

## KİRLİ TOPRAKLARDAN METALLERİN FİTOEKSTRAKSİYONU

Kirli ortamların temizlenmesinde bitkilerin kullanılması yeni bir kavram değildir. Yaklaşık 300 yıl önce bitkilerin atık suların işlenmesinde kullanılması önerilmiştir (Hartman, 1975). 19. yüzyıl sonunda *Thlaspi caerulescens* ve *Viola calaminaria*, yapraklarında yüksek düzeylerde metal biriktiren ilk bitki türleri olarak ortaya konmuştur (Baumann, 1885). 1935' te Byers *Astragalus* familyasındaki bitkilerin filizlerinde %0.6' ya kadar Se toplayabilme yeteneğinde olduğunu rapor etmiştir. Bundan 10 yıl sonra Minguzzi ve Vargnano (1948) filizlerinde %1 Ni depolayabilecek bitkileri belirlemiştir. Rascio (1977) *Thlaspi caerulescens*' in filizlerinde Zn birikimi ve toleransını ortaya koymuştur. Co, Cu ve Mn süper biriktiricilerinin belirlenmesini öne süren bir dizi raporlara rağmen Cd, Ni, Se ve Zn haricinde diğer metaller için süper taşıyıcı bitkilerin varlığı sorgulanmıştır ve bu ilave bir onay gerektirmektedir (Salt ve ark., 1995). Bulaşık topraklardan metallerin çıkarılmasında bitkilerin kullanımı fikri Utsunomyia (1980) ve Chaney (1983) tarafından yeniden ortaya konmuş ve geliştirilmiştir ve Zn ve Cd' un fitoekstraksiyonu üzerine ilk arazi denemesi 1991' de gerçekleştirilmiştir (Baker ve ark.). Son 10 yılda metal fitoekstraksiyonunun biyolojisini araştırmak amacıyla çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Önemli başarılarla rağmen metal ekstraksiyonuna olanak sağlayan bitki mekanizmasına dair anlayışlarımız yeni yeni ortaya çıkmaktadır. Buna ilaveten agronomik faaliyetlerin bitkiler yardımıyla metal atılması üzerine etkileri gibi uygulamaya yönelik kavramlar büyük ölçüde bilinmemektedir. Fitoekstraksiyonun ticari amaçlı bir teknolojiye dönüşmesi ancak bitki mekanizmalarının ortaya konabilmesine ve yeterli düzeyde agronomik faaliyetlerin uygulanabilmesine bağlı olacaktır. Son derece yüksek seviyelerde metal depolayabilen bitki türlerinin doğal olarak ortaya çıkması bu işlemin incelenmesini özellikle ilginç hale getirmektedir.

### *Fito- İyileştirici Bitkiler Neden Toksik Metalleri Alırlar*

Büyümek (gelişmek) ve yaşam döngüsünü tamamlamak için bitkiler N, P, K, Ca ve Mg gibi makro bitki besin maddelerinin yanında Fe, Zn, Mn, Ni, Cu ve Mo gibi gerekli mikro besin maddelerini de almak zorundadırlar. Bitkiler bu besin maddelerini bünyelerine almak, yer değiştirmek ve depolamak için özel mekanizmalar geliştirmişlerdir. Örneğin biyolojik zarlar dışına metal akışı hareket fonksiyonuna sahip proteinler ile oluşturulmaktadır. Ayrıca, hassas mekanizmalar fizyolojik sınırlar içerisinde metal iyonlarının hücre içi konsantrasyonunu sağlar. Genel olarak akım mekanizması seçici olup, bitkiler bazı iyonları diğerlerine tercih eder. İyon alım seçiciliği zar ileticilerin yapısı ve özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler ileticilerin, özel iyonların zarlar arası hareketine, tanınmasına ve bağlanmasına ve hareketi kolaylaştırmasına olanak sağlar.

Zn, Mn, Ni ve Cu gibi birçok metal gerekli mikro besin maddeleridir. Akümülatör olmayan bitkilerde bu metallerin birikimi bitkilerin metabolik gereksinimlerini aşmaz (<10 ppm). Bunun tersine, metal hiperakümülatör türler büyük miktarda (ppm' in 1000 katı) metal biriktirebilir, metal alımı enerji tüketen bir proses olduğundan, metal birikiminin bitkilere gelişimleriyle ilgili nasıl bir avantaj sağladığı merak konusudur. Son yıllardaki çalışmalar yapraklardaki metal birikiminin bitkileri tırtıl, fungus ve bakterilere karşı korunduğunu göstermiştir.

Hiperakümülatör bitkiler sadece yüksek seviyede mikro besin maddelerini biriktirmekle kalmamakta aynı zamanda Cd gibi gerekli olmayan metalleri de almaktadır. Cd birikiminin mekanizması henüz

anlaşılamamıştır. Bu metallerin köklere alımı diğer gerekli mikro besin maddelerinin (olasılıkla Zn ile) taşınmasını sağlayan sistemle oluşması mümkün gibi görünmektedir. Kadmiyum Zn' nun benzeri gibi hareket etmekte ve bitki bu iki iyon arasında ayırım yapamayabilmektedir.

### **Alternatif yöntemler:**

- Toprağı kazıma ve doldurma
- Yıkama
- Kimyasal immobilizasyon
- Kimyasal ekstraksiyon

### **Avantajları**

#### **Dezavantajları**

- Düşük teknolojik metot özel toprak istekleri \* Bitkiye
- Toprak matriksinin değişmemesi alım kapasitesi \* Bitkinin
- Kabul görmesi \* Zaman
- Ucuz

### **Potansiyel Çözümler:**

- Süper toplayıcı (hyperaccumulator) bitki kullanma

#### ***Hiperakümülatör Bitki Nedir***

Toprak kirlenmesinde iyileştirici ajan olarak bitki kullanımı konusuna ilgi, yüksek metal sömüren bitki türlerinin tanımlanmasından sonra çok artmıştır. Bunlar, normal bitkilerde ölçülenden 100 kat daha fazla metal biriktirme kabiliyetine sahip bitkiler olarak tanımlanmaktadır. Hiperakümülatör bir bitki 10 ppm' den fazla Hg, 100 ppm' den fazla Cd, 1000 ppm' den fazla Co, Cr, Cu ve Pb ve 10000 ppm' den fazla Ni ve Zn' yu bünyesine alabilmektedir. Şimdiye kadar, en azından 45 bitki familyasında 400 bitki türünün metal sömürücü hiperakümülatör olduğu belirlenmiştir. Bunlardan çoğu Ni' i biyolojik olarak konsantrale hale getirebilmekte, yaklaşık 30 tanesi Co, Cu ve/veya Zn' yu absorbe edebilmekte, çok azı Mn ve Cd' u biriktirebilmektedir. Ancak, Pb' u bünyesine alan hiperakümülatör bitkiler ve hiperakümülatör potansiyelleri Tablo 1' de verilmiştir.

