



## Heavy Metal Pollution in Soil and Removal Methods

Osman SÖNMEZ<sup>1a\*</sup>, Fatma Nur KILIÇ<sup>1a</sup>

<sup>a</sup> Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Ziraat Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, 38039, Melikgazi Kayseri, TÜRKİYE

(\*): Corresponding author, [osmansonmez@erciyes.edu.tr](mailto:osmansonmez@erciyes.edu.tr)

### ABSTRACT

Heavy metals decompose in the soil and cause pollution that is difficult to remove, due to their inability to turn into other compounds. Recently, the increase in population and increasing demand and industrialization and intensive agricultural practices in line with this cause environmental pollution. Heavy metal pollution can also occur from the parent material. Among the heavy metals in the soil, cadmium (Cd), copper (Cu), lead (Pb), cobalt (Co), arsenic (As), mercury (Hg) and zinc (Zn) have an important place. Heavy metal pollution can cause losses in agricultural areas, as well as adversely affect human health with the consumption of products grown in these areas. Heavy metal pollution in the soil can be controlled by physical, chemical or biological methods and/or processes, by isolation techniques, replacing contaminated soil, electrokinetic techniques, leaching and bioremediation techniques. In this review, heavy metal pollution and removal methods were evaluated.

#### REVIEW ARTICLE

Received: 06.09.2021

Accepted: 02.11.2021

#### Keywords:

- Soil pollution,
- Heavy metal,
- Remediation techniques

**To cite:** Sönmez O, Kılıç FN (2021). Toprakta Ağır Metal Kirliliği ve Giderim Yöntemleri Turkish Journal of Agricultural Engineering Research (TURKAGER), 2(2): 493-507.  
<https://doi.org/10.46592/turkager.2021.v02i02.020>

## Toprakta Ağır Metal Kirliliği ve Giderim Yöntemleri

### ÖZET

Ağır metaller toprakta ayrışarak kirliliğe yol açmaktadır ve bu kirliliğin giderilmesi metallerin başka bileşiklere dönüşmemesinden dolayı zordur. Son zamanlarda nüfusun artış hızı ve artan ihtiyaç talebi ile bunun doğrultusunda sanayileşme, yoğun tarımsal uygulamalar çevre kirliliğine yol açmaktadır. Ağır metal kirliliği ana materyal kaynaklı da meydana gelebilmektedir. Toprakta yer alan ağır metaller arasında kadmiyum (Cd), bakır (Cu), kurşun (Pb), kobalt (Co), arsenik (As), civa (Hg) ve çinko (Zn) önemli bir yer tutmaktadır. Ağır metal kirliliği tarımsal alanlarda kayıplara neden olabildiği gibi, bu alanlarda yetiştirilen ürünlerin tüketimiyle birlikte insan sağlığını da olumsuz etkilemektedir. Toprakta ağır metal kirliliği fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntem ve/veya süreçlerle izolasyon teknikleri, kirlenmiş toprağın değiştirilmesi, elektrokinetik teknikler, yıkama, biyoremediasyon teknikleri ile kontrol altına alınabilmektedir. Bu derlemede ağır metal kirliliği ve giderim yöntemleri değerlendirilmiştir.

#### DERLEME MAKALESİ

Alınış tarihi: 06.09.2021

Kabul tarihi: 02.11.2021

#### Anahtar Kelimeler:

- Toprak kirliliği,
- Ağır metal,
- İslah teknikleri

**Alıntı için:** Sönmez O, Kılıç FN (2021). Heavy metal pollution in soil and removal methods. Turkish Journal of Agricultural Engineering Research (TURKAGER), 2(2): 493-507.  
<https://doi.org/10.46592/turkager.2021.v02i02.020>

### GİRİŞ

Son yıllarda hızla artan dünya nüfusu, sanayileşme ve yoğunlaşan tarımsal uygulamalardan kaynaklı olarak, toprak ve çevrede ağır metal kirliliği hızlanmaktadır. Nüfus artışı ile gıda talebi, gıda tüketimi ve endüstriyel ürünlerdeki artış sonucu çevre kirliliği oluşmaktadır (Mikhailenko ve ark., 2020). Toprak kirliliği, temelde taşıma kapasitesini aşan ve toprak kalitesini değiştiren zehirli maddeler anlamına gelmektedir (Golui ve ark., 2019). Toprak kirliliğinin temel sebepleri ağır metaller, kanalizasyon ve mahsul tarlası gibi tarım alanlarına uygulanan büyük miktarlarda gübre ve pestisitler de dahil olmak üzere endüstriyel kentsel atıklardır (Chen ve ark., 2015). Endüstriyel üretim faaliyetlerinin sürekli emisyonu nedeniyle, metal toprak kirliliğinde sürekli bir artış söz konusudur (Weissmannová ve ark., 2019). Kirli topraklarda en çok bulunan ağır metaller sırasıyla Cr, Pb, Cu, Cd, Zn, Hg ve As'dır (Khalid ve ark., 2017). Ağır metaller yüksek bağl yoğunluğa sahiptir ve düşük konsantrasyonda bile canlılar üzerinde toksik etkiler meydana getirmektedir (Ackova, 2018). İnsan sağlığı açısından kritik ağır metal limitleri Çizelge 1'de verilmiştir. Toprakta ağır metal kirliliği ekolojik çevre, gıda güvenliği, sürdürülebilir tarımın gelişimi için tehdit oluşturmaktadır (Yao ve ark., 2012). Gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarım gelişimi için tehdit oluşturması, metallerin biyolojik olarak parçalanamaması ve yalnızca bir kimyasal durumdan diğerine aktarılabilir ve toprakta oldukça kalıcı olmasından ileri gelmektedir (Naila ve ark., 2019; Sun ve ark., 2020). Toprak, yer kürenin çoğunu örtü halinde kaplayan, iklim ve canlıların, topoğrafik koşullara bağlı olarak zamanla ana materyal üzerine yaptıkları ortak etkiler sonucu ortaya çıkmış, belirli karakteristiklere sahip, dinamik, açık, üç boyutlu, üç fazlı doğal bir bütündür. Toprak pH' sınırın değişmeye karşı gösterdiği direnç yani toprak

tamponlama özelliğine bağlı olarak toprak kirleticileri toprak bünyesinde tutulmaktadır. Ağır metaller parçalanabilir olmadığından (Kirpichtchikova ve ark., 2006), biyolojik birikim yoluyla besin zincirinin tüm halkalarında ağır metal aktarımı meydana gelebilmektedir. Besin zincirinde oluşan ekolojik kirlilik farklı hastalıklara ve zehirlenmelere neden olabilmektedir (Adriano ve ark., 2004; Vareda ve ark., 2016; Almasi ve ark., 2016). Madencilik sektörü, farklı endüstri kolları, fosil yakıt kullanımı ve tarımsal ilaçların kullanımı gibi insan kaynaklı faaliyetler sonucunda ağır metallerin biyoyararlı ve hareketli formları çevreye yayılmaktadır (Kabata-Pendias, 2000; Bolan ve ark., 2003; Wuana ve Okieimen, 2011). Antropojenik etkiler ile ağır metal kirliliği toprağın mevcut biyotik özelliklerinin zamanla negatif yönde etkilenmesine yol açmaktadır (Çağlarırnak ve Hepçimen, 2010). Ağır metallerin toprakta birikmesi bitki bünyesindeki fizyolojik ve biyokimyasal faaliyetleri yüksek oranda etkilemektedir (Asri ve Sönmez, 2006). Ağır metal kirliliğinin olumsuz sonuçlarının zamanla artması ile çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik giderim teknikleri geliştirilmiştir örneğin üzerine çalışmalarda bulunulmuştur. Toprakta oluşan kirliliğin giderilmesinde belirlenen temel yaklaşımlar insan sağlığı ve ekolojik ortamın refahı için uygun ortam oluşturulması üzerinedir. Toprak kirliliği için uygun giderim yöntemlerinin seçilmesi toprakta bulunan ağır metalin tipine, doğasına, fizikokimyasal özelliklerine ve dağılımına bağlıdır (Schwalfenberg ve ark., 2018; Wuana ve Okieimen, 2011). Toprakta ağır metallerin giderimi için fiziksel, kimyasal, biyolojik teknikler olarak üç temel giderim tekniği bulunmaktadır. Toprakta ağır metal giderim tekniğinin belirlenmesinde uygulanan tekniğin az maliyetli, geniş alanlarda uygulanabilir, olumsuzluğun görüldüğü kirli alanda ağır metalin ciddi oranda mevcut ortamdan giderilebileceği bir teknik seçiminde bulunulması oluşan çevre kirliliğinin önlenmesinde veya kontrol altına alınabilmesinde önemli bir yer edinebilir.

