

Akarsu Kirliliğinin Azaltılmasında Fitoremediasyon Yaklaşımının Kullanımı*

Use of Phytoremediation Approach to Decrease Streamwater Pollution

 Ahmet AYTEĞİN¹,  Mehmet ÖZCAN²

Özet

Yeterli ve temiz içme ve sulama suyu temini, dünya genelinde ciddi bir endişe kaynağıdır. Dünya genelinde çeşitli kirlenici kaynakları su kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Çevresel ve sucul ekosistemler, bu kirlenici maddelerin salınımına maruz kalmaktadır. Ne yazık ki, kirlenmiş ortamların arıtımı için çevre dostu yöntemler sınırlıdır. Ağır metal kirliliği, insan sağlığı üzerinde ciddi hastalıklara neden olan en büyük tehditlerden biridir. Bitkilerin kirleniciyi uzaklaştırma kapasitesine dayanan fitoremediasyon, çevre dostu ve ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, toksik elementlerin toprakta birikimini azaltmada etkili olduğu gibi, biyoremediasyon ile entegre edilen sistemlerde su kirlenicilerinin giderilmesinde de dikkat çekmektedir. Fitoremediasyonun etkinliğini artırmak için, farklı bitki türlerinin potansiyelini inceleyen mekanik süreçler uygulanmaktadır. Bu süreçte, multidisipliner bir yaklaşım benimsenerek geniş bir bitki yelpazesinin analiz edilmesi önem taşır.

Anahtar Kelimeler: Fitoremediasyon, akarsu kirliliği, ağır metaller, sürdürülebilir çevre, bitki bazlı temizleme

Abstract

The supply of adequate and clean drinking and irrigation water is a serious concern worldwide. Various sources of pollutants around the world are causing water quality degradation. Environmental and aquatic ecosystems are exposed to the release of these pollutants. Unfortunately, environmentally friendly methods for the treatment of contaminated environments are limited. Heavy metal pollution is one of the biggest threats to human health, causing serious illnesses. Phytoremediation, based on the capacity of plants to remove pollutants, stands out as an environmentally friendly and economical solution. This method is effective in reducing the accumulation of toxic elements in soil, as well as in the removal of water pollutants in systems integrated with bioremediation. In order to increase the efficiency of phytoremediation, mechanistic processes that examine the potential of different plant species are applied. In this process, it is important to analyze a wide range of plants by adopting a multidisciplinary approach.

Keywords: Phytoremediation, river pollution, heavy metals, sustainable environment, plant-based cleanup

Geliş Tarihi: 03.05.2025, Düzeltme Tarihi: 13.05.2025, Kabul Tarihi: 23.05.2025

Adres: ¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orman Mühendisliği Bölümü

²Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü

E-mail: ahmetaytegin@gmail.com

*Bu çalışma, Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Düzce (Melen) Havzasında Yer Alan Bazı Bitkilerde Arazi Kullanım Etkinliğine Bağlı Olarak Ağır Metal Kirliliğinin İncelenmesi" isimli doktora tezinden üretilmiştir.

1. Giriş

Su, insanlar, bitkiler ve hayvanlar için temel bir kaynaktır ve gezegenimizdeki yaşamın varlığı için çok önemlidir. Bununla birlikte, akarsular ve diğer su kaynakları, hızlı nüfus artışına paralel olarak artan tarımsal faaliyetler ve sanayileşme ile hızlı bir şekilde kirlenmektedir (Chen ve ark., 2018; Delgado-González ve ark., 2021). Akarsulardaki kirlilik, bu kaynakları kullanan insanları önemli ölçüde etkileyebilmekte, biyolojik çeşitlilik kayıplarına ve olumsuz çevresel etkilere neden olabilmektedir. Nitekim su kaynaklarının kirlenmesi, ekosistemlerin ve insan sağlığının korunması açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Özellikle ağır metaller, sucul ortamlarda birikerek toksik etkilere neden olabilmektedir (Xue ve ark., 2010).

Çeşitli kirleticiler ile kirlenen su kaynaklarının temizlenmesi için fiziksel ve kimyasal bir dizi yöntem geliştirilmiştir (Hua ve ark., 2012). Ancak uygulanan bu yöntemler yüksek maliyet, enerji ve iş gücü gerektirmektedir. Geleneksel arıtma yöntemlerinin yüksek maliyeti ve çevresel etkileri nedeniyle, günümüzde fitoremediasyon gibi sürdürülebilir ve ekonomik alternatifler önem kazanmaktadır (Hanif ve Bhatti, 2009; Dhir ve ark., 2009). Bu yöntem, canlı bitkileri veya onların enzimlerini kullanarak kirleticileri ortamda parçalayarak, biriktirerek veya daha zararsız bir forma dönüştürerek toprağı, havayı ve suyu temizleyen düşük maliyetli ve düşük teknoloji bir süreçtir. Fitoremediasyon; rizofiltrasyon, fitoekstraksiyon, fitovolatilizasyon, fitostabilizasyon, hiperakümülyasyon, rizosfer bozunması, gelişmiş biyolojik bozunma ve mikorizodegradasyon gibi çeşitli mekanizmaları içerir (Terzi ve Yıldız, 2011).

1.1. Akarsu kirliliğı ve fitoremediasyon

Akarsular, yağış sularını deniz ve göllere taşıyarak su döngüsünde önemli bir rol oynamaktadır. Sanayileşme, kentleşme ve yoğun tarımsal faaliyetler akarsularda inorganik ve organik kirliliğın artmasına neden olmaktadır. Endüstriyel ve kentsel baskılar altında kalan birçok nehir, kirletici maddelerin girişine maruz kalmaktadır (Tangahu ve ark., 2011). Bu durumu önlemek için, bu kaynakların özenli bir şekilde kullanılması ve denetimlerinin dikkatli bir şekilde yapılması gerekliliğı önem arz etmektedir (Ghosh ve Singh, 2005). Ancak, endüstriyel faaliyetler ve mevzuat yetersizlikleri nedeniyle, kirletici maddeler nehir yataklarına sızmakta ve bu sularda kirliliğı neden olmaktadır (Pilon-Smits, 2005). Ağır metallerin ve organik maddelerin akarsulara taşınması su kaynaklarını kirletmekte, kirliliğın toprağı, yeraltı sularına ve suya yayılması bitki ve hayvan yaşamını olumsuz etkilerken, insan sağlığına da zarar vermektedir (Yadav ve ark., 2011).

