

Bazı Su Mercimeklerinin Nutrient Gideriminde Kullanımı

Murat TOPAL^{1*}, Bünyamin KARAGÖZOĞLU², Erdal ÖBEK¹, E.İşıl ARSLAN TOPAL¹

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisi Bölümü, Elazığ

²Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas

*Sorumlu yazar e-mail: mtopal@cumhuriyet.edu.tr

Özet

Son zamanlarda, ülkemizde sulak alanların korunmasına yönelik çalışmaların önemi artmıştır. Bu nedenle yüzeysel sulara ve/veya göllere giren her türlü kirletici kaynağın belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle birçok bölgede atıksular, yüzeysel sulara ve/veya göllere deşarj edilmektedir. Bu da, atıksu bünyesinde bulunan C, N ve P elementlerinin su ortamında artışına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak nutrient artışı kirliliğe sebep olmakta ve sucul ekosistemi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorunu gidermek için günümüzde atıksulardan nutrient gideriminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Nutrient giderimi Lemna gibba L., Lemna minor L., Spirodela polyrrhiza ve Wolffia arrhiza gibi su mercimekleri kullanılarak başarılmaktadır. Ülkemizde su mercimekleri; ülkemizde kolay bulunabilmesi, yüksek arıtım potansiyelleri, olumsuz koşullara dayanıklı olması, ekonomik olmaları gibi özelliklerinden dolayı nutrient gideriminde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Su mercimeği, nutrient, giderim

Usage of Some Duckweeds in Nutrient Removal

Abstract

In recent years, studies about the protection of wetlands have growing importance in our country. Therefore, detection of all pollutant sources which enter to surface waters and/or lakes is needed. Particularly wastewaters are discharged to surface waters and/or lakes in most regions. This causes increase of C, N, P which present in wastewater in water environment. As a result of this, the increase of nutrient causes pollution and effects the aquatic ecosystem negatively. Today, for the elimination of this problem, several methods are used for nutrient removal from wastewaters. Nutrient removal is achieved by using duckweed as Lemna gibba L, Lemna minor L., Spirodela polyrrhiza and Wolffia arrhiza. In our country duckweed can be used for nutrient removal because of their properties like accessibility in our country, high removal capacities, resistance to the negative conditions, being economical.

Keywords: Duckweed, nutrient, removal

Giriş

Doğal sularda sucul bitkilerin büyümesi ve gelişimi için karbon (C), azot (N) ve fosfor (P) gibi bitki besin maddelerine (nutrientlere) ihtiyaç vardır. Ancak bu besinlerin sularda kabul edilebilir sınır değerlerin üzerinde olması ciddi çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Çevresel sorunların en başında, arıtılmamış atıksuların doğrudan yüzeysel sulara verilmesi gelir. Atıksularda nutrientler; N, P ve C'un formları şeklinde bulunur ve girdiği sularda aşırı olması sucul ekosistemi olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle atıksuların göllere, nehirlere ve alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce arıtılması gerekmektedir. Günümüzde atıksulardan nutrient gideriminde birçok yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bu yöntemler arasında fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri sayılabilir. Ancak kullanılan bu yöntemlerin işletilmesi, bakımı ve enerji maliyeti oldukça yüksektir. Bu nedenle alternatif bir arıtma yöntemi olan doğal arıtma, son zamanlarda atıksulardan nutrientlerin giderilmesinde kullanılmaktadır. Doğal arıtma diğer arıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında fazla insan gücü gerektirmeyen, işletilmesi kolay ve minimum enerji gereksinimi olan alternatif bir arıtma yöntemidir. Bu yöntemde genel olarak doğal ortamlarda yetişen sucul bitkiler kullanılmaktadır. Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan sucul bitkilerin bazıları *Lemna gibba* L., *Lemna minor* L., *Wolffia arrhiza*, *Spirodela pollyrriza* gibi sucul bitkilerdir. Bu bitkiler temel olarak su mercimekleri adı altında sınıflandırılırlar ve *Lemnaceae* sınıfının üyelerini oluştururlar.

Doğal arıtma sistemlerinde kullanılan su mercimekleri ülkemizde kolay bulunabilmesi, ekonomik olması ve kolaylıkla yetişebilmesi açısından özellikle kırsal kesimlerde nüfusun az olduğu yerlerde kolayca uygulanabilmektedir. Su mercimekleri kullanarak yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Brix ve Schierup (1989), su kirliliği kontrolünde sucul makrofitleri kullanmışlardır. Martin ve Moshiri (1994), değişik sucul bitkileri kullanarak arıtılmış sızıntı suyundaki nutrientlerin giderildiğini bildirmişlerdir. Martin ve Johnson (1995), köklü sucul bitki kullanarak amonyak, toplam fosfat ve kimyasal oksijen ihtiyacı parametrelerinin giderildiğini belirtmişlerdir. Körner ve diğ. (1998), su mercimeği ile kaplı evsel atıksularda organik maddelerin parçalanması üzerine *Lemna gibba* L.'nin etkisini araştırmışlardır. Huett ve diğ. (2005), bir sulakalanda N ve P giderimi üzerine

çalışmalar yapmışlardır. Ling (2006), sızıntı sularından nutrientlerin giderimi üzerine çalışma yapmıştır. El-Kheir ve diğ. (2007), atıksu arıtımında su mercimeğinin verimini değerlendirmişlerdir.

Bu derleme, atıksulardan giderimi büyük sorun olan nutrientlerin gideriminde maliyet açısından yük getirmeyen ve bunun yanı sıra sürdürülebilir bir arıtım sağlayan su mercimeklerinin kullanılabilirliğini göstermek amacıyla yapılmıştır.

Su Mercimekleri

Su mercimekleri; *Lemnaceae* ailesine has, çok küçük, yüzebilen, yaprakları birkaç mm genişliğinde olan sucul makrofitlerdir (Tchobanoglous ve Burton, 1991; Dalu ve Ndamba, 2003).