## Metal toplayıcı bitkiler:

- *Thlaspi caerulescens*
- *Armeria maritima*
- *Festuca aquis granensis*
- *Minuartia verna*
- *Silene vulgaris*

## Özellikleri:

- Metale karşı yüksek tolerans
- Hasat kısmında yüksek metal birikimi
- Düşük biyokütle
- Yavaş büyüme

**Tablo 1.** Bazı Metal Hiperakümülatör Bitki Türleri ve Biyoakümülyasyon Potansiyelleri.

Bitki Türü	Metal	Yaprak Kapsamı	Referans
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn: Cd	39.600:1.800	Reeves&Brooks (1983): Baker&Walker (1990)
<i>Ipomea alpina</i>	Cu	12.300	Baker&Walker (1990)
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	10.200	Brooks (1977)
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	14.900	Beath et. al. (1937)
<i>Sebertia acuminata</i>	Ni	%25 kuru özsuyu ağırlığına göre	Jaffre et. al. (1976)

En çok tanınan hiperakümülatör bitki *Thlaspi caerulescens* (Alpine pennycress) dir. Birçok bitki 100 ppm Zn biriktirmesi durumunda toksiklik semptomları gösterirken bu tür, herhangi bir hasar olmaksızın 26.000 ppm' e kadar Zn' yu bünyesine alabilmektedir.

Hiperakümülatörler normal bitkilere göre Zn gibi metallere daha fazla ihtiyaç duyabilirler. Buna örnek; *T. caerulescens*' in de dahil olduğu bir çok hiperakümülatörün Pb, Zn ve Cd' ca zengin topraklarda koloni oluşturabildiğidir. Bu yeteneklerinden dolayı metallerce zengin topraklardaki hiperakümülatör teşhisi için birçok çalışma yapılmaktadır.

## Bitkiler Topraktaki Yüksek Metal Konsantrasyonuna Nasıl Tolerans Gösterirler

Ekolojik çalışmalar, yüksek seviyede Zn, Cu, ve Ni ile kirlenmiş topraklara adapte olan endemik flora ve spesifik bitki topluluklarının bulunduğunu ortaya çıkarmıştır. Aynı türün farklı ekotipleri metal kirlenmesi olmayan alanlarda da bulunabilmektedir.

Metallerce kirlenmiş topraklardaki endemik bitki türleri için metal toleransı ayrılmaz bir özelliktir. Kirlenmiş alanlardaki popülasyonlarda, yüksek ve düşük toleranslı ekotipler arasında sürekli bir dereceleme oluşmaktadır.

Bitkiler topraktaki yüksek metal konsantrasyonunu tolere etmek için etkili mekanizmalar geliştirmişlerdir.

1. Bazı türlerde, tolerans toksik metallerin kök hücrelerine alımını engellemek şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür bitkilerden “merlin”, metallerce kirlenmiş erozyona duyarlı alanlarda stabilizasyonu sağlamak için kullanılan kırmızı fescue (*festuca rubra*)’nın (kırmızı yumak) ticari bir varyetesidir.

2. İkinci grup bitkiler (biriktiriciler) metallerin köklerine girmesini engellemezler. Bu türler, hücrelerdeki yüksek metal seviyesi için toksik etkiyi giderecek mekanizmalar oluşturmuşlardır. Bu mekanizmalar, oldukça yüksek metal konsantrasyonun biyolojik birikimine izin verirler.

3. Üçüncü grup bitkiler (indikatörler), metal alımı ve metal iletim işlemleri üzerine zayıf kontrole sahiptirler. Bu bitkilerde metal birikiminin derecesi toprak rizosfer bölgesindeki metal konsantrasyonunu gösterir. İndikatör bitkiler yeni cevherlerin bulunması için madencilik çalışmalarında kullanılmaktadır.

### **Metallerin Köklere Alınma ve Sürgünlere Taşınma Mekanizmaları**

Elektrik yükleri nedeniyle metal iyonları, lipofilik yapıdaki hücre zarından geçip serbestçe hareket edemezler. Bu nedenle, iyon hareketi, hareketi kolaylaştırıcı zar proteinleri vasıtasıyla sağlanır ve proteinlere “taşıyıcılar” denir.

Söz konusu zar dışı taşıyıcılar, hücre dışında iyonun bağlanacağı bir yüzey ile hücre içi ve dışı ortamının temasını sağlayan zar dışı bir yapıya sahiptir.

İyon bağlayıcı alan sadece spesifik iyonlar için açık olup, taşıyıcının özelliğini belirler. Zar dışı yapı ise zarın hidrofobik ortamı sayesinde hücre dışından, bağlı konumdaki iyonların hücrelere transferini kolaylaştırır.

Köklere bağlı toplam iyon miktarının sadece bir kısmı hücrelerce absorbe edilir. Önemli bir iyon fraksiyonu ise kök hücre duvarlarının negatif yüklü kısımlarında fiziksel olarak adsorbe edilmektedir. Bu hücre duvarına bağlı fraksiyon sürgünlere taşınmaz; bu nedenle sürgün biyokütlesinin kesilmesi ile çıkarılmaz. Bu nedenle, köklerine önemli oranda metal biriktiren bir bitkinin, sınırlı metal ekstraksiyon özelliği göstermesi muhtemeldir. Örneğin, birçok bitki köklerinde Pb biriktirmekte, fakat Pb’ nun sürgünlere taşınması çok düşük olmaktadır.

