

## KENTSEL KATI ATIK KOMPOSTU VE ARITMA ÇAMURUNDA AĞIR METALLERİN BİTKİLER VE ÇEVRE ÜZERİNDE POTANSİYEL ETKİLERİ VE KİRLETİCİ LİMİTLERİ

Doç. Dr. Bülent TOPCUOĞLU<sup>(1)</sup>

### ÖZET

Kentsel katı atık kompostu ve arıtma çamuru uygulanan topraklarda bitkisel üretim, çevre ve tüketiciler ve sürdürülebilir toprak idaresi üzerinde risk taşıyan istenmeyen ağır metal birikimi görülebilmektedir. Arıtma çamurunun tarımda kullanılmasına ilişkin, risk-esaslı yaklaşıma göre güncelleştirilmiş sınır değerler ve uygulama kriterleri getirilmiştir. Tarımda çamur kullanımında, sunulan bu yasal düzenlemelerdeki kriterlere uyulduğunda bitkisel üretim, çevre ve tüketiciler için yönetilebilir bir risk taşıdığı belirtilmektedir. Halihazırda, kentsel katı atık kompostu kalite kriterlerine özgü uluslararası kabul edilen bir standart yada yönetmelik bulunmamaktadır. Kompost kalitesinin düzenlenmesinde esas alınan yaklaşımlara bağlı olarak kentsel katı atık kompostunda ağır metal kirleticilerine ilişkin standartlar ülkeler arasında geniş bir yelpazede farklılık göstermektedir. Birçok bakımdan kentsel katı atık kompostunun arıtma çamuruna benzerliği nedeniyle, arıtma çamuru hakkında elde olunan bilgilerin çoğu kentsel katı atık kompostlarına uygulanabilmektedir.

### GİRİŞ

'Kentsel katı atık' (KKA) kompostu ve 'arıtma çamuru' önemli miktarda organik madde, bir miktar kireç ile makro ve mikro bitki besin maddelerini içermektedir. Bu nedenle bu substratlar tarımda toprak ıslah maddeleri veya gübre olarak kabul edilmekte ve kullanılmaktadır (Özbek ve ark., 2000).

KKA kompostu ve arıtma çamurunun tarımsal amaçlı kullanımı, bu materyallerdeki organik madde ve bitki besinlerinin geri kazanımı ile çevresel ve ekonomik yararlar sağlamaktadır. Ancak bu materyallerin tarımsal amaçlı kullanımında; toprağa patojen organizmalar ve ağır metaller ve diğer kimyasal kirleticilerin katılımı, besin maddelerinden N ve P'un aşırı girişinden dolayı sorunlar görülmektedir. Bu materyallerin uygulandığı birçok toprakta ağır metal (özellikle Pb, Cd, Cu ve Zn) birikimleri görülmüştür. Toprağın bu elementlerle kirlenmesi, yüzey suları ve yer altı suyunu kötüleştirmekle beraber, toksik metallerin besin zincirine girişi artmaktadır.

Tarımsal kullanımda arıtma çamuru, modern atıksu arıtımının başladığı yaklaşık 150 yıl öncesinden buyana denenirken, KKA kompostuyla ilgili az sayıda deneme bulunmaktadır. Geçen 20 yılda ABD'de arıtma çamurlarının ve kompostlaştırılmış arıtma çamurlarının arazi uygulamalarına dikkate değer ilgi gösterilirken, KKA kompostu'nun arazi uygulamaları göreceli olarak daha az ilgi çekmiştir. Ancak son zamanlarda katı atık bertarafı için arazi dolguları ve yakma gibi diğer seçeneklerin genel olarak daha az kabul edilebilir ve daha masraflı olmaya başlamasıyla bu konuya yeniden ilgi duyulmuştur.

KKA kompostu ve arıtma çamuru uygulamalarında belirtilmesi gereken endişelerden biri bu materyallerde bulunan düşük konsantrasyonlardaki ağır metallerin ve metalloidlerin (metal-benzeri elementler) bitki gelişimi, toprak organizmaları, su kalitesi ve insan ve hayvan sağlığını olumsuz etkileyebilme derecesidir. Bu çalışmada kompost ve arıtma çamuru ile toprağa katılan ağır metallerin toprak organizmaları ve su kalitesi üzerinde etkilerine ilişkin kısa bir tartışma ve bu konuda getirilmiş standartlar ve uygulama kriterleri yer almaktadır.

(1) Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Çevre Kirlenmesi ve Kontrolü Programı - ANTALYA

### Kentsel Katı Atık Kompostu ve Arıtma Çamurunda Ağır Metaller

Ağır metaller atomik ağırlıkları 63.546 ile 200.590 arasında değişen (Kennish, 1992) ve özgül ağırlığı 4'den daha büyük olan (Connel ve Miller, 1984) elementlerdir. Toprak ve suda birçok ağır metaller ve metalloidler iz miktarlarda bulunmaktadır. Bu iz elementler kayaçların tecezzisi sonucu doğal olarak toprak ve suya katılmaktadırlar. Ağır metaller yüzey sularına yada yeraltı sularına yıkanabilmekte, bitkiler tarafından alınabilmekte, atmosfere gaz olarak karışabilmekte, yada kil ve organik madde gibi toprak komponentleri tarafından yarı-kalıcı olarak bağlanabilmektedir. Topraklar, ağır metaller ve iz elementler bakımından biyolojik donanımın bir parçası olup, aynı zamanda bu bileşiklerin büyük miktarının son depolanma bölgesidir (Haktanır ve Arcak, 1998).

