



Kirletilmiş Topraklarda ve Sularda Bitkisel İyileştirme Teknikleri ve Önemi

İlknur YURDAKUL*

Toprak Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi/Received: 05.11.2014

Kabul Tarihi/Accepted: 08.02.2015

*Sorumlu Yazar/Correspondence: ilknur_yurdakul@yahoo.com

Özet: Kirletilmiş topraklardaki iyileştirme metotları ekonomik aynı zamanda teknik bir mücadeledir. Kirli toprakları metal toplayıcı bitkiler kullanarak iyileştirme metotları fitoremediasyon olarak adlandırılmaktadır. Bitki kullanılarak, kirletilmiş alanların temizlenmesi; ucuz, doğaya uygun, halk tarafından benimsenebilir bir tekniktir. Fitoremediasyon teknolojisi bitkisel ekstraksiyon, bitkisel sabitleme, bitkisel bozunma, kök bölgesinde bozunma, kök bölgesinde filtrasyon, bitkiden buharlaştırma, hidrolik kontrol, tampon şeritler ve bitkisel örtü sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada, toprak ve sulardan kirliliği uzaklaştırmak ve kirlilik zararlarını önlemede bitkinin tercih edildiği bitkisel iyileştirme teknikleri üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Toprak, su, kirlilik, fitoremediasyon

Phytoremediation Techniques and Importance in Contaminated Soils and Waters

Abstract: The remediation technology for contaminated soils, which represents an economic liability as well as a technical challenge. Recent interest in metal hyper accumulation has been stimulated by the potential for phytoremediation of polluted soils, using metal accumulating plants to clean soils of contaminants. The use of plants to clean up a site is an inexpensive and environmental technique that can be adapted by the people. Phytoremediation technology is formed by 8 systems that are phytoextraction, phytostabilization, phytodegradation, rhizodegradation, rhizofiltration, phytovolatilization, hydraulic control, buffer strips (riparian buffer strips) and vegetative cover systems. This study focused on the phytoremediation that use of plants to remove pollutants from the soil and water and to render them harmless.

Keywords: Soil, water, pollution, phytoremediation

1. Giriş

Ağır metaller çevreye; rafineri, madencilik, sanayi, doğal kaynaklar ve tarımsal kaynaklı yollarla yayılmakta (Özay ve Mammadov, 2013), antropojenik etkiler de ağır metallerin dağılımında etkili olmaktadır (Başkaya ve Teksoy, 1996). Metallerden bazıları yaşam için gerekli olmakla birlikte, birikimleri zararlı etki yapmaktadır. Ağır metallerce kirlenmiş toprağın kalitesi bozulmakta, verim düşmekte (Long ve ark., 2002), insan ve

diğer canlıların hayatında tehlikelere yol açılmaktadır (Blaylock ve Huang, 2000).

Fitoteknoloji ile ekosistemi oluşturan bitkilerin çeşitli yollarla kullanılması sağlanarak bozulan doğal denge eski haline getirilmektedir. Bu teknoloji, entegre ekosistem yönetimi, önleme, kontrol, iyileştirme ve değerlendirme aşamalarının takip edilmesi ile yönetilmektedir (Zalewski ve Lotkowska, 2004). Metal biriktirici olarak anılan bazı bitkilerin normal bitkilere göre bazı elementleri aşırı miktarda bünyelerinde

depoladıkları (Brooks ve ark., 1977) ve birikimin topraktaki metal miktarından, Clemens (2006)'e göre 50-500, Brooks (1998)'a göre 100-1000 kat daha fazla olduğu bildirilmektedir. Kirlilik etmenlerini yok etmek için kullanılacak doğadan gelmeyen yöntemlerin kendileri bozulmaya neden olmakta ve doğaya uygun olmayan tüm yaklaşımlar doğanın kazanımına yetmemektedir. Fitoremediasyon çalışmaları, düşük miktarlarda kirlenici içeren toprak ve sularda kullanılan, geniş hacimlerde etkili ve ucuz mücadele yöntemlerini kapsamaktadır. Bu teknik; bitki ile toprak, sediment, su ve çamurdan inorganik [Gümüş (Ag), kadmiyum (Cd), kobalt (Co), krom (Cr), bakır (Cu), civa (Hg), mangan (Mn), molibden (Mo), nikel (Ni), kurşun (Pb), çinko (Zn), strontiyum (90Sr), sezyum (137Cs), plutonyum (239Pu), uranyum (238U, 234U) ve bor (B)] ve organik [Toplam Petrollü Hidrokarbonlar (TPH), Çok Halkalı Aromatik Hidrokarbonlar (PAH), Pestisitler ve Poliklorinatlı Bifeniller (PCB)] kirliliği uzaklaştırmada kullanılan bir grup teknolojiyi anlatmaktadır (Mcintyre, 2003; Hamutoğlu ve ark., 2012).

Kirliliğin uzaklaştırılması kirlenici unsurun doğaya katılımı kadar kısa sürede gerçekleşmemekte, çok daha uzun bir zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Nitekim; Hansruedi (1997) *Salix viminalis* ile tarladan 6.6 mg kg⁻¹ Cd uzaklaştırılarak, toprağı kabul edilen sınır Cd değerine (0.8 mg kg⁻¹) düşürmek için 77 yıla gereksinim olduğunu bildirmekte, Levine (1997) ise metallerin fitoremediasyon işlemi için en azından 2-10 yıla ihtiyaç duyulduğunu belirtmektedir.