Akarsuların temizlenmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığı açısından büyük öneme sahiptir. Akarsular, yaşam kaynağı olan suyun temin edilmesinde kritik rol oynar ve ekosistemlerin sağlığıyla doğrudan bağlantılıdır. Akarsu kirliliği, sadece su kaynaklarını kirletmekle kalmaz, aynı zamanda doğal dengeyi de bozar. Su kaynaklarının kirlenmesi, doğrudan insan sağlığını tehdit eder. Kirli sular, mikroorganizmalar, patojenler, ağır metaller ve toksik kimyasallar içerebilir ve bu da çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilir. Aynı zamanda akarsular, çok çeşitli sucul canlıların yaşadığı ekosistemlerdir. Su bitkileri, balıklar, su kuşları ve mikroorganizmalar, akarsularda yaşamlarını sürdürür. Kirlilik, bu canlıların habitatlarını tahrip eder, onların yaşam alanlarını daraltır ve biyoçeşitliliği tehdit eder. Tarımsal sulama, çoğu zaman akarsulara bağlıdır. Kirli suyun tarımda kullanılması, toprağın verimliliğini düşürebilir, bitkilerin büyümesini engelleyebilir ve ürünlerin kalitesiz olmasına neden olabilir. Ayrıca kirli sulama suyu, toprağa ağır metaller ve kimyasal maddeler biriktirebilir, bu da uzun vadede toprak verimliliğini bozabilir. Akarsulardaki suyun yetersizliği ve kirli olması nedeniyle, günlük kullanıma uygun hale getirilmesi için kirliliğin akarsulardan temizlenmesi gerekmektedir. Akarsuların temizlenmesinde ise filtrasyon, klorlama ve demirleme gibi farklı temizleme işlemleri uygulanmaktadır. Kirleticileri temizleme yaklaşımlarından biri hem ekonomik hem de çevre dostu bir temizleme teknolojisi olarak kabul edilen fitoremediasyondur (Delgado-González ve ark., 2021).

Son yıllarda fitoremediasyon, bitkilerin biyolojik süreçlerini kullanarak çevresel kirleticilerin giderilmesine yönelik çevre dostu ve düşük maliyetli bir teknik olarak büyük ilgi görmektedir. Bu yöntem, kirlenmiş toprakları ve suları eski haline getirmek için etkili, estetik açıdan hoş ve sürdürülebilir bir yol sunmaktadır (Ali ve ark., 2013). Hiperakümülatör bitkiler, ağır metaller (Pb, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn) ve metaloidler (As) gibi toksik maddeleri dönüştürme ve detoksifiye etme kapasitesine sahiptir (Salt ve ark., 1998). Fitoremediasyon, arıtma maliyetlerini düşürmek ve ekosistem sağlığını korumak için etkili bir strateji sunmaktadır (McGrath ve Zhao, 2003).

1.2. Fitoremediasyon: Tanım ve ilkeler

1.2.1. Fitoremediasyon nedir?

Fitoremediasyon, bitkilerin kökleri aracılığıyla kirleticileri alıp, metabolize ederek veya depolayarak çevreden uzaklaştırdığı bir biyoremediasyon tekniğidir. Bu yöntemde, hiperakümülatör bitkiler toprak ve su ortamlarındaki ağır metalleri bünyelerinde biriktirme kapasitesine sahiptir. Akarsulardaki kirliliğin temizlenmesinde fitoremediasyon, kirleticilerin bitkiler tarafından emilmesi, biriktirilmesi ve ayrıştırılması temeline dayanır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018; Ay, 2019).

Akarsu ekosistemlerinde sıkça karşılaşılan kirleticiler; endüstriyel ve evsel atıklar, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan pestisit ve gübre kalıntıları, petrol sızıntıları, ağır metaller, boyalar ve plastik atıklardır. Bu maddeler, su ekosistemleri ve içme sularında ciddi olumsuz etkilere yol açarak insan sağlığını tehdit etmektedir (Toroğlu ve ark., 2006; Acar ve Acar, 2022; Okcu ve ark., 2009).

Fitoremediasyon, diğer yöntemlerle kıyaslandığında akarsulardaki kirliliğin giderilmesinde daha ekonomik ve çevre dostu bir alternatif sunar (Rulkens ve ark., 1998). Özellikle *Phragmites australis*, *Thypha* spp., *Arundo donax* gibi bitkiler ile *Eichhornia* spp. ve *Pistia* spp., ağır metal ve organik kirleticilerin giderilmesinde etkili rol oynar. Bu bitkiler, köklerindeki geniş yüzey alanı sayesinde kirleticileri etkin bir şekilde bünyesine alıp ortamdan uzaklaştırabilir (Hayta ve Erkan, 2019; Baghirova, 2020).

1.3. Fitoremediasyon yöntemleri

Fitoremediasyon yöntemi, kirliliğin giderilmesi için geleneksel fizikokimyasal yöntemlere göre daha düşük maliyet, az enerji ve çok daha az çevresel etki gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, yöntemin uygulanması sırasında oluşan bitki biyokütlesi, gübre veya yakıt olarak da değerlendirilebilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018; Özay ve Mamadov, 2013; Terzi ve Yıldız, 2011).

Bununla birlikte, fitoremediasyon yönteminin etkinliği; akarsu özelliklerinin (hız, derinlik, sıcaklık vb.), kirletici türünün ve konsantrasyonunun, kullanılan bitki türlerinin ve iklim koşullarının uygunluğuna bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, her bir akarsu sistemi için optimum şartların belirlenmesi ve yöntemin takibi önemlidir (Toroğlu ve ark., 2006; Vangronsveld, 2009).

