87	%66
Azeez ve Sabbar (2012)	480	323	%32
Leng (1999)	461	323	%33
Gökyay ve Balcıgil (2017)	600	156	%74
Bu çalışmada	210	90	%57

Çizelge 4. Giriş ve çıkış suyundaki NH₄⁺-N değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Araştırmacılar	Giriş suyunda NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	Çıkış suyunda NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	Giderim NH ₄ ⁺ -N (mg/L)
Tekoğul (2023c)	474,2	206,3	%56,5
Žaltauskaitė vd. (2014)	88,34	78,75	%10,85
Zhao vd. (2014)	17,59	5,98	%66
Bu çalışmada	79	58	%26,6

Çizelge 5. Giriş ve çıkış suyundaki NO₃-N değerlerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Araştırmacılar	Giriş suyunda NO ₃ -N	Çıkış suyunda NO ₃ -N	Giderim NO ₃ -N
Bal Krishna ve Polprasert (2008)	27	16	%40,7
Azeez ve Sabbar (2012)	21	9	%57,14
Žaltauskaitė vd. (2014)	0,05	0,02	%60
Tekoğul (2023b)	33,68	28,87	%14,3
Bu çalışmada	26	13	%50