Tek ve çok yıllık gelişim gösteren biriktirici 450 bitki çeşidi belirlenmiştir. Nikel biriktirici bitki olarak; Brassicaceae familyasından *Alyssum* ve *Thlaspi*, Euphorbiaceae familyasından *Phyllanthus*, *Leucocroton* ve *Asterceae* belirlenmiştir. Zn biriktirici bitki olarak, Brassicaceae familyasından *Thlaspi* belirlenmiştir. Cu ve Co biriktiren bitkiler incelendiğinde, Lamiaceae ve Scrophulariaceae'nin öne çıktığı çalışmalar dikkat çekmektedir (Brooks, 1998). Doğada Ni biriktirici çok sayıda bitki bulunmasına karşın, örneğin Cr⁺³ biriktiren bitki sayısı azdır (Prasad, 2005). Ni biriktiren 35 bitki familyasında 300'den fazla bitki bulunmaktadır (Palmer ve ark., 2001). Bu bitkiler kuru yaprakta % 3-4 arasında Ni bulundurmaktadırlar. Serpantin topraklar için endemik bir çeşit olan *Alyssum bertolonii* en yüksek yoğunluklarda Ni (>10000 mg kg⁻¹ yaprak) bulunduran bitki olarak bilinmektedir. *Brassica juncea*, *Thlaspi caerulescens*'dan 20 kat daha fazla biyolojik kütle üretmekte ve bünyesinde Pb,

Cr(VI), Cd, Cu, Ni, Zn, Sr(90), B ve Se biriktirmektedir (Salt ve ark., 1998).

Bu çalışmada, kirliliği depolayıcı materyal olarak bitkinin tercih edildiği bitkisel iyileştirme teknolojileri incelenmiştir.

2. Bitkisel İyileştirme (Fitoremediasyon) Teknolojileri

Fitoremediasyon kirlenici özelliğine göre, bitkisel ekstraksiyon, kök bölgesi filtrasyonu, bitkisel sabitleme, bitkide bozunma, kök bölgesinde bozunma, bitkiden buharlaştırma, hidrolik kontrol, tampon şeritler (kıyı tampon şeritleri) ve vejetatif örtü sistemlerinin gerçekleştirildiği tekniklerdir (Anonymous, 1995; Terzi ve Yıldız, 2011; Hamutoğlu ve ark., 2012).

2.1. Bitkisel ekstraksiyon (fitoekstraksiyon)

Bitkisel ekstraksiyon ile metal biriktiren bitkiler kullanılarak kirli topraktan toksik metaller uzaklaştırılmaktadır. İyileştirme planlamasının başarılı olması için kirlilik etmeni, toprak tipi, kirlenicinin bitki tarafından alınması, yetiştirme şartları dikkate alınmalıdır. Bu etkenler bitkinin yetiştirilmesinde ve kirlenici etmenin uzaklaştırılmasında önemlidir. Nitekim, Hansruedi (1997) tarafından yapılan bir çalışmada; *Zea mays*, *Brassica juncea*, *Raphanus sativus* ve *Brassica napa* tarlada, *Alyssum murale* ve *Thlaspi caerulescens* plastik kaplara taşınan toprakta, *Salix viminalis* plastik kaplarda, *Nicotiana tabacum* ve *Miscanthus sinensis* turba ve kum karışımı ile taşınan toprakta yetiştirilmiş ve en iyi Cd ve Ni toplayıcı olarak *Alyssum murale* tespit edilmiştir.

Biriktirici bitkiler ağır metalleri hücre zarlarındaki taşıyıcı proteinler yoluyla ve plazma zarlarındaki taşıyıcıların aşırı üretimi ile alabilmektedirler (Terzi ve Yıldız, 2011). Işık (2004) tarafından da işaret edildiği gibi bu bitkilerde proteinler ağır metallerin taşınmasını gerçekleştirecek şekilde, diğer bitkilere göre değişikliğe uğramışlardır. Metal depolayan bitkilerin hasadı ve depolama sahalarına nakilleri veya metal filizi olarak değerlendirilmeleri yakın gelecekte planlanması gereken çevre koruma adımlarından birisi olacaktır. Robinson ve ark. (1997) *Alyssum bertolonii* bitkisinin bitkisel madencilik için uygun olduğunu ve üretilen ürünün yakılması ile % 11 Ni içeren sülfürsüz biyolojik cevherin elde edileceğini bildirmişlerdir.

Şelat kullanımı bitkilerin metal alımını arttırmaktadır (Zaier ve ark., 2010). Kirliliğin % 24 katı ve % 76 sıvıdan oluştuğu Toronto topraklarına şelat ilaveleri yapılarak; bakırın % 96'sı, kurşunun % 71'i, nikelin % 72'si ve çinkonun % 63'ü

uzaklaştırılarak kirliliğin giderilmesinde başarılı olunmuştur (Richardson ve Ehrenreich, 1994).

Ni uygulamasının Etilen Diamin Tetraasetik Asit (EDTA)'li ve EDTA'sız olarak uygulandığı ortamlarda, *Brassica juncea* ve *Brassica carinata* bitkilerinde kontrole göre Ni miktarı iki kat daha fazla bulunmuştur. *Brassica juncea*'nın diğerine göre çok az miktarda daha güçlü Ni toleransı göstererek Ni biriktirdiği, EDTA'lı uygulamalarda köklerden filizlere Ni taşınmasının hızlandığı bildirilmiştir (Panwar ve ark., 2002).