Hücre duvarına bağlanma, köklerdeki metal immobilizasyonu iyonların sürgünlere taşınımının engellenmesi ile ortaya çıkan ve sadece bitki mekanizmalarınca gerçekleştirilen bir durum değildir. Metaller,

hücre yapısı içinde de sürgünlere taşınımı engelleyen kompleks yapılar haline gelebilmektedir. Bazı bitki türleri metallerin köklere taşınımını engellemektedir. Metal alımının engellenmesi hala iyice anlaşılammıştır.

Metallerin kök hücrelerine alınımı, canlı hücrelere giriş noktası fitoekstraksiyon prosesi için önemli unsurlardan bir adımı oluşturmaktadır. Ancak, fitoekstraksiyon oluşumu için metallerin kökten sürgünlere taşınması gerekir. Metal içeren bitki özsuununun kökten sürgünlere hareketi iki proses tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar; Kök basıncı ve yapraktaki terleme (transpirasyon)' dir.

Gümüş, Krom, Kurşun, Kalay ve Vanadyum sürgünlerde (yaprak ve gövde) köklere ve rizoma nazaran daha çok birikirken, Kadmiyum, Kobalt, Bakır, Demir ve Molibden köklerde rizom ve sürgünlere (yaprak ve gövde) nazaran daha çok birikir. Nikel, Mangan ve Çinko bitkinin kök ve sürgünlerine daha az üniform olarak yayılır.

Zn, Mn, Ni ve Cu gibi mikro elementlerin bitki büyümesi ve gelişmesi için gerekli olmasına rağmen, bu iyonların hücre içindeki yüksek konsantrasyonları toksik olabilir. Bu potansiyel baskıyı gidermek için, akümülatör olmayan bitkiler bazı mekanizmalar geliştirmişleridir. Bu tip mekanizmalar, iyon akışının düzenlenmesi (taşıyıcı aktiviteyi düşük iyon konsantrasyonu sağlaması ve yüksek konsantrasyonu önlemesi için uyarma) ve hücre içi iyonların dış çözeltiliye gönderilmesi gibi prosesleri içermektedir.

Binlerce ppm metali alma yeteneğine sahip hiper metal akümülatör türler ilave toksiklik giderici mekanizmalara sahiptir. Örneğin;

- Nikel akümüle eden *T. geoesingense*' deki yüksek tolerans, metali inaktif halde geri veren histidininin Ni ile yaptığı kompleks nedeniyle oluşmaktadır.
- Zn akümüle eden *T. caerulescens*' in sürgünlerindeki Zn toleransı vakuollerde meydana gelmektedir. Birçok mekanizma Zn-Fosfat olarak çökeltme ve düşük molekül ağırlığına sahip organik asitler ile bağ oluşturma gibi vakuoldeki Zn' nin inaktif hale getirilmesinden sorumludurlar.

Düşük molekül ağırlığına sahip organik bileşiklerin kompleks oluşturması da Ni toleransında önemli rol oynamaktadır. Birçok hayvan, bitki ve bakterilerde teşhis edilen metallothioneins de ağır metallerle bağlanma özelliğine sahip bir protein bileşiğidir.

## **Bitki Sınırlamaları**

Fitoekstraksiyon kavramı yeniden ortaya atıldığında, orta derecede kirlenmiş bir toprağın bitkiye bağlı olarak tekrar kirli olması için, %1-2' den fazla metali (konsantre duruma getirmesi) gerekmektedir. Böyle yüksek seviyede ağır metal birikimi oldukça toksik olup yaygın akümülatör olmayan bitkileri öldürmesi beklenir. Ancak, bu derecedeki konsantrasyonlar hiper akümülatör türlerde erişilebilir bir durumdur. Bununla birlikte sınırlı miktarda metali ekstrakt ve tolere etme kabiliyeti, kaldıran metalin derecesini sınırlamaktadır.

Kuru ağırlık bazında, bu eşik Ni ve Zn için yaklaşık %3 olup, çok daha toksik Cd ve Pb gibi metaller için ise oldukça düşüktür. Metal fitoekstraksiyonu için potansiyel kısıtlayıcı diğer biyolojik parametre biyokütle üretimidir. Oldukça yüksek üretken türlerde biyokütle üretimi için yaklaşık 100 ton ağ./ha' dır. Bu parametre değerleri yıllık sömürme potansiyelini maksimum 400 kg metal/ha/yıl ile sınırlamaktadır. Birçok metal hiper akümülatör türlerin yavaş büyüyen ve az biyokütle üreten bitkiler olduğu da unutulmamalıdır. Bu özellikler, hiper akümülatör bitkilerin çevre kirliliği amaçlı kullanılmasını sınırlamaktadır.

## METAL BİRİKTİREN BİTKİLERCE TOPRAĞIN TEMİZLENMESİ

Rufus Chaney' in gözüyle zehirli ağır metallerle beslenen bitkiler üzerinde yapılan çalışmalarda, Chaney bu önemli bitkilerin bir gün kirlenmiş topraklar ve kirli maden alanlarının, nükleer atık çöplüklerinin, tarım alanlarının, kurşun, kadmium, çinko, nikel veya uranyum ya da kobalt gibi radyoaktif izotoplarla kirlenmiş kırsal alanların temizlenmesinde kullanılacağını öngörmüştür.

Bitkiler, kökleri yoluyla zehirli maddeleri veya izotopları alıp onları dallara veya yapraklara taşıyarak hasat edip kolayca temizleyebilmektedir. Ziraat Araştırma Agronomisti Chaney, kirlenmiş toprakları bitkiler kullanarak temizlemenin maliyetinin, onları zararlı atık çöplüklerine koyup üzerlerini betonlamaktan 10 kat daha ucuz olacağını söylemiştir.