**Çizelge 1.** Türkiye topraklarındaki insan sağlığı açısından ağır metal sınır değerleri (Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, 2010).

**Table 1.** Heavy metal limit values in terms of human health in Turkey (Prime Ministry Legislation Development and Publication General Directorate, 2010).

Kirletici	Toprağın yutulması ve deri teması yoluyla emilim		Uçucu maddelerin dış ortamda solunması	Kaçak tozların dış ortamda solunması		Kirleticilerin yeraltı suyuna taşınması ve yeraltı suyunun içilmesi <sup>1</sup> (mg kg <sup>-1</sup> fırın kuru toprak)	
	(mg kg <sup>-1</sup> fırın kuru toprak)	(mg kg <sup>-1</sup> fırın kuru toprak)		(mg kg <sup>-1</sup> fırın kuru toprak)	(mg kg <sup>-1</sup> fırın kuru toprak)	SF = 10	SF=1
Arsenik	0.4	e	-	471	e	3	1
Bakır	3129	b,c	-	-	f	514	b,g
Kadmiyum	70	b,m	-	1124	e	27	b,g
Kobalt	23	b,c	-	225	e	5	b,g
Krom (toplam)	235	b,c	-	24	e	900000	1
Kurşun	400	n	-	-	f	135	b,g
Nikel	1564	b,c	-	-	f	13	1
Arsenik	0.4	e	-	471	e	3	1
Bakır	3129	b,c	-	-	f	514	b,g

<sup>1</sup> Akifere olan mesafenin 3m'den az olması, akiferin çatlaklı veya karstik olması ya da kirlilik kaynağı alanının 10 hektar veya daha büyük olması koşullarından herhangi birinin geçerli olması halinde seyrelme faktörü SF<sup>DF=1</sup>; diğer durumlarda SF "10" olarak kabul edilmelidir.

<sup>a</sup> Jenerik Kirletici Sınır Değerlerinin hesaplanmasında insan sağlığı üzerine riskler dikkate alınmıştır.

<sup>b</sup> Bu değer hesaplanmasında tehlike endeksi "1" olarak kabul edilmiştir.

<sup>c</sup> Bu kirletici için deri emilim faktörü bulunmadığından sadece toprağın yutulması maruziyet yolu dikkate alınmıştır.

<sup>d</sup> Toprak doygunluk konsantrasyonu (C<sub>sat</sub>).

<sup>e</sup> Bu değer hesaplanmasında kanser riski "10<sup>-6</sup>" olarak kabul edilmiştir.

<sup>f</sup> Bu maruziyet yolu için toksikolojik değer bulunmamaktadır.

<sup>g</sup> Bu değer hesaplanmasında HBL değeri kullanılmıştır.

<sup>h</sup> Bu değer hesaplanmasında Dünya Sağlık Örgütü'nün belirlediği içme suyu standardı kullanılmıştır.

<sup>i</sup> Bu değer hesaplanmasında TS-266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular standardında içme ve kullanma suları için verilmiş olan sınır değer kullanılmıştır.

<sup>j</sup> Bu kirleticiye ait Di, ve Dw değerleri bulunmadığı için bu maruziyet yolu için sınır değer hesaplanamamıştır.

<sup>k</sup> Topraktaki kirletici konsantrasyonu ne olursa olsun, kimyasala özgü özellikler nedeniyle, bu maruziyet yolunun dikkate alınmasına gerek bulunmamaktadır.

<sup>k</sup> Bu sınır değer vinilklorür'e ömür boyunca sürekli olarak maruz kalındığı varsayılarak hesaplanmıştır.

<sup>l</sup> Bu sınır değer vinilklorür'e yetişkinlik döneminde sürekli olarak maruz kalındığı varsayılarak hesaplanmıştır.

<sup>m</sup> Bu sınır değer hesaplanmasında kadmiyum'un besin yoluyla vücuda alınması için belirlenen RFD<sub>a</sub> değeri kullanılmıştır.

<sup>n</sup> Bu değer ABD EPA, 1994'den alınmıştır ([U.S. Environmental Protection Agency, 1994](#). Revised Interim Soil Lead Guidance for CERCLA Sites and RCRA Corrective Action Facilities, EPA/540/F-94/043, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C. Directive 9355.4-12.).

<sup>o</sup> Bu değer talyum sülfat (CAS No. 7446-18-6) için belirlenen RFD<sub>a</sub> değeri kullanılarak hesaplanmıştır.

## Ağır metallerin tanımı ve ağır metal kaynakları

Ağır metaller metalik özelliklere sahip, yoğunluğu 5 g cm<sup>-3</sup>'den büyük ve atomik kütlesi 20'den büyük olan elementlerdir (Şekil 1). Ağır metal sözcüğü, literatüre çevre kirliliği ile dahil olmuştur. Çevrede yaygın olarak kadmiyum (Cd), bakır (Cu), kurşun (Pb), kobalt (Co), arsenik (As), cıva (Hg) ve çinko (Zn) ağır metalleri bulunmaktadır. Zn, Cd, Cu ve Pb'nin tahmini kalıcılık süreleri 70–510 yıl, 13–1100 yıl, 310–1500 yıl ve 740–5900 yıl iken, ([Lindsay ve Doxtader, 1981](#)) ılıman iklim koşullarında tahminen Cd için 75-380 yıl, Hg için 500-1000 yıl ve Cu, Ni, Pb ve Zn için 1000-3000 yıl olarak bildirilmiştir ([He ve ark., 2005](#)).

Şekil 1. Periyodik cetvel içerisinde mevcut ağır metaller ([Ali ve Khan, 2018](#)).

Figure 1. Heavy metals present in the periodic table ([Ali and Khan, 2018](#)).

Hydrogen 1 H 1.0079																				Helium 2 He 4.0026
Lithium 3 Li 6.941	Beryllium 4 Be 9.0122											Boron 5 B 10.811	Carbon 6 C 12.011	Nitrogen 7 N 14.007	Oxygen 8 O 15.999	Fluorine 9 F 18.998	Neon 10 Ne 20.180			
Sodium 11 Na 22.990	Magnesium 12 Mg 24.305											Aluminum 13 Al 26.982	Silicon 14 Si 28.086	Phosphorus 15 P 30.974	Sulfur 16 S 32.065	Chlorine 17 Cl 35.453	Argon 18 Ar 39.948			
Potassium 19 K 39.098	Calcium 20 Ca 40.078	Scandium 21 Sc 44.956	Titanium 22 Ti 47.867	Vanadium 23 V 50.942	Chromium 24 Cr 51.996	Manganese 25 Mn 54.938	Iron 26 Fe 55.845	Cobalt 27 Co 58.933	Nickel 28 Ni 58.693	Copper 29 Cu 63.546	Zinc 30 Zn 65.38	Gallium 31 Ga 69.723	Germanium 32 Ge 72.64	Arsenic 33 As 74.922	Selenium 34 Se 78.96	Bromine 35 Br 79.904	Krypton 36 Kr 83.798			
Rubidium 37 Rb 85.468	Sr 87.62	Yttrium 39 Y 88.906	Zirconium 40 Zr 91.224	Niobium 41 Nb 92.906	Molybdenum 42 Mo 95.94	Technetium 43 Tc [98]	Ruthenium 44 Ru 101.07	Rhodium 45 Rh 101.07	Palladium 46 Pd 106.42	Silver 47 Ag 107.87	Cadmium 48 Cd 112.41	Indium 49 In 114.82	Tin 50 Sn 118.71	Antimony 51 Sb 121.76	Te 127.60	Iodine 53 I 126.90	Xenon 54 Xe 131.29			
Cesium 55 Cs 132.91	Barium 56 Ba 137.33		Hafnium 72 Hf 178.49	Tantalum 73 Ta 180.95	Tungsten 74 W 183.84	Rhenium 75 Re 186.21	Osmium 76 Os 190.23	Iridium 77 Ir 192.22	Platinum 78 Pt 195.08	Gold 79 Au 196.97	Mercury 80 Hg 200.59	Thallium 81 Tl 204.38	Lead 82 Pb 207.2	Bismuth 83 Bi 208.98	Po [209]	Astatine 85 At [210]	Rn [222]			
Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]		Rutherfordium 104 Rf [261]	Dubnium 105 Db [262]	Seaborgium 106 Sg [266]	Berkelium 107 Bh [267]	Hassium 108 Hs [268]	Mendelevium 109 Mt [271]	Darmstadtium 110 Ds [271]	Roentgenium 111 Rg [272]										
Lanthanum 57 La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Promethium 61 Pm [145]	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.05	Lu 174.97						
Actinium 89 Ac [227]	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkelium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [268]	Nobelium 102 No [269]	Lr [262]						