ABD ve Avrupa'nın ultrafamik topraklarında *Thlaspi* L. türlerinde (*Thlaspi cyprium*, *Thlaspi elegans*, *Thlaspi oxyceras*, *Thlaspi rosulare*, *Thlaspi jaubertii* ve *Thlaspi ochroleucum*) Ni biriktirme kontrolü yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda; Adana, Osmaniye, Kahramanmaraş, Erzincan ve Refahiye'de, *Thlaspi oxyceras* ve *Thlaspi rosulare*; Niğde'de, *Thlaspi jaubertii*; Kastamonu ve Çanakkale'de, *Thlaspi ochroleum* tespit edilmiş ve Ni içerikleri tayin edilmiştir (Reeves, 1988).

Zengin Ni içerikli topraklardaki *Alyssum bertolonii* bitkisinin kuru maddede Ni miktarı % 0.8 (külde % 11) olarak belirlenmiştir (Robinson ve ark., 1997). Biriktirici bitkiler kirlilik etmenlerine ve ortam şartlarına göre seçici davranmakta her ortamda aynı gelişimi gösterememektedirler. Nitekim *Thlaspi goesingense*'nin biriktirici fenotipinin belirlenmesinde; filizlerde *Thlaspi goesingense* ve *Thlaspi arvense*'nin Ni konsantrasyonu sırasıyla 13.9-112.2 ve 4.6-13.3, köklerde ise sırasıyla 6.0-33.5 ve 16.4-58.8 $\mu\text{mol Ni g}^{-1}$ kuru madde aralığında bulunmuştur. En düşük Ni uygulaması dahi *Thlaspi arvense*'nin verimini % 40 azaltmış, yaprak aralarında sarılık ile nekrotik belirtiler oluşturmuştur. *Thlaspi goesingense*'nin nikel *Thlaspi arvense*'den daha toleranslı olduğu belirtilmiştir (Krömer ve ark., 1997). Filizlerinde Cd ve Zn'yi biriktiren *Thlaspi caerulescens*'un 1 ve 500 μM 'lük Zn'lu ve Cd'lu ortamları kıyaslandığında; yüksek Zn içeriğindeki Cd toleransının daha iyi olduğu, köklerin Cd⁺²'yi içlerine aldıkları görülmüştür (Papoyan ve ark., 2007).

Arsenik kirliliğinin olduğu bölgelerde *Populus deltoides*, *Populus canadensis* ve *Pteris vittata* ile iyileştirmenin yapıldığı durumda bitkilerde katalaz aktivitesinin arttığı, As için *Pteris vittata* ve *Populus clones*'un biriktirici bitki olarak iyileştirmede kullanılabilir olduğu bildirilmiştir (Ciurli ve ark., 2013). Toprağa Cd (2, 4, 8 ve 16 mg kg⁻¹) ve Pb (6, 12, 18 ve 24 mg kg⁻¹) uygulanarak mısırın saksılarda yetiştirildiği çalışma ile kadmiyumun filizlerden daha fazla

köklerde, kurşunun ise iki aksamda da arttığı bildirilmiştir. Yüksek Cd uygulamasında mısırdaki Cd düşüşünün olduğu bildirilmiştir (Moijiri, 2011).

2.2. Kök bölgesi filtrasyonu (rizofiltrasyon)

Kök bölgesi filtrasyonu, bitki kökleri kullanılarak toksik metallerin sulardan uzaklaştırılmasıdır. Pb uzaklaştırmak üzere gerçekleştirilen çalışmada *Brassica juncea* L. *Czern* ve *Helianthus annuus* L. bitkilerinin Pb uzaklaştırmada etkili olduğu, bitkinin kök ile absorbladığı kurşunu çökelmiş (kurşun fosfat) olarak bünyesinde tuttuğu, köklerde metalin kuru maddede 131-563 kat arttığı bildirilmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda Pb çökmesinin Pb uzaklaştırmasında önemli rolü oynadığı ifade edilmektedir (Viatcheslav ve ark., 1995). *Brassica* türlerinde (*Brassica nigra*, *Brassica juncea*, *Brassica campestris*, *Brassica oleracea*, *Brassica carinata* ve *Brassica napus*) Brassica olmayanlara göre fitoekstraksiyon oranının daha yüksek olduğu ve köklerde Pb seviyesinin kuru ağırlık olarak % 0.82-10.9 olduğu belirlenmiştir (Nanda Kumar ve ark., 1995).

Şelatlı ve şelatsız sularda Pb ve Ni uygulamaları, ayçiçeğinin kök ve filizlerinde kuru ağırlığın azalmasına sebep olmuştur. Bu çalışmada; Pb ve Ni miktarları sırası ile filizde ve kökte, % 55.1, % 38.3, % 50.5 ve % 33.6 olarak bildirilmiştir. Filiz ve kökteki Ni ve Pb'nin maksimum konsantrasyonu sırasıyla 18.43 ve 20.73 mg kg⁻¹, 12.82 ve 18.67 mg kg⁻¹ olarak bulunmuştur. Bitkideki Ni ve Pb birikimi 55.82 ve 72.28 mg kg⁻¹ iken, EDTA'lı konu ile kontrolün kıyaslanmasından bulunan prolin miktarı % 128.2 ve % 98.3 bulunmuştur. Ayçiçeğinde Pb birikiminin Ni'den daha fazla olduğu, Pb ve Ni ile kirlenmiş sularda şelat ilavesinin ağır metal alımını arttırdığı bildirilmiştir (Mukhtar ve ark., 2010).