Fitoremediasyon yöntemi, akarsuların yanı sıra toprak ve yeraltı sularındaki çeşitli kirleticilerin giderilmesinde kullanılabilir (Bütünoğlu, 2018; E.P.A., 1995). Bu yöntemde

kullanılan bitkilerin aşırı metal konsantrasyonunda yaşayabilmeleri için köklerinin yoğunluk durumu ve uzunluğu, ortam şartlarına aşırı hassas olmaması ve hızlı büyümesi önemli bir faktördür. Bitkiler, köklerinden başlayarak kirleticiler bünyelerine alır, çözer, parçalar veya transpirasyon yoluyla uzaklaştırabilirler (Reeves ve Baker, 2000; Watanabe, 1997; Bütünoğlu, 2018). Fitoremediasyon, ağır metaller, organik bileşikler, radyoaktif maddeler ve pestisitler gibi kirleticilerin giderilmesinde çevre dostu bir yöntemdir (Özay ve Mamadov, 2013).

Tamamen su ortamında gelişen yapraklı bitkiler, serbest yüzen veya batık yapraklı türler ise hem kökleri hem de yaprakları yardımıyla ağır metalleri bünyelerine alabilmektedir. Öte yandan, suyun altında kök salan bitkiler yalnızca sudaki değil, aynı zamanda dip çökellerindeki (sediment) metalleri de tutma kapasitesine sahiptir (Sheoran ve Sheoran, 2006).

Bitkisel Özümleme (fitoekstraksiyon), toprak veya sudan bitki kökleri ve sürgünleri aracılığıyla kirleticilerin alınarak uzaklaştırılması sürecidir. Özellikle geniş alanlara dağılmış kirleticilerin temizlenmesinde etkili bir yöntemdir (AiniSyuhaida ve ark., 2014). Bu yöntemde, kirlenmiş bölgeye ekilen bitkiler, büyüme süreci boyunca kirleticileri bünyelerine alır. Hasat edilen bitki kısımları, içerdiği ağır metallerin geri kazanımı için işlenebileceği gibi gübre olarak da değerlendirilebilir. Bitkisel madencilik (phytomining) olarak adlandırılan bu süreç, normal şartlarda ekonomik olarak çıkarılması zor olan metallerin geri kazanılmasını sağlar. Özellikle altın ve nikel gibi değerli elementlerin elde edilmesine olanak tanıyan bu teknoloji, ağır metallerle kirlenmiş topraklarda yaygın olarak kullanılmaktadır (E.P.A., 2000).

Bitkisel Buharlaştırma (fitobuharlaştırma) bu yöntem, organik ve inorganik kirleticilerin bitkiler tarafından emildikten sonra atmosferde daha az zararlı bileşiklere dönüştürülerek salınmasını ifade eder. Fitobuharlaştırma süreci, özellikle civalı bileşikler gibi son derece toksik maddelerin daha az zehirli hale getirilmesine yardımcı olurken, bazı zararlı bileşiklerin atmosfere yayılması olumsuz bir yön olarak değerlendirilir (Pilon-Smits ve Freeman, 2006).

Bu yöntemin etkinliğinde kök derinliği kritik bir rol oynamaktadır. Fitobuharlaştırma kullanılarak yeraltı suları, toprak ve sedimentlerdeki kirleticiler giderilebilmektedir. Uygulanabileceği kirleticilerin arasında organik klorlu çözücüler ile selenyum (Se), civa (Hg), arsenik (As) benzeri inorganik kirleticiler bulunur (E.P.A., 2000).

Köklerle Süzme (rizofiltrasyon) yönteminde bitki kökleri, sudaki ağır metal gibi kirleticileri emerek arıtım sağlar. Köklere süzülme, kirleticilerin bitki köklerine nüfuz etmesi

veya kök yüzeylerine adsorpsiyonu yoluyla gerçekleşmektedir. Bu yöntemde esas amaç, kirleticilerin bitki bünyesinde veya yüzeyinde tutulması ve ardından uygun yöntemlerle bitkiden uzaklaştırılmasıdır. Hem karasal hem de sucul bitkiler bu yöntemde kullanılabilir. Yöntem, doğal ekosistemlerde uygulanabileceği gibi, havuz, tank ve gölet gibi yapay ortamlarda da uygulanabilmektedir. Özellikle düşük derecede kirlenmiş ve yüksek hacimli suların arıtılmasında etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, bakır (Cu), çinko (Zn), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), krom (Cr) ve nikel (Ni) gibi ağır metallerin yanı sıra, uranyum (U), sezyum (Cs) ve stronsiyum (Sr) gibi radyonüklidlerin ortamdan uzaklaştırılmasında etkili bir çözüm sunmaktadır (E.P.A., 2000).

Köklerle Sabitleme (fitostabilizasyon), kirleticilerin su ve toprakta hareketsiz hale getirilip yayılmasının önlenmesi şeklinde gerçekleştirilen bir yöntemdir. Köklere sabitleme toprak, sediment ve çamurda uygulanabilmektedir. Bu yöntem, bitki kökleri aracılığıyla kirleticilerin hareketini sınırlamayı amaçlar. Kirlenmiş kara alanlarının stabilize edilmesi ve yeniden kazanılması için bitkilerden yararlanılır. Aynı zamanda, bitki kökleri toprağın pH seviyesini ve nem dengesini etkileyerek çevresel koşullarda değişiklikler oluşturur (Rai, 2009; Rajakaruna ve ark., 2006). Ancak fitostabilizasyonun en büyük dezavantajlarından biri, kirleticilerin ortamda birikmeye devam etmesi ve zamanla yıkanarak yeraltı sularına karışma riskidir. Bu yöntemin etkinliği açısından kök derinliği oldukça önemli bir faktördür (E.P.A., 2000).

Bitkisel Parçalanma (fitodegradasyon) yönteminde organik kirleticiler, bitkilerin yardımıyla parçalanarak zararsız hale getirilir. Bitkisel parçalanma, kirleticinin bitki tarafından alınarak, metabolik süreçler ve bitkilerin ürettiği enzimler yardımıyla bozunmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu bozunma süreci, bitkinin salgıladığı bileşiklerin etkisiyle bitki dışında da gerçekleşebilir. Fitodegradasyon sürecinde bitkilerin kirleticileri bünyesine alması beklenir ve bu işlem çoğunlukla kök bölgesi ile yapraklarda yoğunlaşır (E.P.A., 2000).