Ağır metaller genellikle toprak partiküllerine adsorbe halde bulunabildikleri gibi organik bileşikler meydana getirerek, minerallerin yapısına bağlı şekilde, şelatlı bileşiklerin bünyesinde çözülmüş halde, farklı hallerde bağlı iyon ya da katı halde

çözeltiler formunda bulunabilmektedirler ([Kafadar ve Saygıdeğer, 2010](#)). Ağır metaller toprağın oluşumu esnasında ana materyalin bünyesinde silikat, sülfür ve karbonat halinde sabit bileşik şeklinde ya da doğal olarak silikatların bünyesinde adsorbe halde bulunabilmektedir ([Okçu ve ark., 2009](#)). Doğal olarak yer kürenin yapısında yer almasının yanında antropojenik faaliyetler ile sanayileşme, kentleşme ve yoğun tarımsal işlemler, toprakların ve çevrenin ağır metal yayılımının temel kaynaklarıdır ([He ve ark., 2005](#)).

### **Ağır metal kirliliği**

Ağır metaller topraklarda uzun süre kalması, geri döndürülemez, az miktarda transfer miktarı, yüksek toksisite, karmaşık kimyasal özellikler ve ekolojik tepki gibi özelliklere sahip olmasından dolayı toprak kirliliğinde önemli bir terimdir. Ağır metaller inorganik kirleticiler arasında yer almaktadır. Toprağa doğal ve insan faaliyetleri ile ulaşan ağır metaller katyon değişim kapasitesi ve demir ve alüminyum oksitler, kil, toprak organik maddesi ile toprakta hareketsiz yani immobil olan ağır metallerin toprak içerisindeki birikimi indirgenebilmektedir. Bunların haricinde örneğin, organik karbon, toprak tekstürü, toprak sıcaklığı, toprağın su içeriği, kil tipi, fosfor, bikarbonatlar ve karbonat gibi farklı faktörlerde ağır metallerin toprak mevcudundaki aktif hareketlerini etkilemektedir ([Yerli ve ark., 2020](#)). Toprak çözeltisindeki katyonların değişebilir durumu fazla olan kil miktarı yüksek topraklar ve organik madde bakımından zengin topraklar, yüksek miktarda ağır metali tutabilmektedir. Bu tip topraklarda ağır metal kirliliği daha fazla etkili olmaktadır. Ağır metallerin kil ve organik maddeye bağlanmaları nedeniyle toprağın üst katmanında yoğun olarak bulunmaktadırlar ([Kızıloğlu ve ark., 2008](#); [Montiel ve ark., 2016](#)). Ağır metallerin meydana getirdiği kirlilik bir ekosistemden diğer ekosistemlere besin zinciri yoluyla kolayca aktarılmaktadır. Ekosistem zincirinde oluşan kirlilik, canlıların bünyesine alınması ile büyük olumsuzluklara neden olmaktadır ([Vareda ve ark., 2016](#)). FAO tarafından sulama suyu, toprak ve bitkilerde toksik ağır metal konsantrasyonu için izin verilen sınır değerleri Çizelge 2’de gösterilmiştir. Bazı ülkelerin tarım topraklarındaki ağır metallerin kritik limitleri Çizelge 3’te gösterilmiştir. Ülkemiz topraklarında ağır metal konsantrasyonu gün geçtikçe artmaktadır. Ağır metal kirliliği için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

[Varol ve Erdem \(2020\)](#), tarafından yapılan çalışmada; Özellikle sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerden, toprak kirliliği seviyesini belirlemek için çalışma yapılmıştır. ICP MS cihazıyla yapılan ölçümlerde baryum (Ba) 135.5-389.7 mg kg<sup>-1</sup> değerleri arasında bulunmuştur ve mevzuatta izin verilen limitlerin üzerinde bir değer olduğu saptanmıştır. Ni, Co ve Cr gibi elementler mevzuatta izin verilen limitlerin altında değerlerde ölçülmüştür.

[Özkul \(2019\)](#) tarafından yapılan çalışmada, Kütahya ilinde çocuk parklarındaki toprakların ağır metal içerikleri değerlendirilmiştir. Kütahya il merkezi yerleşim bölgesinde olan 19 çocuk parkından 0-10 cm derinliğinde toprak örnekleri alınmış ve Cd, As, Hg, Cu, Cr, Zn, Pb ve Ni ağır metallerinin analizleri ICP-MS yöntemi ölçülmüştür. Arsenik (As) için 9.60-260.90 mg kg<sup>-1</sup>, kadmiyum (Cd) için 0.07-1.24 mg kg<sup>-1</sup>, krom (Cr) için 16.10-55.50 mg kg<sup>-1</sup>, bakır (Cu) için 9.13-65.23 mg kg<sup>-1</sup>, civa (Hg) için 0.02-0.60 mg kg<sup>-1</sup>, nikel (Ni) için 24.70-121.30 mg kg<sup>-1</sup>, kurşun (Pb) için 13.06-113.60 mg kg<sup>-1</sup> ve Zn için 28.70-252.90 mg kg<sup>-1</sup> aralığında ağır metal konsantrasyonlarında olduğu tespit edilmiştir.

[Özkan \(2017\)](#) yaptığı çalışmada; Antakya-Cilvegözü karayolu çevresindeki tarım alanlarında ağır metal kirliliği ve karayolu uzaklığının toprakta ağır metal birikimi üzerine değişim durumu araştırılmıştır. ICP-OES cihazı kullanılarak ağır metaller, Pb 0.130-0.780 mg kg<sup>-1</sup>, Cd 0-0.265 mg kg<sup>-1</sup>, Ni 0.370-3.97 mg kg<sup>-1</sup>, Cr 0-0.120 mg kg<sup>-1</sup>, Co 0-1.83 mg kg<sup>-1</sup>, Al 0-0.700 mg kg<sup>-1</sup>, Fe 1.45-22.8 mg kg<sup>-1</sup>, Cu 0.385-5.43 mg kg<sup>-1</sup>, Mn 1.96-27 mg kg<sup>-1</sup>, Zn 0-4.26 mg kg<sup>-1</sup> değerleri arasında ölçülmüştür. Topraktaki demir (Fe) elementinin izin verilen sınır değerlerinin üzerinde olduğu saptanmıştır. Toprakta ağır metal konsantrasyonunun karayolu ile uzaklık arttıkça azaldığı tespit edilmiştir.

Topraktaki ağır metallerin toprak çözeltisi içerisindeki hareketliliği toprak pH'ına bağlı olarak değişmektedir. Toprakta ağır metal toksisitesi ile toprak pH'ı etkileşimindedir ([Cherfouh ve ark., 2018](#); [Leuther ve ark., 2019](#)). Toprakta hidrojen iyonlarının konsantrasyonlarının artışı sonucu toprakta asidik koşullar artmakta ve hidrojen iyonları ağır metallerle göre yüksek çekimle toprağa bağlanmakta bu durum sonucunda da ağır metallerin serbest hale gelebilmektedir ([Singh ve ark., 2016](#)).