Biyotik ve abiyotik işlemlerle kirlenmiş köklerin içine alınarak veya üzerlerinde adsorblanarak ortamdaki bitkiye geçmektedirler. Bu özellikten yeraltı, yüzey ve atık sularda faydalanılmaktadır. Bu teknikte hem karasal hem de sucul bitkiler kullanılabilir. Bu yöntem doğal ortamlarda, havuzlarda, tank, gölet gibi yapay alanlarda da uygulanabilmektedir. Atık suda pH ve debi kontrolleri yapılarak bitkilerle iyileştirmede uygun ortamların hazırlanması gerekmektedir (Pivetz, 2001). Kirli sulara hidroponik sistemde Se(VI), As(V), Cd(II), Cr(VI), Cu(II) ve Ni(II) elementlerini içeren bileşikler 0, 0.5, 1, 2, 5 ve 10 mg L⁻¹ seviyelerinde ilave edilerek bitki tepkileri kontrol edilmiştir. Su sümbülünün kök ve filizinde Cd ve Cr için iyi bir depolayıcı olduğu, toksik Cr(VI)'yı hemen toksik olmayan Cr(III)'e çevirerek bünyesinde tuttuğu

ortaya konulmuş, yüksek seviyede Cd ve Cr, orta seviyede Cu ve Se biriktirme özelliğine sahip olduğu bildirilmiştir (Zhu ve ark., 1999).

Bu yöntemde bitki için belirlenen kritikler, kök biyokütlesinin kirlenmeye toleranslı olması, fazla biriktirmesi ve maliyetinin az olmasıdır (Dushenkov ve Kapulnik, 2000). İtalya'nın kuzeyinde maden ocaklarından çıkan topraklarda ve nehir çakılları üzerinde yetişen *Thlaspi rotundifolium subsp. cepaeifolium* ve *Alyssum wulfenianum* bitkilerinde Pb ve Zn miktarlarının kuru yapraklarda 8200-860 $\mu\text{g g}^{-1}$ ve 17300-2500 $\mu\text{g g}^{-1}$ olarak farklı değerlerde olduğu belirlenmiştir (Reeves ve Brooks, 1983). Uzun yıllar süren çalışmalar sonucunda fitoremediasyon tekniği ile *Brassica juncea* ve *Brassica oleracea*'nın düşük seviyede Cs-137 ve Sr-90 içeren toprakları temizlemede kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir (Levine, 1997). Taşıma yapılan kanallarda metal artışına paralel olarak aşırı depolayıcı bitkilerde artmakta ve kanalların tıkanması, geçişin engellenmesi söz konusu olmaktadır. Su sümbülü yoğunluğunun Lagos Gölü (Nijerya) ve çevresinde endüstri kirliliği ile arttığı, tekstil, metalürji ve eczacılıktan gelen atıkların iyileştirilmesinde bu bitkinin etkili, Cu ve Fe kirliliğinde etkisiz olduğu bildirilmiştir (Ajayi ve Ogunbayo, 2012).

2.3. Bitkisel sabitleme (fitostabilizasyon)

Bitkisel sabitleme yeraltı sularının kirliliğinin azaltılması ve kirlenmelerin toprakla temasının önlenmesi için toprak yüzeyinin bitkiler ile örtülmesi, toksik metallerin biyo yarayışlılığının azaltılarak bitkinin zarar görmesinin engellenmesidir. Fitostabilizasyon tekniğinde yüksek metal miktarlarına toleranslı, metalleri sorpsiyon, çöktürme, kompleksleşme veya metal valanslarının indirgenmesiyle toprakta immobilize edebilen bitkiler kullanılmaktadır (Kocaer ve Başkaya, 2003; Bert ve ark., 2005).

Bitkide sabitleme tekniğinin tercih edildiği çalışmalar kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için araştırılan konular içerisinde yer bulmuştur. Belçika'da Zn, Pb, Cd, As ve Cu kirliliğinin olduğu ve üç farklı seviyede (% 0.5, 1 ve 5) hidroksiapatit [$\text{HA}-(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] ilavesi yapılmış olan topraklarda mısır ve fasulye bitkileri yetiştirilmiştir. Bitkilerdeki değişebilir metal miktarlarının % 1'lik HA uygulamasının yapıldığı durumda azaldığı ve bu seviyede en iyi bitki gelişiminin sağlandığı görülmüştür. HA uygulama seviyesi % 5'e yükseldiği durumda bitki gelişiminde kısıtlamalar oluşmuştur. Artan HA uygulamasının mısır yapraklarında Cu, Zn, Ni ve As miktarlarının azalmasına, fasulyede ise artmasına neden olduğu bildirilmiştir. Kirliliğin

olduğu alanlarda HA uygulamasının bitkinin As alımını arttırdığı bildirilmiştir (Boisson ve ark., 1999).

Bu teknikte kullanılan materyallerin her bitki ve her kirlenici için uygun olmadığı bazı bitkilerin kimi metalleri alımına engel oluştururken, bazılarının metali daha fazla almasına neden olabilmektedir. Köklerle sabitleme toprak, sediment ve çamurda yerinde uygulanabilme avantajı olan bir yöntemdir. Bitkilendirme gerçekleştirildiği için ekosistem zenginleşmekte, erozyon ve sediment hareketi önlenmektedir (Anonymous, 1995). Ancak kirlenici unsurlar hala ortamda bulunmakta ve risk devam etmektedir.

