



*Thlaspi caerulescens*  
kuru ağırlığının %2'si  
kadar çinko ve %0,1'i  
kadar kadmiyumu  
gövdesinde biriktiriyor.

# KİRLİTİLMİŞ TOPRAKLARIN BİTKİLERLE TEMİZLENMESİ: BİYOMADENCİLİK

**T**opraklar insan etkinlikleri sonucu çeşitli toksik (zehirli) bileşiklerle kirletiliyor. Kirlilik kaynaklarının önemli bir bölümünü ağır metaller oluşturmaktadır. En fazla kirliliğe neden olan ağır metaller, kadmiyum, kurşun, civa, krom, bakır ve çinko. Metaller aslında toprağın doğal bileşenleri. Kirlilik oluşturmalarıysa, maden cevherlerinin çıkarılması ve ergitilmesi, galvanizleme, enerji ve yakıt üretimi, gaz salımları, gübre ve zararlılarla mücadele ilaçları (pestisit) uygulamalarıyla endüstri ve belediye atıklarından kaynaklanıyor. Metallerin topraktaki yüksek derişimleri bitkilerde zehir etkisi yapar (fitotoksik). Metal toksisitesi sonucu bitkilerin yetişmemesi, metallerin su ve rüzgar erozyonuyla taşınmasını kolaylaştırır ve böylece toprağın yanında sular da kirlenir. Kirleticilerin topraktan dağılmasını önlemek ve toprağın temizlenmesini sağlamak için pek çok alternatif yöntem geliştirilmiş bulunuyor. Toprağın katılaştırılması, kazınıp başka bir yerde tehlikeli atık gibi depolanması, kimyasal uygulanarak topraktaki metallerin hareketliliğinin engellenmesi, toprakların yıkanması ve bitkileri kullanarak temizleme vb. Bu yöntemler içinde uzun vadeli olmasına karşın en ekonomik

olanı bitkileri kullanarak temizleme (biyomadencilik).

Toprakların bitkilerle temizlenmesi, bitkilerin topraktan ağır metalleri alması (fitoekstraksiyon), topraktaki kimyasalların uçucu duruma gelmesi (fitovolatilizasyon), akan sudan bitki kökleri ile kirleticilerin alınması (rizofiltrasyon) ve topraktaki kimyasalların daha az toksik duruma getirilmesi (fitostabilizasyon) şeklinde gerçekleşmektedir. Bu yöntemler içinde de en dikkat çekici ve karşılığında ekonomik değer elde edilen yöntem olarak topraktaki metallerin bitkilere temizlenmesi görülmektedir. Biyomadencilik olarak da adlandırılan bu yöntemde yüksek biriktirme özellikli bitkiler, metal kapsamı yüksek topraklarda yetiştirilerek, metallerin bitkilerde yoğunlaşması sağlanmakta, bitki hasat edildikten sonra metaller, maden cevherlerinde olduğu gibi, bitkiden ka-

zınılmakta. Arsenik, kalsiyum, kobalt, bakır, mangan, nikel, kurşun, selenyum, ve çinko için toplayıcı bitkiler belirlenmiş, Ni, Zn ve Co için ABD ve İngiltere'de patentler alınmış bulunuyor.

## Bitkiler Toksik Metalleri Neden Alır?

Bitkilerin hayatlarını devam ettirebilmeleri için makro elementler yanında (azot, fosfor, potasyum, kalsiyum, magnezyum, kükürt) temel mikro elementlere de ihtiyaçları var (demir, mangan, çinko, bor, bakır, molibden). Bitkilerin bu elementleri alması, taşınması ve depolanması kendilerine özel. Element alım mekanizması seçici olur. Bitkiler bazı iyonları diğerlerine tercih ederler. İyon alımı ve seçiciliği hücre zarlarındaki taşıyıcı yapıya özelliğe bağlı olur. Örneğin, bazı taşıyıcılar iki değerlikli iyonları tanır, tek ve üç değerlikli iyonları tanımaz. Metal biriktirmeyen normal bitkilerde çinko, mangan, nikel, ve bakır gibi temel elementlerin alımı ve birikimi metabolik ihtiyacın üstüne çıkmaz (<10 ppm= milyonda 10'dan az). Aksine yüksek biriktirme özellikli bitkiler, metalleri birkaç bin ppm düzeyine kadar biriktirebilirler. Bitkile-