Bu yöntemin en büyük dezavantajlarından biri, bozunma sırasında ortaya çıkabilecek toksik ara ve son ürünlerin tespit edilmesinin zor olmasıdır. Fitodegradasyon tekniğiyle uzaklaştırılan kirleticiler arasında pestisitler, klorlu bileşikler fenoller ve bazı kimyasal maddeler bulunmaktadır (E.P.A., 2000).

1.4. Fitoremediasyonda kullanılabilecek bitkiler

Sulak alanlarda yetişebilen su bitkileri (makrofitler) bulundukları ortam, form, gelişim özellikleri, biçim ve boyutlarına göre sınıflandırılabilir. Aynı zamanda bu bitkiler su

içerisindeki yetiştirme durumlarına göre serbest yüzme veya kökleriyle sedimente tutunma durumlarına göre de sınıflandırılabilirler (Kırım ve ark., 2014). Bu bitkiler, su içerisindeki durumlarına göre üç sınıfa ayrılmaktadır;

Gövdenin bir kısmı su içerisinde olan bitkiler (Emers); Su yüzeyinde *Typha* spp. *Potamogeton* spp. ve *Phragmites* spp. gibi yaprakları bulunan bitkilerdir.

Tamamen su içinde yaşayan bitkiler (Submers); *Ceratophyllum demersum* ve *Myriophyllum spicatum* gibi tamamı ile su altında yaşayan bitkilerdir.

Sadece kökleri su altında olan bitkiler (Serbest yüzen); Kökleri ile su altında bulunan çamur tabanına tutunmuş, yaprak ve çiçeği su yüzeyinde olan bitkilerdir. Örneğin, *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiote* ve *Lemna* spp.

Submers bitkiler tamamen su altında yaşar ve emers bitkiler su tabanında kök salarak kalan organlarını su üzerine çıkarırlar (Cirik ve Cirik, 2004). Makrofitler, karasal bitkilere kıyasla daha hızlı büyüme, yüksek biyokütle üretimi ve emilim kapasitesi göstermektedir (Aurangzeb ve ark., 2014).

Hiperakümülatör bitkiler, yüksek konsantrasyonda ağır metal içeren toprak veya sucul ortamlarda yaşayabilen, bu metalleri kökleriyle alıp gövde, yaprak gibi dokularında biriktiren bitkilerdir. Bu bitkiler, metalleri kökten alıp gövdeye taşır ve yapraklarında depolar (Rascio ve Navari-Izzo, 2011).

Bitkiler, ağır metal ve organik kirleticilerin giderilmesinde oldukça etkilidir. Özellikle su bitkileri, köklerindeki geniş yüzey alanı sayesinde kirleticileri etkin bir şekilde bünyelerine alabilmekte ve metabolize edebilmektedirler. Hiperakümülatör olarak bilinen bazı bitkiler ise kirleticileri dokularında yüksek konsantrasyonlarda tutabilmektedir (Terzi ve Yıldız, 2011; Vanlı, 2007).

Fitoremediasyon yöntemi ile birçok farklı bitki türünün farklı ortamlardaki ağır metaller üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Örneğin Bello ve arkadaşları (2018) Al-Asfar Gölü'ndeki *Phragmites australis* bitkisinin organlarındaki kadmiyum ve kurşunun %90'ından fazlasını giderirken, nikeli bu oranda uzaklaştıramadığı belirlenmiştir. Ancak pH yükseldikçe nikel giderimi %90'ın üzerine çıkmış, pH ve tuzluluk değişimleri kadmiyum ve kurşun giderimini etkilemezken, nikel giderimini artırmıştır. Kirleticilerin çoğu bitkinin köklerinde, daha azı ise sürgün ve yapraklarda birikmiştir. Bir başka çalışmada *Typha latifolia* bitkisinin hayvancılık atık sularında bulunan çinko ve bakır gibi ağır metallerin giderilmesindeki etkisi araştırılmış ve *Typha latifolia* bitkisinin atık sulardan çinko ve bakırı kök, gövde ve yapraklarında birikim yaparak etkili bir şekilde uzaklaştırdığı belirlenmiştir. (Hejna ve ark., 2020). Yine *Mentha aquatica* bitkisi ile sera ortamında yapılan çalışmada

8327 mg/kg nikel (Ni) uzaklaştırılmıştır (Zurayk ve ark., 2002). *Arundo donax* bitkisi sera koşullarında 0, 50, 100, 300, 600 ve 1000 mg/l gibi artan dozlarda arsenik (As) çözeltisine maruz bırakılmış ve 600 mg/l'ye kadar olan dozlardan etkilenmemiştir (Mirza ve ark., 2010). Bu çalışmalar, söz konusu bitkilerin ağır metal içeren atık suların iyileştirilmesinde etkili olabileceğini göstermektedir. Sucul ekosistemlerdeki ağır metal kirliliğinin azaltılmasında hangi bitki türlerinin kullanılabileceğine dair yapılmış olan çalışmalar Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Ağır metallerin tutulmasında kullanılabilecek bitki türleri.

