

S.Ü. KAMPÜS ATIKSULARININ KARAKTERİZAYSONU VE SU MERCİMEĞİ (*LEMNA MINOR L.*) İLE ARITILABİLİRLİĞİ

Zehra YILMAZ¹, Kemal GÜR² ve Esra TARLAN³

Selçuk Üniversitesi, Müh.- Mim. Fak., Çevre Müh. Bölümü, 42075 Kampüs / KONYA

¹zyilmaz@selcuk.edu.tr, ²kgur@selcuk.edu.tr, ³etarlan@selcuk.edu.tr

Makalenin Geliş Tarihi: 21.04.2005

ÖZET: Yüzen su bitkilerinden su mercimeğinin (*Lemna minor L.*), karakterizasyonu yapılan S.Ü. Kampüs atıksularının arıtılmasındaki etkinliği laboratuvar ölçeğinde araştırılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında S.Ü. Kampüs atıksuyundan 1 yıl süreyle anlık ve kompozit numuneler alınarak parametre ölçümleri yapılmıştır. Atıksu arıtımı 50x50x20 cm boyutlarındaki tanklarda, ışık, sıcaklık ve nemin kontrol altında tutulduğu iklim odasında kompozit atıksu numunesi ile gerçekleştirilmiştir. Kesikli ve sürekli sistemle arıtımda tankların giriş-çıkış sularında pH, askıda katı madde (AKM), bulanıklık, çözülmüş oksijen (ÇO), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), nitrat-N, amonyak-N, toplam P ve suda bulunan ağır metallerin analizleri yapılmıştır. Bitki bulunmayan kontrol tankları da diğerlerine paralel olarak çalıştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, orta derecede kirli bir evsel atıksu niteliğindeki Kampüs atıksuyunun, mevsimsel ve günlük kalite salınımlarına rağmen, su mercimeğiyle oluşturulan sistemle başarılı bir şekilde arıtılabileceğini göstermektedir. Bitkiler nihai arıtım verimine yaklaşık yedi günlük bekleme süresinde ulaşabilmektedir. Buna göre yapılan sürekli arıtım denemelerinde su mercimeğinin büyüme hızı, 4.5 g/gün olarak belirlenmiştir. Bütün parametrelerin verimleri birlikte değerlendirildiğinde kesikli sistemde %65 – 90, sürekli sistemde ise %72 – 95 oranında arıtım performansı sağlandığı söylenebilmektedir. Buna göre, su mercimeği ile atıksu arıtımının küçük ölçekli ve salınımlı atıksu karakteristiği olan sistemlerde başarı ile uygulanabileceği önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arıtım, karakterizasyon, *Lemna minor L.*, su mercimeği, S.Ü. Kampüs atıksuyu.

Characterization and Treatability of S.U. Campus Wastewater by Duckweed (*Lemna Minor L.*)

ABSTRACT: Characterization of domestic wastewater from Selcuk University Campus and the effectiveness of duckweed (*Lemna minor L.*) in wastewater treatment was searched in lab scale system. In wastewater characterization, grab and composite samples were taken from the S.Ü. Campus during one year and parameter analyses were performed. Wastewater treatment was applied on composite samples in batch and continuous operation in tanks with dimensions of 50*50*20 cm, placed in a climate room where temperature, lightening and humidity were under control. pH, turbidity, suspended solids (SS), dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), nitrate-N, ammonia-N, total P and heavy metal variations in the influent and effluent were analysed. Control tanks were also processed in parallel with the experimental tanks. The results indicate that, despite the fluctuating quality, duckweed is effective in treatment of Campus wastewater, which is a medium strength domestic wastewater. Aquatic plant is able to reach its ultimate removal efficiency in 7 days with growth rate of 4.5 g/d. Considering all parameters, it can be stated that in batch system, 65 – 90%, in continuous system 72 – 95% removal efficiencies were achieved. Therefore, utilization of *Lemna minor L.* can be suggested for small-scale treatment facilities with fluctuating quality influent.

Key Words: Treatment, characterization, *Lemna minor L.*, duckweed, S.U. Campus wastewater.

GİRİŞ

Günümüzde yüzen su bitkileriyle arıtım tekniği tüm dünyada uygulanmaktadır. Su mercimeği bu amaçla kullanılan bitkilerden biridir ve oluşturulan sistemlerde atıksu arıtımı için temel ilke, hem bitkilerin hem de mikroorganizmaların birlikte büyümesidir (Wolverton, 1986). Su mercimeği, atıksuların arıtılmasında aerobik ve anaerobik bakteriler ile işbirliği içindedir (Metcalf and Eddy, 1991). Nüfusun az olduğu küçük kırsal alanlarda su mercimeğine dayalı atıksu stabilizasyon havuzları evsel atıksuların arıtılması için başarılı bir şekilde kullanılabilir (Dalu ve Ndamba, 2003).

Su bitkileriyle arıtma işleminde çökeltme, adsorpsiyon, bakteriyel ayrışma ve bitkisel kullanım gibi arıtma mekanizmaları etkindir (Karagöz, 1998). AKM giderimi esas olarak; çökeltme, organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından tüketilmesi, küçük fraksiyonların su mercimeği kökleri tarafından adsorpsiyonu ve alg büyümesinin engellenmesiyle gerçekleşmektedir. Organik madde giderimi, su mercimeği tarafından hem oksijen hem de bakteriyel büyüme için yüzey alanı sağlamak suretiyle artmaktadır (Körner ve diğ., 1998). Su mercimeğinin büyümesi, amonyum ve fosfat formlarında nutrientlerden yararlanabilmesine bağlıdır (Cheng ve diğ., 2001). Amonyum, su mercimeğinin öncelikli azot kaynağıdır (Caicedo ve diğ., 2000). Bunun yanısıra azot bileşikleri, askıda katıların organik azotla çökeltmesi, amonyağın uçması ve nitrifikasyon-denitrifikasyon gibi yollarla giderilmektedir. Fosfor ise, bitki alımı, partiküller ve organik maddeler üzerine adsorpsiyon, kimyasal çökeltme ve çamur giderimi gibi yollarla sudan uzaklaştırılmaktadır (Smith ve Moelyowati, 2001).