2.4. Bitkisel bozunma (fitodegradasyon)

Bitkide bozunma, metabolik yapısı gereği bitkilerin enzimlerle bünyesine aldığı organik bileşikler parçalaması işlemidir (Komives ve Gullner, 2005). Bozunma bitki bünyesine alım, taşıma, metabolik faaliyet ve mikrobiyal faaliyet ile gerçekleşmektedir. Bu yöntemde bitkilerin metabolik yapılarındaki farklar etkindir. Farklı bitkilerle gerçekleştirilen çalışmalarla bu değişiklikler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Eski Pb yatakları yakınındaki 10.02, 500, 1000, 2500 ve 5876 mg kg^{-1} Pb içerikli topraklar ile Pb kirliliği olmayan topraklar, ayçiçeği (*Helianthus annuus*), sorgum (*Sorghum bicolor*) ve çin kabağı (*Brassica chinensis*) kullanılarak test edilmiştir. Çin kabağının daha fazla kurşunu bünyesine aldığı, bitki dokusunda Pb artarken gelişimde zayıflama, biyolojik kütlede azalma olduğu bildirilmiştir (Hamvumba ve ark., 2014). Ham yağ kirliliğinin 2700 mg kg^{-1} olduğu kumlu tın karakterli toprakta *Sorghum bicolor* L. yetiştirilmiş ve gelişimin beş yaprak, çiçek ve olgun dönemlerinde topraklardan örneklemeler yapılmıştır. Toplam petrol hidrokarbon miktarlarının tüm vejetatif dönemlerde düştüğü bulunmuştur (Banks ve ark., 2003).

2.5. Kök bölgesinde bozunma (rizodegradasyon)

Kök bölgesinde bozunma, toprak mikroorganizmalarının organik kirlenmeleri çözmesi (şeker, alkol, organik asit ve karbonhidrat), böylece mikrobiyal aktivitenin ve bitkinin desteklenmesidir (Anonymous, 2014a). Çoğu biriktirici bitkinin biyolojik bilgi ve kimlik bilgisi tamamen açıklanamamış durumda değildir. Ağır metal alımı ve metale toleranslar bitkiye, toprağa, mikroorganizmalara, rizobiyumlar ile mikorizalar arasındaki ilişkiye göre farklılık göstermektedir. Mikoriza köklerde oluşarak bitkinin ağır metalden etkilenmemesini bitkinin direncini arttırmak suretiyle gerçekleştirilmektedir

(Khan, 2006). Ekosistemin doğada korunmasına yardımcı olacak bitki-toprak-mikorizal faaliyet- ağır metal sorgulamalarının sonuçlandırılmasıyla edinilecek bilgiler ışığında iyileştirme planlarının yapılması doğanın sürdürülebilir kullanımına katkılar sağlayacaktır.

2.6. Bitkiden buharlaştırma (fitovolatilizasyon)

Bitki topraktaki Hg ve Se gibi elementleri yapraklarına kadar taşıyarak element yapısını atmosfere verilecek şekilde değiştirmektedir. Yöntemin en önemli avantajı çok zehirli bileşiklerin (Hg) daha az zehirli formlara dönüştürülmesidir. Ancak zehirli gazların atmosfere bırakılması da bir dezavantajdır (Anonymous, 2000; Terzi ve Yıldız, 2011). As, Hg ve Se gibi metaller doğada gaz formunda bulunabilmektedir. Doğal olarak oluşan veya genetiği değiştirilmiş *Brassica juncea* ve *Arabidopsis thaliana* gibi bazı bitkilerin ağır metalleri absorbe ettikleri ve gaz formuna dönüştürerek atmosfere verebildikleri bildirilmiştir (Ghosh ve Singh, 2005). Özellikle *Populus* ve *Salix* gibi ağaç türleri elementleri buharlaştırma özelliklerinden dolayı bu teknikte çok kullanılmaktadır (Pulford ve Watson, 2003). Bu nedenle *Populus* ve *Salix* genotiplerinin yetiştirilme teknikleri üzerine yapılan çalışmalar fitoremediasyon tekniğine dolaylı olarak yardımcı olmaktadır (Ronald ve ark., 2007).

2.7. Hidrolik kontrol

Yeraltı sularındaki kirliliğin iyileştirilmesinde kullanılan fitoremediasyon tekniğinde ağaçlar pompa gibi davranmak sureti ile su içerisindeki kirletici unsurları kökleriyle yukarıya hareket ettirmekte, yeraltı sularından kirletici unsurların uzaklaştırılıp ortamın temizlenmesi sağlanmış olmaktadır (Anonymous, 2012). Bazı ağaçlarda (kavak) toprak suyunun önemli bir kısmını alma yeteneği bulunmaktadır. Bu yetenek sık kök sistemi ile kirleticilerin yer altı suyuna ulaşmasını ve saturasyon zonuna girme eğilimlerini doğal hidrolik pompalar ile azaltarak büyük miktarlarda suyu buharlaştırabilmektedirler. Topraktaki Cd miktarının 68 mg kg^{-1} olduğu alanda köknar ağaçlarının köklerinde kuru maddede 25 mg kg^{-1} Cd absorbe ettiği, daha az olmakla birlikte üst aksamlara da taşınmanın gerçekleştiği bildirilmiştir. Cd artışına tepki olarak bitkideki metil-esterifikasyon miktarında azalma değişim olarak değerlendirilmektedir (Astier ve ark., 2014).