Maryland, Beitville ARS çevresel kimya laboratuvarında ağır metal uzmanı olarak çalışan Chaney, bitkilerde ağır metallerin bulunup çıkarılması sonucunda metallerin çıkarılması için gereken iş gücünü azaltılacağını söylemektedir. Ayrıca, hiperakümülatör olarak adlandırılan metal toplayıcı bitkilerin saman gibi hasat edilebileceğini belirtmiştir. "Samanın yakılması, metallerin yeniden elde edilmesini ve dönüşümünü sağlar. Küller aynı ticari maden gibidir."

Chaney, bu işlemi yeşil iyileştirme olarak adlandırmış ve ağır metallerin toprakta yüzyıllarca kalabileceğini vurgulamıştır.

Chaney ile Maryland Üniveristesinde birlikte çalışan Scott Angle, henüz bitki araştırmacıları yoksa da, prototip bitkilerin test edildiğini ve hiperakümülatör gen araştırmalarına başlandığını söylemektedir.

Angle, çinko, kadmium ve nikel depolamada etkin bitkilerin 5-10 yıl içinde belirleneceği konusunda ümitli fakat kurşun depolayan bitkiler için o kadar ümitli değildir. Dupont Çevresel Biyoteknoloji Laboratuvarı, Ambrosia L. familyasından seçilmiş Ambrosya soylarıyla kurşun iyileştirmesi üzerine çalışmaktadır.

Kurşunun iyileştiriminde Ambrosya ve Thlaspi rotundifolium diğer bitkilerden daha iyidir. Ancak bu bitkiler çinko ve kadmium hiperakümülatörü olarak bilinen Alpine pennycress ve Thlaspi caerulescens kadar yavaştır. Pennycress pek çok ülkede çinko ve nikel bakımından zengin topraklarda bulunan yabancı ot bir bitkidir.

Tarihte hiperakümülatör otlar, içlerinde metal cevheri biriktirdikleri için altın arayıcıları tarafından kullanılmıştır. Bu otlar Alpler gibi kayalık dağlarda yetişmekte ve ayrıca Alplerin buzul bölgelerinde 10000 yıldan beri var oldukları sanılmaktadır. Chaney, bu bitkilerin, yüksek çinko düzeyi nedeniyle diğer bitkilerin öldüğü alanları kolonileştirdiğini söylemektedir. "Fakat bu bitkiler genelde yavaş büyüyen zayıf otlardır ve metalleri çok yavaş alırlar."

Bir mikrobiyolog olan Angle, hiperakümülatörler bitkilerin köklerinde bulunan yararlı mikorizal mantarın bitkilerin metal alım hızlarını artırdığı konusu üzerinde durmuştur. Bitkilerin metal alım yeteneğini bu mantarların gizlediğine inanmaktadır. (Mantarların bitkileri etkilemek suretiyle ortaya çıkan metal ilişkileri konusu "Metallerce Kirlenmiş Rizosfer Ekolojisinin Mikorizalar Yardımıyla İyileştirilmesi" başlığı altında tartışılacaktır).

St. Paul, Minnesota' da bulunan dolgu alanı Pig's Eye' daki türlerin testinde pennycress bitkisinin kadmiyum, çinko ve kurşunu iyileştirmede en iyi olduğunu belirtmiştir. Pennycress bitkisi herhangi bir toksite semptomu göstermeksizin yapraklarında 30000 ppm çinko biriktirerek çinko ve kadmiyumu topraktan uzaklaştırmada iyi olduğunu kanıtlamıştır. Bitkilerin çoğu için zamanla 500 ppm çinko toksiklik yaşatmaktadır.

Pennycress gübrelendiğinde ve iyi bakıldığında, yılda hektardan 125 kg çinkoyu alabilmektedir. Kadmiyum için aynı süredeki değer ise 2 kg/ha' dır.

Chaney' e göre "hektarda bulunan 2000 kg çinko 20-30 kg kadmiyuma karşılık gelmektedir." Bu durum pennycressin her ikisini de 16 yılda uzaklaştıracağı anlamına gelmektedir. Biyolojik yapısı geliştirilmiş bir hiperakümülatör her yıl hektardan 500 kg çinko, 6-8 kg kadmiyum uzaklaştırabilmektedir. Pratikte bu olayın 4 yıl alacağı belirtilmektedir.

Topraklardan kadmiyum ve çinko giderimi testleri hali hazırda Pensilvanya, Palmerton Şehir Parkında yürütülmektedir.

### **Fitoremidasyon Çeşitleri:**

#### **1. Parçalama**

**A. Biyolojik parçalama:** Kök altında mikroplar aracılığıyla biyolojik parçalama

**B. Rizosfer parçalaması:** Yeraltı veya üstünde bitki kök, gövde ve yapraklarıyla kirleticinin alımı

#### **2. Biriktirme**

**A. Ekstraksiyon:** Kirleticinin alımı ve uzaklaştırılmak üzere biriktirilmesi (Phytoextraction ). Ekstraksiyon ile, bitkiler topraktan yüksek miktarda elementi alıp hasat edilen organlarında biriktirirler.