Lemnaceae ailesi; taze sularda geniş yayılımıyla *Lemna*, *Spirodela*, *Landolita*, *Wolffia* ve *Wolffiella* cinslerini kapsar (Al Nozaily ve diğ., 2000; Morales ve diğ., 2006). *Lemnaceae* ailesinin üyeleri Kuzey kutbu ve Antarktika bölgesi hariç dünyanın diğer bölgelerinde durgun ve yavaş akıntılı sularda bulunur (Landolt, 1986; Scheer ve diğ., 2008). Su mercimekleri, en küçük ve en basit çiçekli bitkiler olup, en hızlı çoğalma özelliğine sahiptirler. Yapraktaki küçük bir hücre bölünerek yeni bir yaprak üretir. Her bir yaprak yaşama süresince en az 10-20 kez üretim yapabilir. Su mercimeklerinin su sümbüllerinden %30 daha hızlı büyüebildiği saptanmıştır (Tchobanoglous ve Burton, 1991). Bitki, esasen çok küçük lifli yapıda olan ve tamamı metabolik olarak aktif hücrelidir (Reed ve diğ., 1988; EPA, 1988; Tchobanoglous ve Burton, 1991). Su mercimeği kolaylıkla hasat edilebilir. Soğuğa toleranslıdır (Körner ve diğ., 1998). Çoğunlukla genetik olarak düzenli klonlar şeklinde vejetatif çoğalmaları, onları, bitki fizyolojisi, genetik, ekoloji ve çevre kontrolü çalışmalarında değerli araştırma organizmaları yapmaktadır (Mader, 2004; Mkandawire ve Dudel, 2005; Scheer ve diğ., 2008). Su mercimeği, yaşayan tüm organizmalar gibi kontrol altına alınmış laboratuvar şartları altında, büyümesinde ve metabolik aktivitesinde önemli değişimler gösterir (Scheer ve diğ., 2008).

Su mercimeğinin kullanımı; hızlı büyüme oranıyla yüksek seviyede nutrient giderimi elde edildiğinden ve düşük lif ve yüksek protein içeriğinden dolayı tercih edilir (Landolt, 1986; Körner ve diğ., 1998). Su mercimekli atıksu arıtma sistemleri; süt ürünleri atığı

lagünlerinde, ham ve seyreltik evsel atıksuyunda, ikincil çökelmede ve septik yüklü havuzların arıtılmasında kullanılmaktadır.

Su mercimeği havuzları, su mercimeklerinin yüzen bir yığını ile kaplı stabilizasyon havuzlarının modifikasyonlarıdır (Van der Steen, 1998). Su mercimeğine dayanan atık stabilizasyon havuzu esasen atık stabilizasyon havuzlarından daha yüksek nutrient ve BOİ gideriminden dolayı daha iyidir (Robson, 1991; Dalu ve Ndamba, 2003). Bu gerçekte hasatlanmış su mercimeğinin kabiliyetinden dolayıdır. Su mercimekli sisteme dayanan atık stabilizasyon havuzu, uygun şekilde yönetilirse, üçüncül arıtma standartlarına eşit çıkış suyu üretilebilir (Dalu ve Ndamba, 2003). En yaygın kullanılan türler *Lemna sp.*'dir (Aalbers, 1999). Yüzen küçük bitkiler, rüzgara duyarlı olup setler olmadıkça havuzun rüzgar yönündeki tarafına doğru sürüklenebilir. Bitkilerin yeniden dağıtılması el işçiliği gerektirmektedir. Sürüklenenler yeniden dağıtılmazsa havuz yüzeyinin tamamen kaplanmamasına bağlı olarak düşük arıtma verimine yol açabilir. Ayrıca bitkiler anaerobik bozunmaya uğrayarak kokuya sebep olabilir (Tchobanoglous ve Burton, 1991). Havuzu kaplayan su mercimeği, havuzun karışımını önler ve katıların çökeltimi için iyi şartlara yol açar. Su mercimeği güneş ışığı girişini de azaltır ve alg büyümesini durdurur (Aalbers, 1999). Su mercimeği, temel olarak alg konsantrasyonunu azaltarak fakültatif lagünlerden veya stabilizasyon havuzlarından çıkan suyun kalitesini arttırmakta kullanılmaktadır (Tchobanoglous ve Burton, 1991). Ancak, azaltılmış güneş ışığı girişi oldukça az patojen giderimine yol açar (Aalbers, 1999).

Su mercimeklerine dayalı olarak bazı tam ölçekli sistemler Tayvan, Çin, Bangladeş, Belçika ve ABD'de işletilmektedir (Körner ve diğ., 1998). Makrofite dayalı atıksu arıtma sistemleri klasik arıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir (Brix and Schierup, 1989; Körner ve diğ., 1998). Sucul makrofitler arasında *Lemnaceae*; azot, fosfor, potasyum, kalsiyum, sodyum ve magnezyum vb. makro elementleri absorplamada çok büyük kapasiteye sahiptir (Landolt ve Kandeler, 1987; Dalu ve Ndamba, 2003). Çalışmaların çoğu nutrient giderim verimi üzerine odaklanmıştır. %50-95 arasında BOİ₅ ve KOİ giderme oranı su mercimeği ile kaplı sistemlerde bulunmuştur. Brix ve Schierup (1989) çalışmalarında, su mercimeği su sümbülü ile karşılaştırıldığında, arıtma işlemlerinde az bir rol oynadığını, gerçekte geniş kök sistemlere ihtiyaç olduğunu ve bağlı mikrobiyal büyüme için çok küçük substrat yüzey alanı sağladığını iddia etmişlerdir. Su yüzeyinde su mercimeğinin yoğun bir

şekilde kaplı olması, hem havadan difüzyonla suya oksijen girişini hem de az ışık nüfuz etmesinden dolayı planktonlarla oksijenin fotosentetik üretimini engelleyebilmesi olumsuz yanlarını oluşturmaktadır. Zirschky ve Reed (1988), su içinde sınırlı oksijen transferinden dolayı su mercimeği ile kaplı havuzlarda BOİ gideriminin azaldığını ifade etmişlerdir. Bununla beraber Alaerts (1996), su mercimeğiyle kaplı atıksu lagün sistemlerinde her zaman aerobik kalan bir su sütununun bulunduğunu bildirmiştir (Körner ve diğ., 1998).