2.8. Vejetatif örtü

Yoğun kullanımlar sonucunda tahrip olan alanların yeniden bitkisel örtüye kavuşturulmasında vejetasyon örtü sistemleri

oldukça önemlidir. Vejetatif örtü veya vejetatif kapak olarak adlandırılan sistemler, atıklar üzerinde veya kirlenmiş alanlarda uzun zaman periyodunda oluşmuş sistemlerdir. Bitkiler sızmayı azaltmada, erozyonu engellemede ve alanın altındaki materyalin bozunmasında etken olmaktadır (Anonymous, 2014b). Vejetatif örtü sistemleri, çok az bakım isteyen uzun süre devamlılığını koruyabilen su kaybını engelleyici ve ıslah edicidir. Vejetatif örtüler kirlenmiş yüzey toprağı veya çamur olan yerlerde, belirli kirlilikleri yayan ünitelerin etrafında ve kirli birikintilerin olduğu yerlerde kurulabilmektedirler. Başlangıçta bitki toprağın su kaybetmesini azaltırken, su tutma yeteneğini de arttırmaktadır. Kirletici etmenler de yıkanma formuna indirgenemez veya hareket edemez duruma gelmektedir. Islah edici sistemlerde bitkinin bir örtü olarak suyun infiltrasyonunu minimize ederek alt tabakadaki kirliliğin bozunması amaçlanmaktadır. Bozunmada etken, su alımı, kök çevresi mikrobiyolojisi ve bitki metabolizmasıdır. Kullanılan iyileştirme sistemleri hidrolik kontrol, köklerde bozunma, bitkisel buharlaşma ve bitkisel özümlemedir. Bitkisel iyileştirme yöntemlerinin tümünde olduğu gibi uygun bitki örtüsünün yetiştirilmesi için uzun süreli bir bakıma ihtiyaç duyulmaktadır (Anonymous, 2000; Pivetz, 2001; Köseoğlu, 2007).

2.9. Tampon şerit

Tampon şerit, akarsu kıyılarındaki sudan çok fazla etkilenen toprakları tarif etmekte kullanılmaktadır. Sığ su hattı çevresinde doğal çimlerden, çiçeklerden, ağaçlardan ve çalılardan oluşmuş ince bir bölge bulunmaktadır. Buralar bitkisel tampon bölge olarak adlandırılmakta ve bu alanlarda fitoremediasyon (fitodegradasyon, fitovolatilizasyon ve rizodegradasyon) uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Bitkiler nehir kıyısında veya sığ suda yetiştirildiğinde kıyı koridor, toprak doldurulmuş alanda yetiştirildiğinde ise tampon şerit metodu kullanılmaktadır. Amaç nehre giren ya da yeraltı suyuna geçen kirleticileri engellemek, durdurmak veya iyileştirmektir (Anonymous, 2014b). Bu teknikten faydalanılarak Yeni Zelanda'nın boş tarımsal alanları ile kıyı bölgesinde bulunan endemik bitkilerin besin elementi miktarlarının ve iz elementlerin taşınımına etkilerinin incelendiği çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Mo ve Cd için toksisite gösteren bitkilerin Zn, B, Cu, Mn ve Co'ı seçici olarak aldıkları bildirilmiştir. Rizosfer bölgesinde fiziko-kimyasal yapının değiştiği ve kimyasalların drenaj suyuna ulaşımındaki yolların etkilendiği bildirilmiştir (Hahner ve ark., 2014). As, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V ve Zn ile kirlenmiş kıyı suyunda test bitkisi olarak su

sümbülü (*Eichornia crassipes*) kullanılarak fitoremediasyon ile iyileştirme yapılmış, su sümbülünün kök ve filizlerinde Cr, Cd, Pb ve As birikmiş, ancak birikim biriktirici olarak bilinen çeşitlerden daha düşük bulunmuştur (Agunbiade ve ark., 2009).

3. Sonuçlar

Kirliliği kontrol etmek için kullanılan yöntemlerin çoğunda yerinde iyileştirme yapılamamakta, işlemler için kalifiye elemana ihtiyaç duyulmakta ve maliyet yüksek olmaktadır. Doğal dengenin korunması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için kirlenmiş bölgeleri iyileştirmede kullanılacak materyallerin ve işlemi gerçekleştirme prensibinin doğaya aykırı olmaması yöntemlerin kabul edilebilirliğini yükseltmektedir. Fitoremediasyon teknolojisi bitki ile iyileştirmeye odaklanan, doğanın dengesini bozmayan, yapılabirliği yüksek, su, sediment ve topraklarda kirleticileri parçalamak, sabitlemek ve uzaklaştırmak suretiyle temizlemeyi hedeflemektedir. Bu tekniğin başarılı olması için, kirliliğin yoğunluğu, kirliliğe toleranslı ve biriktirici bitki seçimi, bitkinin gelişimi için uygun ortamın hazırlanması ve takibi, iyileşmenin oluşacağı sürenin planlanması dikkat edilecek hususlardandır. Çevreyi kirleticilerden korumak, kirlenmiş ortamları iyileştirmek ekosistemin sürdürülebilirliği için gereklidir. Tüm bu olguları gerçekleştiren fitoremediasyon araştırılacak, geliştirilecek ve uygulamaya aktarılacak değerlerde bir iyileştirme teknolojisidir.