*Salix viminalis*, oldukça yüksek miktarlarda kadmiyum ve çinko toplamasının yanısıra, enerji üretiminde kullanılacak büyük miktarda biyokütle de üretiyor.



rin neden yüksek düzeyde metal biriktirdiği tam olarak bilinmemekle birlikte, bu özellik onların yaşadığı bölgede avantajlı duruma geçmesini sağlıyor. Buna ek olarak, yapraklarında metal biriktiren bitkiler böcek, bakteri ve mantar saldırılarından da korunuyorlar.

Yüksek topayıcı özellikte bitkiler sadece yaşamları için gerekli elementleri değil, kadmiyum ve arsenik gibi gerekli olmayan elementleri de biriktirebiliyorlar. Kadmiyum ve arseniğin neden biriktirildiği tam olarak bilinmemekle birlikte, köklerdeki alıcı taşıyıcı moleküllerin iki değerlikli çinko iyonunun ( $Zn^{++}$ ) analogu olan kadmiyumu ayırt edememelerine bağlanıyor. Bir başka neden olarak da fosforun analogu olan arsenatın, fosfor ile ayırt edilememesi sonucu, fosfor alım mekanizmasıyla alınması görülüyor.

## Yüksek Biriktirme Özellikli Bitkiler

Topraklardaki ağır metallerin bitkilerle temizlenmesi, yüksek biriktirme özellikli bitkilerin (metalofit) ağır metalleri topraktan kökleriyle alıp, toprak üstü organları olan gövde ve yapraklarda biriktirmesiyle gerçekleşiyor. Temizleyici bitkilerin bazı özelliklere sahip olması gerekir; topraktaki metallerle tolerans, yüksek biyokütle üretimi, teknik ve kültürel işlemlere uygunluk (hasadının ve işlenmesinin kolay olması vb.) ve bölgeye iyi adapte olması. Yüksek biriktirme özellikli bitkiler, normal bitkilere oranla 100 kat daha fazla metal biriktiren bitkiler olarak tanımlanmakta. Birçok metal için



ABD'de Savannah Irmağı bölgesinde melez kavak fidanları nikel, kadmiyum ve çinko toplama yeteneklerine göre sınıflandırmaya tabi tutuluyor.

sınır değer derişimi 1000 ppm olarak kabul edilmiş bulunuyor. Ancak, bu sınır, çinko için 10.000 ppm, kadmiyum için 100 ppm, altın için 1 ppm olarak kabul ediliyor. Yaklaşık 400 tür bitkinin yüksek biriktirme özellikli olduğu, bunlardan 300 türün nikel, 26 türün kobalt, 24'ünün bakır, 19'unun selen-



Genellikle endüstriyel etkinlikler, kanalizasyon deşarjı, metal işleme ve enerji üretimi gibi nedenlerle topraklara büyük çeşit ve miktarda kirletici karışıyor. Toprağı bilinen yöntemlerle arındırmak hem pahalı, hem de ekosistemlere zarar veriyor. Biyomadencilik, bu işlemi bitkilere ve bitkisel süreçlere yaptıran, görece ucuz ve kârlı bir yöntem.

yum, 16'sının çinko, 11'inin mangan, 1 türün arsenik, 1 türün talyum ve 1 türün de kadmiyum biriktirdiği biliniyor. Yüksek biriktirici özellikli olarak tanımlanan bazı bitkiler Tablo 1'de verilmiştir.