Lemnaceae ailesinden olan ve nutrient gideriminde sıkça kullanılan su mercimeklerinden *Lemna gibba* L., *Lemna minör* L., *Spirodela polyrrhiza* ve *Wolffia arrhiza* türlerine ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

***Lemna gibba* L.**

Lemna gibba L., özellikle nutrientce zengin suların yüzeyinde dünya çapında bulunabilen *Lemnaceae* ailesine ait yüzen sucul bir makrofittir (Şekil 1a, b, c) (Zimmo, 2003; El-Kheir ve diğ., 2007). *Lemna gibba* L. sucul bir bitkidir ve göllerde, akarsularda ve çıkış sularını içeren pek çok sucul ortamda bulunur. Damarlı çiçekli bir bitkidir. Laboratuvar şartları altında, biyokütlenin en uygun nutrient temini altında, 24-48 saatte, uygun aydınlatma ve 25-29°C'de iki kat arttığı bilinmektedir (Wang, 1990; Sanchez Villavicencio ve diğ., 2007). *Lemna gibba* L. İle alınan nutrientler bitki proteinine asimile olur. İdeal büyüme şartları altında kuru ağırlık esas alındığında protein içeriğinin %40'ından fazlasına ulaşılabilir (Skillikorn, 1993; El-Kheir ve diğ., 2007). *Lemna gibba* L. Diğer çoğu bitkiyle karşılaştırıldığında düşük lif içeriğine sahiptir (yaklaşık %5). *L. Gibba*'nın kimyasal içeriğine bakıldığında 5 mg/g Klorofil a+b, %3,84 N içeriğine ve %24,06 protein muhtevasına sahiptir.



Şekil 1. *Lemna gibba* L.

a)

b)

c)

Doğal ortamdan temin edilen *Lemna gibba* L. Şekil 2a, b’de verilmiştir.



Şekil 2. Doğal ortamında *Lemna gibba* L. a)

b)

Atıksu arıtımında *Lemna gibba* L.’nin, nütrientlerin, çözülmüş tuzların, organik maddelerin, ağır metallerin gideriminde ve askıda katı maddelerin elimine edilmesinde, alg çokluğunda ve toplam ve fekal koliform yoğunluğunda çok etkili olduğu bulunmuştur (El-Kheir ve diğ., 2007). *L. gibba* kadmiyum ve kurşun vb. ağır metallere toleranslıdır (Miranda ve diğ., 2000; Sanchez Villavicencio ve diğ., 2007). Adsorpsiyon ve biyoakümülyasyon yeteneği, bazı toksik bileşiklerin gideriminde kullanılabilir (Wang, 1990; Lemnatest, 2000; Sanchez Villavicencio ve diğ., 2007). Belirli organik bileşikleri parçalayabilir ve sulu çözeltilerde radyoaktif iyonları alıkoyabilir (Stomp ve diğ., 1993; Sanchez Villavicencio ve diğ., 2007). Sığ küçük göletlerde (20 ve 30 cm derinlik), evsel atıksuyun arıtımında *L. gibba*’nın performansını değerlendirmek için yapılan açık havadaki deneyler, meydana gelen ikincil çıkış suyunun kalitesinin yeniden kullanılan sulama suyu kriterlerini karşıladığını göstermektedir (Oron, 1994; El-Kheir ve diğ., 2007).

***Lemna minor* L.**

Su mercimeği *Lemna minor* L.; *Lemnaceaea* ailesine ait, küçük boyutlu, hızlı büyüyen vejetatif olarak çoğalan damarlı yüzen makrofitlerdir (Şekil 3a, b). *L. minor*, pH=4,5-7,5 aralığında ve sıcaklık 20-30 °C’de iyi gelişim gösterir. Klorofil a+b içeriği 5,02 mg/g’dır. %3,90 oranında N içeriğine sahip olan *L. minor* %24,40 oranında protein muhtevasına sahiptir. *L. minor* ortam şartları elverişsiz olduğunda uyku haline geçer ve su altına çekilir.

Şartlar yeniden uygun oluncaya kadar tohum veya tomurcuk halinde kalır (Saygıdeğer, 1996).



Şekil 3. *Lemna minor* L a)



b)

Spirodela polyrrhiza

Su mercimeği (*Spirodela polyrrhiza*); hızlı büyüyen, geniş dağılımlı, kısa yaşam süreli ve geniş çevresel değişikliklere stabil bitkilerdir (Şekil 4a, b) (Landolt ve Kandeler, 1987).



Şekil 4. *Spirodela polyrrhiza* a)



b)

Wolffia arrhiza

Lemnaceae ailesinden olan *Wolffia arrhiza*, yaygın olan ve tomurcuklanmayla yoğun olarak çoğalan, en küçük damarlı bitkidir (Şekil 5a, b). Yaprak olarak ifade edilen, tipik olmayan yaprağa benzer vücut yalnızca küçük farklılıkla dokuların bir karışımıdır. Bu sebeple *W.arrhiza*'nın organizması damarlı bitkilerdence daha çok tallofitik alge benzer. Özellikle kış ve sonbahar gibi uygun olmayan çevre şartlarında yaprak turion olarak adlandırılan bekleyen bir forma geçebilir. Bitki, sıcaklık ve pH dalgalanmaları, ksenobiyotik kirlenme gibi çeşitli stres ve toksik faktörlerin etkisine oldukça dayanıklıdır. Bu özellikleri nedeniyle bitki özellikle, aminoasitler, proteinler, şekerler, organik azot ve fosfor bileşiklerince zengin kentsel, tarımsal ve süt ürünleri kaynaklı atıksuların arıtma biyoteknolojisinde giderek daha

çok kullanılmaktadır. *W. arrhiza* biyokütlesi, vejetatif formdaki (yaprak) proteinlerin yüksek birikimi (%40-50) ve mineral bileşiklerin çeşitleri ile karakterize edilir. Protein, nişasta, vitamin, hormon ve mineral tuzlarca zengin sığır yemi olarak kullanılabilir (Czerpark ve Piotrowska, 2005).