Yüksek seviyelerdeki ağır metaller bitki büyümesi için zararlıdır ([Ghani, 2010](#)). Bitkinin metabolik olaylarının olumsuz etkilenmesiyle bitkisel üretimde verim düşüklüğü meydana getirmektedir. Ağır metaller tohumların çimlenmesini birçok yönden etkilemektedir ve bundan dolayı potansiyel olarak mahsul verimini azaltmaktadır ([Ahmad ve Ashraf, 2011](#)). Özel yapıdaki bazı bitki türleri zarara uğramadan bünyelerinde ağır metalleri biriktirebilmektedirler ([Wei ve Chen, 2006](#)). Ağır metallerin olumsuz etkilerine rağmen tolerans göstererek bünyelerinde ağır metalleri muhafaza eden bitkilere akümülatör bitkiler denir. Örneğin; [Mohsenzadeh ve Mohammadzadeh \(2018\)](#) tarafından yapılan çalışmada fitoremediasyon testleri deneysel saksılar kullanılarak yapılmış, İran'ın Hamedan şehrinde bulunan çinko ve kurşun maden alanında yetiştirilen bitkilerin ağır metali bünyelerini alma kapasitelerini araştırmak için, *Conium maculatum*, *Stachys inflata* ve *Reseda lutea* üç baskın bitkinin vejetatif aksamında Cu, Pb, Zn, Cd ve Ni konsantrasyonlarına atomik absorpsiyon spektrometresi ile ölçülmüştür. *C. maculatum* Pb ve Zn'nin giderilmesinde, *S. inflata* Ni'nin azaltılmasında ve *R. lutea* Cu'nun azaltılmasında etkili olabileceği saptanmıştır.

**Çizelge 2.** Sulama suyu, toprak ve bitkilerde toksik ağır metal konsantrasyonu için izin verilen sınır değerleri ([WHO/FAO, 2007](#)).

**Table 2.** Allowable limit values for toxic heavy metal concentration in irrigation water, soil and plants ([WHO/FAO, 2007](#)).

Metal	Sulama suyu (µg ml <sup>-1</sup> )	Toprak (µg g <sup>-1</sup> )	Bitki (µg g <sup>-1</sup> )
Cd	0.01	3	0.2
Cu	0.20	140	40
Ni	1.40	50	67
Pb	0.015	300	0.30
Zn	2.0	300	60
Hg	0.01	30	0.03
Cr	0.10	150	5
As	0.01	20	0.1
Fe	0.50	50.000	450
Mn	0.20	80	500

**Çizelge 3.** Bazı ülkelerin tarım topraklarındaki bazı ağır metallerin kritik limitleri (Chokor ve Ekanem, 2016).

**Table 3.** Critical limits of some heavy metals in agricultural soils of some countries (Chokor and Ekanem, 2016).

Ülke	Bazı ağır metallerin tarım topraklarında kritik limitleri (mg kg <sup>-1</sup> ) (Chokor and Ekanem, 2016)				
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Kanada	0.5	20	30	25	50
Danimarka	0.3	50	30	40	100
Finlandiya	0.3	80	32	38	90
İsviçre	0.8	75	50	50	200
İrlanda	1.0	100	50	50	150
Rusya	0.2	90	55	32	100

### Toprakta ağır metal giderim yöntemleri

Topraklarda meydana gelen ağır metal kirliliğinin iyileştirilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Temelde ikiye ayrılan bu yöntemler kirlenmiş toprağın yerinde iyileştirilmesi (in-situ) ve kirlenmiş toprağın alınarak başka yerde iyileştirilmesidir (ex-situ) (Gomes ve ark., 2013). Toprakta ağır metal kirliliğini iyileştirme yönteminin seçimi, sahanın özelliklerine, giderilecek kirleticilerin türlerine, kirleticinin konsantrasyonuna ve kirlenmiş ortamın son kullanıldığı duruma bağlı yapılmalıdır (Bhandari ve ark., 2007). İyileştirme yöntemleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerle gerçekleştirilmektedir.

Fiziksel iyileştirme yöntemleri: toprak değiştirme, izolasyon, çevreleme yöntemi ve ısıl işlem dahil olmak üzere fiziksel teknolojileri kullanarak toprağa verilen hasarı tersine çevirme veya durdurma süreci içeren işlemlerdir (Yao ve ark., 2012).

Toprak değiştirme teknolojilerinde, toprak yüzeyini kaplamak için fazla miktarda kirlenmemiş toprak kullanılmaktadır. Bu işlem ağır iş yükü ve yüksek maliyeti nedeniyle dar alanlar için daha uygundur.

Toprak izolasyonu teknolojileri, kirlenmiş alanların çevresine kirliliği taşımasını engellemek için bariyer duvarlarla etrafının kaplanması sağlanan sistemlerdir. Çelik, çimento, bentonit ve harç gibi geçirimsiz malzemelerden yapılmış fiziksel bariyerler, dikey ve yatay muhafaza için kullanılır. Toprak izolasyonu veya çevreleme yöntemleri doğrudan iyileştirme yöntemleri içerisinde yer almamaktadır (Jankaite ve Vasarevičius, 2005). Isıl işlemde toprağın ısıtılarak iyileştirilmesi için kirleticinin uçuculuğu ile gerçekleştirilir (Song ve ark., 2017).

Kimyasal iyileştirme yöntemleri: kirlenmiş ortamdaki kirleticileri çıkarmak veya stabilize etmek için kimyasalların kullanımını içermektedir. Toprak yıkama ve immobilizasyon teknikleri (katılaştırma/stabilizasyon, vitrifikasyon ve elektrokinetik yöntem) dahil olmak üzere çeşitli kimyasal iyileştirme yöntemlerini içermektedir.

Toprakta yıkama yöntemleri, kirlenmiş toprağı temiz su, reaktifler ve diğer sıvılar ile topraktan kirleticileri süzmek amacıyla toprağın yıkanmasından meydana gelmektedir (Derakhshan Nejad ve ark., 2018). Ağır metal giderimi için su (Dermont ve ark., 2008), saponin (Maity ve ark., 2013), organik asit (Kim ve ark., 2013), şelatlayıcı maddeler (Jiang ve ark., 2011) yüzey aktif maddeler (Sun ve ark., 2011) ve

düşük moleküler ağırlıklı organik asitler ([Almaroai ve ark., 2012](#)) gibi maddelerin topraklardaki kirleticilerin desorpsiyonunu etkilediği saptanmıştır.

[Zhai ve ark. \(2018\)](#) tarafından yapılan çalışmada, kireç, biochar ve siyah karbon kullanılarak toprak yıkama işlemi ve yerinde hareketsizleştirme çalışılmıştır. FeC kombinasyonu ile yıkama işleminden sonra Cd, Pb, Zn ve Cu metallerinde sırasıyla %62.9, %52.1, %30.0 ve %16.7 azalma saptanmıştır. Kireç ilavesi ile Cd, Cu, Pb ve Zn'nin biyoyararlanımında %36.5, %73.6, %70.9 ve %53.4 azalma belirlenmiştir. Aynı zamanda toprakta mikrobiyolojik iyileşmede olumlu etki gösterdiği tespit edilmiştir.

İmmobilizasyon teknikleri, çözünmeyen veya zor hareket eden, düşük toksik maddeler oluşturmak amacıyla kirlenmiş toprağa reaktifler veya materyaller eklenmesiyle ağır metallerin su, bitki ve diğer çevresel ortamlara geçişini azaltılmasının sağlanmasıyla yapılan tekniklerdir ([Yao ve ark., 2012](#)).

[Ren ve ark. \(2020\)](#) yaptıkları çalışmada, Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> domuz gübresi biyokömürü (PSMB) hazırlanmış ve toksik metallerin (Cd ve Pb) içeriği ve toprak besin elementi düzeyi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için araştırılmıştır. PSMB'nin maksimum %3 oranında eklenmesi, Fengxian ve Kunming toprağında DTPA ile ekstrakte edilebilir Cd (%34.02 ve %47.73) ve Pb (%18.70 ve %24.58) konsantrasyonlarını önemli seviyede azalttığı saptanmıştır.