Ağır metallerin, organizmaların hücre fonksiyonlarına zarar vererek biyolojik aktiviteyi inhibe etmesi sebebiyle atıksudan giderilmesi gerekmektedir (Smith ve Moelyowati, 2001, Boniardi ve diğ. 1999). Bunlar da yüzen su bitkileriyle oluşturulan sistemlerle sudan uzaklaştırılabilir (Rahmani ve Sternberg, 1999; Boniardi ve diğ., 1999; Bergman ve diğ., 2000), ancak bu konuda yapılmış çok fazla

çalışma bulunmamaktadır. Ağır metaller, yüksek konsantrasyonlarda olmadıkları sürece, su mercimeğine dayalı atıksu arıtma sistemlerinde çamur olarak çökeltme, bitki tarafından alım ve adsorpsiyon prosesleriyle giderilirler (Smith ve Moelyowati, 2001). Yüzen su bitkileri çoğu ağır metali genellikle %85-95 verimle giderebilmektedir (Metcalf & Eddy, 1991). Bazı araştırmacılar, su mercimeği ile Pb gideriminde %85-90 verim elde edildiğini belirtmişlerdir (Rahmani ve Sternberg, 1999).

Su mercimeği ile doğal arıtım sistemlerinin yapım ve işletim maliyetlerinin düşük olması, herhangi bir kimyasal madde veya mekanik teçhizata gerek olmayışı, tamamen doğal bir mekanizma ile çalışması ve buna ilave olarak evsel atıksu gibi besi maddesince zengin bir ortamda, organik yükün proteince zengin bitki biyokütlelerine dönüştürülmesi, bu sistemleri cazip hale getirmektedir. Atıksu arıtımının yanı sıra, protein içeriği yüksek biyokütlelerden hayvan yemi yapımında veya biyogaz üretiminde yararlanılabilmektedir (Uysal, 1998).

Üniversite kampüsleri, gerek öğrenci kapasitesi gerekse bünyesinde bulunan laboratuvarlar, sosyal tesisler, lojmanlar ve yurtlar ile önemli miktarda atıksuyun oluşmasına neden olmakta ve özellikle laboratuvarlardan dolayı içerisinde organik maddelerin yanısıra ağır metal de bulundurmaktadır. Kampüs nüfusu eğitim-öğretim faaliyetlerine bağlı olarak gerek gün içinde gerekse aylık süreçlerde önemli değişiklikler göstermekte ve bu değişiklikler atıksuyun debi ve kompozisyonuna da yansımaktadır. Topluma örnek teşkil eden kurumlar olan Üniversitelerde atıksuların arıtımı kanuni bir yaptırımdan çok sosyal bir gerekliliktir. Arıtılabilirliğin tespitinde ise debi ve kompozisyonun değişken olduğunun bilinciyle su kalitesinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu sebeple, sunulan bu çalışmada, öncelikle Selçuk Üniversitesi (S.Ü.) Kampüs atıksuyunun 1 yıllık süreyle alınan anlık ve kompozit numunelerde karakterizasyonu yapılmıştır. Bu bölümün başlarında da vurgulandığı gibi, su mercimeği ile oluşturulan arıtım sistemlerinin kampüs gibi nüfusun fazla olmadığı küçük alanlarda uygulanabilir bir yöntem olmasından dolayı, çalışmanın ikinci

kısmında, su mercimeği (*Lemna minor L.*)'nin kesikli ve sürekli sistemlerde kampüs atıksuyunun arıtımındaki etkinliği belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Deney Düzenegi

Atıksuların kontrollü şartlarda kesikli sistem ile arıtılabilirlik çalışması için öncelikli olarak bir iklimlendirme odası hazırlanmıştır. Bu odanın sıcaklığı ve nemi, su mercimeğinin en uygun büyüme koşulları olan 25°C ve %60-70 oranında sabit tutulmuştur. Odanın başka yerden ışık alması engellenerek, bitkiler için gerekli olan gün ışığına simüle edilen ışık iki adet L 36W/77 Fluora model 1400 lumen ve iki adet 21 W/11-860 Dulux model 1155 lumen ışık yayan lambalarla elde edilmiştir. Bitkilerin bulunduğu tanklarda su yüzeyinde AVO LM 4 marka luxmetre ile ölçülen ışık şiddeti ise 220 lux'tür. Bu lambalar bir zaman saatine bağlanarak, gün ışığına benzeşimi sağlayacak şekilde yanması sağlanmıştır. Bu iklim odasına 50x50x40 cm boyutlarında plexyglass tanklar yerleştirilmiş ve bu tanklar hem bitki stoklama hem de arıtılabilirlik deneyleri için kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan su mercimeği (*Lemna minor L.*) Silifke-Atakent mevkiinde bulunan kanaldan alınmış, iklimlendirme odasına getirilerek stok tanklarına yerleştirilmiştir. Burada öncelikle ortam koşullarına adaptasyonu sağlandıktan sonra stok tanklarında çoğaltılan su mercimekleri deneysel çalışmalar için kullanılmıştır.

S.Ü. Kampüs atıksularının karakterizasyonu

S.Ü. Kampüsü atıksularının genel ve değişken özelliğinin belirlenmesi için 1 yıl süreyle karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar çerçevesinde, kampüs atıksularının tamamının toplandığı ana kanaldan gündüz, yoğun saatlerde (saat 9.00-16.00 arasında) sekiz saat boyunca her saat anlık numuneler alınmış ve hem bu sekiz adet numunenin hem de saatlik anlık numunelerin eşit oranda karıştırılmasından elde edilen kompozitin parametre analizleri (pH, Bulanıklık, AKM, Çözünmüş Oksijen, KOI, Nitrat-N,

Amonyak-N, TP, ağır metaller) yapılmıştır. Bu numune alma işlemi ayda bir gün ve günde sekiz saat olmak üzere toplam 12 ay tekrarlanmıştır.