Şekil 5. *Wolffia arrhiza* a)

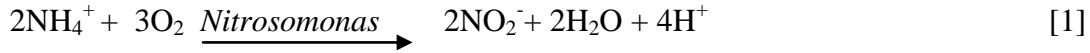
b)

Nutrient Giderimi

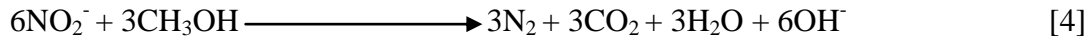
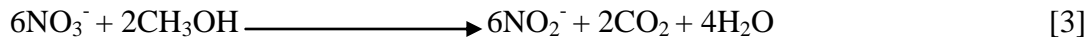
Azot Giderimi

Gübre kullanımı, azot sabitleyen ürünler, fosil yakıtların kullanımı gibi nedenlerle insan kaynaklı etkiler sonucu azot miktarı artmaktadır (Özen ve Beklioğlu, 2007). Nitrikoksit, nitrit veya amonyak/amonyum formundaki azot suda çözünebilir olup sulara noktasal olmayan kaynaklardan (tarımsal akış) ve noktasal kaynaklardan (atıksu arıtma tesisi deşarjları) ulaşabilir. Azot, su kalitesi problemlerine sebep olduğundan azotun giderimi önemlidir. Yapay bir sulakalan sisteminde azot giderimi; bitkilerce ve diğer yaşayan organizmalarca alım, nitrifikasyon, denitrifikasyon, çökelme, NH_3 buharlaşması ve NH_4^+ için katyon değişimini içermektedir (Majernevman ve diğ., 1999; Yang ve diğ., 2001; Yalcuk ve Uğurlu, 2009).

Azot gideriminin en yaygın kullanılan metodu, biyolojik nitrifikasyon /denitrifikasyon olarak adlandırılır. İlk önce BOİ kullanılır ve yalnızca kolaylıkla okside olan karbon bileşikleri tükendiğinde nitrifikasyon yapıcılar azot içeren bileşiklerin oksidasyonuna başlarlar. Bu meydana gelirse son ürün nitrat azotudur. Proses, farklı kademelerde görev yapan farklı mikroorganizma gruplarınca 2 kademedede gerçekleştirilir. Bu prosesi tanımlayan basitleştirilmiş denklemler şunlardır;



Bu reaksiyonlar yavaş olup uygun havalandırma tanklarında uygun çözülmüş oksijen kadar suyun bekleme zamanını da gerektirir. Reaksiyonların kinetik sabitleri düşük olup çok düşük ürün verir. Bu nedenle çamur üretimi sınırlıdır. Çıkış suyu, göllere veya nehirlere giriş yapmayacaksa nitrat azotunun üretimi uygundur. Bununla beraber, çoğu durumda azot uzaklaştırılmalıdır (Weiner ve Matthews, 2003). Amonyak ilk önce nitrata oksitlendikten sonra *Pseudomonas* gibi fakültatif ve anaerobik bakteriler tarafından indirgenebilir. Denitrifikasyon bir karbon kaynağına ihtiyaç duyar ve metanol (CH_3OH) sıklıkla bu amaç için kullanılır. Reaksiyonlar şunlardır;

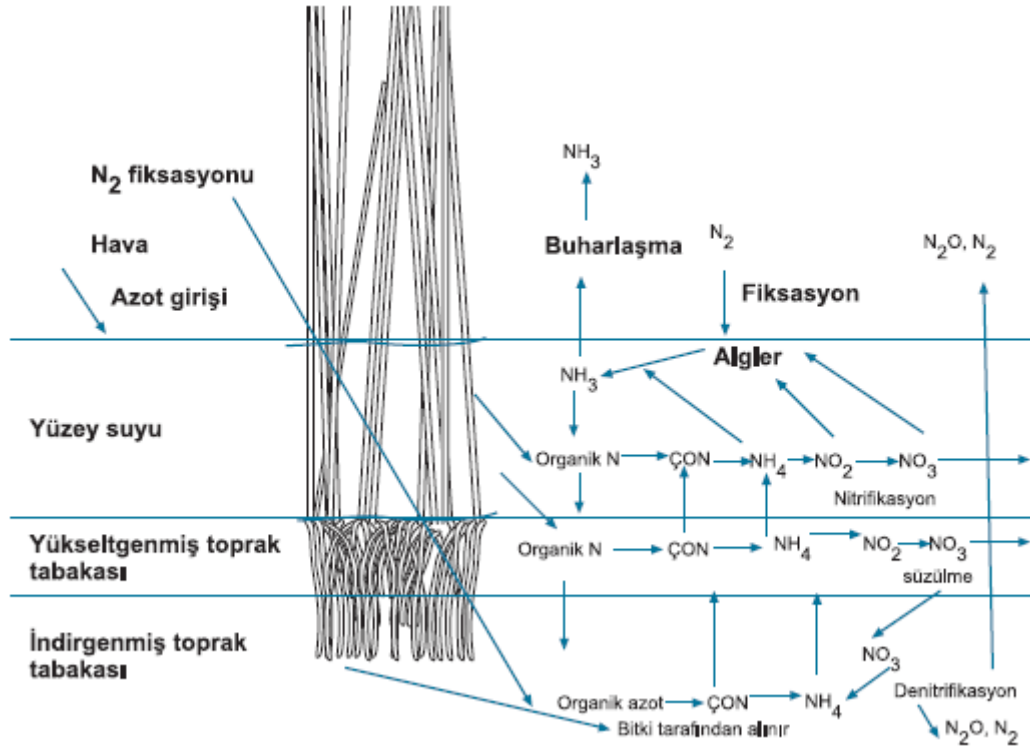


Sulakalanlardaki azot döngüsü Şekil 6'da verilmiştir (Korkusuz ve diğ., 2005; Özen ve Beklioğlu, 2007).