**B. Filtrasyon:** Kirleticinin kök üstünde adsorpsiyonu (Rhizofiltration)

#### **3.Yayma:**

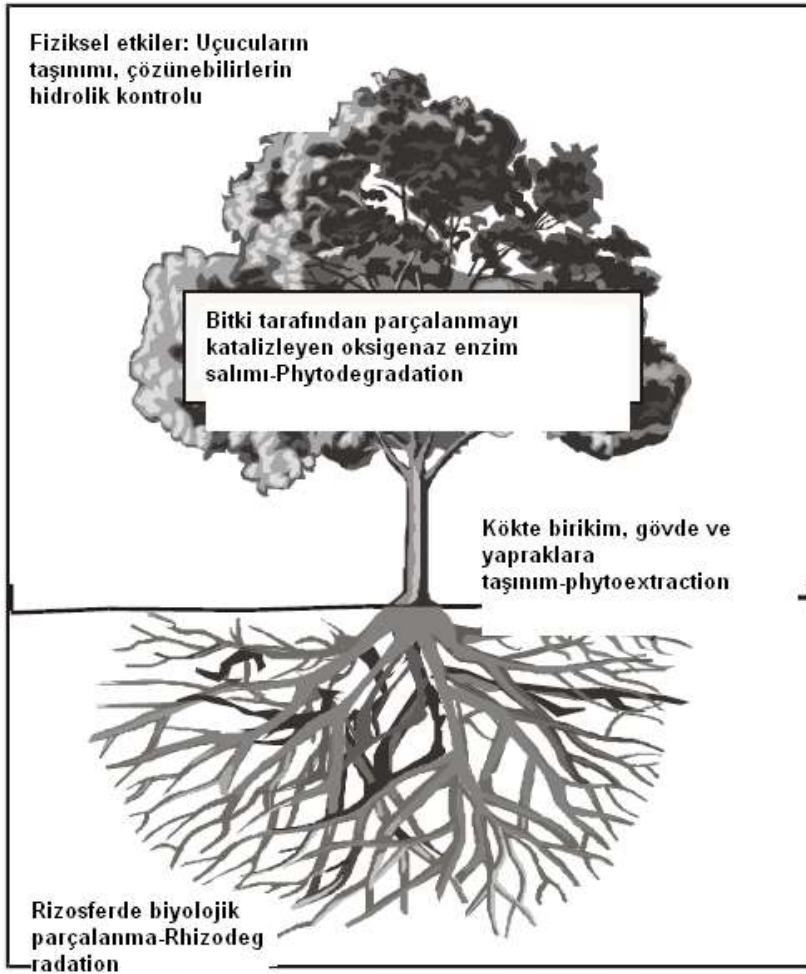
**A. Buharlaştırma:** Kirleticinin alımı ve buharlaştırılması (Phytovolazation). Hg ve Se'ca zengin toprakların ıslahı için yararlı bir yöntem olarak görülmektedir.

#### **4.Hareketsiz kılma:**

**A. Hidrolik kontrol:** Bitki su alımı yoluyla yer altı su akış kontrolü

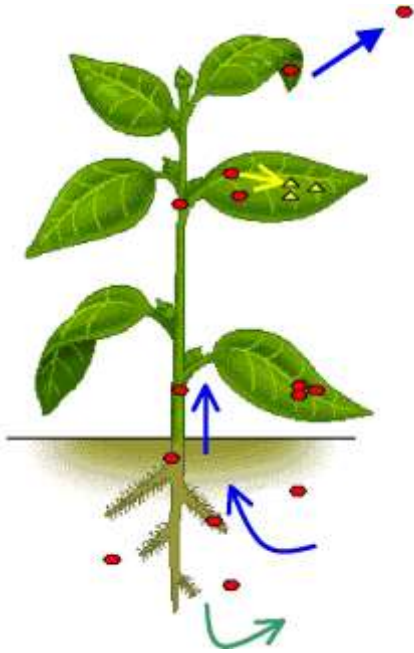
**B. Sabitleme:** Kirleticinin toprakta hareketsiz hale getirilmesi (Phytostabilization).

## Fitoremidasyon Mekanizmaları





## FİTOREMİDASYON TEKNOLOJİLERİ



Bitkisel buharlaşma/Phytovolatilization:  
organikler, metaller

Bitkisel bozulma/Phytodegradation:  
organikler

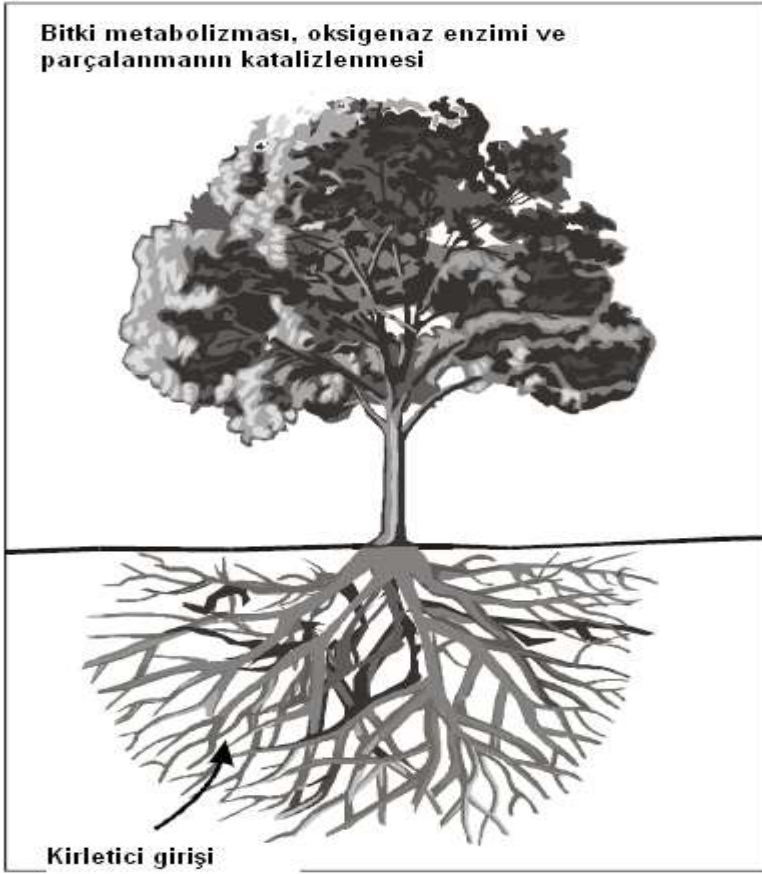
Birikme/Accumulation:  
organikler, metaller

Bitkisel ekstraksiyon/Phytoextraction:  
organikler, metaller

Bitkisel stabilizasyon/Phytostabilization:  
organikler, metaller



## -Phytodegradation-Bitki kökleriyle Parçalama



**Tanım:** Bitkinin metabolik prosesleri aracılığı ile kirlenicilerin parçalanması

- Organik kirleniciler için geçerli
- Buharlaştırma (Phytovolatilization) yöntemi ile birlikte işleyebilir.

**Kullanım Alanları:** Toprak, sedimen, çamur, yer altı suları.

**Hedef Kirleniciler:**

- **Organikler:** Klorinli bileşikler, herbisitler, insektisitler, fenoller.
- 88 bitki çeşidinin 70 adet organik kirleniciyi bünyesine alıp biriktirdiği belirlenmiştir
- **İnorganikler:** sadece besin elementleri özellikle nitrat.