S.Ü. Kampüsü Atıksularının Kesikli Sistemle Arıtılması

S.Ü. Kampüs alanı atıksularının su mercimeği (*Lemna minor L.*) ile arıtılabilirliğinin belirlenebilmesi amacıyla, öncelikle kesikli sistemde arıtım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, iklimlendirme odasında bulunan tanklara kompozit atıksu numunesinden 24 L doldurulmuştur. Tanklardan birine bitki yerleştirilmemiş, Kontrol 1 tankı olarak işletilmiştir. Tanklara atıksu doldurulduktan sonra üzerine su yüzeyini yaklaşık %75 oranında kaplayacak şekilde bitki yerleştirilmiş (Test tankı) ve 10 gün süreyle tanklardan belirli aralıklarla numune alınarak analizler yapılmıştır.

S.Ü. Kampüsü Atıksularının Sürekli Sistemle Arıtılması

Kesikli sistem bulgularından hareketle sürekli sistemde 7 günlük bekleme süresi esas alınmış, tanklara 3.5 L/gün debide atıksu beslemesi yapılmış ve aynı oranda su tanklardan atılmıştır. Su mercimeği tankların yüzey alanını yaklaşık %70-75 oranında kaplayacak şekilde yerleştirilmiştir (Test Tankı). Ayrıca bitki bulunmayan kontrol tanklarında gelişen alg biyokütlelerinin miktarını belirlemek ve alglerin sistemdeki arıtım üzerindeki etkisini belirlemek için iki adet bitkisiz tank çalıştırılmıştır (Kontrol 1 ve Kontrol 2). Bu tanklardan Kontrol 2'ye alg metabolizmasını bloke eden actidione maddesi %0.001 oranında ilave edilerek su mercimeğinin yokluğunda alg büyümesi önlenmiştir. 2-3 gün aralıklarla bütün tanklardan numune alınarak analizler yapılmıştır.

Analizler

Analizleri gerçekleştirilen parametrelerden Bulanıklık, Nefelometrik Yöntem; AKM, Gravimetrik Yöntem; Çözünmüş Oksijen, Winkler Yöntemi (İyodometrik Yöntem); KOI, Open-Reflux Titrimetrik Yöntem; NO₃-N,

Kolorimetrik Yöntem; NH₃-N, Nessler Yöntemi; Klorofil-a, Aseton Ekstraksiyon Yöntemi kullanılarak standard metotlara göre ölçülmüştür (APHA, 1998). Toplam Fosfor ve ağır metal (Al, Cr, Pb) analizleri ise ICP-AES cihazında gerçekleştirilmiştir. pH ölçümlerinde, 1-11 aralıklı Macherey-Nagel + CO marka pH kağıdı kullanılmıştır.

BULGULAR

Bir yıl boyunca yapılan ve her ay en az bir kez olmak üzere gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarında, en fazla kirlilik yükünün geldiği zaman olan 9.00 – 16.00 saatleri arasında sekiz saat boyunca alınan anlık ve kompozit numunelerin pH, bulanıklık, AKM, çözünmüş oksijen, KOİ, nitrat-N, amonyak-N ve toplam P parametrelerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de bir yıl boyunca gerçekleştirilen bu analizler sonucunda belirlenen atıksu kompozisyonu yer almaktadır. Bu atıksu karakterizasyonu literatür ile birlikte değerlendirildiğinde, S.Ü. Kampüs atıksuyunun orta derecede kirli bir evsel atıksu niteliği taşıdığı görülmektedir (Metcalf & Eddy, 1991). Tablo 1’de görüldüğü gibi her bir parametrenin ölçülen minimum ve maksimum değerleri oldukça geniş aralıklar oluşturmaktadır. Bu durum sabah 09.00’da alınan numunelerin atıksuyun gece saatlerindeki kompozisyonunu yansıtması ve günün en kalabalık ve atık yükü en fazla olan öğlen saatlerinin numunelerinin de atıksuyun en kirli kompozisyonunu yansıtması şeklinde açıklanabilmektedir.

Nüfusun sabit ve statik olmaması, hem gün içinde hem de dönemselsel olarak dinamik bir nüfus olması sebebiyle de min. – max. kompozisyon aralığı oldukça geniştir. Arıtım çalışmalarında kompozit numune kullanılmıştır.

Kesikli Sistemle Arıtım Süreci

S.Ü. Kampüs atıksularının karakterizasyonunun ardından, bu suların su mercimeği ile arıtılabilirliğini belirlemek amacıyla önce kesikli sistemle arıtım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, en uygun bekleme süresini ve su mercimeğinin arıtmadaki etkinliğini belirlemek amacıyla bitkili (Test Tankı) ve bitkisiz (Kontrol 1 Tankı) tanklar

kullanılmıştır. Kesikli arıtım süresince tanklardan alınan numunelerin pH değerleri 7-8 aralığında gözlenmiştir. Numunelerde Bulanıklık, AKM, çözünmüş oksijen, KOİ, Nitrat-N, toplam P parametrelerinin ve ağır metallerin (Al, Cr, Pb) analizleri yapılmıştır. Kesikli sistemde bekleme süresi önce 10 gün alınarak deneyler yapılmıştır. Ancak parametrelerin konsantrasyonlarının önemli kısmının 7 gün içinde azaldığı, 7 günlük bekleme süresi ile 10 günlük bekleme süresi sonunda elde edilen giderim verimlerinin birbirine yakın değerler olduğu bulunmuştur. Bu nedenle sistemin bekleme süresi 7 gün olarak önerilebilmektedir. Tablo 2’de su mercimeği bulunan (Test Tankı) ve bulunmayan (Kontrol 1 ve 2) tanklarda atıksudaki kirlilik parametrelerinin giriş ve çıkış değerleri gösterilmektedir.