Kentsel katı atık maddeleri ve arıtma çamurunun ağır metal bileşimi kentsel çevre ve endüstriyel kaynak girişlerine bağlı olarak geniş bir yelpazede farklılık gösterebilmektedir (Woodbury ve Breslin, 1992). Piller, tüketici elektronik araçları, seramikler, ışık ampülleri, ev tozları ve boya kırıntıları, şişe kapaklarındaki kurşun yıldız kağıtları, kullanılmış motor yağları, plastikler, bazı mürekkepler ve cam vb. bütün hepsi katı atık içine metal bulaşmaları katabilmekte; deterjanlar, biyosidler, çeşitli endüstri atıksuları ve baca emisyonları, otomobil eksoz gazları, çeşitli gübreler vb. atıksu içinde ağır metallerin kaynağı olmaktadır. Katı atık muhtevasında bulunan organik maddeden yapılan kompostun, bu materyalde düşük konsantrasyonlarda olan ve bir çok kaynağı uzaklaştırıldığı halde ağır metalleri içermesi kaçınılmaz olmakta; arıtma çamurundaki ağır metaller ise, arıtma tesisine çok değişik kaynaklardan gelen atıksu ile arıtma çamuru içinde konsantre olmaktadır.

Canlı organizmalar, kobalt, bakır, demir, mangan, molibden, vanadyum, stronsiyum ve çinko gibi bazı ağır metallere iz miktarlarda gereksinim duymaktadırlar. Ancak esansiyel maddelerin aşırı düzeyleri organizmaya zararlı olabilmektedir. Esansiyel olmayan ağır metaller kadmiyum, krom, civa, kurşun, arsenik ve antimondur (Kennish, 1992). Küçük miktarlarda, bu iz elementlerin çoğu (ör. bor, çinko, bakır) bitki gelişimi için mutlak gerekli olduğu halde, bu elementlerin yüksek konsantrasyonları bitki gelişimini azaltabilmektedirler. Diğer iz elementler (ör. arsenik, kadmiyum, kurşun ve civa) toprak organizmalarına ve kontamine olmuş bitkileri yiyebilen insan ve hayvanlara ve toprağa potansiyel zararlı etkileri nedeniyle öncelikli ilgi çekmektedirler. Kompost uygulanmış topraklarda yetişen bitkiler üzerinde metallerin tesiri yalnızca metallerin konsantrasyonuna değil, fakat aynı zamanda pH, organik madde içeriği ve katyon değişim kapasitesi gibi toprak özelliklerine de bağlı olmaktadır. Aynı zamanda değişik tipteki bitkiler, ortamda bulanabilecek metallere karşı çok farklı tepki gösterebilmektedir (Tirmizi ve ark., 1996).

KKA kompostunda ve arıtma çamurunda incelenen ağır metaller aşağıda verilmiştir.

**Bor:** Mutlak gerekli bitki besin maddesi olan Bor yüksek düzeylerde bitki gelişimini azaltabilmekte ve KKA kompostunda bulunan fazla bor KKA kompostunun tarımsal uygulamalarında ara sıra bir problem olabilmektedir. Ancak, diğer iz elementlere benzer şekilde, bor'un toksisiteye neden olmasından çok topraklarda eksikliği daha olası görülmektedir. KKA kompostunda bor'un çoğu suda çözünebilir bulunmakta ve uygulanma öncesi kompostun yeterince yıkanması toksisite problemini giderebilmektedir.

**Kadmiyum:** Kadmiyum vücutta çinko ve bakır konsantrasyonlarını regüle eden ve aşırı düzeylerdeki esansiyel metalleri yarayışsız kılmak üzere bağlayan bir protein olan metalotionein aktivitesi ile interfere olabilmektedir. Kadmiyum metalotionein aktivitesini uyardığında, metalotionein bakır ve çinkoyu bağlamakta ve hemeostasis (kan pıhtılaşması etkenleri) düzeylerini bozmaktadır (Kennish, 1992). Kadmiyum elementi önemli derecede zehir etkisine sahip olup, toprakta humik maddelere bağlı bulunmakta, çinko ile birlikte sinerjistik etkide bulunmaktadır (Çepel, 1997).

Tarım alanlarına KKA kompostunun uygulandığı uzun süreli çalışmalarda, ürünlerin kadmiyum içeriğinde çok az bir değişiklik saptanmıştır. Ancak bu denemelerde kadmiyumu kolaylıkla biriktiren tütün, mantarlar, ıspanak ve diğer yapraklı sebzeler gibi tanınmış türler kullanılmamıştır. Arıtma çamuru uygulamalarında ise yüksek düzeyde kadmiyum birikimleri sıklıkla görülmektedir.

Tütün bitkisi kadmiyum birikimi yönünden özel bir önem arz etmektedir. Tütün yandığı ve solunduğunda kadmiyumun oldukça fazlası onun diyetle vücuda alınmasından daha çok vücuda geçmektedir. Bu sebeple toprakta bulunduğu ortalama miktardan çok daha fazla kadmiyumu içeren KKA kompostu ve arıtma çamuru tütün yetiştirilen arazilere uygulanmamalıdır. Yarayışlı sınırlı sayıdaki bilgilere dayanarak, KAA kompostlarının kültür mantarı üretiminde kullanılmasından kaçınılmalıdır. Ayrıca, ıspanak ve diğer yapraklı sebzeler tarafından kadmiyum alımı onların kadmiyum biriktirdiğinin bilinmesi yüzünden daha ileri düzeyde araştırılmalıdır.

ABD Ulusal Araştırma Konseyi yem bitkilerinin kadmiyum içeriğinin 0.5 mg/kg yada daha az olmasını önermiştir. KKA kompostunun ve arıtma çamurunun uygulandığı çalışmalar bitki dokusundaki konsantrasyonların bu değeri aşabileceğini göstermiştir (Anonymous, 1996).

**Kurşun:** İyonik çap ve yük benzerlikleri nedeniyle, kurşun kalsiyumun yerine geçebilmekte ve kemik dokusuna yerleşebilmektedir. Gelişmekte olan iskelet sistemlerinin yüksek kalsiyum düzeylerine gereksinim göstermeleri nedeniyle özellikle çocuklar kurşuna daha hassastırlar. Kemik dokusuna bağlanan kurşun doğrudan zararlı olmamakta, ancak yüksek miktarlarda kalsiyum daha sonra vücuda alındığında kemik dokusundaki kurşun kalsiyumla yer değiştirerek mobilize olabilmektedir. Böylece sistemde serbest kalan kurşun nefrotoksisite, nörotoksisite ve hipertansiyona neden olabilmektedir. Katı besin maddeleri yoluyla günlük olarak bünyeye giren Pb miktarının 600 µm değerini aşmaması gerektiği belirtilmektedir. KKA kompostu uygulaması kontamine olmamış topraklarda kurşun içeriğini arttıracacağı, arıtma çamuru uygulamalarında kurşun birikiminin çoğunlukla yüksek olduğu bildirilmiştir (Miller ve ark., 1995). Bu durum kompost uygulanmış toprakla doğrudan temas eden insan ve hayvanlara bir risk arz etmektedir.