Kullanılan Bitki Türleri	Ağır Metal ve Diğer Kirleticiler	Yazarlar
<i>Arundo donax</i>	As	Mirza ve ark., 2010
<i>Azolla</i> spp.	Cd, Cu, Pb, Hg, Zi, Fe	Benaroya ve ark., 2004; Valderrama ve ark., 2012; Rai, 2008
<i>Ceratophyllum demersum</i>	Cr, Pb	Abdallah, 2012; Lima ve ark., 2013
<i>Eichhornia crassipes</i>	As, Hg, Ni, Pb, Zn, Cu, Ag	Ingole and Bhole, 2003; Odjegba and Fasidi, 2007
<i>Eleocharis acicularis</i>	Cu, Zn, As, Cd, Pb	Sakakibara ve ark., 2011
<i>Elodea canadensis</i>	Cd, Pb, Zn, Cu	Basile ve ark., 2012; Török ve ark., 2015
<i>Helianthus annuus</i>	Ni, Pb	Mukhtar ve ark., 2010
<i>Hydrilla verticillata</i>	Fe, Pb, Zn, Cr	Dixit and Dhote, 2009; Sinha ve ark., 2000; Xue and Yan, 2011; Kumar ve ark., 2008
<i>Ipomoea aquatica</i>	Pb, Cr	Chanu and Gupta, 2016; Weerasinghe ve ark., 2008
<i>Iris pseudacorus</i>	Cr, Zn	Caldelas ve ark., 2012
<i>Juncus effusus</i>	Pb	Najeeb ve ark., 2017
<i>Lemna gibba</i>	U, As	Mkandawire ve ark., 2004
<i>Lemna minor</i>	Cr,	Bokhari ve ark., 2016
<i>Lolium perenne</i>	Cr	Vernay ve ark., 2007
<i>Ludwigia stolonifera</i>	Cd, Ni, Zn, Pb	Galal ve ark., 2019
<i>Mentha aquatica</i>	Ni	Zurayk ve ark., 2002
<i>Myriophyllum</i> spp.	Cd, Cr, Ni, Zn	Colzi ve ark., 2018; Sivaci ve ark., 2004
<i>Nelumbo nucifera</i>	Cd, Cu, Co, Pb, Ni, Zn	Kumar ve ark., 2008
<i>Phragmites australis</i>	Cd, Pb, Ni, Zn, Fe, Mn, Cu	Bello ve ark., 2018; Parzych ve ark., 2016
<i>Pistia stratiotes</i>	Cd, Cu, Fe, Hg	Nurhayati, 2012; Kumar ve ark., 2019; Das and Das, 2013
<i>Plantago major</i>	Pb	Romeh, 2014
<i>Potamogeton natans</i>	Cu, Cd, Pb, Zn	Fritioff and Greger, 2006
<i>Pteris vittata</i>	As	Huang ve ark., 2004
<i>Salvinia</i> spp.	Pb, As, Zn, Cu, Ni, Cr	Loria ve ark., 2019; Hoffmann ve ark., 2004; Da Silva ve ark., 2018; Dhir and Srivastava, 2011
<i>Spirodela polyrhiza</i>	As	Rahman ve ark., 2007
<i>Trapa natans</i>	Cr, Pb, Cd, Cu	Kumar and Chopra, 2018; Sweta ve ark., 2015
<i>Typha domingensis</i>	P, Na, K, Zn, Hg	Eid ve ark., 2012; Gomes ve ark., 2014
<i>Typha latifolia</i>	Cu, Zn, Fe, Mn, Ni	Hejna ve ark., 2020; Parzych ve ark., 2016
<i>Typha angustifolia</i>	Cu, Cd, Cr, Mn, Fe, Ni, Pb, Zn	Chandra and Yadav, 2011; Syukor ve ark., 2016
<i>Vallisneria natans</i>	As	Li ve ark., 2018; Chen ve ark., 2015

2. Sonuçlar

Günümüzde ekolojik bir yaklaşım anlayışı ile düşünüldüğünde fitoremediasyon, geleneksel iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve daha çevreci bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Kirleticinin türü, ortam ve mevcut alternatif yöntemler dikkate alındığında, fitoremediasyonun maliyeti genellikle 2-10 kat daha düşüktür (Glass, 1999). Ayrıca, kazı ve kaldırma, kimyasal stabilizasyon, toprak yıkama veya yakma gibi yöntemlere göre estetik açıdan daha avantajlıdır (E.P.A., 1998, 1999). Bitkilerin farklı sinerjik süreçlere katkı sağlayabilmesi, sadece çevresel temizliği değil, aynı zamanda ekosistem restorasyonunu da mümkün kılmaktadır. Fitoremediasyon, kirlenmiş ortamın özelliklerine göre uyarlanabilir; bu sayede, gelecekte kirleticilerin karışımını içeren sahaları temizlemek için farklı yeteneklere sahip bitki türlerinin kombinasyonu tercih edilebilir. Bunlara ek olarak, temizleme sürecinde ekosistem restorasyonunu desteklemek amacıyla yerli bitki türlerinin kullanımı da önerilmektedir (Pilon-Smits ve Freeman, 2006). Akarsulardaki kirliliğin giderilmesinde fitoremediasyonun rolü giderek artmaktadır (Güneş ve ark., 2017).

Ancak bu yararları yanında fitoremediasyonun bazı sınırlamaları da bulunmakta olup bunları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Kirleticilerin bitkiler tarafından emilmesi ve temizlenmesi uzun zaman alabilmektedir. Özellikle bazı ağır metal ve toksik maddelerin bu yöntemle temizlenmesi zor olabilmektedir.
- Eğer su çok kirli ise, bitkiler bu yoğun kirleticileri yeterince hızlı bir şekilde temizlemekte zorlanabilmektedir. Yüksek yoğunlukta kirlenmiş sularda yeterince etkili olmayabilir.
- Fitoremediasyon bitkilerinin büyümesine ve hava koşullarına bağlıdır. Kış aylarında veya kurak dönemlerde bitkilerin verimi düşebilir, bu mevsimsel koşullar temizlik sürecini olumsuz etkileyebilir.
- Fitoremediasyonda yabancı türler kullanıldığında bazen yerel ekosistemlere zarar verebilmekte veya biyolojik çeşitliliği tehdit edebilmektedir. Bu yüzden ekosistem dengesizliği oluşturulabilir.
- Bitkiler kirleticileri emdikten sonra ölürse, bu maddeler tekrar çevreye salınabilmektedir. Bu yüzden kirlenmenin yeniden oluşma riski mümkün olabilmektedir.

Sonuç olarak, fitoremediasyon, akarsulardaki kirliliğin giderilmesinde çevre dostu, sürdürülebilir ve ekonomik bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Ancak, etkinliğin

artırılması ve yaygınlaştırılması için daha fazla araştırma ve uygulama çalışmasına gerek duyulmaktadır (Rezania ve ark., 2016; E.P.A., 2000).