Yapay sulakalanlarda azot dönüşümleri çok karmaşık ve dinamik bir süreçtir ve birçok faktör dolaylı ya da dolaysız yönden performanslar üzerine etkili olabilir (Tunçsiper ve Akça, 2006). Sulakalan sistemlerinde, azot dönüşümleri, toprağın okside olmuş ve indirgenmiş tabakalarında, kök-toprak ara yüzeyinde ve köklü bitkilerin batmış kısımlarında yer alır (Nordin, 2006). Organik azot, hem oksitlenmiş hem de indirgenmiş toprak tabakalarında NH_4^+ 'a mineralize olur. Bitkilerin oksitlenmiş tabakası ve batmış kısımları, NH_4^+ 'un *Nitrosomonas* ile NO_2^- 'e sonra *Nitrobacter* ile NO_3^- 'a dönüştürdüğü nitrifikasyon için önemli kısımlardır. Yüksek pH'da NH_4^+ 'un bir kısmı, NH_3 formundadır ve buharlaşma süreciyle atmosferde kaybolur. İndirgenmiş bölgedeki nitrat; denitrifikasyon, liçleme ve bazı bitki alımı ile tüketilir (Eng, 2002; Nordin, 2006).

Kök-toprak ara yüzeyinde atmosferden oksijen; sulakalan bitkilerinin yaprakları, göve diğ.eleri, rizomları ve kökleri yoluyla rizosfere difüzenir ve toprak-su ara kesitine

benzer anoksik tabaka oluşturur (Maehlum, 1999; Johnson ve diğ., 1999; Nordin, 2006). Amonyumun nitrata okside olduğu aerobik rizosferde nitrifikasyon yer alır. Bitkilerce alınmayan nitrat, denitrifikasyon prosesiyle N_2 ve N_2O 'e indirildiği anoksik bölgeye difüzenir. Rizosferdeki amonyum, difüzyonla anoksik bölgedeki amonyumla yeniden dolar (Nordin, 2006).



Şekil 6. Azot döngüsü (ÇON: Çözünebilir organik azot) (Korkusuz ve diğ., 2005; Özen ve Beklioğlu, 2007)

Nitrifikasyon prosesi hidrojen iyonları ürettiğinden pH'da belirgin düşümlere sebep olabilir. Eğer pH yeteri kadar düşükse nitrifikasyonu tamamen engelleyebilir. Denitrifikasyon, çözülmüş oksijen yokluğunda özellikle *Pseudomonas spp.* gibi fakültatif aerob hetetrofların nitratı terminal bir elektron alıcısı olarak kullanabildiği procestir (Lester ve Birkett, 1999).

Reed ve De Busk (1985) sucul makrofitlerin nutrient giderme potansiyeli üzerine yaptıkları çalışmada, N'un %16-75 oranında giderildiğini tespit etmişlerdir. Körner ve diğ. (1998)'nin çalışmasında, azot giderimi tespit edilmiştir. Su mercimeği ile kaplanmamış kontrollere göre kaplanmış olanlarda daha hızlı azot giderimi bildirilmiştir. Su mercimeği ile

azot alınımı; su mercimeği ve sistem duvarları üzerine bağlı biyofilm tarafından azot alınımına ve biyofilm tarafından birlikte nitrifikasyon-denitrifikasyona bağlanmıştır. Asılı yumaklar üzerinde bakteriler tarafından nitrifikasyon-denitrifikasyonun artan derinlikle önemli hale gelebileceği ve artan bekletme zamanı ile NH_3 buharlaşmasının önemli olabileceği belirtilmiştir. Su mercimeğince azot alınımının başlangıçtaki azot girişinin %42'sini oluşturduğu ve nitrifikasyon-denitrifikasyonla, buharlaşma ve çökeltmeyle azot gideriminin yalnızca %16 olduğunu bildirmişlerdir. Martinez Cruz ve diğ. (2006)'nin çalışmasında nitrit giderimi *Lemna gibba* L. ile %90,23 olmuştur. Bu durum nitritlerin, makrofitler tarafından bir azot kaynağı olarak alınan nitrata hızlı şekilde okside olduğunu göstermiştir.

Fosfor Giderimi

Fosfor, kimyasal veya biyolojik olarak uzaklaştırılabilir. En popüler kimyasal metotlar kireç, $Ca(OH)_2$ ve $Al_2(SO_4)_3$ kullanımudur. Alkali şartlar altında kalsiyum, kalsiyum hidroksiapatit oluşturmak için fosfat ile birleşir. Çözünmeyen $CaCO_3$ 'da oluşur ve uzaklaştırılır ve bir fırında yakılarak geri döndürülebilir. Fosfor biyolojik olarak da uzaklaştırılabilir. Bir atıksu arıtma tesisindeki tipik bir fosfor uzaklaştırma sisteminde havalandırma tankının ilk kademesindeki sıvı karıştırılır fakat havalandırılmaz. Mikroorganizmalar fosforu hücrelerinde kullanarak bu oksijen yokluğuna tepki gösterir. Böylece hayatı sürdürmek için enerji sağlarlar. Sonra mikroorganizmalar aerobik kademeye hareket ettiğinde çözünebilir fosforu alır ve mikroorganizmaların enerji içeren organik maddeyi hızlı şekilde asimile etmeye çabaladığı bir şart oluşur. Bu noktada mikroorganizmalar fazla fosforu kendileriyle birlikte alarak son çökeltimde çöktürülerek uzaklaştırılır (Weiner ve Matthews., 2003).