**Civa:** Bitkiler için fazla zehirli olmamasına karşın insanlar ve hayvanlar için şiddetli bir zehirleyicidir. Civa, özellikle metil-civa formunda insanlara büyük bir risk oluşturmaktadır. Civa suya karıştığında organizmalar tarafından hemen toksik metil-civa formuna transforme edilmektedir. Akut zehirlenme semptomları, faranjit, gastroenterit, kusma, nefrit, hepatit, dolaşım (kan) bozukluğudur. Kronik zehirlenme genellikle endüstriyel civa emisyonlarına maruz kalma yada kontamine olmuş balık gibi bir diyetin (civa biyoakümüle olan tek metaldir) yenmesi sonucunda görülmektedir (USEPA, 1987).

KKA kompostunda ve arıtma çamurunda civa konsantrasyonu genellikle düşük olmakta ve böylece bitkiler tarafından önemli derecede alımı çok az olası görülmektedir. Ancak bazı mantar türleri, civa gibi bazı ağır metalleri biriktirebilmektedir ve bu yüzden kontamine olmamış toprakların taban (background) düzeylerinden çok daha yüksek düzeylerde civa içeren KKA kompostu kültür mantarı üretimi için uygun olmamaktadır.

**Arsenik:** Arsenik, kontamine olmuş gıda yada suyun vücuda alınması sırasında şiddetli toksisiteye neden olabilmektedir. Birçok organizmanın dokularında birikebildiği için düşük düzeyleri bile zararlıdır. Arseniğin vücuda alınması kusma, diyere ve kalp anormalisine neden olmaktadır. Arsenik, insan ve hayvanlara toksik etki yaparken, bitkiler tarafından kolaylıkla alınmamakta ve bir problem arz etmesi olası dışı görülmektedir.

**Krom:** Suda krom anyonlarının bol bulunuşu genellikle endüstriyel atıkların bir sonucudur. Kronik sağlık

etkileri solunum ve dermatolojik sorunlardır. Krom KKA kompostunda yalnızca iz miktarlarda bulunmaktadır. Ayrıca, KKA kompostunda kromun çoğu bitkiler tarafından kolaylıkla alınamaz formda bulunmaktadır. İnsanların Cr alımındaki artış, içme sularına bulaşmasından ve besin endüstrisi nedeniyle. Toprağa katılan Cr çok kısa sürede immobil hale geçmekte ve bitkilerde Cr kapsamının artışı nadir görülmektedir.

**Bakır:** Bitkiler tarafından az miktarda alınan besin maddesi olduğu için, bitkilerde yüksek düzeylerde birikerek zararlı olabilmeleri çok seyrek. Ancak toprakta yüksek bakır içeriği diğer mikrobeyin maddelerinin bitkiler tarafından alınmasına etki yapmaktadır. Bakırın yüksek düzeyleri mikroorganizmalar için toksiktir. Çok yıllık tarla denemeleri, KKA kompostunun zengin uygulamalarında bile ürünlerin bakır içeriğinde çok az artışı göstermiştir.

**Nikel:** Toprakta yüksek Ni konsantrasyonu bitkilere toksik etki yapmaktadır. Bitkilerde besin maddelerinin çoğunun alınmasını önlemekte ve kök tahribatı yapmaktadır. KKA kompostunda nikel konsantrasyonları genellikle düşüktür. Bu yüzden nikel bitkilere toksik olduğu halde, kompost uygulandığında bitki gelişimini azaltması olası dışı görülmektedir.

**Çinko:** Bitkiler için az miktarlarda gerekli bir besin maddesidir. Bitkilerin çoğu yüksek çinko düzeylerinden fena halde zarar görmekte, bu da beslenme zincirinde kendiliğinden koruma sağlamaktadır. Arıtma çamuru uygulamaları yüksek çinko içeriği nedeniyle bitkilerde toksisiteye neden olduğu halde, KKA kompostunda çinkonun ürünlere zararı olası görülmekte ve gerçekte çinko eksikliği görülen bölgelerde yararlı da olabilmektedir.

**Selenyum:** Bazı bitki türleri için gerekli bir element olan selenyum hayvanlar için hayatsal önem taşımakta, ancak toprakta yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu toksik etkileri görülmektedir. Arıtma çamurlarındaki selenyum konsantrasyonu genellikle düşük düzeyde bulunmaktadır. Bu nedenle düşük düzeyde selenyum içeren çamurların arazide depolanması dışında bu elementin birikerek zarar oluşturma ihtimali zayıftır.

## **Su Kalitesi Üzerine Etkileri**

Bitki ve hayvan sağlığını etkilemesinin yanında KKA kompostunda yer alan iz elementler topraktan yıkanabilmekte (suyla taşınmakta) ve yüzey ve yeraltı sularına girmektedir. Bir yönden bitkiler tarafından alınırken, toprak pH'sı, organik madde kapsamı ve diğer toprak karakteristikleri yıkanmanın miktarını etkilemektedir. KKA kompostundaki ağır metallerin topraktan yıkanması üzerindeki veriler oldukça nadirdir. Avrupada yapılan bir araştırmada, çalışılan bütün metallerin başlangıç yıkanma konsantrasyonlarının 'Avrupa Topluluğu İçme Suyu Standartları'nı aştığını, fakat bir buçuk yıllık yıkama sonrası, sadece nikelin bu sınırları aştığını ortaya koymuştur. Çalışmada ekstrem derecede yüksek kompost uygulama oranları ve çok sığ düzeyde deney toprağı kolonları kullanılmış ve böylece yıkanma potansiyeli tahmin edilmiştir. Arıtma çamurunun uzun süreli uygulamalarından elde olunan bilgiler yıkanma oranının düşük olduğunu ortaya koymuştur. Yeraltı suyuna metallerin yıkanması yalnızca kum tekstürlü topraklarda uzun yıllar KKA kompostunun yoğun ve yinelemeli uygulamalarında oluşması, yada toprakta ağır metallerin adsorpsiyonunu sınırlandıran diğer koşulların oluşması durumunda olası görülmektedir.