Teşekkür

Ahmet AYTEĞİN, Yükseköğretim Kurulu'nun 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında, 'Sürdürülebilir Ormancılık ve Orman Afetleri' tematik alanında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Abdallah, M.A.M. (2012). Phytoremediation of heavy metals from aqueous solutions by two aquatic macrophytes, *Ceratophyllum demersum* and *Lemna gibba* L. *Environ. Technol.*, 33, 1609–1614.
- Acar, B.Ç., ve Acar, M.B. (2022). Kimyasal yöntemlerle atık sulardan ağır metal giderimi. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 3(1), 1-13.
- AiniSyuhaida, A.W., Sharifah Norkhadijah, S.I., Emilia, Z.A. & Sarva Mangala, P. (2014). Neptuniaoleracea (water mimosa) as phytoremediation plant and the risk to human health: A review. *Adv. Environ. Biol.*, 8(15), 187-194,
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Aurangzeb, N., Nisa, S., Bibi, Y., Javed, F., & Hussain, F. (2014). Phytoremediation potential of aquatic herbs from steel foundry effluent. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31, 881-886.
- Ay, İ. (2019). Ağır metal şelasyonunda fitoremediasyon tekniği ve uygulamada etkili makrofitler. *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 2(3), 77-82.
- Baghirova, F. (2020). ‘Sukul ortamlardan fitoremediasyon yöntemi ile ağır metal giderimi’. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Basile A., Sorbo S., Conte B., Cobianchi R.C., Trinchella F., Capasso C. & Carginale V. (2012). Toxicity, accumulation, and removal of heavy metals by three aquatic macrophytes. *Int. J. Phytoremediat.*, 14, 374–387.
- Bello, A.O., Tawabini, B.S., Khalil, A.B., Boland, C.R. & Saleh, T.A. (2018). Phytoremediation of cadmium-, lead- and nickel-contaminated water by *Phragmites australis* in hydroponic systems. *Ecol. Eng.*, 120, 126–133.
- Benaroya, R.O., Tzin, V., Tel-Or, E. & Zamski, E. (2004). Lead accumulation in the aquatic fern *Azolla filiculoides*. *Plant Physiol. Biochem.*, 42, 639–645.
- Bokhari, S.H., Ahmad, I., Mahmood-Ul-Hassan, M., Mohammad, A. (2016). Phytoremediation potential of *Lemna minor* L. for heavy metals. *Int. J. Phytoremediat.*, 18, 25–32.
- Bütünoğlu, A. (2018). ‘Su kaynaklarında yüzer sulak alan ve sucul bitkiler ile nütrient gideriminin değerlendirilmesi’. Uzmanlık Tezi. T.C Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.

- Caldelas, C., Araus, J.L., Febrero, A. & Bort, J. (2012). Accumulation and toxic effects of chromium and zinc in *Iris pseudacorus* L. *Acta Physiol. Plant.*, 34, 1217–1228.
- Chandra R. & Yadav S. (2011). Phytoremediation of Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Pb and Zn from aqueous solution using *Phragmites cummunis*, *typha angustifolia* and *Cyperous esculentus*, *Int. J. Phytoremediat.*, 13, 580–591.
- Chen G., Liu X., Brookes P.C. & Xu J. (2015). Opportunities for phytoremediation and bioindication of arsenic contaminated water using a submerged aquatic plant: *Vallisneria natans* (Lour.) Hara, *Int. J. Phytoremediat.*, 17, 249–255.
- Chen, L., Zhou, S., Şi, Y., Wang, C., Li, B., Li, Y. & Wu, S. (2018). Heavy metals in food crops, soil, and water in the Lihe River Watershed of the Taihu Region and their potential health risks when ingested. *Science of The Total Env.*, 615, 141–149.
- Cirik, Ş. ve Cirik, S. (2004). Su bitkileri (deniz bitkilerinin biyolojisi, ekolojisi yetiştirme teknikleri), Bornova–İzmir: Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayınları.
- Colzi, I., Lastrucci, L., Rangoni, M., Coppi, A. & Gonnelli, C. (2018). Using *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. to remove heavy metals from contaminated water: Better dead or alive? *J. Environ. Manag.*, 213, 320–328.
- Da Silva, A.A., De Oliveira, J.A., De Campos, F.V., Ribeiro, C., Farnese, F.D.S. & Costa, A.C. (2018). Phytoremediation potential of *Salvinia molesta* for arsenite contaminated water: Role of antioxidant enzymes. *Theor. Exp. Plant Physiol.*, 30, 275–286.
- Das, S., Goswami, S. & Das Talukdar, A. (2013). A Study on Cadmium Phytoremediation Potential of Water Lettuce, *Pistia stratiotes* L. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 92, 169–174.
- Delgado-González, C.R., Madariaga-Navarrete, A., Fernández-Cortés, J.M., Islas-Pelcastre, M., Oza, G., Iqbal, H.M., & Sharma, A. (2021). Advances and applications of water phytoremediation: A potential biotechnological approach for the treatment of heavy metals from contaminated water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5215.
- Dhir, B., Sharmila, P. & Pardha Saradhi, P. (2009). Potential of aquatic macrophytes for removing contaminants from the environment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 39, 1-28,
- Dhir, B. & Srivastava, S. (2011). Heavy metal removal from a multi-metal solution and wastewater by *Salvinia natans*. *Ecol. Eng.*, 37, 893–896.
- Dixit, S. & Dhote, S. (2009). Evaluation of uptake rate of heavy metals by *Eichhornia crassipes* and *Hydrilla verticillata*. *Environ. Monit. Assess.*, 169, 367–374.