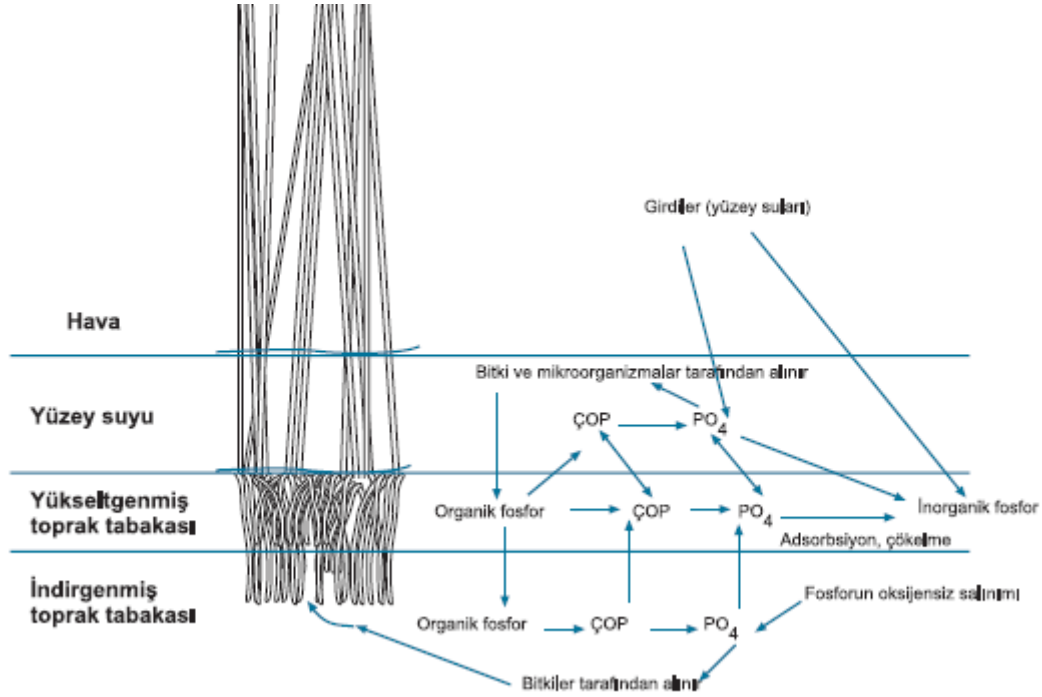
Fosfor diğer ekosistemlerde de olduğu gibi sulakalanlarda da biyolojik üretimi sınırlayıcı bir faktördür. Fosfor sulakalanlarda çözünebilir ya da çözünemez halde hem organik hem de inorganik olarak bulunur. Fosfor aynı zamanda demir, kalsiyum ve alüminyumla kompleks yapılar oluşturma eğilimine sahiptir. Fosfor döngüsü dip çamurunda gerçekleşir. Fosforun inorganik hali ortofosfat ya da çözülebilir reaktif fosfor olarak adlandırılır ve fosforun biyolojik olarak kullanılabilir miktarının belirtecidir. Çözünmüş

organik fosfor ya da çözünemeyen organik formlar ve inorganik fosfor, çözünmüş inorganik form haline gelene kadar biyolojik olarak kullanılmaya hazır değildir. Sulakalanlarda asidik topraklarda fosfor, alüminyum ve demir ile, alkalın topraklarda ise kalsiyum ve magnezyumla bağ yapmış halde bulunur. Kil parçacıklarına yapışık bulunan fosfor ise sulakalanlara dışardan gelen suyla taşınabildiğinden önemlidir. Kimyasallar ve besin tuzları hidrolojik olarak sulakalanlara, yağış, yüzey akışı ve yeraltısuyu ile taşınırlar. Sadece yağışlarla beslenen sulakalanlar besin açısından fakir iken diğer yollarla bu maddelerin taşındığı sulakalanlar besin açısından daha zengindir. Sulakalanlar besin tuzları ve kimyasallar için kaynak, yutak ya da dönüşümlerin gerçekleştiği yerler olabilirler ve bu özellik sezondan sezona ve yıldan yıla değişebilir. Sulakalanlarda insan etkisiyle (erozyon, baraj ve kanal açma, hidrolojik değişimler ve kirlilik gibi) kimyasal döngülerde değişmelerin meydana gelmesine neden olunmaktadır. Fosforun ana kaynağının kayalar olmasına karşın, ticari gübrelerle döngüye daha fazla fosfor katılır. Fosforun döngüde fazla miktarda bulunması çevresel sorunlara yol açar. Örneğin, tarım alanlarında gübre olarak kullanılan fazla fosfor sığ kıyılal alanlara taşındığında, fotosentetik bakteri ve alglerin sayılarının birden bire artmasına neden olur. Bu durum, su yüzeyinin fitoplanktonlarla kaplanmasına neden olur ve güneş ışığının su altındaki bitkilere ulaşmasına engel olur. Bu bitkiler ve yüzeydeki bakteri ve algler öldüğünde diğer bakteriler tarafından tüketilir. Bu bakteriler beslenme sırasında sudaki çözünmüş oksijeni kullanırlar. Oksijen miktarının düşmesiyle trofik seviyenin üst kısmındaki canlılar olumsuz etkilenir ki bu durum ölümle sonuçlanabilir (örneğin balık ölümleri). Bu olay ötrofikasyon olarak adlandırılır. Sulakalanlar karasal ve sucul ekosistemler gibi besin açısından zengin ya da fakir olarak sınıflandırılabilmesine rağmen besin tuzlarının dip çamurunda depolanması ve bitkilerin döngüdeki rolleri bakımından farklılık göstermektedir (Özen ve Beklioğlu, 2007).

Sulak alanlardaki fosfor döngüsü Şekil 7’de gösterilmektedir (Özen ve Beklioğlu, 2007).