Vitrifikasyon teknikleri, aşırı yüksek sıcaklıkta çoğu inorganik kirleticiyi hareketsiz hale dönüştürülmesi ile oluşan tekniklerdir ([USAEC, 2000](#)).

[Navarro ve ark. \(2013\)](#) yaptığı çalışmada, İspanya'daki gümüş ve kurşun madenlerinden çıkan kirleticilerin güneş enerjisi teknolojisini kullanarak vitrifikasyon tekniği ile ıslahı çalışılmıştır. Vitrifikasyonun 1350°C'de Mn, Zn, Cu, Fe ve Ni' in immobilizasyonuna ile sonuçlandığını, 1050 °C' de ise Mn, Ni, Zn ve Cu'nun mobilize olduğunu saptamışlardır.

Elektrokinetik teknikler, kirletici yüklü türleri hareketli hale getirerek elektrotlarla doğru akım uygulamasıyla sağlanan tekniklerdir ([Dindar ve ark., 2017](#)).

[Azhar ve ark. \(2016\)](#) yılında yapılan çalışmada, elektrokinetik ve biyoremediasyon ıslah teknikleri birlikte kullanılmıştır. 50 V m<sup>-1</sup> elektrik gradyanı kullanılarak 7 gün boyunca, anotta Lysinibacillus fusiformis bakterisi uygulanmıştır. Uygulama sonucu yaklaşık %78 civarında cıva konsantrasyonunda azalma olduğu tespit edilmiştir.

[Kim ve ark. \(2012\)](#) tarafından yapılan çalışmada, arsenik (As) ile kontamine olmuş toprağın ex-situ elektrokinetik ıslahı değerlendirilmiştir. As'ın desorpsiyonunu arttırmak için sırasıyla katolit ve anolit olarak etilendiamin tetraasetik asit (EDTA) ve sodyum hidroksit, siltli ve kumlu killi toprakta uygulanmıştır. Arsenik ortalama %78'i sekiz hafta sonra iki toprak tipinden uzaklaştırılmıştır. Toprak tiplerinde ortalama kaldırma oranları sırasıyla 1.06 ve 1.55 mg kg<sup>-1</sup> gün<sup>-1</sup> olduğu saptanmıştır.

Biyolojik iyileştirme teknikleri: Biyoremediasyon işlemleri, kirlenmiş ortamın çevre dostu bir şekilde bitkilerin ve makro ve mikro organizmaların kullanılarak iyileştirilmesi temelinde yapılan işlemlerden oluşur ([Dindar ve ark., 2017](#)). Biyoremediasyon işlemlerinde, kirlenmiş ortamdan kirleticileri uzaklaştırmak, tümünden gidermek veya hareketsiz duruma getirmek amacıyla bitkilerin ve mikroorganizmaların biyolojik mekanizmaları kullanılmaktadır ([Ayangbenro ve Babalola, 2017](#)). Biyoremediasyon teknikleri diğer fiziksel ve kimyasal tekniklerle kıyaslandığında büyük alanlar için daha az maliyetli ve çevre dostu bir tekniktir ([Blaylock ve ark., 1997](#)). Biyoremediasyon teknikleri sıcaklık, pH, nem, oksijen gibi faktörlerden etkilenebilmektedir ([Dandan ve ark., 2007](#); [Yao ve ark., 2012](#)).



Kirlenmiş ortamların temizlenmesi için yararlanılan mikroorganizmalar toprak içerisinde bulunan ağır metalleri ayrıştıramaz/parçalayamaz ancak ağır metalleri çeşitli fiziksel ve kimyasal formlarına dönüştürerek bünyelerine alabilmektedirler (Bosecker, 1999). Kirlenmiş topraklarda genelde ağır metallerin uzaklaştırılmasında kullanılan mikroorganizmalar bakteri ve mantarlardır fakat maya ve algler de ağır metal uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır (Coelho ve ark., 2015). Kirlenmiş ortamlarda ağır metallerin uzaklaştırılmasında bitki ve mikroorganizmaların birlikte kullanılması ile daha hızlı ve etkili sonuç alınmaktadır (Vangronsveld ve ark., 2009). Biyoremediasyon ile ağır metallerin uzaklaştırılması işlemlerinin iyi bir sonuç vermesi için ortam şartlarının biyoremediasyonu sağlayacak organizmalar için uygun olması ve uzaklaştırılması yapılacak ortamda yeterli organizma bulunması gerekmektedir. Biyobirikim, biyoliç (metallerin çözünebilir forma dönüşümü), biyosorpsiyon, biyotransformasyon ve biyomineralizasyon ve metal ile mikroorganizma etkileşimleri biyoremediasyonun bazı mekanizmaları olarak yer almaktadır (Sikkema ve ark., 1995). De ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada, Kadmiyum ve kurşun detoksifiye etme potansiyellerini değerlendirmek için 25 ppm'de veya daha yüksek cıva konsantrasyonlarında büyüeyebilen cıvaya karşı oldukça dirençli olan *Alcaligenes faecalis*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Brevibacterium iodinium* bakterileri 100 ppm olan büyüme ortamından sırasıyla 72 ve 96 saat içinde Cd'nin %70'inden fazlasını ve Pb'nin %98'ini çıkardığı gözlemlenmiştir. Hg, Cd ve Pb için detoksifikasyon etkinlikleri, ağır metallerin biyoremediasyonunda önemli bir uygulama olabileceği saptanmıştır.

Özbucak ve ark. (2018) yaptığı çalışmada, Cu (bakır), Pb (kurşun), Zn (çinko) maden yatağı topraklarından izole edilen bazı bakterilerin, Biyoremediasyon potansiyelleri araştırılmıştır. *Pseudomonas luteola*, *Paenibacillus polymyxa* ve *Pseudomonas stutzeri* ağır metal absorbe potansiyeli yüksek olan bu türler, kültür ile çoğaltılmıştır. *P. polymyxa* ve *P. luteola* bakterilerinin birbirlerinden ayrı olarak bakır elementini, *P. luteola* ve *P. polymyxa* bakterilerinin kombinasyonlarında ise çinko elementini uzaklaştırmada etkili oldukları tespit edilmiştir. *P. polymyxa* ve *P. luteola* bakterinin ayrı ve birlikte olduğu uygulama ortamında kurşun miktarının saptanmıştır.

Fitoremediasyon teknolojileri: Fitoremediasyon, kirlenmiş toprakta kirleticiyi azaltarak temizlemek için kirleticileri sabitlemek veya adsorbe etmek amacıyla kullanılan tekniklerdir (Yao ve ark., 2012). Fitoremediasyon teknolojileri arasında fitoekstraksiyon, rizofiltrasyon, fitostabilizasyon, fitovolatilizasyon ve fitodegradasyon yer almaktadır (Kong ve Glick, 2017).

Toprakta metal kirleticilerin temizlenmesinde, rizofiltrasyon, fitostabilizasyon fitoekstraksiyon yöntemleri kullanılmaktadır. Toprakta organik kirleticilerin temizlenmesinde ise rizodegradasyon, fitovolatizasyon, fitodegradasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Aybar ve ark., 2015). Akümülatör bitkiler, toprakta olan metal varlığına kıyasla toprak üstü aksamına daha fazla metal biriktirebilen ve toprak ağır metal ıslahında kullanılabilen bitkilerdir (Baker ve Walker, 1990). Hiperakümülatör bitkiler, topraktaki metal seviyesinden 50-500 kat daha fazla toprak üstü aksamlarında metal biriktirebilen bitkilerdir (Clemens, 2006). En çok bilinen hiperakümülatör bitkilerden, *Thlaspi*, *Chenopodium*, *Urtica*, *Polygonum sachalase* ve *Allyssim* bitkisel aksamlarında kadmiyum, nikel, bakır, çinko ve kurşun gibi metalleri biriktirme potansiyelleri yüksek bitkilerdir (Mulligan ve ark., 2001).