Ağır metallerin toprakta mobilitesinin düşük olduğu ve onların yeraltı suyuna taşınımının, agronomik miktarlarda arıtma çamuru uygulamalarının sonucu olarak olası görülmediği, çamur-kökenli iz elementlerin toprağın yüzey derinliğinde konsantre olma eğiliminde olduğu bildirilmiştir. Ancak, çevrede potansiyel olarak



zararlı bu tür öğelerin taşınımı ve akibeti aynı zamanda bir endişe kaynağı olmaktadır. Çamur uygulamasından gelen öğeler yüzey toprağında immobilize olmaz ise kök bölgesine kaçabilecek ve yeraltı suyuna sızabilecektir.

## Toprak Organizmaları Üzerine Etkileri

KKA kompostundaki iz elementlerin omurgasızlar (ör. toprak kurtları) ve mikroorganizmalar (ör. azot fikse eden bakteriler) gibi toprak organizmaları üzerinde etkileri hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. Arıtma çamuru araziye uygulandığında toprak kurtlarında bazı iz metallerin (ör. kadmiyum) konsantrasyonu artmaktadır, fakat bu artış arıtma çamuru için düzenlenen 'Risk Değerlendirmesi' ve uygulama kriterlerine dayanarak toprak kurtlarına yada onu tüketen yaban yaşamına önemli bir risk arz etmemektedir. KKA kompostunda kurşun, bakır ve çinkonun ortalama değerleri bir grup avrupalı araştırmacı tarafından toprak omurgasızlarını korumak için ileri sürülen toprak limitlerini aşmaktadır. Bu limitler, komposttaki metallerin mineral topraklardakinden biyolojik olarak daha az yararlı olması durumunda koruyucu olabilmektedir.

Arıtma çamuru uygulanmış topraklarda metallerin birikimi Rhizobium ve Cyanobacter cinslerinin aktivitesini engelleyebilmekte ve mikrobiyel biyoküttelede azalmalara neden olabilmektedir. Bu durum belirli negatif baklagil türlerinin kalıcılığı üzerinde endişe yaratmaktadır. KKA kompostundaki metallerin azot fikse eden bakterileri de içeren toprak organizmalarına zararlı olup olamayacağı hakkında ise literatürde çelişkili bulgular yer almaktadır.

## Toprağa Potansiyel Etkileri

KKA kompostunda ve arıtma çamurunda potansiyel olarak zararlı iz elementlerin konsantrasyonları hemen hemen çok az istisnaıyla topraktaki tipik konsantrasyonlarından daha yüksektir. KKA kompostu ve arıtma çamuru, azot ve fosfora ek olarak kalsiyum, potasyum, magnezyum, sodyum, demir, mangan, çinko gibi bitki gelişimi için diğer mutlak gerekli besin maddelerini de içermektedir.

KKA kompostunda ve arıtma çamurunda ağır metallerin ve metalloidlerin potansiyel zararlı etkileri yanında, aynı zamanda tarım ve bahçecilik için potansiyel yararlı etkileride bulunmaktadır. Uzun yıllar kültür bitkisi yetiştirilen topraklar bor, çinko ve bakır gibi besinler yönünden fakirleşebilmekte (Martens ve Westerman, 1991) ve KKA kompostu ve arıtma çamuru bu gibi eksiklikleri azaltabileceği (Logan ve Chaney, 1983) bildirilmiştir. Diğer faydaları arasında, artan su tutma kapasitesi gibi gelişmiş toprak fiziksel karakteristikleri, besin tutma kapasitesi gibi gelişmiş kimyasal karakteristikler, bitki gelişimini artırabilen mikrobiyel aktivitenin teşviki, ve su kaynaklarına kirleticilerin yıkanmasının azalması yer almaktadır. KKA kompostu aynı zamanda iz element kirleticilerini ve toksik organik bileşikleri bağlamak suretiyle bitkilere zararı azaltabilmektedir.

Arıtma çamuru azot ve fosfor besini için agronomik miktarlarda uygulandığında, potasyumun olası istisnasıyla mutlak gerekli diğer besinlerin çoğunu genellikle ürünün ihtiyacını karşılayabilecek miktarda sağlayacağı bildirilmiştir (Chaney, 1990). Yinelemeli arazi uygulamalarında bor dışındaki iz elementler çamurun uygulandığı derinlikte yada biraz daha altında birikmektedir. Arıtma çamuru uygulamaları toprakta iz elementlerin konsantrasyonlarını genellikle artırmakta ve bitkilerdeki metal içerikleri, topraklara artan çamur yüklemesiyle artmaktadır (Miller ve ark., 1995; Tirmizi ve ark., 1996; Brito ve ark., 1997). Brallier ve ark., (1996) 16 yıl önce toprağa uygulanan arıtma çamuru ile katılan ağır metallerin 16 yıl sonra dahi bitki tarafından alınabilir formda bulunduğunu belirlemişlerdir. Arıtma çamurundaki belirli öğeler (ör. tuzlar, Cd, Cu, Ni ve Zn) toprağa kritik düzeylerin üzerinde uygulandığında fitotoksik olabilmektedir. Çamurdaki iz elementler ve iz organikler tüketicilere zararlı olacak düzeyde ürün tarafından alınır yada diğer yollarla ulaşırsa ciddi bir sakınca yaratacaktır. Bitki bünyesinde biriken ağır metallerin bitki-hayvan-insan zincirinde hareket ederek insanlara toksik düzeyde etki

yapması çok muhtemeldir. Yüksek oranlarda arıtma çamuru ile muamele edilmiş toprakta yetişen çoğu bitkilerin Cd içeriğinin hayvan tüketimi için uygun olan düzeyin çok üstünde olduğu bildirilmiştir (Miller ve ark., 1995). Diğer yandan karışık bulgular olarak, arıtma çamuru kullanımının test edilen türlerde ağır metal içeriklerinde (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd ve Cr) tehlikeli artışa yol açmadığı ve düzeylerin kabul edilebilir aralıkta olduğu (Brito ve ark., 1997), aynı zamanda arıtma çamurunun tarımsal kullanımında yürürlükteki düzenlemelere uyulduğunda asit yada potansiyel olarak asit topraklarda olumsuz bir etki yaratmayacağı bildirilmiştir.