Sulakalanlarda fosfor giderim mekanizmaları; bitki alımı (Fraser ve diğ., 2004; Huett ve diğ., 2005), mikrobiyal asimilasyon, toprak ve organik maddeyle adsorpsiyon ve Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+3} ve Mn^{+2} ile çökeltimi içerir. Adsorpsiyon ve çökeltme reaksiyonları, hidrolik bekletme zamanı daha uygun olduğunda ve iyileştirici yapıllı topraklar kullanıldığında fosfor

sorpsiyonu için daha büyük fırsattır ve toprak reaksiyonlarının meydana gelmesi sağlandığından temel giderme yollarıdır. Adsorpsiyon ve çökeltme reaksiyonları sulakalan toprağında fosforu yakalar (Nordin, 2006).



Şekil 7. Fosfor döngüsü (ÇOP: Çözünabilir organik fosfor) (Özen ve Beklioğlu, 2007)

Reed ve De Busk (1985) sucul makrofitlerin nutrient giderme potansiyeli üzerine yaptıkları çalışmada, P'un %12-73 oranında giderildiğini tespit etmişlerdir. Körner ve diğ., (1998)'in çalışmasında fosfor, su mercimeği ile kaplı arıtmada su mercimeksiz kontrollerindekinden belirgin olarak daha hızlı giderilmiştir. Martinez Cruz ve diğ. (2006) tarafından yağışlı aylarda yağmurun seyreltme etkisine bağlı olarak fosfatın azaldığı ve *Lemna gibba* L. ile maksimum giderim veriminin %50 olduğu bildirilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Sonuç olarak su mercimekleri atıksu arıtma sistemlerinde kullanılmakta ve arıtma verimi üzerine olumlu yönde etkiler yapmaktadır. Ekonomik olması, ülkemizde kolay bulunabilmesi, yüksek arıtım potansiyellerinin bulunması, akümülyasyon kapasitelerinin yüksek olması, olumsuz koşullara dayanıklı olması gibi özelliklerinden dolayı su

mercimekleri nutrinet gideriminde kullanılabilir. Ancak su mercimeğinin bu avantajlarının yanı sıra rüzgara duyarlı olduklarından havuzun bir tarafına doğru sürüklenebildiklerinden dağıtılmaları için el işçiliği gerektirmesi, su mercimeği anaerobik bozunmaya uğrayarak kokuya sebep olabilmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle, su mercimekleri nutrient gideriminden sonra hasatlanarak hayvan yemi, biyoyakıt ve toprak iyileştirici olarak değerlendirilebilir ve ülke ekonomisine katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

- Aalbers, H. (1999). Resource Recovery from Faecal Sludge Using Constructed Wetlands, A Survey of the Literature, UWEP Working Document, The Netherlands.
- Alaerts, G.J., Mahbubar Rahman, M. and Kelderman, P. (1996). Performance analysis of a full-scale duckweed covered lagoon, Water Res., Vol. 30, 843-852.
- Al-Nozaily, F., Alaerts, G. and Veenstra, S. (2000). Performance of duckweed -covered sewage lagoons-II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity, Water Research, Vol. 34, 2734-2741.
- Brix, H. and Schierup, H.H. (1989). The use of aquatic macrofits in water pollution control, Ambio, Vol. 18, 101-107.
- Czerpark, R. and Piotrowska, A. (2005). Wolffia arrhiza- The smallest plant with the highest adaptation ability and applications, Kosmos, Vol. 54, 267-268.
- Dalu, J.M. and Ndamba, J. (2003). Duckweed based wastewater stabilization ponds for waste water treatment (a low cost technology for small urban areas in Zimbabwe), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 28, 1147-1160.
- El-Kheir, W.A., İsmail, G., El-Nour, F.A., Tawfik, T. and Hammad, D. (2007). Assesment of the efficiency of duckweed (*Lemna gibba*) in wastewater treatment, International Journal of Agriculture and Biology, Vol. 9, 681-687.
- Eng, L.P. (2002). Constructed Wetlands: Mechanisms of Treatment Processes and Design Models. In: Mansor, M., Eng, L.P. and Shutes, R.B.E. (Ed), Constructed Wetlands: Design, Management and Education, Universiti Sains Malaysia Publisher, Malaysia.
- EPA. (1988). Design Manual for Constructed Wetland and Floating Aquatic Plants Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA625/1-88-022, Cincinnati, OH.
- Fraser, L.H., Carti, S.M. and Steer, D. (2004). A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms, Bioresour Technology, Vol. 2, 185-192.

- Huett, D.O, Morris, S.G., Smith, G. and Hunt, N. (2005). Nitrogen and phosphorous removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands, *Water Research*, Vol. 39, 3259-3272.
- Johnson, K.D., Martin, C.D., Moshiri, G.A. and McCrory, W.C. (1999). Performance of a Constructed Wetlands Leachated Treatment System at the Chonchula Landfill, Mobile Country, Alabama, In: Mulamootil, G., McBean, E.A. and Rovers, F. (Ed), *Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates*, Lewis Publisher, USA.
- Korkusuz, E.A., Beklioglu, M. and Demirer, G.N. (2005). Comparison of the treatment performances of blast furnace slag-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for domestic wastewater treatment in Turkey, *Ecological Engineering*, Vol. 24, 187-200.
- Körner, S., Lyatuu, G.B. and Vermaat, J.E. (1998). The influence of *Lemna gibba* L. on the degradation of organik material in duckweed-covered domestic wastewater, *Wat. Res.* Vol. 32, 3092-3098.
- Landolt, E. (1986). The family of Lemnaceae- a monographic study, Vol. 1, 566p. *Veröffentlichungen des geobotanischen Institutes der ETH Zuerich, Stiftung Ruebel*, 71.
- Landolt, E. and Kandeler, R. (1987). The family of Lemnaceae- a monographic study. *Veroeffentlichungen des Geobotanisches institutes der Edg. Tech. Hochschule, Stiftung Ruebel, Zuerich*, p638.
- Lemnatest. (2000). Duckweed growth inhibition test. Determination of the nonpoisonous effect of water constituents and wastewater to duckweed (*Lemna minor* L., *Lemna gibba*). Würselen, Germany, Lemna Norm E. Oberabilted, 200p.
- Lester, J.N. and Birkett, J.W. (1999). *Microbiology and Chemistry for Environmental Scientists and Engineers*, Second Edition, Spon Press, 276-277.
- Ling, C.A. (2006). *Nutrient Removal from Leachate Using Horizontal Subsurface Constructed Wetlands*, Master Thesis, Universiti Teknologi Malaysia.
- Mader, J.C. (2004). Differential in vitro development of in florescences in long and short day *Lemna* spp.:involvement of ethylene and polyamines, *J. Plant Physiol.*, Vol. 161, 653-663.
- Maehlum, T. (1999). Wetlands for Treatment of Landfill Leachates in Cold Climates, In: Mulamootil, G., McBean, E.A. and Rovers, F. (Ed), *Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates*, Lewis Publisher, USA.
- Majernevman, J., Clausen, J.C. and Neafsey, J.A. (1999). Seosanal performance of a wetland