Fitostabilizasyon, çevredeki kirleticilerin hareketliliğini ve biyoyararlanımını azaltmayı amaçlamaktadır (Radziemska ve ark., 2018). Genelde erozyonun meydana geldiği alanlarda kirlilik görülen yerden kirleticinin toprakla temasını önlemek ve yer altı sularına sızmasının önüne geçilmesi amacıyla yapılmaktadır (Bert ve ark., 2009). Fitostabilizasyon tekniğinde bitkiler kökleri ile kirleticiyi fiziksel ve kimyasal olarak sabitlemektedirler (Jabeen ve ark., 2009).

Zeng ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, *Osmanthus fragrans* (OF), *Ligustrum vicaryi* L. (LV), *Loropetalum chinense var. rubrum* (LC), *Cinnamomum camphora* (CC) ve *Euonymus japonicas cv. aureomar* (EJ) beş farklı süs bitkisinde, sera koşullarında; Cd (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O formunda uygulanan kadmiyum (0, 6, 21 mg kg<sup>-1</sup>) dozlarında bitkilere uygulanmıştır. Sonuçlara olarak, süs bitkilerinin toprak kadmiyum içeriği 24.6 mg kg<sup>-1</sup> 'den az bulunmuştur. Gelişimlerinde herhangi bir sorun olmadığı ve kadmiyumun OF, LV, LC ve EJ bitkilerinin köklerinde biriktiği saptanmıştır. Süs bitkilerinin fitostabilizasyon da kullanılmasının önemli olabileceği düşünülmektedir.

Yang ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, *Alternanthera philoxeroides*, *Artemisia princeps*, *Bidens frondosa*, *Bidens pilosa*, *Cynodon dactylon*, *Digitaria sanguinalis*, *Erigeron canadensis* ve *Setaria plicata* bitki türlerinin Cd, Mn, Pb ve Zn ağır metallerinin biyokonsantrasyonları üzerine çalışılmıştır. Cd, Mn, Pb ve Zn için ilişkili topraklardan, biyokonsantrasyon faktörleri sürgünler ve köklerde 1'den az bulunmuştur. Özellikle mangan (Mn) fitostabilizasyonu için, sekiz bitki çeşidinin, ağır metallerle karşı gösterdiği toleransın yüksek olduğu ve fitostabilizasyon tekniği için potansiyel bitki olabileceklerini saptamışlardır.

Fitoekstraksiyon, ortamdaki kirleticileri uzaklaştırmak ve toprağın uzun süreli temizliğini sağlamak amacıyla bitki kökleri tarafından topraktan kirleticilerin alınması, topraktan alınan kirleticilerin sürgüne veya diğer hasat edilebilir bitki aksamalarına taşınması anlamına gelmektedir (Bhargava ve ark., 2012). Hiperakümülatör bitkiler, kirleticileri bünyelerinde biriktirme potansiyelleri yüksek olabildiği için, fitoekstraksiyon da kullanılabilen bitki türleri arasında kullanılmasının avantajlı olabileceği düşünülmektedir (Cristaldi ve ark., 2017).

Guo ve Miano (2010) tarafından yapılan bir çalışmada; çok yıllık otsu bitki *Arundo donax*'ın kadmiyum (Cd) ile kirlenmiş bir toprağa karşı fitoekstraksiyon kapasitesini değerlendirmişler sonucunda, yapraklarda ve rizomlarda sırasıyla 2.92-4.02 mg kg<sup>-1</sup> ve 0.57-1.42 mg kg<sup>-1</sup> arasında değerler elde etmişlerdir. Cd ile kirlenmiş toprağın fitoekstraksiyonda kullanılan *Arundo donax*'ın Cd'ı biriktirme kapasitesi açısından önemli olduğu saptanmıştır.

Salam ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, bakır (Cu) ve çinko (Zn) kirliliği görülen maden sahasında, dört *Salix* çeşidinin bitki gelişimi, bakır, çinko alımı ve fitoekstraksiyon kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Çeşitlerde sürgünler, yapraklar ve köklerdeki toplam bakır konsantrasyonları 163-474 mg kg<sup>-1</sup> ve çinko konsantrasyonları 776 -1823 mg kg<sup>-1</sup> arasında bulunmuştur. Sonuç olarak, *Salix* çeşitlerinin önemli miktarda Cu ve Zn biriktirme potansiyelinin olduğu saptanmıştır.

Rizofiltrasyon, karasal veya sucul ekosisteme ait bitkilerin, köklerinden kirleticiyi emerek, konsantre etmek ve biriktirmek amacıyla kullanılmalıdır (Jadia ve Fulekar, 2009). Kara bitkileri kök alan miktarlarını arttırması ve potansiyel olarak toksik metalleri etkili bir şekilde ortadan kaldıran lifli ve uzun kök sistemlerine

sahip olmaları nedeniyle sucul bitkilere göre daha çok tercih edilmektedirler ([Ghori ve ark., 2015](#)).

[Ignatius ve ark. \(2014\)](#) yapılan çalışmada, Pb içeren atık suyun *P. amboinicus* bitkisi tarafından rizofiltrasyonunun araştırılmıştır. 15 gün süresince hidroponik ortamda yetiştirilen aynı boyutlardaki *P. amboinicus* bitkileri, Pb (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> olarak sağlanan 5-200 mg l<sup>-1</sup> Pb içeren 100 ml damıtılmış su içinde uygulanmıştır. 20 günlük uygulamada bitki 100 mg l<sup>-1</sup> Pb'ye kadar tolere etmiş ve (0, 5, 15, 25, 50, 100, 200) mg l<sup>-1</sup> Pb konsantrasyonlarında sırasıyla (8.7, 9.26, 10.5, 11.11, 11.36, 11.76, 12.02) mg kg<sup>-1</sup> ölçülmüştür. Pb'yi genelde köklerde biriktirerek toprak üstü aksamına taşınmasını kısıtladığı saptanmıştır.

[Meyers ve ark. \(2018\)](#) tarafından yapılan çalışmada, hidroponik ortamda yetiştirilen *Brassica juncea* (Hardal otu), 14 günlük büyüme periyodunda (3 günlük uygulama; kurşun (Pb) aktiviteleri 3.2, 32 ve 217) tarafından tutulan kurşun alımı ve dağılımı araştırılmıştır. X-ışını fotoelektron spektroskopisi ile yapılan ölçümde kurşun (Pb) birikimi kök uçlarında yoğun bir şekilde tespit edilmiştir. *B. juncea* fazla dallanan kökleri nedeniyle ağır metal rizofiltrasyonunda kullanılabileceği saptanmıştır.

Fitoremediasyon için bitki türleri hızlı büyümeli, bol vejetatif aksam, yüksek konsantrasyonlu metallere tolerans ve yüksek metal biriktirme yeteneği gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir ([Jabeen k 2009](#)).

## SONUÇ

Doğal ve insan faaliyetleri sonucu toprak kirliliği oluşmaktadır. Ağır metaller yüksek yoğunluklu toksik metallerdir. Başta toprakta ağır metal birikimiyle birlikte bitkinin bünyesine alınarak, özellikle insanların ve hayvanların tüketimi ile çok büyük riskler meydana getirmektedir. Ağır metallerin toprakta birikmesi toprakta kalite kaybı, bitkinin metabolik olaylarında gerileme meydana gelmesi ve devamında durması, insan ve hayvanlarda nörolojik ve kanserojenik olumsuzluklar doğurabilmektedir. Önemli bir sorun olan ağır metal kirliliğinin toprak bünyesinden giderilmesi veya en az düzeye indirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu açıdan yapılacak olan çalışmaların daha fazla kirliliğe sebep olmaması, ekosistemin korunması adına çevre dostu ve geniş alanlarda uygulanabilir olmalarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, ıslah teknikleri göz önüne alınacak olunursa biyoremediasyon ve fitoremediasyon teknolojilerinin çevre dostu ve uygun maliyetli olmaları nedeniyle ağır metal kirliliğinin giderimi ve toprak sağlığının düzeltilmesi üzerine yapılan çalışmaların daha çok artırılması gerekmektedir. Biyoremediasyon ve fitoremediasyon teknolojilerinde kullanılan tekniklerin kombinasyonlarının daha etkili ve hızlı sonuç verebileceği düşünülmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar olarak herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederiz.