Tablo 1. S.Ü. Kampüs atıksuyu kompozisyonu.

Table 1. Composition of S.U. Campus wastewater.

Parametre	Min.-Maks. Değer	Ortalama	Kompozit Numune Ortalaması
Bulanıklık (NTU)	30-690	123.6	122.6
AKM (mg/L)	12-286	162.8	165.1
Ç. Oksijen (mg/L)	0.6-7	3.7	1.7
KOİ (mg/L)	80-1440	524	560.2
Nitrat-N (mg/L)	0.01-1.4	0.35	0.26
Amonyak-N (mg/L)	2.9-50.8	10.61	10.53
T. Fosfor (mg/L)	0.25-15	7.19	7.44
Alüminyum, Al (mg/L)	0.01-0.83	0.14	0.14
Krom, Cr (mg/L)	0.002-1.17	0.08	0.13
Kurşun, Pb (mg/L)	0.002-0.16	0.02	0.01

Suda mevcut bulanıklığın fiziksel çökme ile gideriminde bu şekilde etkili olan su mercimeği aynı zamanda tank yüzeyinde ışık geçişini engelleyerek alg oluşumuna da izin vermediğinden bulanıklık artışı da olmayacaktır. Özellikle 10 günden uzun bekleme sürelerinde bitkisiz tanklarda zamanla gelişen alg, suda bulanıklığı arttırmaktadır. Su mercimeği AKM ve bulanıklık gideriminde metabolik olarak doğrudan bir etkinliğe sahip değildir. Ancak fiziksel AKM giderimine, kopan köklerin çökmesi sırasında sürüklediği taneciklerle katkıda bulunmaktadır. Tablo 2’de görüldüğü gibi su mercimeğinin bulunduğu tanklarda AKM konsantrasyonu yaklaşık %90 azalmıştır. Benzer şekilde bu tanklarda bulanıklık giderimi %80 seviyelerine ulaşmaktadır.

Tablo 2. Kesikli sistemle arıtım sürecinde giriş ve çıkış konsantrasyonları.

Table 2. Influent and effluent concentrations in batch treatment process.

Parametre	Çıkış Konsantrasyonu, mg/L			
	Giriş	Test Tankı ¹	Kontrol 1 ²	Kontrol 2 ³
AKM (mg/L)	138	16.6	48.3	48.3
Bulanıklık (NTU)	118	23.6	33.0	33.0
Org. Madde (mg/L)	213	74.6	102.2	102.2
KOI (mg/L)	437	78.7	113.6	113.6
Nitrat-N (mg/L)	0.3	0.03	0.06	0.06
Toplam P (mg/L)	8.5	1.53	4.1	4.1
Al (mg/L)	0.04	0.0096	0.0164	0.0164
Cr (mg/L)	0.5	0.145	0.18	0.18
Pb (mg/L)	0.05	0.008	0.016	0.016

¹Su mercimeği bulunan tank.

²Su mercimeği bulunmayan ve alg gelişen tank.

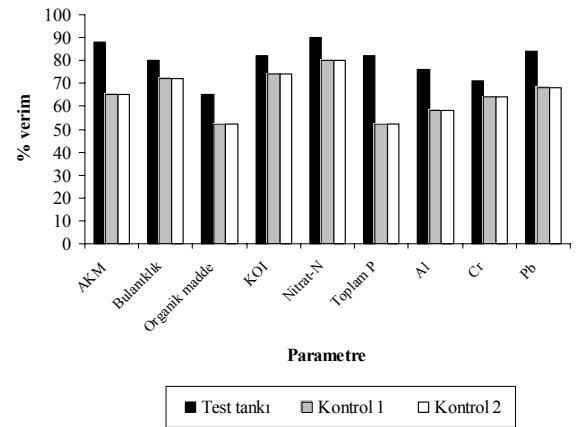
³Su mercimeği ve alg bulunmayan tank.

Tablo 2’de görüldüğü gibi su mercimeği ile %82 gibi yüksek bir KOİ giderim verimi elde edilmiştir. Sistemde, organik maddelerin bitki köklerinin adsorpsiyon ve absorpsiyon mekanizması ile alınmakta, bunun yanında köklerde bulunan aerobik ve anaerobik bakteriler tarafından tüketilmektedir. Böylece atıksuda bulunan organik madde (KOİ) miktarında önemli düzeyde giderim gerçekleşmiştir. Bitkiler organik maddelerin yanısıra azot ve fosfor gibi nutrientleri de kullandıklarından kesikli sistemde, %90 Nitrat-N, %82 TP giderim verimi elde edilmiştir (Tablo 2). Bitkilerin yanısıra köklerinde gelişen ve yaşayan mikroorganizmalar da metabolik faaliyetlerini sürdürürken azot ve fosforu da kullanmış ve bu giderim verimlerine yansımıştır.

Alınan giriş ve çıkış numunelerinde önce bütün ağır metallerin analizleri yapılmıştır. Tablo 2’de görüldüğü gibi atıksuda Al, Cr ve Pb metallerinin diğerlerine kıyasla belirgin seviyede olduğu görülmektedir. Kesikli sistemle arıtımda, Al, Cr ve Pb gideriminde sırasıyla %76, %71 ve %84 oranlarında arıtım verimi elde edilmiştir. Konsantrasyon olarak giriş değerleri çok yüksek olmadığı için bu ağır metaller su mercimeği veya köklerindeki mikroorganizmalar için toksik etki yaratmamıştır. Giderimlerinin de adsorpsiyon ve/veya metabolik alım ile sağlandığı söylenebilmektedir. Kampüsün dinamik nüfusu gözönüne alındığında zaman zaman bu metallerin daha yüksek seviyede gelmesi veya başka ağır metallerinde yer alması olasıdır.