## Bitkiler Yüksek Metal Derişimine Nasıl Uyum Sağlar?

Metallerin kök hücrelerinden canlı dokuya alınımı metallerin topraktan çıkarılmasının başlangıç evresi. Bun-

dan sonra metallerin köklerden taşınımı başlar. Toprakta alınan metaller sadece kök hücrelerinde biriktirilirse, kurşunda olduğu gibi, metal çıkarımından söz edilemez. Köklerden alınıp yapraklara gelen metaller, yaprak hücreleri tarafından tekrar metabolize edilir. Yüksek derişimlerde zehirli olan metaller yüksek biriktirme özellikli bitkilerde farklı metabolizmalarla zararsız hale getirilir. Metaller hücrede; kısıtlama (şelatlama), hücrenin değişik bölümlerinde depolama, biyolojik dönüş-

türme ve hücresel onarım mekanizmalarıyla zararsız hale getirilir. Bitkilerde bilinen ağır metallerin kısıtlandığı peptidler, metallothioninler ve fitoşelatinlerdir. Metallothioninler genlerin kodladığı, düşük moleküler yapı, sistince zengin polipeptidlerdir ve bakır dostudurlar. Fitoşelatinler ise enzimler tarafından sentezlenen, düşük moleküler yapı, sistince zengin polipeptidlerdir ve kadmiyum, bakır ve arseniği bağlarlar. Örneğin nikel biriktirici *Thlaspi goesingense*, nikeli histidine bağlayarak; *T.caerulescens*, çinkoyu vakuollerinde Zn-fitat ve düşük moleküler yapı organik asitlere bağlayarak; kadmiyumu kükürtçe zengin peptitler, fitoşelatinlere bağlayarak zarar vermeden yüksek derişimlerde biriktirilirler.

## Bitkiler Toprakta Ne Kadar Metal Kaldırır?

Toksik metallerden etkilenen bitkilerin genel olarak biyokütle üretimi azalır. Bu kural yüksek biriktirici özellikte bitkiler için de geçerlidir. Bu bitkiler normal bitkilere kıyasla oldukça küçüktür; fakat biyokütle üretimi yüksek olan bitkilerden daha fazla metal biriktirebildikleri için, daha fazla metali topraktan uzaklaştırabilirler. Mısır bitkisi normal koşullarda hektarda 20 ton kuru biyokütle oluştururken, çinko oranı 100 ppm olan toprakta verim 10 tona düşmekte, bünyesinde 500 mg/kg (500 g Zn/ton) çinko biriktirmekte ve hektardan ancak 5 kg çinko kal-

Tablo 1. Biyomadencilikte kullanılan yüksek biriktirme özellikli bitkiler

Element	Bitki Türü	Konsantrasyon ppm	Toprakta kaldırdığı metal kg/ha
Kadmiyum	<i>Thlaspi caerulescens</i>	2.000	6-8
Çinko	<i>Thlaspi caerulescens</i>	30.000	125
Nikel	<i>Berkheya coddii</i>	17.000	110
Bakır	<i>Haumaniastrum katangense</i>	8356	41
Mangan	<i>Macadamia neurophylla</i>	55.000	165
Kobalt	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10.200	40
Selenyum	<i>Astragalus pattersoni</i>	6000	30
Uranyum	<i>Atriplex confertifolia</i>	100	1
Talyum	<i>Iberis intermedia</i>	400	3
Arsenik	<i>Pityrogramma calomelanos</i>	8350	



*Thlaspi caerulescens* bitkisinin üç farklı türü



Çinko, genel olarak bitkinin epiderm hücrelerindeki kovuklarda tutuluyor.



Hardal bitkisinin kök tabanı yüksek düzeyde çinko içeriyor.

dırmakta. Diğer yandan, yüksek düzeyde çinko biriktirici *T.caerulescens* ise verim düşüklüğüne neden olmadan, dokularında 30.000 ppm çinkoya tolerans gösterebilmekte (25 kg/ton). Hektar başına 5 ton gibi düşük verimine karşın, hektardan 125 kg çinko kaldırmakta. Bitki yakıldıktan sonra geri kalan kül, % 20-40 oranında çinko içermekte ve zengin maden cevheri olarak değerlendirilebilmekte. Bazı bitkilerin hektardan kaldırdıkları metal düzeyleri Tablo 1'de verilmiştir.