- Eid, E.M., Shaltout, K.H., El-Sheikh, M.A. & Asaeda, T. (2012). Seasonal courses of nutrients and heavy metals in water, sediment and above- and below-ground *Typha domingensis* biomass in Lake Burullus (Egypt): Perspectives for phytoremediation. *Flora*, 207, 783–794.
- E.P.A. (Environmental Protection Agency), (1995). Contaminants and Remedial Options at Select Metals – Contaminated Sites, EPA/540/R-95/512.
- E.P.A. (Environmental Protection Agency). (1998). A citizen's guide to phytoremediation. Washington, DC: EPA. Publication 542-F-98-011.
- E.P.A. (Environmental Protection Agency). (1999). Phytoremediation resource guide. Washington, DC: EPA. Publication 542-B-99-003.
- E.P.A. (Environmental Protection Agency). (2000). Introduction of Phytoremediation. epa/600/R-99/107, Cincinnati, Ohio, U.S.A.
- Fritioff, Å. & Greger, M. (2006). Uptake and distribution of Zn, Cu, Cd, and Pb in an aquatic plant *Potamogeton natans*. *Chemosphere*, 63, 220–227.
- Galal, T.M., Al-Sodany, Y.M. & Al-Yasi, H.M. (2019). Phytostabilization as a phytoremediation strategy for mitigating water pollutants by the floating macrophyte *Ludwigia stolonifera* (Guill. & Perr.) P.H. Raven. *Int. J. Phytoremediat.*, 22, 373–382.
- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1-18.
- Glass D.J. (1999), Economic potential of phytoremediation, *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*, (Raskin I., Ensley B.D., Eds.), John Wiley&Sans, New York, 15-31.
- Gomes, M.V.T., de Souza, R.R., Teles, V.S. & Mendes, É.A. (2014). Phytoremediation of water contaminated with mercury using *Typha domingensis* in constructed wetland. *Chemosphere*, 103, 228–233.
- Güneş, A., Kumar, R., Pek, T., Yüksel, M., & Kabay, N. (2017). Yapay Sulak Alanlarda Atıksu Rehabilitasyonunda Kullanılan *Salvinia natans* ve *Lemna minor* Bitki Türlerinin Su Kalitesine Olan Etkileri. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 74(EK-1), 79-86.
- Hanif, A. & Bhatti, H.N. (2009). Removal and recovery of Cu (II) and Zn (II) using immobilized *Mentha arvensis* distillation waste biomass. *Ecol. Eng.*, 35, 1427-1434.
- Hayta, Ş. ve Erkan, Y. (2019). Ahlat Sazlıklarındaki, *Phragmites australis* (cav.) Trin. Exstend, *Typha angustifolia* L., *Lythrum salicaria* L. Bitkilerinin ve Bunları Çevreleyen

- Sedimentlerde Ağır Metal Konsantrasyonlarının Belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 795-805.
- Hejna, M., Moscatelli, A., Stroppa, N., Onelli, E., Pilu, S., Baldi, A. & Rossi, L. (2020). Bioaccumulation of heavy metals from wastewater through a *Typha latifolia* and *Thelypteris palustris* phytoremediation system. *Chemosphere*, 241, 125018.
- Hoffmann, T.L., Kutter, C. & Santamaria, J.M. (2004). Capacity of *Salvinia minima* Baker to Tolerate and Accumulate As and Pb. *Eng. Life Sci.*, 4, 61–65.
- Hua, M., Zhang, S., Pan, B., Zhang, W., Lv, L. & Zhang, Q. (2012) Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: A review. *J. Hazard. Mat.*, 211, 317–331.
- Huang, Z.C., Chen, T.B., Lei, M. & Hu, T.D. (2004). Direct determination of arsenic species in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* by EXAFS. *Acta Bot.*, 46, 46–50.
- Ingole, N.W. & Bhole, A.G. (2003). Removal of heavy metals from aqueous solution by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *J. Water Supply Res. Technol.*, 52, 119–128.
- Kırım, B., Çoban, D., & Güler, M. (2014). *Floating aquatic plants and their impact on wetlands in Turkey*. In 2 nd International Conference-Water resources and wetlands. Tulcea, Romania.
- Kumar, J.N., Soni, H., Kumar, R.N. & Bhatt, I. (2008). Macrophytes in phytoremediation of heavy metal contaminated water and sediments in Pariyej Community Reserve, Gujarat, India. *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, 8, 193–200.
- Kumar, V. & Chopra, A.K. (2018). Phytoremediation potential of water caltrop (*Trapa natans* L.) using municipal wastewater of the activated sludge process-based municipal wastewater treatment plant. *Environ. Technol.*, 39, 12–23.
- Kumar, V., Singh, J., Saini, A. & Kumar, P. (2019). Phytoremediation of copper, iron and mercury from aqueous solution by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Environ. Sustain.*, 2, 55–65.
- Li, B., Gu, B., Yang, Z. & Zhang, T. (2018). The role of submerged macrophytes in phytoremediation of arsenic from contaminated water: A case study on *Vallisneria natans* (Lour.) Hara. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 165, 224–231.
- Lima L.K.S., Pelosi B.T., Silva M.G.C. & Vieira M.G.A. (2013). Lead and chromium biosorption by *Pistia stratiotes* biomass. *Chem. Eng. Trans.*, 32, 1045–1050.
- Loría, K.C., Emiliani, J., Bergara, C.D., Herrero, M.S., Salvatierra, L.M. & Pérez, L.M. (2019). Effect of daily exposure to Pb-contaminated water on *Salvinia biloba* physiology and phytoremediation performance. *Aquat. Toxicol.*, 210, 158–166.

- McGrath, S.P. & Zhao, F.J. (2003). Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 14(3), 277-282.
- Mirza, N., Mahmood, Q., Pervez, A., Ahmad, R., Farooq, R., Shah, M.M. & Azim, M.R. (2010). Phytoremediation potential of *Arundo donax* in arsenic-contaminated synthetic wastewater. *Bioresour. Technol.*, 101, 5815–5819.
- Mkandawire, M., Taubert, B. & Dudel, E.G. (2004). Capacity of *Lemna gibba* L. (Duckweed) for Uranium and Arsenic Phytoremediation in Mine Tailing Waters. *Int. J. Phytoremediat.*, 6, 347–362.
- Mukhtar, S.A.I.M.A., Bhatti, H.N., Khalid, M., Haq, M.A.U. & Shahzad, S.M. (2010). Potential of sunflower (*Helianthus annuus* L.) for phytoremediation of nickel (Ni) and lead (Pb) contaminated water. *Pak. J. Bot.*, 42, 4017–4026.
- Najeeb, U., Ahmad, W., Zia, M.H., Zaffar, M. & Zhou, W. (2017). Enhancing the lead phytostabilization in wetland plant *Juncus effusus* L. through somaclonal manipulation and EDTA enrichment. *Arab. J. Chem.*, 10, 3310–3317.
- Nurhayati P. (2012). Water Lettuce (*Pistia stratiotes*, Linn) potency as one of eco- friendly phytoextraction absorbers of zinc heavy metal to solve industrial waste problem in indonesia. *International Conerence on Environmental Biomedical and Biotechnology*, 41, 151-156,
- Odjegba, V.J. & Fasidi, I.O. (2007). Phytoremediation of heavy metals by *Eichhornia crassipes*. *Environmentalist*, 27, 349–355.
- Okcu, M., Tozlu, E., Metin Kumlay, A., & Pehlivan, M. (2009). Ağır metallerin bitkiler üzerine etkileri. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 17(2), 14-26.
- Özay, C. ve Mammadov, R. (2013). Ağır metaller ve süs bitkilerinin fitoremediasyonda kullanılabilirliği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 68-77.
- Parzych A., Sobisz Z. & Cymer M. (2016). Preliminary research of heavy metals content in aquatic plants taken from surface water (Northern Poland). *Desal. Water Treat.*, 57, 1451–1461.
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39.
- Pilon-Smits, E.A. & Freeman, J.L. (2006). Environmental cleanup using plants: biotechnological advances and ecological considerations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(4), 203-210.
- Rahman, M.A., Hasegawa, H., Ueda, K., Maki, T. & Okumura, C. (2007). Arsenic accumulation in duckweed (*Spirodela polyrhiza* L.): A good option for phytoremediation. *Chemosphere*, 69, 493–499.