Kaynaklar

Agunbiade, F.O., Olu-Owolabi, B.I., Adebowale, K.O., 2009. Phytoremediation potential of eichornia crassipes in metal-contaminated coastal water. *Bioresource Technology*, 100(19): 4521-6.

Ajayi, T.O., Ogunbayo, A.O., 2012. Achieving environmental sustainability in wastewater treatment by phytoremediation with water hyacinth (*Eichornia Crassipes*). *Journal of Sustainable Development*, 5(7): 80-90.

Anonymous, 1995. Contaminants and Remedial Options at Select Metals-Contaminated Sites. Environmental Protection Agency, EPA/540/R-95/512.

Anonymous, 2000. Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio, 45268 EPA/600/R-99/107.

Anonymous, 2012. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G). United States. EPA 542-F-12-016.

Anonymous, 2014a. Classical Homeopathy Holistic Healing Info on the Dangers of Vaccines+Prescription Meds. Phyto Remediation-Using Plants to Remove Toxins. Homeo-

Pathginatyler's Blog. <http://homeopathytyler.wordpress.com/2010/06/18/phyto-remediation-using-plants-to-remove-toxins> (Erişim tarihi: 24.02.2014).

Anonymous, 2014b. Phytoremediation: An Environmentally Sound Technology for Pollution Prevention Control and Redmediation. United Nations Environment Programme Division of Technology. Newsletter and Technical Publication Freshwater Management Series, No: 2. <http://www.unep.or.jp/letc/Publications/Freshwater/FMS2/2.asp> (Erişim tarihi: 28.01.2014).

Astier, C., Gloaguen, V., Faugeron, C., 2014. Phytoremediation of cadmium-contaminated soils by young douglas fir trees: Effects of cadmium exposure on cell wall composition. *International Journal of Phytoremediation*, 16: 790-803.

Banks, M.K., Kulakow, P., Schwab, A.P., Chen, Z., Rathbone, K., 2003. Degradation of crude oil in the rhizosphere of *Sorghum bicolor*. *International Journal of Phytoremediation*, 5: 225-234.

Başkaya, H.S., Teksoy, A., 1996. Topraklarda ağır metaller ve ağır metal kirliliği. I. *Uludağ Çevre Mühendisliği Sempozyumu*, 24-26 Haziran, Bursa, s. 763-771.

Bert, V., Girondelot, B., Quatannens, V., Laboudigue, A., 2005. A phytostabilisation of a metal polluted dredged sediment deposit-mesocosm experiment and field trial. In: Uhlmann, O., Annokée, G.J. and Arendt, F. (eds.), *Proceedings of the 9th International FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems, Remediation Concepts and Technologies*, Bordeaux, pp. 1544-1550.

Blaylock, M.J., Huang, J.W., 2000. Phytoextraction of metals. In: I. Raskin, B.D. Ensley (eds), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean-up the Environment*, Wiley, New York, pp. 53-70.

Boisson, J., Ruttens, A., Mench, M., Vangronsveld, J., 1999. Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part 1. Influence of Hydroxyapatite on Metal Exchangeability in Soil, Plant Growth and Plant Metal Accumulation. *Environmental Pollution*, 104: 225-233.

Brooks, R.R., 1998. General Introduction. In: Brooks R.R. (eds), *Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals: Their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining*. CAB International, New York, pp. 1-14.

Brooks, R.R., Lee, J., Reeves, R.D., Jaffré, T., 1977. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal Geochemical Exploration*, 7: 49-57.

Ciurli, A., Lenzi, L., Pardossi, A., 2013. Arsenic uptake and translocation by plants in pot and field experiments. *International Journal of Phytoremediation*, 16: 804-823.

Clemens, S., 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88: 1707-1719.