## Gelecekteki Stratejiler

Metal biriktirici bitkiler genel olarak küçük yapılı, fazla biyokütle oluşturmayan yabancı bitkilerdir. Bu bitkilerin biyokütle üretimi yükseltilebilirse topraktan kaldıracakları metal miktarında da artma olacağı düşünülüyor. Bu düşünce, gübreleme, sulama gibi tekniklerle kısmen doğrulanmış bulunuyor. Bitkilerin biyokütle üretimini artırmak için iki strateji üzerinde duruluyor; gen teknolojisiyle yüksek biyokütle üretimine sahip bitkilerden

bu genleri yüksek biriktirme özellikli bitkilere nakletmek, ya da yüksek biyokütle üretimine sahip bitkilere, yüksek biriktirme genlerini aktarmak. Hangi yöntem gerçekleşirse gerçekleşsin, sonuçta, biyomadencilik yöntemiyle toprakların daha kısa sürede metallere temizlenmesi gerçekleşecek, diğer yandan da biyomadencilik daha ekonomik hale gelecektir.

## Sonuç

Ağır metallere kirletilmiş toprakları bitkilere temizletmenin, ya da biyomadencilik, öteki yöntemlere göre farklı avantajları bulunmakta. Ekonomik olarak işletilmeye uygun olmayan metal oranı düşük maden alanları bitkilendirildiğinde, hem erozyon önlenerek kirleticilerin yayılması engellenmekte, hem de maden oranı yüksek biyolojik maden cevheri elde edilebilmekte. Biyomadenlerin kükürt oranı düşük olduğu için, yöntem, asit yağmurlarına da neden olmuyor. Kirletilmiş toprakların temizlenmesi dikkate alındığındaysa, bitkilerle temizleme, diğer fiziksel ve kimyasal yöntemlere göre daha ekonomik ve çevreyi tahrip etmeyen yöntem olarak ön plana çıkıyor.

Gülgün Köseoğlu,  
Ömer H. Dede,  
Doç. Dr. Saim Özdemir

Sakarya Üniv., Müh. Fak., Çevre Müh. Bölümü

## Biyomadencilik Ekonomik Değeri

Yüksek biriktirme özellikli bitkiler uzun yıllardır bilinmekle birlikte, bunların ekonomik değer olarak kullanılma düşüncesi görece yeni. 1983 yılında bunların pratik olarak kullanılabilirliği ortaya atıldı ve 1995 yılında da *Streptanthus polygaloides* bitkisinin hektardan 100 kg'ın üzerinde nikel kaldırmasıyla biyomadencilikte kullanılması uygulamada gerçekleşti. ABD'de % 0.35 nikel içeren topraklarda, normal koşullarda ekonomik madencilik için uygun olmayan, *S.polygaloides* bitkisinin kuru ağırlığının %1'i oranında nikel içerdiği saptandı ve biyomadencilik yoluyla hektardan ortalama 515 \$ gelir sağlanabileceği hesaplandı. Bu gelir, aynı alanda yetiştirilen buğdaydan elde edilebilecek gelirden daha yüksek. İtalya'da nikel biriktirici *Alyssum betoloni* bitkisiyle yapılan başka bir çalışmada, hektar başına kuru ağırlığında % 0.8 nikel içeren 9 ton biyokütle üretilmiş, bu biyokütle ile hektardan 72 kg nikel kaldırılmış bulunuyor. Başka bir yüksek nikel biriktirici *Berkheya coddii* ile yapılan çalışmalarda da, kuru ağırlıkta 5500 ppm nikel derişiminde, hektarda 22 ton kuru biyokütle ve 110 kg nikel kaldırıldı. Dünya nikel fiyatı 7.65 \$/kg olarak alındığında, hektar başına 841,5 \$ gelir elde edilmekte. Bitki yakıldığında elde edilen enerjiyle birlikte, hektardan elde edilen gelir daha da yükselmekte. Birim alandan elde edilen gelir, kıymetli metallere daha yüksek; ya da biyomadencilik daha ekonomik olabilmekte. Ekonomik madencilik elverişli olmayan, ortalama 10 mg/kg talyum içeren topraklarda *Iberis intermedia* bitkisi yetiştirilerek, hektardan maksimum 8 kg ve ortalama 4 kg talyum hasat edilebilmekte. Talyumun dünya fiyatı 300 \$/kg'dır. Be-