Bitkinin bünyesine alımında kirlenicinin

- Hidrofobik,

- Çözünürlük
- Polar özellikleri önemlidir.

#### AVANTAJLARI:

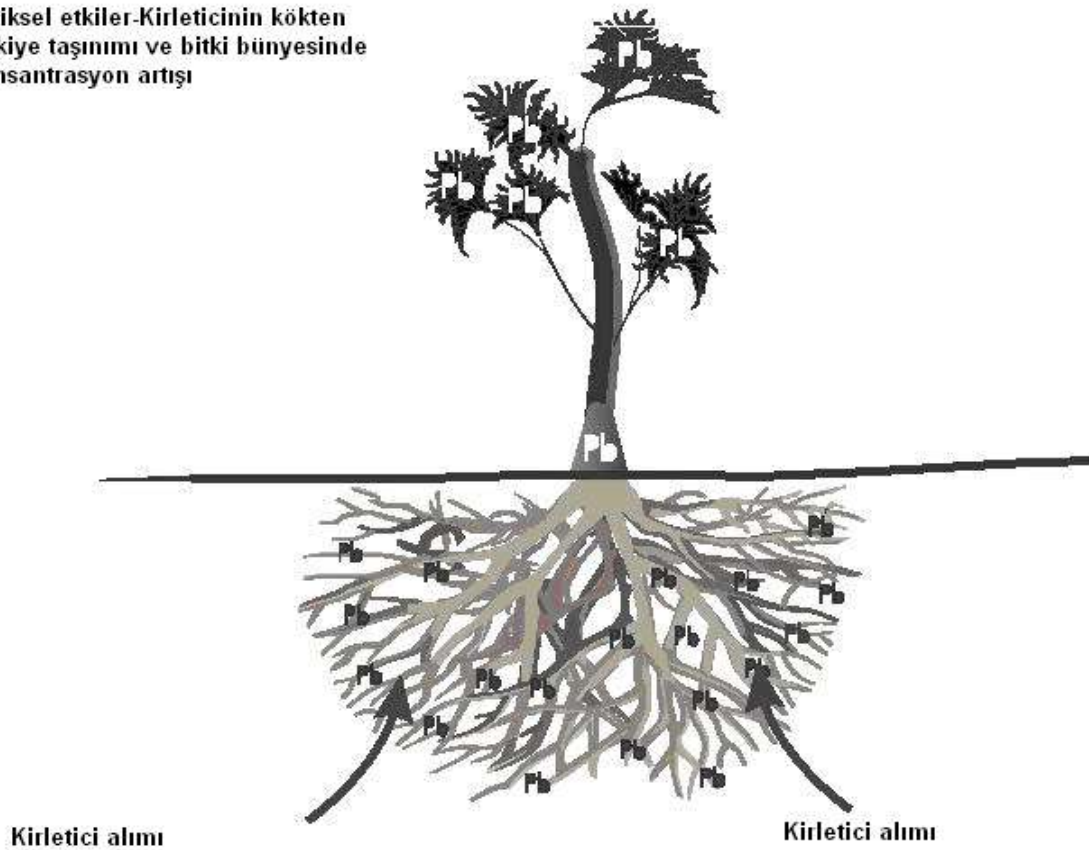
- Bitki tarafından salınan enzimler aracılığıyla gerçekleşen kirletici parçalanması m.organizma hareketinden bağımsız olarak gerçekleşebilir.
- Biyolojik parçalanmanın olmadığı koşullarda da phytodegradation gerçekleşebilir.

#### DEZAVANTAJLARI

- Toksik ara bileşenler oluşabilir.
- Metabolitlerin belirlenmesi güç olabilir.

### Phytoextraction-Ekstraksiyon

Fiziksel etkiler-Kirleticinin kökten bitkiye taşınımı ve bitki bünyesinde konsantrasyon artışı



**Tanım:** Kirleticinin bitki kökleri tarafından alınıp bitkiye taşınımı.

- Kirleticiler genellikle bitkinin hasatı ile uzaklaştırılır.

**Kullanım Alanları:** Ağır metal kirliliği olan toprak, sediment, çamur, sularda çok yaygın değildir.

**Hedef Kirleticiler:** Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Zn, Pb, As, Se ve B.

- Organiklerde çalışma yok.