## YAZAR KATKISI

Yazarlar olarak makaleye aşağıdaki katkıların sunulduğunu beyan ederiz.

**Osman Sönmez:** Verilerin incelenmesi, makalenin son şeklinin verilmesi.

**Fatma Nur Kılıç:** Çalışmanın planlanması, literatür taraması, makalenin genel kontrolü.

## KAYNAKLAR

- Ackova DG (2018). Heavy metals and their general toxicity on plants, *Plant Science Today*, 5: 15-19.
- Adriano DC, Wenzel WW, Vangronsveld J and Bolan NS (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122: 121-142.
- Ahmad MSA and Ashraf M (2011). Essential roles and hazardous effects of nickel in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 214: 125-167.
- Ali H and Khan E (2018). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100: 6-19.
- Almaroai YA, Usman ARA, Ahmad M, Kim KR, Moon DH, Lee SS and Ok YS (2012). Effects of synthetic chelators and low-molecular-weight organic acids on chromium, copper, and arsenic uptake and translocation in Maize (*Zea mays* L.). *Soil Science*, 177: 655-663.
- Almasi A, Dargahi A, Ahagh MMH, Janjani H, Mohammadi M and Tabandeh L (2016). Efficiency of a constructed wetland in controlling organic pollutants, nitrogen, and heavy metals from sewage. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9: 2924-2928.
- Asri FÖ ve Sönmez S (2006). Ağır metal toksisitesini bitki metabolizması üzerine etkileri. *Derim* 23: 36-45.
- Ayangbenro AS and Babalola OO (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1): 94.
- Aybar M, Bilgin A ve Sağlam B (2015). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi, *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2): 59-65.
- Azhar ATS and Nabila ATA, Nurshuhaila MS, Zaidi E, Azim, MAM and Farhana SMS (2016). Assessment and comparison of electrokinetic and electrokinetic bioremediation techniques for mercury contaminated soil. *International engineering research and innovation symposium (IRIS) IOP Publishing IOP Conference Series. Materials Science Engineering*, 160: 1-8.
- Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü (2010). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100608-3.htm> (08/06/2010).
- Baker AJM and Walker PL (1990). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants, in: Shaw A.J. (Ed.), Heavy metal tolerance in plants: *Evolutionary Aspects*, CRC Press, Boca Raton, 155-177.
- Bert V, Seuntjens P, Dejonghe W, Lacherez S, Thuy HTT and Vandecasteele B (2009). Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites. *Environmental Science and Pollution Research*, 16: 745-764.
- Bhandari A, Surampalli, RY, Champagne P, Ong SK, Tyagi RD and Lo IMC (2007). Remediation technologies for soils and groundwater. *Remediat. Remediation Technologies for Soils and Groundwater*, 60: 1-449.
- Bhargava A, Carmona FF, Bhargava M and Srivastava S (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105: 103-120.
- Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley BD and Raskin I (1997). Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environmental Science & Technology*, 31: 860-865.
- Bolan NS, Adriano DC and Naidu R (2003). Role of phosphorus in (im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 177: 1-44.
- Bosecker K (1999). Microbial leaching in environmental clean-up programmes. *Process Metall*, 9: 533-536.
- Chen M, Xu P, Zeng G, Yang, C, Huang D and Zhang J (2015). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs. *Biotechnology Advances*, 33: 745-755.
- Cherfouh R, Lucas Y, Derridj A and Merdy P (2018). Long-term, low technicality sewage sludge amendment and irrigation with treated wastewater under Mediterranean climate: impact on agronomical soil quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 35571-35581.

- Chokor AA and Ekanem EO (2016). Heavy metals contamination profile in soil from automobile workshops in sapele, Nigeria. *World Journal of Analytical Chemistry*, 4(2): 26-28.
- Clemens S (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11): 1707-1719.
- Coelho M, Luciene M, Rezende HC, Coelho Luciana M, de Sousa PAR, Melo DFO and Coelho NMM (2015). Bioremediation of polluted waters using microorganisms. *Adv. Bioremediation Wastewater Polluted Soil*, 1-22.
- Cristaldi A, Conti G, Jho EH, Zuccarello P, Grasso A, Copat C, and Ferrante M (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8: 309-326.
- Çağlarınmak N ve Hepçimen Z (2010.) Ağır metal toprak kirliliğinin gıda zinciri ve insan sağlığına etkisi. *Akademik Gıda*, 8: 31-35.
- Dandan W, Huixin L, Feng H and Xia W (2007). Role of earthworm-straw interactions on phytoremediation of Cu contaminated soil by ryegrass. *Acta Ecologica Sinica*, 27: 1292-1298.
- De J, Ramaiah N and Vardanyan L (2008). Detoxification of toxic heavy metals by marine bacteria highly resistant to mercury. *Marine Biotechnology*, 10(4): 471-477.
- Derakhshan NZ, Jung MC and Kim KH (2018). Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environmental Geochemistry and Health*, 40: 927-953.
- Dermont G, Bergeron M, Mercier G and Richer-Lafleche M (2008). Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications. *Elsevier*, 152(1): 1-31.
- Dindar E, Şen CN, Topaç ŞFO ve Başkaya HS (2017). Topraklarda organik azot fraksiyonlarının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32: 767-775.
- Ghani A (2010). Toxic effects of heavy metals on plant growth and metal accumulation in maize (*Zea mays*). *Iranian Journal of Toxicology*, 3: 325-334.
- Ghori Z, Iftikhar H, Bhatti MF, Nasar UM, Sharma I, Kazi AG and Ahmad P (2015). Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soil. *Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques*, 29: 361-384.
- Golui D, Datta SP, Dwivedi BS, Meena MC, Varghese E, Sanyal SK, Ray P, Shukla AK and Trivedi VK (2019). Assessing soil degradation in relation to metal pollution—a multivariate approach. *Soil and Sediment Contamination*, 28: 630-649.
- Gomes HI, Dias FC and Ribeiro AB (2013). Overview of in situ and ex situ remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. *Science of The Total Environment*, 237-260.
- Guo ZH and Miao XF (2010). Growth changes and tissues anatomical characteristics of giant reed (*Arundo donax* L.) in soil contaminated with arsenic, cadmium and lead. *Journal of Central South University of Technology*, 17(4): 770-777.
- Hakeem KR (2015). Crop production and global environmental issues. *Crop Production and Global Environmental, Issues 1-598*.
- He ZL, Yang XE and Stoffella PJ (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 19: 125-140.
- Ignatius A, Arunbabu V, Neethu J and Ramasamy EV (2014). Rhizofiltration of lead using an aromatic medicinal plant *Plectranthus amboinicus* cultured in a hydroponic nutrient film technique (NFT) system. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(22): 13007-13016.
- Jabeen R, Ahmad A and Iqbal M (2009). Phytoremediation of heavy metals: Physiological and molecular mechanisms. *The Botanical Review*, 75: 339-364.
- Jadia CD and Fulekar MH (2009). Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques. *African Journal of Biotechnology*, 8: 921-928.
- Jankaite A and Vasarevičius S (2005). Remediation technologies for soils contaminated with heavy metals. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 13: 109-113.
- Jiang W, Tao T and Liao ZM (2011). Removal of heavy metal from contaminated soil with chelating agents. *Open Journal of Soil Science*, 01: 70-76.
- Kabata-Pendias A (2000). Trace elements in soils and plants. *CRC Press*.
- Kafadar FN ve Saygıdeğer S (2010). Gaziantep ilinde organize sanayi bölgesi atık sulari ile sulanan bazı tarım bitkilerinde kurşun (pb) miktarlarının belirlenmesi. *Ekoloji*, 48: 41-48.
- Khalid S, Shahid M, Niazi NK, Murtaza B, Bibi I and Dumat C (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182: 247-268.
- Kızıloğlu FM, Turan M, Sahin U, Kuslu Y ve Dursun A (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) and red cabbage