Ancak bunlar anlık iniş çıkışlar şeklinde olduğundan sistemin yukarıda belirtilen %70-80’lik verimleri sağlayabileceği açıktır.

Şekil 1’de Test ve Kontrol tanklarında elde edilen parametre giderim verimleri grafik üzerinde bir arada gösterilmektedir. Kesikli sistemde, Test ve Kontrol tanklar kıyaslandığında, bitkili tanklarda tüm parametrelerde Kontrol tanklarına kıyasla daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir.



Şekil 1. Kesikli sistemde test ve kontrol tanklarında giderim verimlerinin kıyaslaması.
Figure 1. Comparison of removal efficiencies of test and control tanks in batch system.

Çalışılan bu arıtım sisteminde çözünmüş oksijenin iki yönlü değişimi söz konusudur. Birincisi bitkilerin yaprak kısımlarından köklere taşıdıkları oksijenle ve arıtım gerçekleştikçe sudaki oksijenin artması, diğeri de köklerde bulunan aerobik mikroorganizmalar tarafından organik madde tüketildikçe bu besleme faaliyeti sırasında oksijenin tüketilmesidir. Bu durumda arıtım süreci sonunda suda KOİ giderimine de ulaşıldığına göre net oksijen değerinde artış olması beklenmektedir. Sistemde ölçülen başlangıç ve sonuç çözünmüş oksijen konsantrasyonu Test tankında 1.6 mg/L’den, 2.2 mg/L’ye, Kontrol 1 ve 2 tanklarında ise 2.8 mg/L değerine artmıştır. Bu değerler, beklendiği gibi, havadan suya transferin gerçekleştirildiğini ve transfer edilen oksijenin de Test tanklarında arıtım sırasında kullanıldığını göstermektedir.

Sürekli Sistemle Arıtım Süreci

Bu aşamada tanklarda ortalama 3.5 L/gün debiyle su giriş-çıkış sağlanmıştır. Her deney

seti, sistemin kararlı konuma ulaşip nihai veriminin açıkça görülebilmesi için 25 günlük bir periyotta çalıştırılmıştır. Sistemde, tanklardan alınan numunelerin pH değerleri 7-8 aralığındadır. Su mercimeğinin atıksu arıtımındaki etkinliğini (Test tankı) yanısıra bitkinin bulunmadığı tankta (Kontrol 1) ışığın da etkisiyle alg büyümesinin de arıtıma sebep olduğu gözlemlendiğinden bir de alg gelişiminin bloke edildiği bir kontrol tankı daha (Kontrol 2) diğerlerine paralel olarak çalıştırılmıştır. Bu tanklarda elde edilen giriş ve çıkış konsantrasyonları ile alg gelişimini ifade eden klorofil-a konsantrasyonları Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Sürekli sistemle arıtım sürecinde ortalama giriş ve çıkış konsantrasyonları.

Table 3. Influent and effluent concentrations in continuous treatment process.

Parametre	Çıkış Konsantrasyonu			
	Giriş	Test tankı ¹	Kontrol 1 ²	Kontrol 2 ³
AKM (mg/L)	245	12	37	62
Bulanıklık (NTU)	167	25	117	58
Org. Madde (mg/L)	285	86	114	143
KOI (mg/L)	778	40	93	171
Nitrat-N (mg/L)	0.4	0.11	0.22	0.26
Amonyak-N (mg/L)	15.5	2.3	8.5	10.1
Toplam P (mg/L)	2	0.2	0.6	0.8
Al (mg/L)	0.29	0.075	0.096	0.125
Cr (mg/L)	0.018	0.0031	0.0076	0.0093
Pb (mg/L)	0.01	0.0021	0.0028	0.0038
Klorofil-a ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Yok	Yok	350 (21 günde)	200 (10 günde)

¹Su mercimeği bulunan tank.

²Su mercimeği bulunmayan ve alg gelişen tank.

³Su mercimeği ve alg bulunmayan tank.

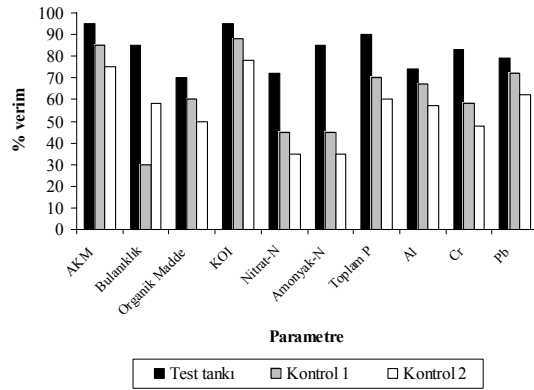
Tablo 3'te görüldüğü gibi sürekli arıtımda da AKM giderim verimi oldukça yüksektir. Yaklaşık üç günlük bir adaptasyon süresinin ardından sistem kararlı konuma ulaşmış ve bitkili tankta %95'lik arıtma verimine ulaşılmıştır. Kesikli sistemde bitki köklerinin bu duruma etkisi ile ilgili yapılan yorum burada da doğrulanmaktadır.

Su mercimekleri suyun yüzeyini tamamen kaplayarak suyun alt kısımlarına ışığın geçmesini engellemekte böylece su içinde alg gelişimini önlemektedir. Kontrol tankında bitkiye dayalı adsorpsiyon mekanizması geçerli olmadığından bitkili tanklardaki kadar (%85)

(Tablo 3) AKM ve bulanıklık giderimi görülmezken Kontrol 2 tanklarında alg gelişimine bağlı olarak bulanıklık artmıştır. Bu durumu niceliksel olarak ifade edebilmek amacıyla Klorofil-a analizleri yapılmıştır. Çalışılan 25 günlük periyotta sadece atıksu bulunan Kontrol 1 tankında Klorofil-a seviyesi sürekli artan yeşillenmeyle paralel olarak artış göstermektedir (Tablo 3). Buna karşılık Kontrol 2 tankında yaklaşık $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde sabit kalmıştır. Kesikli sistem bulgularına paralel olarak, su mercimeğinin bulunduğu Test tanklarında arıtım süresince çözünmüş oksijen konsantrasyonu $2 \text{ mg}/\text{L}$ 'den $2.5 \text{ mg}/\text{L}$ değerine, su mercimeği bulunmayan Kontrol tankında ise $2.3 \text{ mg}/\text{L}$ değerine yükselmiştir.