- Dushenkov, V., Kapulnik, Y., 2000. Phytofiltration of metals. In: I. Raskin, B.D. Ensley (eds), *Phytoremediation of Toxic Metals-Using Plants to Clean-up the Environment*. Wiley, New York, pp. 89-106.
- Ghosh, M., Singh, S.P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(3): 1-18.
- Hahner, J.L., Robinson, B.H., Tao, Z.H., Dickinson, N.M. 2014. The phytoremediation potential of native plants on New Zealand dairy farms. *International Journal of Phytoremediation*, 16(7-8): 719-734.
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A.B., Cansaran-Duman, D., Aras, S., 2012. Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69(4): 235-253.
- Hamvumba, R., Mataa, M., Mweetwa, A.M., 2014. Evaluation of sunflower (*Helianthus annuus* L.), sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) for phytoremediation of lead contaminated soils. *Environment and Pollution*, 3(2): 65-73.
- Hansruedi, F., 1997. Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soils using crop of metal-accumulating plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160: 525-529.
- İşık, K., 2004. Bitki Biyolojisi. (Ed: C. Özay, R. Mammadov), Ağır metaller ve süs bitkilerinin fitoremediasyonda kullanılabilirliği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, C, 15(1): 67-76.
- Khan, G.A., 2006. Mycorrhizo remediation-an enhanced form of phytoremediation. *Journal Zhejiang University Science B*, 7(7): 503-514.
- Kocaer, F.O., Başkaya, H.S., 2003. Metallerle kirlenmiş toprakların temizlenmesinde uygulanan teknolojiler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 8(1): 121-131.
- Komives, T., Gullner, G., 2005. Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 60: 179-185.
- Köseoğlu, C., 2007. Atık çamurun iyileştirilebilmesi için bitkisel arıtım (fitoremediasyon)'ın kullanım olanaklarının araştırılması. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Krömer, U., Smith, R., Wenzel, W., Raskin, I., Salt, D., 1997. The role of metal transport and tolerance in Ni hyperaccumulation by *Thlaspi goesingense* Halacsy. *Plant Physiology*, 115: 1641-1650.
- Levine, R., 1997. Removal of 137Cs from Soils at Brookhaven National Laboratory's Hazardous Waste Management Facility Site, Cornish et al, MSE Technology Applications. DOE-HQ at 301-903-7920/rashalee.
- Long, X.X., Yang, X.E., Ni, W.Z., 2002. Current status and perspective on phytoremediation of heavy metal polluted soils. *Journal of Applied Ecology*, 13: 757-762.
- Mcintyre, T., 2003. Phytoremediation of heavy metals from soils. In: C. Özay, R. Mammadov (Eds), Ağır metaller ve süs bitkilerinin fitoremediasyonda kullanılabilirliği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1): 67-76.
- Mojjiri, A., 2011. The potential of corn (*Zea mays*) for phytoremediation of soil contaminated with cadmium and lead. *Journal of Biological and Environmental Science*, 5(13): 17-22.
- Mukhtar, S., Bhatti, H.N., Khalid, M., Ul Haq, M.A., Shahzad, S.M., 2010. Potential of sunflower (*Helianthus annuus* L.) for phytoremediation of nickel (Ni) and lead (Pb) contaminated water. *Pakistan Journal of Botany*, 42(6): 4017-4026.
- Nanda Kumar, P.B.A., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I., 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Sciences and Technology*, 29(5): 1232-1238.
- Özay, C., Mammadov, R., 2013. Ağır metaller ve süs bitkilerinin fitoremediasyonda kullanılabilirliği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi C*, 15(1): 67-76.
- Palmer, E.F., Warwick, F., Keller, W., 2001. Brassicaceae (Cruciferae) family, plant biotechnology and phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 3(3): 245-287.
- Panwar, B.S., Ahmed, K.S., Mittal, S.B., 2002. Phytoremediation of nickel contaminated soils by *Brassica* species. *Environment Development and Sustainability*, 4(1): 1-6.
- Papoyan, A., Pineros, M., Kochian, L., 2007. The effect of plant cadmium and zinc status on root and shoot heavy metal accumulation in the heavy metal hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens*. *New Phytologist*, 175: 51-58.
- Pivetz, B.E., 2001. Ground Water Issue: Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. United States Environmental Protection Agency, EPA, 540/S-01/500.
- Prasad, M.N.V., 2005. Toxic metals in plants. Nickelophilous plants and their significance in phytotechnologies. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 113-128.
- Pulford, I.D., Watson, C., 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees: A review. *Environment International*, 29: 529-540.
- Reeves, R., Brooks, R., 1983. European species of *Thlaspi* L. (Cruciferae) as indicators of Ni and Zn. *Journal Geochemical Exploration*, 18: 275-283.
- Reeves, R.D., 1988. Nickel and zinc accumulation by species of *Thlaspi* L., *Cochlearia* L. and other genera of the Brassicaceae. *Taxon*, 37(2): 309-318.
- Richardson, T.L., Ehrenreich, L., 1994. SITE demonstration of Toronto harbour commissioners soil recycling project. *Air and Waste*, 44: 727-731.
- Robinson, B.H., Chiarucci, A., Brooks, R.R., Petit, D., Kirkman, J.H., Gregg, P.E.H., De Dominicis, V., 1997. The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation

- and phytomining of nickel. *Journal of Geochemical Exploration*, 59(2): 75-86.
- Ronald, S., Zalesny, Jr., Bauer, E.O., 2007. Selecting and utilizing populus and salix for landfill covers: Implications for leachate irrigation. *International Journal of Phytoremediation*, 9: 497-511.
- Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I., 1998. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49: 643-668.
- Terzi, H., Yıldız, M., 2011. Ağır metaller ve fitoremediasyon: Fizyolojik ve moleküler mekanizmalar. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 11: 1-22.
- Viatcheslav, D., Nanda Kumar, P.B.A., Motto, H., Raskin, I., 1995. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology*, 29: 1239-1245.
- Zaier, H., Ghnaya, T., Rejeb, K.B., Lakhdar, A., Rejeb, S., Jemal, F., 2010. Effects of EDTA on phytoextraction of heavy metals (Zn, Mn and Pb) from sludge-amended soil with *Brassica napus*. *Bioresource Technology*, 101: 3978-3983.
- Zalewski, M., Lotkowska, I.W., 2004. Integrated Watershed Management-Ecohydrology & Phytotechnology–Manuel. Nations Environment Programme International Environmental Technology Centre, 2-110 Ryokuchi Koen, Tsurumi-ku, Osaka 538-0036 1091 Oroshimo-cho, Kusatsu-City, Shiga 525-0001, Japan.
- Zhu, Y.L., Zayed, A.M., Qian, J.H., De Souza, M., Terry, N., 1999. Phytoremediation of trace elements by wetland plants: II. Water Hyacinth. *Journal Environmental Quality*, 28: 339-344.