- Rai, P.K. (2008). Technical Note: Phytoremediation of Hg and Cd from Industrial Effluents using an Aquatic Free Floating Macrophyte *Azolla pinnata*. *Int. J. Phytoremediat.*, 10, 430–439.
- Rai, P.K. (2009). Heavy Metal Phytoremediation from Aquatic Ecosystems with Special Reference to Macrophytes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(9), 697–753.
- Rajakaruna, N., Tompkins, K. M., & Pavicevic, P. G. (2006). Phytoremediation: an affordable green technology for the clean-up of metal-contaminated sites in Sri Lanka. *Ceylon Journal of Science*, 35(1), 25.
- Rascio, N. & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? and what makes them so interesting? *Plant Science*, 180, 169–181.
- Reeves, R.D. & Baker, A.J.M. (2000). Metal accumulating plants. In: Raskin, I. and Finsley, B.D., Eds., *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*, Wiley, New York, 193–229.
- Rezania, S., Taib, S. M., Din, M. F. M., Dahalan, F. A., & Kamyab, H. (2016). Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 587–599.
- Romeh, A.A. (2014). Phytoremediation of cyanophos insecticide by *Plantago major* L. in water. *J. Environ. Health Sci. Eng.*, 12, 38.
- Rulkens, W.H., Tichy, R. & Grotenhuis, J.T.C. (1998). Remediation of polluted soil and sediment: perspectives and failures. *Water Sci. Technol.*, 37, 27–35,
- Sakakibara, M., Ohmori, Y., Ha, N.T.H., Sano, S. & Sera, K. (2011). Phytoremediation of heavy metal-contaminated water and sediment by *Eleocharis acicularis*. *Clean Soil Air Water*, 39, 735–741.
- Salt, D.E., Smith, R.D., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 49(1), 643–668.
- Sheoran, A.S. & Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19, 105–116.
- Sinha, S., Saxena R., & Singh S. (2000). Fluoride Removal from Water by *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle and Its Toxic Effects. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 65, 683–690.
- Sivaci, E.R., Sivaci, A., & Sökmen, M. (2004). Biosorption of cadmium by *Myriophyllum spicatum* L. and *Myriophyllum triphyllum* orchard. *Chemosphere*, 56, 1043–1048.

- Sweta, K. Bauddh, R. Singh, R.P. Singh, (2015). The suitability of *Trapa natans* for phytoremediation of inorganic contaminants from the aquatic ecosystems. *Ecol. Eng.*, 83, 39–42.
- Syukor A.A., Sulaiman S., Siddique M.N.I., Zularisam A.W., Said M.I.M., (2016). Integration of phytochrome for heavy metal removal from wastewater. *J. Clean. Prod.*, 112, 3124–3131.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Kirlenmiş saha temizleme/iyileştirme teknolojileri kılavuzu*. Ankara: Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Tangahu, B. V., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*.
- Terzi, H., ve Yıldız, M. (2011). Ağır metaller ve fitoremediasyon: fizyolojik ve moleküler mekanizmalar. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 1-22.
- Toroğlu, E., Toroğlu, S., ve Alaeddinoğlu, F. (2006). Aksu Çayı'nda (Kahramanmaraş) Akarsu Kirliliği. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 4(1), 93-103.
- Török A., Gulyás Z., Szalai G., Kocsy G. & Majdik C. (2015). Phytoremediation capacity of aquatic plants is associated with the degree of phytochelatin polymerization. *J. Hazard. Mater.* 299, 371–378.
- Valderrama, A., Tapia, J., Peñailillo, P. & Carvajal, D.E. (2012). Water phytoremediation of cadmium and copper using *Azolla filiculoides* Lam. in a hydroponic system. *Water Environ. J.*, 27, 293–300.
- Vangronsveld, T. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 765-94.
- Vanlı, Ö. (2007). '*Pb, Cd, B elementlerinin topraklardan şelat destekli fitoremediasyon yöntemiyle giderilmesi*', Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul
- Vernay, P., Gauthier-Moussard, C. & Hitmi, A. (2007). Interaction of bioaccumulation of heavy metal chromium with water relation, mineral nutrition and photosynthesis in developed leaves of *Lolium perenne* L. *Chemosphere*, 68, 1563–1575.
- Watanabe, M.E. (1997). Phytoremediation on the Brink of Commercialization. *Environmental Sciences and Technology*, 31, 182-186.
- Xue, P., Li, G., Liu, W. & Yan, C. (2010). Copper uptake and translations in a submerged aquatic plant *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Chemosphere*, 81, 1098-1103.

- Xue, P.Y. & Yan, C.Z. (2011). Arsenic accumulation and translocation in the submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Chemosphere*, 85, 1176–1181.
- Yadav, S.K., Juwarkar, A.A., Kumar, G.P., Thawale, P.R., Singh, S.K., & Chakrabarti, T. (2011). Bioaccumulation and phytotranslocation of arsenic, chromium and zinc by *Jatropha curcas* L.: Impact of dairy effluent and bioamendment. *Bioresource Technology*, 102(2), 219-226.
- Zurayk, R., Sukkariyah, B., Baalbaki, R., & Ghanem, D.A. (2002). Ni Phytoaccumulation in *Mentha aquatica* L. and *Mentha sylvestris* L. *Water Air Soil Pollut.*, 139, 355–364.