Yüzen su bitkileriyle oluşturulan kesikli arıtma sisteminde, %82 olarak gözlenen KOİ giderim verimi Tablo 3'te görüldüğü gibi sürekli sistemde %95 oranında gerçekleşmiştir. Benzer şekilde Nitrat-N, Amonyak-N ve TP parametrelerinin giderim oranları da sırasıyla %72, %85 ve %90 gibi yüksek değerlerdedir. Kontrol tanklarında ise AKM, Bulanıklık, KOİ, Nitrat-N, Amonyak-N ve TP parametrelerinin giderim verimleri sırasıyla %85, %30, %88, %45, %45 ve %70 olarak bulunmuştur. Bu değerler su mercimeği bulunan Test tanklarında elde edilen verimlere göre oldukça düşüktür. Tablo 3'te görülen çıkış konsantrasyonlarının ışığı altında, bitki bulunmayan tanklarda gelişen alg biyokütlerinin de arıtıma yaklaşık %10 oranında katkı sağladığı düşünüldüğünde su mercimeğinin arıtımdaki etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 3'te görüldüğü gibi sürekli arıtım sisteminde ağır metal giderimi de oldukça başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Suda diğerlerine kıyasla ağırlıklı olarak bulunan Al, Cr ve Pb metallerinin, sırasıyla %74, 83 ve 79 oranında giderildiği gözlenmiştir. Yukarıda kesikli sistemde ulaşılan değerlerle kıyaslandığında az da olsa farklılıklar bulunmakla birlikte metal giderim verimlerinin sürekli sistem ile kesikli sistemde benzer olduğu söylenebilmektedir. Şekil 2'de de sürekli sistemde su mercimeği bulunan (Test tankı), alg gelişen (Kontrol 1), su mercimeği ve alg bulunmayan (Kontrol 2) tanklardaki arıtım verimleri toplu halde grafikte gösterilmektedir.



Şekil 2. Sürekli sistemde Test ve Kontrol tanklarında giderim verimlerinin kıyaslaması.
Figure 2. Comparison of removal efficiencies of Test and Control tanks in continuous system.

TARTIŞMA

Su mercimeğinin Kampüs atıksuyunu arıtmadaki etkinliği deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Kesikli sistemde elde edilen bulgular sürekli sistem uygulamasında elde edilenlerle paralellik göstermiştir. Giderim verimleri parametre bazında birbirine yakın değerlerdir. Kampüs atıksuyunun değişken nitelikli olması ve salınımların hem mevsimsel, hem de günlük periyotlar halinde olması sebebiyle deneysel çalışmalarda tanklara beslenen su da Tablo 1’de verilen aralıklar içerisinde değişken nitelik taşımıştır. Buna rağmen ulaşılan sonuç performanslarının yakın olması bitkilerin yüksek arıtım performansının yanısıra değişen atıksu koşullarına karşı dayanıklı olduğunun da göstergesidir. Yapılan çalışmada parametrelerin önemli bir kısmının ilk üç günde giderildiği tespit edilmiş ancak nihai arıtma seviyelerine yaklaşık yedinci günde ulaşılmıştır. Bu sebeple ortalama arıtım bekleme süresi 7 gün olarak önerilmektedir.

Su mercimeği, büyüme hızı oldukça yüksek bir yüzen su bitkisidir. Sürekli sistemde arıtım başlangıcında tank yüzeyinin yaklaşık %75’ini kaplayacak şekilde yerleştirilen su mercimeğinin, 25 günlük süreç sonunda havuz yüzeyinin tamamını yoğun bir şekilde kapladığı görülmüştür. Tank yüzeyinden toplanan su mercimekleri tartılmış ve başlangıçtaki bitki yoğunluğuna göre bitki büyüme hızı 4.5 g ıslak ağırlık/gün olarak bulunmuştur. Bu oran literatürde sentetik besiyerinde büyüyen su mercimeği için verilen 0.10 - 0.35 g/gün büyüme

hızına oranla oldukça yüksektir. Bu aşırı yüksek hızın öncelikle ortam sıcaklık ve ışık şartlarının tamamen kontrollü olması ve doğal sulardakine kıyasla çok daha yüksek oranda organik madde ve besin içeren su ile beslenmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kesikli arıtmada analizleri gerçekleştirilen tüm parametrelerin bitkili ve bitkisiz tanklardaki giriş-çıkış konsantrasyonları ve elde edilen arıtım verimleri daha önce Tablo 2’de ve Şekil 1’de verilmişti. Bitkili sistemde elde edilen arıtım verimi bütün parametrelerde ortalama %81 iken bu oranın ortalama %71’lik bir kısmı ilk üç günde gerçekleşmiştir. Bitkisiz sistemde de benzer şekilde ortalama %56 oranındaki arıtım veriminin %49 oranındaki kısmı ilk üç günde gerçekleşmiştir. Yapılan benzer bir çalışmada da (Körner ve Vermaat, 1998), su mercimeği bulunan arıtma sisteminde üç günlük alıkonma süresinin ardından %74-78 oranında arıtım verimi elde edilirken, kontrol sisteminde bu oran %52-60 arasındadır ve sunulan bu çalışmanın sonuçlarıyla tutarlıdır.