## Ağır Metaller ile İlgili Düzenleyici Yönetmelikler ve Kirlenici Limitleri

### 1. Arıtma Çamurları

Arıtma çamurlarının ve katı atık kompostunun topraklara uygulanması yoluyla bitkilerin yüksek miktarda ağır metal içermelerinin ve topraklardaki önemli ölçüde ağır metal birikiminin önlenmesi için 'Arıtma Yönetmeliği' çerçevesinde arıtma çamuru ve topraklar için sınır değerler belirlenmiştir. Arıtma çamurlarında içerik ve uygulamaya ilişkin kirlenici sınır değerleri ülkemizde Çevre Bakanlığı tarafından 2001 tarihinde yeniden düzenlenerek yürürlüğe konulan 'Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde ve EPA'nın (ABD Çevre Koruma Ajansı) konuya ilişkin düzenlemeleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 1. Topraktaki Ağır Metallerin Sınır Değerleri (Anonim, 2001)

	pH ≤ 6 mg/kg Fırın Kuru Toprak	pH > 6 mg/kg Fırın Kuru Toprak
Kurşun	50**	300**
Kadmiyum	1**	3**
Krom	100**	100**
Bakır*	50**	140**
Nikel*	30**	75**
Civa	1**	1,5**
Çinko*	150**	300**

\* pH değeri /'den büyük ise Bakanlık sınır değerleri % 50'ye kadar artırabilir. \*\* Yem bitkileri yetiştirilen alanlarda çevre ve insan sağlığına zararlı olmadığı bilimsel çalışmalarla kanıtlandığı durumlarda, bu sınır değerlerin aşılmasına izin verilebilir.

Çizelge 2. Toprakta Kullanılabilecek Arıtma Çamurunda Müsaade Edilecek Maksimum Ağır Metal İçerikleri (Tavan Konsantrasyonlar) (Anonim, 2001; Anonymous, 1996)

Kirlenici	Sınır Değerler (mg/kg Fırın Kuru Ağırlık)	
	T.C. Çevre Bakanlığı Yönetmeliği, 2001	ABD, EPA Yönetmeliği, 1994
Kurşun	1200	840
Kadmiyum	40	85
Krom	1200	-
Bakır	1750	4300
Nikel	400	420
Çinko	4000	7500
Civa	25	57
Arsenik	-	75
Selenyum	-	100

Çizelge 3. Toprakta On yıllık Dönem Esas Alınarak Bir Yılda verilmesine Müsaade Edilecek Ağır Metal Yükü (Anonim, 2001; Anonymous, 1996)

Kirlenici	Yıllık Kirlenici Yükleme Oranı (kg/ha/yıl)	
	T.C. Çevre Bakanlığı Yönetmeliği**, 2001	ABD, EPA Yönetmeliği, 1994
Kurşun	15*	15
Kadmiyum	0.15	1.90
Krom	15*	-
Bakır	12*	75
Nikel	3*	21
Çinko	30*	140
Cıva	0.1	0.85
Arsenik	-	2.0
Selenyum	-	5.0

\* İşlenmiş arıtma çamurunun topraklarda kullanılması ile hasadın alınması arasında en az 3 ay süre varsa ilgili kuruluşların görüşü alınarak Bakanlıkça Hg ve Cd hariç olmak üzere bu değerler % 5'e kadar artırılabilir.

\*\* Yem bitkileri yetiştirilen alanlarda çevre ve insan sağlığına zararlı olmadığı bilimsel çalışmalarla kanıtlandığı durumlarda, bu sınır değerlerin aşılmasına izin verilebilir.

Çizelge 4. Arıtma Çamurunun Aylık Ortalama Konsantrasyon Limitleri ve Birim Araziye Verilecek Kümülatif Kirlenici Yükleme Oranları (Anonymous, 1996)

Kirlenici	Aylık Ortalama Konsantrasyon Limitleri (mg/kg)	Kümülatif Kirlenici Yükleme Oranı (kg/ha)
Kurşun	300	300
Kadmiyum	39	39
Bakır	1500	1500
Nikel	420	420
Çinko	2800	2800
Cıva	17	17
Arsenik	41	41
Selenyum	100	100

Ülkemizde halihazırdaki Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'ne göre arıtma çamurunda ve katı atık kompostunda ağır metal içeriklerine ilişkin olarak aşağıdaki uygulamaların yapılması gerekli kılınmıştır.

1. Toprak analizleri sonucu, toprakta ağır metal içeriklerinin Çizelge 1'de yer alan değerleri aşması halinde işlenmiş arıtma çamuru ve katı atık kompostu sözkonusu araziye uygulanmamalıdır.

2. Arıtma tesisini işleten resmi ve özel kuruluşların, işlenmiş arıtma çamurunda Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn, N, P içerikleri ile pH ve EC değerlerinin analizlerini günlük kuru çamur miktarı 50 ton'a kadar olanlar altı ayda, 50 ton'un üzerinde olanlar üç ayda bir belgelendirmeleri zorunludur.

3. Arıtma tesisini işleten resmi ve özel kuruluşların, işlenmiş arıtma çamuru kullanılan toprağın Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn, N, P içerikleri ile pH ve EC değerlerini altı ayda bir analiz yaptırarak belgelendirmeleri zorunludur.