lirtilen miktar ve fiyatlardan, hektardan ortalama 1200 \$ gelir, aynı alanda yetiştirilen buğdaydan sağlanabilecek gelirden iki kat daha yüksek. Benzer çalışmalar altın için de yapılmış bulunuyor. Bitkilerin topraktan altını alabilmeleri için, toprağa altını kısıtlayıcı kimyasallar verildiğinde, bitkide 57 ppm altın belirlendi. Toprakta metal alınımı kolaylaştıran kimyasalların da bir maliyeti olduğundan, her çalışmada altın için ekonomik sonuç verilebilmiş değil. Benzer durum, kirleticilik oranı yüksek fakat, ekonomik değeri düşük kurşun için de geçerli. Bitkilerin topraktan aldıkları kurşun, kolay hasat edilebilen gövde ve yapraklarında değil, köklerinde birikmekte. Toprağa maden kısıtlayıcı EDTA verildiğinde *Brassica juncea* bitkisinin toprak üstü organlarında, kuru ağırlığının %1,5'i kadar kurşun biriktirdiği saptandı. Ancak, bu şekilde biyomadencilik ekonomik olarak değerlendirilmiyor. Herhangi bir şekilde kirletilmiş toprakların temizlenmesi düşünüldüğündeyse yüksek biriktirme özellikli bitkilerin artı avantajı ortaya çıkıyor. Unutulmamalı ki, toprakların kirletici ağır metallere temizlenmesi de ayrı bir teknoloji ve maliyet getirmekte. Bu bakımdan da bitkiler potansiyel kaynak olma değerlerini koruyorlar.

Toprakların ağır metallere temizlenmesinde kullanılması düşünülen diğer bir bitki grubu yasa tıbbi bitkiler. Bu bitkilerle, toprakların temizlenmesinin yanı sıra ilaç hammaddesi üretilmesi de hedefleniyor. Bunlardan birisi *Datura stramonium*. Bu bitkiden ilaç yapımında kullanılan alkaloidler; hyoscyamin ve scopolamin elde edilmekte. Bu maddeler ABD'de bitki orijinli etkili madde sınıflamasında ilk 10 içinde yer alıyorlar.

### Kaynaklar

- Anderson, C.V., Brooks, R.R., Chiarucci, a., LaCoste, C.J., Leblanc, M., Robinson, B.H., Simcock, R., Stewart, R.B., 1999. Phytomining for nickel, thallium and gold. J. of Geochemical Exploration. 67, 407-415.
- Brooks, R.R., Chambers, M.F., Nicks, L.J., Robinson, B.H., 1998. Phytomining. Trends in Plant Science. 3 (9): 359-362.
- Chaney, R.F., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S., Baker, A.J.M., 1997. Phytoremediation of soil metals. Current Opinion in Biotechnology. 8, 279-284.
- LaCoste C., Robinson B., Brooks R. 2001. Uptake of thallium by vegetables: Its significance for human health, phytoremediation, and phytomining. Journal of Plant Nutrition. 24 (8): 1205-1215.
- Visoottiviseth, P., Francesconi, K., Sridokchan, W., 2002. The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. Environmental Pollution. 118, 453-461.