Kesikli sistem denemelerinde elde edilen sonuçlar su mercimeğinin başarılı olabildiğini göstermiştir. Gerçek boyutlu arıtma sistemleri tercihen sürekli akım esasına dayalı olarak çalıştırıldığından, önerilen sistem ikinci aşamada sürekli akım prensibiyle çalıştırılmıştır. Bu arıtmada adaptasyon sürecinin ardından sistemin kararlı konuma ulaşması gerekmektedir. Yapılan deneyler sonucunda bitkili tanklarda yaklaşık üç günlük bir adaptasyon sürecinden sonra sistemin kararlı konuma ulaştığı belirlenmiştir. Bitkili tanklarda elde edilen minimum ve maksimum arıtım verimleri %72-95 arasında gerçekleşirken bu oranlar, actidione çözeltilisinin eklenmediği ve Test tanklarıyla paralel olarak çalıştırılan Kontrol 2 tanklarında (Tablo 3) %30-88 arasında kalmıştır.

Çalışmada su mercimeği bulunan tanklarda bu şartlar altında yüksek bir arıtım verimi elde edilmesinin yanısıra kontrol tanklarında da suda çökebilir katıların varlığından ve bunların bir kısmının bitkilerden bağımsız olarak çökebilme özelliğinden dolayı AKM giderimi gözlenmiştir (Tablo 2, 3). AKM giderimi esas olarak; çökeltme, organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından tüketilmesi, küçük fraksiyonların su

mercimeği kökleri tarafından adsorpsiyonu ve alg büyümesinin engellenmesiyle gerçekleşmektedir (Smith ve Moelyowati, 2001).

Çalışma sonucunda, ortamda bulunan azot formlarının su mercimeği ile oluşturulan sistemde yüksek oranda giderildiği belirlenmiştir (Tablo 2, 3). Su mercimeğinin büyümesi, amonyum ve fosfat formlarında nutrientlerden yararlanabilmesine bağlıdır. Amonyum gibi azot bileşikleri su mercimeği bulunan atıksu arıtma havuzlarından, metabolik kullanım, askıda katıların organik azotla çökmesi ve nitrifikasyon-denitrifikasyon gibi yollarla giderilmektedir (Smith ve Moelyowati, 2001; Zimmo ve diğ., 2003). Fosfor ise, bitki alınımı, partiküller ve organik maddeler üzerine adsorpsiyon, kimyasal çökme ve çamur giderimi gibi yollarla sudan uzaklaştırılmaktadır (Smith ve Moelyowati, 2001; Vermaat ve Hanif, 1998).

Su mercimeğinin atıksudan ağır metal giderimi konusunda da oldukça başarılı olduğu bulunmuştur (Tablo 2-3). Ağır metallerin önemli bir kısmının ilk üç günde giderildiği tespit edilmiş ancak nihai giderim seviyelerine yaklaşık yedi günlük hidrolik bekleme süresinde ulaşılmıştır. Bu bulgular literatür ile uyum göstermektedir (Rahmani ve Sternberg, 1999). Al, Cr ve Pb gideriminde sırasıyla ortalama %75, %77 ve %82 oranlarında giderim sağlanmıştır. Bitki bulunmayan sistemde ise bu değerler sırasıyla %63, %61 ve %70 oranlarında gerçekleşmiştir. Literatürde su mercimeğinin Al ve Cr gidermesi konusunda yapılmış çalışma bulunmadığından %70 – 80 arasında gerçekleşen arıtım verimi literatürle kıyaslanmamıştır. Ancak başarılı bir giderim olduğu söylenebilmektedir. Su mercimeğiyle Pb giderimine yönelik bir çalışmada, bu çalışmanın bulgularına paralel olarak %85 – 90 civarında giderim olduğu belirtilmiştir (Rahmani ve Sternberg, 1999).

Çalışmada iki farklı kontrol tankı çalıştırılmıştır. Kontrol 1 atıksuyun doğrudan beslediği ve aynı deneysel koşullarda neler olduğunun gözlemlendiği kontrol tanklarıdır. Bu tanklarda alg gelişimi olması sebebiyle ikinci kontrol tanklarında atıksuya alg metabolik faaliyetini bloke eden actidione eklenerek aynı koşullarda çalışılmıştır. Kontrol 1 tankında

büyüyen alglerin arıtma katkısı önemli oranda olduğundan su mercimeğinin etkisini daha net anlayabilmek için Kontrol 2 tanklarının sonuçları da gözönüne alınmıştır. Kontrol tanklarında gelişen alg biyokütleleri bulanıklığa yol açmaktadır. Actidione eklenmiş Kontrol 2 tankında %65-70 civarında bulanıklık giderimi gözlenirken, eklenmemiş Kontrol 1 tankında başlangıçta bir miktar giderime rağmen ilerleyen safhalarda alg büyümesine bağlı olarak bulanıklık artmıştır. KOI gideriminde de kontrol tankında gelişen alglerin katkısı olduğu görülmektedir. Sistem kararlı konuma ulaştığında actidione eklenmiş tankta KOI giderimi %70 civarındayken, kontrol tankında bu oran yaklaşık %80'e ulaşmaktadır. Bitkili tankta ise bu değer % 95 oranında olduğu görülmektedir. Kontrol tanklarında gelişen algler tarafından atıksudan asimile edilen azot, nitrat veya amonyum olarak depolanmaktadır. Bu nedenle kontrol tanklarında Nitrat-N artış göstermektedir. Actidione eklenmeyen tanktaki Nitrat-N konsantrasyonu daha yüksektir. Azotun algler tarafından asimilasyonunu belirlemek amacıyla kontrol tankından alınan numuneler hem süzülerek hem de süzülmeden Nitrat-N analizi yapılmış ve sonuçta elde edilen Nitrat-N konsantrasyonlarının süzülmemiş numunede %25 – 30 oranında daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Atıksularda bulunan organik madde ile azot ve fosfor gibi nutrientlerin tanklara giriş konsantrasyonlarının da arıtma verimleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Başlangıç konsantrasyonlarının diğerlerine oranla yüksek olduğu durumlarda giderim verimlerinin arttığı belirlenmiştir. Örneğin KOI başlangıç konsantrasyonunun yaklaşık 250 mg/L olduğu durumda giderim verimi %70 civarındayken, yaklaşık 750 mg/L olan başlangıç konsantrasyonunda giderim verimi %90'a ulaşmaktadır. Benzer şekilde başlangıç fosfor konsantrasyonunun 7 mg/L olduğu durumda giderim verimi %45 iken, 11 mg/L olduğu durumda verim %70'e çıkmaktadır. Başlangıç Nitrat-N konsantrasyonunun yaklaşık 0.1 mg/L olduğu durumda giderim verimi %30 civarındayken, konsantrasyonun 0.5 mg/L'ye çıkmasıyla giderim verimi %90'a ulaşmaktadır. Yapılan benzer bir çalışmada, azot ve fosfor girişi