4. Üretilen kompostun Pb, Cd, Cu, Ni, Hg ve Zn içeriklerinin analizleri en fazla üçer aylık aralarla yapılmalıdır

5. Kompostun kullanılacağı arazide toprağın pH değeri, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg ve Zn içerikleri analiz edilmelidir.

6. İşlenmiş arıtma çamurunun toprakta 10 yıllık dönemde her yıl uygulanması halinde toprağa verilebilecek maksimum ağır metal miktarlarının Çizelge 3'deki değerleri aşmaması zorunludur.

EPA'nın arıtma çamurunun araziye uygulanmasına ilişkin Bölüm 503 adı altındaki düzenlemeleri (Anonymous, 1994) ise aşağıdaki gibidir:

1. Ticari olarak açıkta yada paketlerde pazarlanan arıtma çamurunda:

a. Kirletici limitlerinin Çizelge 2'deki değerleri aşması durumunda, arıtma çamuru araziye uygulanmamalıdır.

b. Araziye verilecek çamurla kümülatif kirletici yükü Çizelge 4'deki sınırları aşmamalıdır.

c. Arıtma çamurunun belirlenen aylık ortalama kirletici konsantrasyonları Çizelge 4'deki değerleri aşmamalıdır.

d. Yıllık çamur uygulama oranı ile çamurdaki her bir kirletici konsantrasyonunun çarpımı Çizelge 3'deki yıllık kirletici yükleme oranını aşmamalıdır.

2. Tarım, orman ve reklamasyon arazilerine işlenmemiş ham arıtma çamurunun uygulanması durumunda:

a. Arıtma çamurunun belirlenen aylık ortalama kirletici konsantrasyonları Çizelge 4'deki değerleri aşmamalıdır.

b. Birim arazideki kirleticilerin kümülatif kirletici yükleme oranı aşılmamalıdır (Çizelge 4).

3. İşlenmemiş ham arıtma çamurunun çimlere yada ev bahçelerine uygulanması durumunda aylık ortalama kirletici içerikleri Çizelge 4'deki değerleri aşmamalıdır.

### Arıtma Çamurunun Yıllık Uygulama Oranını Belirleme Prosedürü

Toprağa uygulanacak arıtma çamurunda kirleticilerin yıllık yükleme oranının Çizelge 3'de verilen değerleri aşmasına izin verilmemesi esas alınmıştır.

Aşağıdaki hesaplama Çizelge 3'de verilen 'Yıllık kirletici yükleme oranı'nı (YKYO) aşmayan arıtma çamuru için 'Yıllık toplam çamur uygulama oranı' (YÇUO) belirlemede kullanılan prosedürü içermektedir.

Bir kirletici için YKYO ve YÇUO arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$YKYO = K \times YÇUO \times 0.001 \quad (1)$$

Burada:

YKYO: 365 günde kirletici yükleme oranı (kg/ha/yıl)

K: Kirletici konsantrasyonu (kuru ağırlık esasına göre (mg/kg)

YÇUO: Yıllık toplam çamur uygulama oranı (kuru ağırlık esasına göre (ton/ha/yıl)

0.001: Çevirme faktörü

YÇUO'nı belirlemek için denklem (1) aşağıdaki eşitlikte (2) yeniden düzenlenir.

$$YÇUO = \frac{YKYO}{K \times 0.001} \quad (2)$$

Bir arıtma çamurunun YÇUO'nı belirlemek için kullanılan prosedür:

1. Arıtma çamurunda Çizelge 3'de verilen her bir kirleticinin konsantrasyonunu belirlemek için arıtma çamuru örneği analiz edilir.

2. 1. adımdan kirletici konsantrasyonlarını ve Çizelge 3'den YKYO'nı kullanarak yukarıdaki denklemde (2) kullanılan her bir kirletici için bir YÇUO hesaplanır.

3. Arıtma çamurunun YÇUO'nı 2. adımda her bir kirletici için hesaplanan en düşük YÇUO olarak alınır.



## 2. Kentsel Katı Atık Kompostu

Birçok bakımdan KKA kompostunun arıtma çamuru kompostlarına benzerliği nedeniyle, arıtma çamuru hakkında elde olunan bilgilerin çoğu KKA kompostlarına uyarlanabilmektedir. Katı atıkların kompostlaştırılması üzerindeki yönetmelikler ve politikalar hakkında tartışılmalı durum bulunmaktadır. ABD'de arıtma çamurunun kullanımı konusunda son zamanlarda federal yasalarda köklü revizyonlar yapılmış, fakat katı atık kompostlarına özel uygulanacak federal kanun yada mevzuat bulunmamaktadır.

ABD'de az sayıda eyaletlerde ve Kanada'nın bazı bölgelerinde bu konuda mevzuatlar uyarlanmıştır. Çok sayıda Avrupa ülkesinde bu konuda politika ve standartlar tamamlanmış ve bazı Avrupa ülkelerinde ise bu standartlar daha koruyucu olarak revize edilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Çeşitli Avrupa Ülkelerinde Kullanılan Kompostun Ağır Metal Kirlenici Limitleri (İpek ve ark., 2000).

	Konsantrasyon (mg/kg)				
	Cd	Cu	Cr	Pb	Hg
Avusturya	4	400	150	500	4
Belçika	5	100	150	600	5
Danimarka	1,2	1000	100	80	1,2
Almanya	1	75	100	100	1
İtalya	3	200	150	200	2
Hollanda	0,7	25	50	65	0,2
İspanya	40	1750	750	1200	25
İsviçre	3	150	150	150	2

Kompost kalitesinin düzenlenmesi için birkaç opsiyon bulunmaktadır. Arıtma çamurunun arazi uygulamalarına ilişkin düzenlemelerde olduğu gibi '**Risk-Esaslı**' bir yaklaşım ABD'de birçok eyaletlerde kullanılan en popüler yaklaşımdır. Çeşitli kimyasal ve patojenik kirlenicilerin potansiyel çevre ve sağlık tehlikelerinin bir risk analizi hazırlanmış ve her bir kirlenici için sayısal limitler 'olumsuz etkinin gözlenmediği seviye' (NOAEL) yeterince sağlanacak ölçüde düzenlenmiştir. Bu yaklaşımın altında, bu standartları karşılayan ürünler sınırlama olmaksızın, ve insan ve çevreye kabul edilemez riske neden olmaksızın uygulanabilmektedir. Böylesine bir risk tabanlı yaklaşım, yeterli riski belirlemek ve risklerin ihmal edilebilir yada kabul edilebilir olarak düşünüldüğü 'eşik altı' değerini belirlemek için yeterince bilgi birikimine dayanmaktadır.