**Uygun Bitkiler:** Brassicaceae, Asteraceae, Lamicaeae, Euphorbiaeae

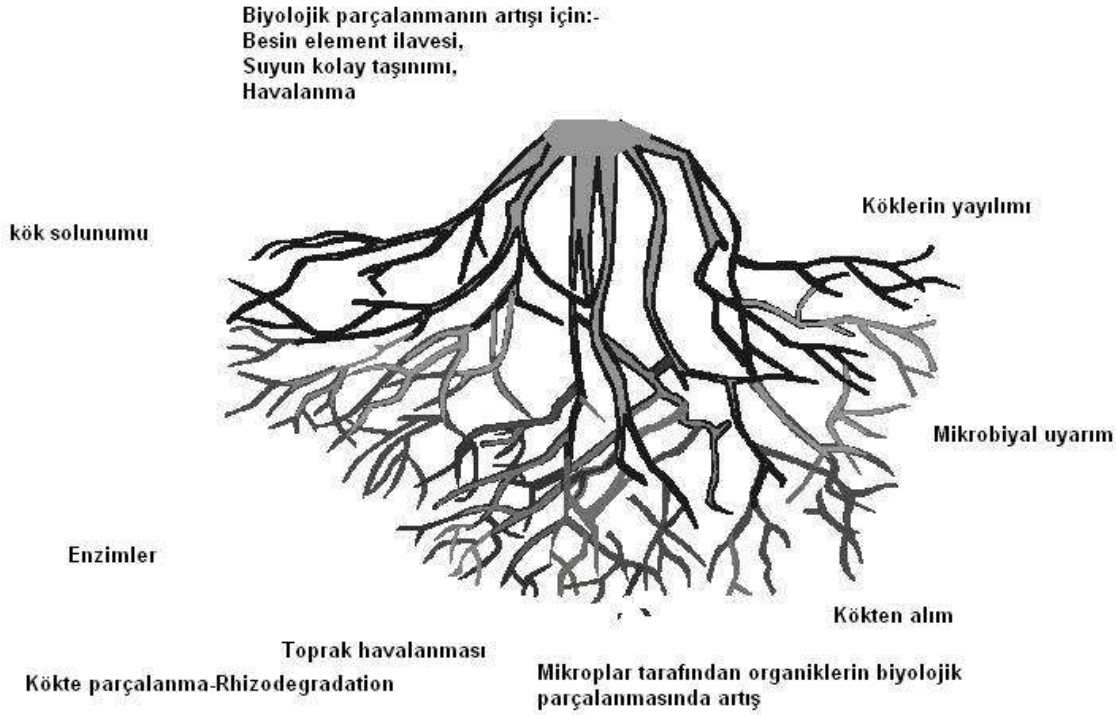
#### AVANTAJLARI

- Ekstrakte edilen kirletici metal kaynağı olarak kullanılabilir (Se).

## DEZAVANTAJLARI

- Metal toplayan bitkiler daha yavaş büyürler.
- Metal toplanan bitkilerin uzaklaştırılma sorunları
- Metaller bitkiye fitotoksik etki yapabilir.
- Tarla koşullarında çalışmayabilir.
- Bitkinin metali alımını kolaylaştırıcı olarak ortam pH'sı ayarlanabilir

## Kök parçalaması- Rhizodegradation:



**Tanım:** Bitki kökleri tarafından mikrobiyal aktivitenin artırılması ve organik kirleticilerin parçalanması.

- Bitki yardımıyla **organiklerin** parçalanması

**Kullanım Alanları:** Organik kirlilik olan toprak, sediment, çamur.

### Hedef Kirleticiler:

- Toplam petrol hidrokarbonları (TPH), PAH, BTEX, Pestisitler, Klorlu çözücüler, PCP, PCBs.
- Rizosfer bölgesinde bitki kökleri aracılığıyla salınan amino asit, organik asit , yağ asitleri, enzimler vs aracılığıyla toprakta organikler parçalanırlar.
- Rizosfer ayrıca aktif mikrobiyal parçalanmayı uyarıcı yönde yüzey alanını genişletir.
- Bitki kökleri toprağı havalandırarak ve toprak nemini ayarlayarak da uygun toprak koşullarını sağlar.

## AVANTAJLARI

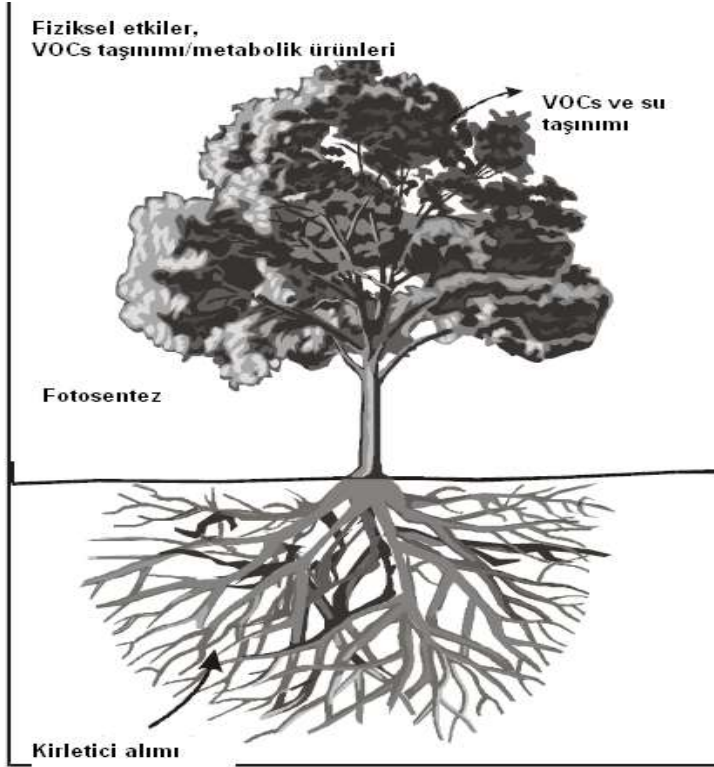
- Kirleticinin yerinde parçalanması
- Kirleticinin bitkiye/atmosfere taşınımı diğer fitoremidasyon tekniklerinden düşük.
- Daha ekonomik

## DEZAVANTAJLARI

- Yoğun bitki kök gelişimi için çok zaman gerekebilir.

- Toprak fiziksel koşulları kök derinliğini sınırlayabilir.
- Başlangıçta rizosferde daha fazla parçalanma oranı olurken, ilerleyen zamanda rizosfer dışı bölgeyle parçalanma oranı benzer.
- Besin elementlerine mikrobiyal rekabetten dolayı ek gübreleme gerekebilir.
- Kök salgılarıyla parçalanmada rol almayan diğer mik.org da uyarılabilir.
- Bitkinin içerdiği organik maddeyi de mik.org. karbon kaynağı olarak kullanır buda hedef organik kirleticinin biyolojik parçalanma oranını azaltır.