- (*Brassica oleracea* L. var. *rubra*) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, 95: 716-724.
- Kim JO, Lee YW and Chung J (2013). The role of organic acids in the mobilization of heavy metals from soil. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 17: 1596-1602.
- Kirpichtchikova TA, Manceau A, Spadini L, Panfili F, Marcus MA and Jacquet T (2006). Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using X-ray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction, and thermodynamic modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 2163-2190.
- Kim YH, Kim DH, Jung HB, Hwang BR, Ko SH and Baek K (2012). Pilot scale ex-situ electrokinetic remediation of arsenic-contaminated soil. *Separation Science and Technology*, 47(14-15): 2230-2234.
- Kong Z and Glick BR (2017). The role of plant growth-promoting bacteria in metal phytoremediation. *Advances in microbial physiology*, 71: 97-132.
- Leuther F, Schlüter S, Wallach R and Vogel HJ (2019). Structure and hydraulic properties in soils under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma*, 333.
- Lindsay WL and Doxtader KG (1981). Environmental chemistry of the elements. *Journal of Environmental Quality*, 10: 249-249.
- Maity JP, Huang YM, Fan CW, Chen CC, Li CY, Hsu CM, Chang YF, Wu CI, Chen CY and Jean JS (2013). Evaluation of remediation process with soapberry derived saponin for removal of heavy metals from contaminated soils in Hai-Pu, Taiwan. *Journal of Environmental Sciences*, 25: 1180-1185.
- Meyers DE Auchterlonie GJ, Webb RI and Wood B (2008). Uptake and localisation of lead in the root system of *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*, 153(2): 323-332.
- Mikhailenko AV, Ruban DA Ermolaev VA and Loon AJ (2020). Cadmium pollution in the tourism environment: A literature review. *Geosciences*, 10: 1-18.
- Mohsenzadeh F and Mohammadzadeh R (2018). Phytoremediation ability of the new heavy metal accumulator plants. *Environmental and Engineering Geoscience*, 24(4): 441-450.
- Montiel MM, Madejón E and Madejón P (2016). Effect of heavy metals and organic matter on root exudates (low molecular weight organic acids) of herbaceous species: An assessment in sand and soil conditions under different levels of contamination. *Environmental Pollution*, 216: 273-281.
- Mulligan CN, Yong RN and Gibbs BF (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation, *Engineering Geology*, 60: 193-207.
- Naila A, Meerdink G, Jayasena V, Sulaiman AZ, Ajit AB and Berta G (2019). A review on global metal accumulators mechanism, enhancement, commercial application, and research trend. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 26449-26471.
- Navarro A, Cardellach E, Cañadas I and Rodríguez J (2013). Solar thermal vitrification of mining contaminated soils. *International Journal of Mineral Processing*, 119: 65-74.
- Okçu M, Tozlu E, Kumlay A and Pehlivan M (2009). Ağır metallerin bitkiler üzerine etkileri. *Alınteri Journal of Agriculture Science*, 17(2): 14-26.
- Özbucak T, Ertürk Ö, Ergen AÖ, Polat G ve Özbucak S (2018). Maden yataklarında bulunan bazı bakterilerin ağır metallerin biyoremediasyonunda kullanılabilir potansiyellerinin belirlenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1): 114-124.
- Özkan A (2017). Antakya-Cilvegözü karayolu etrafındaki tarım arazilerinde ve bitkilerdeki ağır metal kirliliği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3): 9-18.
- Özkul C (2019). Kütahya şehir merkezinde yer alan çocuk parklarındaki toprakların ağır metal kirliliğinin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1): 226-240.
- Radziemska M, Koda E, Bilgin A and Vaverková MD (2018). Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(24).
- Ren J, Zhao Z, Ali A, Guan W, Xiao R, Wang JJ and Li R (2020). Characterization of phosphorus engineered biochar and its impact on immobilization of Cd and Pb from smelting contaminated soils. *Journal of Soils and Sediments*, 20(8): 3041-3052.
- Salam MMA, Mohsin M, Kaipainen E, Villa A, Kuittinen S, Pulkkinen P and Pappinen A (2019). Biomass growth variation and phytoextraction potential of four *Salix* varieties grown in contaminated soil amended with lime and wood ash. *International journal of phytoremediation*, 21(13): 1329-1340.
- Schwalfenberg G, Rodushkin I and Genuis SJ (2018). Heavy metal contamination of prenatal vitamins, *Toxicology Reports*, 5: 390-395.
- Sikkema J, De Bont JAM and Poolman B (1995). Mechanisms of membrane toxicity of hydrocarbons. *Microbiological reviews*, 59: 201-222.
- Singh S, Parihar P, Singh R, Singh VP and Prasad SM (2016). Heavy metal tolerance in plants: Role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6: 1-36.

- Song B, Zeng G, Gong J, Liang J, Xu P, Liu Z, Zhang Y, Zhang C, Cheng M, Liu Y, Ye S, Yi H and Ren X (2017). Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals. *Environment International*, 105: 43-55.
- Sönmez S ve Asri F (2006). Ağır metal toksisitesini bitki metabolizması üzerine etkileri. *Derim*, 23: 36-45.
- Sun H, Wang H, Qi J, Shen L and Lian X (2011). Study on surfactants remediation in heavy metals contaminated soils. ISWREP 2011- Proc. 2011 Int. Symp. *Water Resources Environmental Protection*, 3: 1862-1865.
- Sun R, Yang J, Xia P, Wu S, Lin T and Yi Y (2020). Contamination features and ecological risks of heavy metals in the farmland along shoreline of Caohai plateau wetland. *Chemosphere*, 254: 126828.
- U.S. Environmental Protection Agency (1994). Revised interim soil lead guidance for CERCLA sites and RCRA corrective action facilities. Report No.: OSWER Directive No. 9355.4-12. EPA/540/F-94/043. PB94-963282. Washington, DC: U.S. *Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response*.
- USAEC (2000). In-situ electrokinetic remediation of metal contaminated soils technology status report US Army Environmental Center. <https://clu.in.org/download/toolkit/thirdednew/insituelectrokinetic.pdf> (07.16.2020).
- Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, Boulet J, Adriaensen K, Ruttens A, Thewys T, Vassilev A, Meers E, Nehnevajova E, Lelie D and Mench M (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16: 765-794.
- Vareda JP, Valente AJM and Durães L (2016). Heavy metals in Iberian soils: Removal by current adsorbents/amendments and prospective for aerogels. *Advances in Colloid and Interface Science*, 237: 28-42.
- Varol Z ve Erdem DB (2020). Çorlu deresi ve yakın çevresi (Çerkezköy-Çorlu hattı) topraklarının ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesi . *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 8(1): 26-35.
- Wei CY and Chen TB (2006). Arsenic accumulation by two brake ferns growing on an arsenic mine and their potential in phytoremediation. *Chemosphere*, 63: 1048-1053.
- Weissmannová HD, Mihočová S, Chovanec P and Pavlovský J (2019). Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22): 4495.
- WHO/FAO (2007). Joint FAO/WHO Food Standard Programme Codex Alimentarius Commission 13th Session. Report of the Thirty-Eight Session of the Codex Committee on Food Hygiene, Houston, United States of America (07/30/13).
- Wuana RA and Okieimen FE (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*, 1-20.
- Yao Z, Li J, Xie H and Yu C (2012). Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. *Procedia Environmental Sciences*, 16: 722-729.
- Yang S, Liang S, Yi L, Xu B, Cao J, Guo Y and Zhou Y (2014). Heavy metal accumulation and phytostabilization potential of dominant plant species growing on manganese mine tailings. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 8(3): 394-404.
- Yerli C, Çakmakçı T, Şahin U ve Tüfenkçi Ş (2020). Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(Özel Sayı): 103-114.
- Zeng P, Guo Z, Cao X, Xiao X, Liu Y and Shi L (2018). Phytostabilization potential of ornamental plants grown in soil contaminated with cadmium, *International Journal of Phytoremediation*, 20 (4): 311-320.
- Zhai X, Li Z, Huang B, Luo N, Huang M, Zhang Q and Zeng G (2018). Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization. *Science of the Total Environment*, 635: 92-99.