Arıtma çamuru üzerindeki geniş araştırmalara dayanarak çok yönlü değerlendirmeler 'NOAEL'i sağlayan alternatif kirlenici limitlerini geliştirmek üzere hazırlanmıştır. KKA kompostları üzerinde yararlı olacak çok az sayıda araştırma ve analizler bulunmaktadır. Arıtma çamuru ve KKA türevli kompostlar arasında birçok benzerlikler bulunurken, aynı zamanda bazı önemli farklılıklarda görülmektedir. Metallerin biyoyararlılığı, farklı metaller arasındaki oran, ve kompost için daha yüksek potansiyel uygulama oranı en önemli farklılıklar arasındadır. Araştırmanın gerekli olduğu diğer bir kritik konu ise kurşunun (Pb) kabul edilebilir düzeyidir.

Risk-Esaslı yaklaşıma karşıt olarak, ABD'de su ve hava kirliliği kontrolü sahasında diğer düzenlemeler bazen '**En Başarılı Teknoloji**' prensibini örnek almıştır. Bu konudaki düzenlemeler proses dizaynını ve operasyon gereksinimlerini belirleyebilmektedir.

Gerekli görülen üçüncü yaklaşım, '**Net Olmayan-Arıtma**', Hollanda, İsviçre, Almanyanın bazı eyaletleri, İngiliz Kolombiyası, Ontario ve Kanadanın diğer bazı bölgelerinde halihazırda kompost kriterlerinin düzenlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, toprakların uzun süreli verimliliğinin korunması, belirli kirlenicilerin toprakların background düzeyleri üzerinde artmaması felsefesine dayanmaktadır. Bunlar uygulamada seçilmiş temiz organik

atıklarla kompostlama yapılmasını gerektiren çok sıkı standartlardır.

Yasa düzenleyiciler belirli bir yaklaşımda görüş birliğine varmış olsa bile, halihazırdaki bilimsel bulguların yasal düzenlemelere dönüştürülmesi yorum gerektirmekte ve hazır bulunmamaktadır. ABD'de kurşun gibi anahtar bir kirletici için Risk-Esaslı standartlar kısıtlama getirilmemiştir. I. Sınıf kompost için New York eyaletinde 250 ppm ve Floridada 500 ppm olacak şekilde 2 kat farklılık göstermektedir. Risk-Esaslı ve Net olmayan-Ayrışma standartları arasındaki farklılıklar daha büyüktür. Örneğin civa standardı New York eyaletinde Risk-Esaslı yaklaşıma göre 10 ppm ve Ontario'da Net Olmayan-Ayrışma yaklaşımına göre 0.15 ppm dir ve aralarında 66.7 kat fark bulunmaktadır (Çizelge 6).

### Geleceğe Yönelik Endişeler

Organik madde parçalanırken metallerin konsantrasyonu, kompostta ve böylece uygulandığı toprakta artabilmektedir. Bu konuda güvenilir bilgiler, bol miktarda KKA kompostu uygulanan tarım topraklarında organik maddenin yarısının 10 yada 20 yıl içinde parçalanabileceğini göstermiştir. Toprağa organik madde içeriği yüksek olan kompost çok fazla miktarlarda uygulanmaz ise toprakta metal konsantrasyonlarının orjinal topraktaki mevcut konsantrasyonu aşması muhtemel görülmemektedir. Toprak pH'sı büyük ölçüde düşmez yada toprak uzun bir süre taşkında kalmaz ise, metaller zamanla bitkiler ve diğer organizmalara genellikle daha az yararlı olacaktır.

Çizelge 6. KKA Kompostunda Metaller İçin 'Risk-Esaslı' ve 'Net Olmayan-Ayrışma Standartlarının Karşılaştırılması

	Risk-Esaslı (mg/kg)		Net Olmayan-Ayrışma (mg/kg)	
	Florida	New York	İsviçre	Ontario
Kurşun	500	250	150	150
Kadmiyum	15	10	3	3
Krom	-	1000	150	50
Bakır	450	1000	150	60
Nikel	50	200	100	60
Civa	-	10	3	0,15
Çinko	900	2500	500	500

Arıtma çamuru bileşiminin geniş bir yelpazede farklılık göstermesi ve onun atıksu kaynağının farklılıklarından dolayı (kentsel çevre ve onun endüstriyel kaynak girişleri) ağır metal ve toksik bileşik içerikleri, arıtma prosesleri ve atıksu karakteristikleri arıtma çamurunun tarımsal kullanımında sınırlayıcı faktörler olarak görülmektedir. Ağır metaller ve toksik bileşikler arıtma çamurunun agronomik oranlarda yinelemeli uygulamalarıyla zamanla daha yüksek düzeylere ulaşabilmekte ve böylece uzun süreli etkide hangi toprakta olursa olsun iz elementlerin ve toksik bileşiklerin yığınsal yüklemesinin geriye dönüşümsüz problemleriyle karşılaşmak kaçınılmaz görülmektedir. Diğer tarımsal toprak uygulamalarında olduğu gibi çamur kullanımı, yüzey ve yeraltı sularına bulaşmasından kaçınmak için uygun bir şekilde idare edilmelidir. Takip eden uygulamalarda çamurun uzun süreli ağır metal yüklemesi etkisi göz önüne alınmalıdır.