### Buharlaştırma-Phytovolatilization



**Tanım:** Bitki tarafından buharlaşabilen kirleticilerin alımı, atmosfere taşınımı.

**Kullanım Alanları:** Başlıca yeraltı sularında uygulanır, toprak, sediment de uygulamalar sınırlı.

**Hedef Kirleticiler:**

**Organikler:** Klorlu çözücüler (TCE)

**İnorganikler:** Se, Hg ve As.

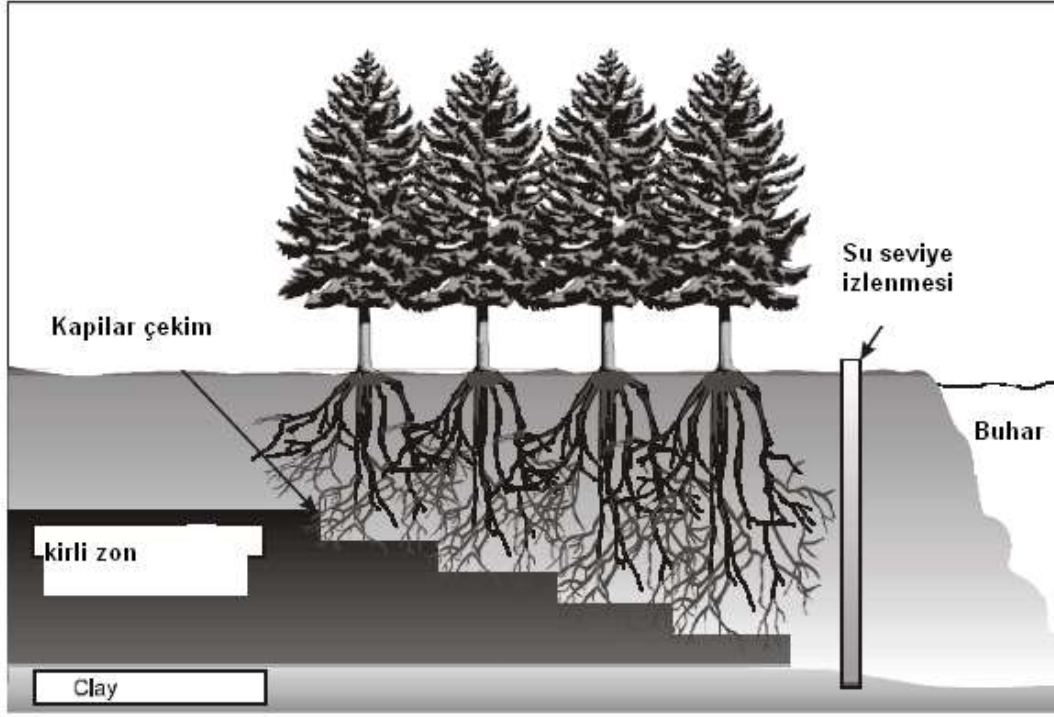
**AVANTAJLARI:**

- Kirleticiler daha az toksik formlara dönüşebilir (elementel civa, dimetil selenit gazı).

**DEZAVANTAJLARI**

- Kirleticiler/metabolitler atmosfere salınır.
- Kirleticiler/metabolitler bitkinin dokularında/meyvelerinde birikebilirler

## HİDROLİK KONTROL



### Hidrolik kontrol

**Tanım:** Bitki aracılığıyla yeraltı suyu kirleticilerinin taşınımını kontrol etmek ve uzaklaştırmak.

**Kullanım Alanları:** Yeraltı suyu, yüzey suları ve toprak çözeltisi.

**Hedef Kirleticiler:** Bitkiye fitotoksik etki yapmayacak konsantrasyonda suda çözünebilir organikler ve inorganikler

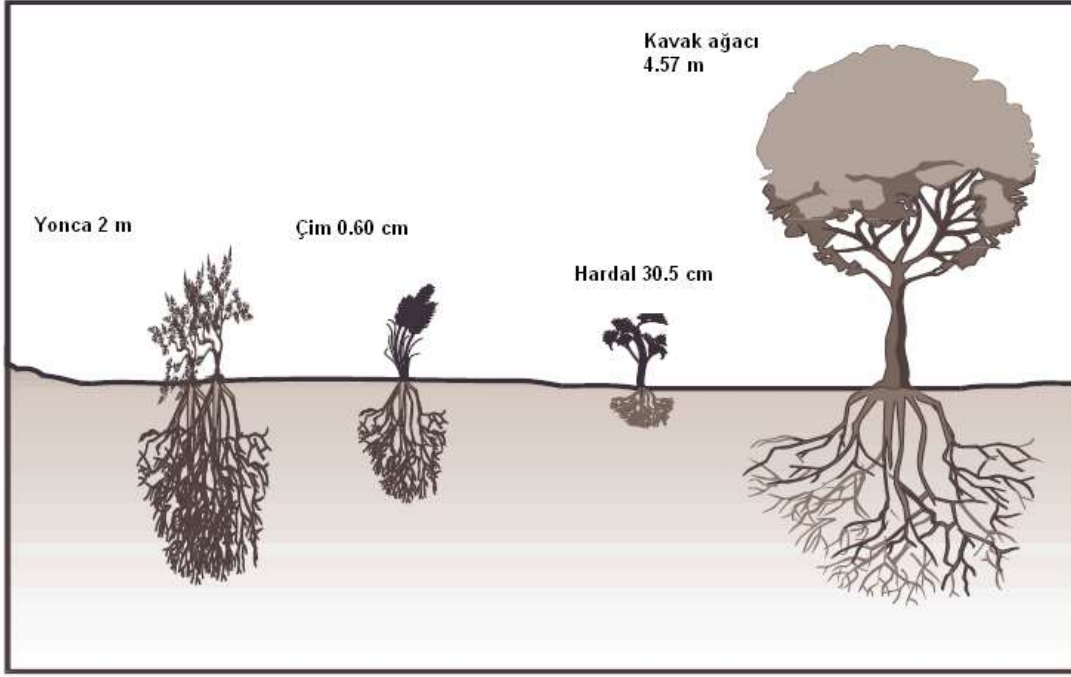
**Kullanılan Bitkiler:** Kavak ağacı en çok kullanılan tür. 5 yaşında kavak ağacı günde 100-200 l suyu transfer edebilir.

### AVANTAJLARI:

- Sistemi kurmak için mühendislik çalışmasına gerek duyulmaz.
- Düşük maliyet
- Pompalama kuyusu kullanmaktansa kökler aracılığıyla kirletici emilimi daha fazladır.

### DEZAVANTAJLARI:

- Bitki tarafından suyun alımı iklim koşulları ve mevsimsel değişimlerden çabuk etkilenebilir.
- Su alım oranı sabit değildir.
- Yeraltı suyu arıtımında kök derinliği sınırlayıcı faktördür.



Bitki kök derinlikleri