konsantrasyonları arttıkça giderim verimlerinde de artış gözlemlendiğinden (Al-Nozaily ve diğ., 2000) sunulan bu çalışmanın bulgularının doğruluğu ve literatür ile tutarlılığı açıkça görülmektedir.

SONUÇ

Yapılan bu çalışmadan şu sonuçlar çıkarılabilmektedir:

- S.Ü. Kampüs atıksuyu orta derecede kirli bir evsel atıksu niteliğindedir, önemli oranda mevsimsel ve günlük kalite salınımları mevcuttur.
- Su mercimeği (*Lemna minor L.*) ağırlıklı olarak evsel nitelik taşıyan ancak kalitesi salınım gösteren kampüs atıksuyunun arıtımında başarıyla kullanılabilir.
- Organik madde, azot ve fosfor gibi nütrientlerin tanklara giriş konsantrasyonları arıtma verimleri üzerinde etkilidir. Başlangıç konsantrasyonlarının

yüksek olduğu durumlarda giderim verimleri artmıştır.

- Arıtımda parametrelerin önemli bir kısmı ilk üç günde giderilebilmekte ancak nihai arıtma seviyelerine yaklaşık yedinci günde ulaşılmaktadır.
- Su mercimeği (*Lemna minor L.*) ile ortalama %88 AKM, %80 Bulanıklık, %82 KOI, %90 Nitrat-N, %82 TP, %76 Al, %71 Cr ve %84 Pb giderimi sağlanabilmektedir.
- Çalışmada laboratuvar koşullarında, ışık, sıcaklık ve nem koşulları kontrol altındayken gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında açıkavada, doğal kuşullarda sistem performansının denemeleri yapılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından, 2002/218 No'lu Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Al-Nozaily, F., Alaerts, G., and Veenstra S., 2000, Performance of duckweed-covered sewage lagoons-II. nitrogen and phosphorus balance and plant productivity, *Water Res.*, **34**, 10, 2734-2741.
- American Public Health Association (APHA), 1998, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, 20th ed., Washington, DC, USA.
- Bergmann, B.A., Cheng, J. Classen, J. And Stomp, A.M., 2000, Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed, *Transactions of ASAE*, **43**, 2, 263-269.
- Boniardi, N., Rota, R. and Nano, G., 1999, Effect of dissolved metals on the organic load removal efficiency of *Lemna gibba*, *Water Res.*, **33**, 2, 530-538.
- Caicedo, J.R., Van Der Steen, N.P., Arce O. and Gijzen, H.J., 2000, Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela Polyrrhiza*), *Water Res.*, **34**, 15, 3829-3538.
- Cheng, J., Bergmann, B.A., Classen, J.J., Stomp, A.M. and Howard, J.W., 2001, Nutrient recovery from swine lagoon water by *Spirodela punctata*, *Bioresource Technol.*, **81**, 81-85.
- Dalu, J.M. and Ndamba, J., 2003, Duckweed based wastewater stabilization ponds for wastewater treatment (a low cost technology for small urban areas in Zimbabwe), *Phys. Chem. Earth* **28**, 1147-1160.
- Karagöz, S., 1998, Çöp Sızıntı Sularının Su Bitkileriyle Oluşturulan Sistemlerle Arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 84s.
- Körner, S., Lyatuu, G.B., Vermaad, J.E., 1998, The influence of *Lemna gibba L.* on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater, *Water Res.*, **32**, 10, 3092-3098.
- Körner, S. and Vermaat, J.E., 1998, The relative importance of *Lemna gibba L.*, bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater, *Water Res.*, **32**, 12, 3651-3661.

- Metcalf&Eddy, 1991, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, McGraw-Hill International Editions.
- Rahmani, G.N.H. and Sternberg, S.P.K., 1999, Bioremoval of lead from water using *Lemna minor*, Bioresource Technol., **70**, 225-230.
- Smith, M.D. and Moelyowati, I., 2001, Duckweed based wastewater treatment (DWWT): Design guidelines for hot climates, Water Sci. Technol., **43**, 11, 291-299.
- Uysal, Y., 1998, Atıksu Arıtım Sistemlerinde Yüzen Su *Bitkilerinden Lemna Minor (L)*'nin Besi Maddesi Giderimindeki Etkinliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 91s.
- Vermaat, J.E. and Hanif M.K., 1998, Performance of common duckweed species (*Lemnaceae*) and the waterfern *Azolla filiculoides* on different types of wastewater, Water Res., **32**, 9, 2569-2576.
- Wolverton, B.C., 1986, Aquatic plants and wastewater treatment, Proceedings of A Conference on Research and Applications of: Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery, July 20-24, Orlando, Florida.
- Zimmo, O.R., van der Steen, N.P. and Gijzen, H.J., 2003, Comparison of ammonia volatilization rates in algae and duckweed-based waste stabilisation ponds treating domestic wastewater, Water Res., **37**, 4587-4594.