Ülkemizde arıtma çamuru ve kompost kullanımı ile ilgili son zamanlarda düzenlenen standartların gelişmiş bazı ülkelerdeki standartların üzerinde daha koruyucu olarak düzenlendiği görülmektedir. KKA kompostunun da arıtma çamuru yönetmeliğindeki yönerge doğrultusunda uygulanmasının sorun yaratmayacağı bildirilmiştir (Anonymous, 1994). Birçok ağır metal ve metalloidler için KKA kompostundaki düzeyler, arıtma çamuru için getirilen standartlardaki yeni düzenlenmiş APL (Alternatif Kirletici Limitleri) değerlerinden daha düşüktür.

Kurşunun önemli derecede istisnasıyla, KKA kompostu bu sınırları genellikle karşılamaktadır (Anonymous, 1994). Ancak, KKA kompostu arıtma çamuruna oranla genellikle daha az organik madde, azot ve fosfor içermekte ve organik ve inorganik toksik madde içeriği yönünden önemli farklılıklar göstermektedir. Arıtma çamuru için geliştirilen bu değerlerin KKA kompostu için yeniden düzenlenmesinin mutlak gerekli olacağı görülmektedir. Ayrıca, bazı toksikolojistler ve hukukcular bu gibi standartları geliştirmede kullanılan risk tayin metodolojisinin yetersiz bilgilere dayanmasından kaygı duymaktalar ve daha koruyucu bir yaklaşımı savunmaktadırlar.

### **Potential Effects of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Composts and Sewage Sludge on Plants and the Environment and Pollutant Limits**

#### **SUMMARY**

Undesirable heavy metal accumulation which presents a risk on crop production, environment and consumers, and sustainable soil management in municipal solid waste compost and sewage sludge applied soils may be occurred. According to risk-based approach there have been updated regulations and guidelines for the agricultural use of sewage sludge. It is stated that as long as the agricultural use of sludge follows current regulations and guidelines, it present a manageable risks on crop production, environment and consumers. In the present case there are no internationally accepted quality standards or laws for heavy metal contents of municipal solid waste compost. Depending on the based approaches for compost quality, heavy metal limits in municipal solid waste compost can be variable in a wide range in various countries. Because of similarities in many ways between sewage sludge and municipal solid waste derived compost, most of the information regarding the use of sewage sludge can be applied for municipal solid waste compost.

#### **KAYNAKLAR**

**ANONİM, 2001.** Türkiye Cumhuriyeti Resmi Gazete, Toprak Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, 10,12,2001, Sayı 24609, Ankara.

**ANONYMOUS, 1987.** U.S. Environmental Protection Agency. Quality Criteria for Water. EPA Publication, 440/5-86-001. U.S. Gov. Prin. Office, Washington D.C.

**ANONYMOUS, 1994.** U.S. Environmental Pollution Agency, Standards for the use or disposal of sewage sludge; Final rules. National Research Council. 40 CFR Parts 257, 403 and 503. Federal register 58(32):9248-9415.

**ANONYMOUS, 1996.** U.S. Environmental Pollution Agency, The use of reclaimed water and sludge in food crop production. National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C.

**BRALLIER, S. HARRISON, R.B., HENRY, C.L., XUE, D., ve XUE, D.S. 1996.** Liming effects on availability of Cd, Cu, Ni, and Zn in a soil amended with sewage sludge 16 years previously. Water, air and soil pollution, 86(1-4):195-206.

**BRITO, I.C., VELICA, A., GUERRERO, C., BELTRAO, J., FALEIRO, M.L., ve CHATZOULAKIS, K.S. 1997.** Reuse of municipal sludges and industrial wastes as organic fertilizers in tomato. Acta-Horticulturae, No.449, 707-713.

**CHANEY, R.L. 1990.** Twenty years of land application research. Biocycle, September 54-59.

**CONNELL, D.W.ve MILLER, G.J. 1984.** Chemistry and Ecotoxicology of Pollution. John Wiley & Sons. NY.

**ÇEPEL, N. 1997.** Toprak Kirliliği ve Çevreye Verdiği Zararlar. TEMA yayınları, 14, İstanbul

- HAKTANIR, K. ve ARCAK, S. 1998.** Çevre Kirliliği. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 1503, Ders Kitabı: 457, A.Ü. Ziraat Fakültesi Halkla İlişkiler ve Yayın Ünitesi, Ankara.
- HARRISON, E.Z.ve RICHARD, T.R. 1992.** Municipal Solid Waste Composting; Issues in Policy and Regulation. Biomass and Bioenergy, 3(3-4): 127-143.
- İPEK, U., ÖBEK, E. ve ÇINARCI, B. 2000** Kompost Kalite Standartları. Standard. Ocak, 31-37.
- KENNISH, M.J. 1992.** Ecology of Etruaries: Antropogenic Effects. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- LOGAN, T.J. ve CHANEY, L. 1983.** Metals.pp In utilization of municipal wastewater and sludge on land. A.L. Page, T.L. Gleason, J.E., Smith, I.K., Iskender and C.E. Sommers, eds. Riverside.
- MARTENS, D.C. ve WESTERMANN, D.T. 1991.** Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies in micronutrients in agriculture. Mortvedt, J.J. et al., eds., Soil Sci. Soc. of Amer. Book Series, No. 4, Madison, Wisconsin, Amer. Soc. of Agronomy.
- MILLER, R.W., AZZARI, A.S.ve GARDINER, D.T. 1995.** Heavy metals in crops as affected by soil types and sewage sludge rates. Communications in soil science and plant analysis, 26 (5/6):703-711.
- ÖZBEK, H., KAYA, Z., GÖK, M. ve KAPTAN, H. 2000.** Toprak Bilimi. Ç.Üniv. Ziraat Fak., Genel Yayın No. 73, Ders Kitapları Yayın No. 16, Adana.
- TIRMIZI, S.A., JAVED, I., SAEED, A.ve SAMINA, F. 1996.** A study of the inorganic elements in vegetable and soil samples of the polluted and nonpolluted areas of Bahawalpur city (Pakistan). Hamdard-Medicus, 39(3):90-95.
- VOODBURY, P.B.ve BRESLIN, V.T. 1992.** Municipal Solid Waste Composting: Potential Effects of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Compost on Plants and the Environment. Biomass and Bioenergy, 3(3-4) 239-259.