- constructed to proces dairy milk house wastewater in connecticut, Ecol. Eng., Vol. 14, 181.
- Martin, C.D. and Moshiri, G.A. (1994). Nutrient reduction in an in-series constructed wetland system terating landfill leachate, Water Science Technology, Vol. 29, 267-272.
- Martin, C.D. and Johnson K.D. (1995). The use of extended aeration and in-series surface flow wetlands for landfill leachate treatment, Wat. Sci. Tec., Vol. 12, 119-128.
- Martinez Cruz, P., Hernandez Martinez, A., Soto Castor, R., Esquivel Herrera, A. and Rangel Levaio, J. (2006). Use of constructed wetlands for the treatment of water from an experimental channel at xochimilco, Mexico, Hidrobiologica, Vol. 16- 211-219.
- Miranda, G., Quiroz, A. and Salazar, M. (2000). Cadmium and lead removal from water by the duckweed. *Lemna gibba* L. (Lemnaceae), Hidrobiologica, Vol. 10, 7-12.
- Mkandawire, M. and Dudel, E.G. (2005). Assignment of *Lemna gibba* L. (duckweed) bioassay for *in situ* ecotoxicity assesment, Aquat. Ecol., Vol. 39, 151-165.
- Morales, N., Arevalo, K., Ortega, J., Briceno, B., Anderade, C. and Morales, E. (2006). pH and nitrogen source as modulators of growth macrofita *Lemna* sp., Rev. Fac. Agron. (LUZ), 65-77.
- Nordin, N.I.A.B.A. (2006). Leachate Treatment Using Constructed Wetland with Magnetic Field, Master Thesis, Universiti Teknologi Malaysia. 88p.
- Oron, D. (1994). Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production, Agric. Wat. Man., Vol. 26, 27-40.
- Özen, A. ve Beklioğlu, M. (2007). Sulakalanlarla İlgili Temel Bilgiler, Sulakalan Yönetim Planlaması Rehberi, Ankara, 176s.
- Reed, S. C., Middlebrooks, E.J. and Crites, R.W. (1988). Natural Systems for Waste Management and Treatment, McGraw-Hill, New York.
- Redd, K. R. and DeBusk, W. F. (1985). Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes, Journal of Environmental Quality, Vol. 14, 459-462.
- Robson, E. (1991). Duckweed: A lowly plant a richer role in cleansing waste and creating protein, UNDP, Vol. 3, 22-26.
- Sanchez Villavicencio, M., Alvares Silva, C. and Arce, G.M. (2007). Boron toxicity in *Lemna gibba*, Hidrobiologica, Vol. 17, 1-6.
- Saygıdeğer, S. (1996). *Lemna gibba* L. ve *Lemna Minör* L.'nin Morfolojik Anatomik, Ekolojik ve Fizyolojik Özellikleri, Sayı 18, 1-11.

- Scheer, C., Simon, M., Spranger, J. and Baungartner, S. (2008). Test system stability and natural variability of a Lemna gibba L. bioassay. *PlusOne*, Vol. 3, 1-7.
- Skillikorn, P., Spira, W. and Journey, W. (1993). Duckweed Aquaculture a New Aquatic Farming System for Developing Countries, The World Bank, Washington, DC, p68.
- Stomp, A.M., Han, K.H., Wilberd, S. and Gordon, M.P. (1993), Genetic improvement of three species for remediation of hazardous wastes, *In Vitro Cell Development Biology Plant*, Vol. 29, 227-232.
- Tchobanoglous, G. and Burton, F.L. (1991). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse*, McGraw-Hill, Inc., 1334p.
- Tunçsiper, B. ve Akça, L. (2006). Pilot Ölçekli Bir Yapay Sulakalan Sisteminin Arıtma Performansının incelenmesi, *İTÜ dergisi*, Cilt 5, 13-22.
- Van der Steen, P., Brenner, A., Shabtai, Y. and Oron, G. (1998). Duckweed systems for wastewater treatment, nutrient recovery and effluent reuse, conference paper small and medium domestic water conservation, wastewater treatment and reuse, 12-14 February, WEDO, Palestine.
- Wang, W. (1990). Literature review on duckweed toxicity testing, *Environ. Res.*, Vol. 52, 7-22.
- Weiner, R.F. and Matthews, R. (2003). *Environmental Engineering*, Fourth Edition, Butterworth Heinemann, USA, 197-199.
- Yalcuk, A. and Uğurlu, A. (2009). Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment, *Bioresource Technology*, Vol. 100, 2521-2526.
- Yang, L., Chang, H. and Huang, M.L. (2001). Nutrient removal in gravel- and soil- based wetland microcosms with and without vegetation, *Ecol. Eng.*, Vol. 18, 91.
- Zimmo, O. (2003). *Nitrogen Transformations and Removal Mechanisms in Algal and Duckweed Waste Stabilisation Ponds*, Doctoral Thesis, Academic Board of Wageningen University and the Academic Board of the International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering at Delft, The Netherlands.
- Zirschky, J. and Reed, S.C. (1988). The use of duckweed for wastewater treatment, *J. WPCF*, Vol. 60, 1253-1258.