

## UÇUCU KÜL VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Ümit ŞENGÜL

İl Kontrol Laboratuvarı, Ordu.

### ÖZET

Dünya’da üretilen tüm fosil yakıt yanma artıklarının %90’ını kömür yanma artıkları oluşturur. Her yıl milyonlarca ton uçucu kül üretilmektedir. Şimdilik uçucu külün sadece %20’si değerlendirilmekte, arta kalanlar karalar doldurularak ya da yüzey havuzlarında biriktirilmektedir. Bu makalenin amacı uçucu kül atımı ve değerlendirilmesi ile ilgili çevresel etkileri içeren mevcut bilgileri vermektir. Kül atımlarının karasal ekosistemler üzerinde önemli potansiyel etkileri şunlardır: Toprak ve yeraltı sularının içine potansiyel toksik maddelerin liçingi; külün başlıca olumsuz kimyasal özellikleri nedeniyle bitki oluşumu ve büyümesinde azalma; külde yetişen sebzelerin element bileşimlerinin değişimidir. Kül atımı, komşu sulu ekosistemleri etkileyebilir. Toprak ıslahlaştırıcı olarak kül kullanımı toprak dokusunu ve su tutma kapasini düzeltebilir, toprak pH’ını artırabilir ve toprak verimliliğini zenginleştirebilir. Bununla birlikte uçucu külün kimyasal özellikleri toprakta elementel dengesizlik, toprağın sıkışması ve çimentolaşma gibi sorunlar yaratır.

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu kül, katı atık, çevresel etkiler.

### FLY ASH AND ENVIRONMENTAL IMPACTS

#### ABSTRACT

Coal combustion wastes constitutes 90% of the wastes of all fossil fuel emerged in the world. Each year, millions ton of fly ash were produced. Presently, only about 20% of these wastes is utilized, and the remainder are deposited in landfills or surface impoundments. The purpose of this article is to review the literature information on utilization of coal combustion residues such as fly ash and its environmental impacts. The major potential impacts of ash disposal on terrestrial ecosystems are: leaching of potentially toxic substances from ash into soils and groundwater; reductions in plant establishments and growth due primarily to adverse chemical characteristics of the ash; changes in the elemental composition of vegetation growing on the ash. Ash disposal can influence adjacent aquatic ecosystem. Using ash as a soil amendment can improve soil texture and water holding capacity,

increase soil pH, and enhance soil fertility. However, chemical characteristics of the fly ash create problems such as elemental imbalances, and cementation or compaction of soil.

**Keywords:** Fly ash, solid waste, environmental impacts.

## 1- GİRİŞ

Dünya'da nüfusun artması, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte gündün güne enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bu enerji ihtiyacını karşılayabilmek için özellikle düşük kalorili ve kül oranı yüksek kömürlerden önemli ölçüde yararlanılmaktadır. Bu amaçla Dünya'da ve Türkiye'de kömür yakan birçok termik santral kurulmuştur.

Termik santrallerde kömürün 1100–1600 °C yanması ile oluşan artıklar %80-90 oranında baca gazları ile sürüklenir ve uçucu kül olarak bilinir, kazanda kalan yaklaşık %10'luk kısım taban külüdür [1]. Uçucu kül yüksek sıcaklıkta yanan kömürün içerdiği, yanma sırasında birçoğu eriyerek yanma gazının etkisiyle şişen inorganik materyalin oluşturduğu, çoğu boş ya da dolu küreciklerden oluşan ve baca gazlarıyla sürüklenen yanmış kömür artığıdır. Büyük oranda ince taneciklerden oluşan uçucu kül ya elektrostatik çöktürücü ya da mekanik filtre gibi emisyon denetim aygıtlarında tutulur ya da bacadan salınır.

Türkiye çok geniş linyit potansiyeline sahiptir. Türkiye'nin (mümkün+olası+görünür) linyit rezervi 8.074.996.000 tondur [2]. Ülkemizde 1999 sonu itibarı ile elektrik üretiminin 15555,9 MW ile %59,6'sı termik santrallerden elde edilmiştir. Türkiye'de elektrik üretiminin termik/hidrolik dengesine bakıldığında 2000 yılında %75 termik %25 hidrolik olan oranın 2020 yılında %82 termik, %18 hidrolik olacağı gözlenmektedir [3]. Ülkemizde termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi sırasında yılda yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır [4]. Bu durum bütün Dünya'da olduğu gibi Türkiye'de de milyonlarca tonluk uçucu kül tepelerinin oluşacağını ve gerekli önlemler alınmazsa önemli çevresel problemler doğuracağını göstermektedir. Uçucu küllerin denetimi ve değerlendirilmesi artık bir zorunluluktur.

Bu makalede uçucu küllerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri kısaca gözden geçirildikten sonra onların çevresel etkileri incelenecektir.

## 2. UÇUCU KÜLLERİN OLUŞUMU VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Kömürün yanması sonucunda inorganik maddeler ile çok az miktardaki yanmamış karbonlu maddeler külü oluşturur. Kömürde bulunan ve yakma

sonrası külü oluşturan mineraller esasen dört grupta toplanabilir: Alüminasilikatlar (killer), karbonatlar, sülfürler ve silika [5]. Yüksek sıcaklık koşullarında kimyasal olarak fazla değişmeyen silika (kuvarz) dışında diğer kömür minerallerinin çoğu yanma sırasında ayrışır. Kil mineralleri su kaybeder ve çeşitli camsı veya kristalin bileşiklere dönüşürler. Karbonatlar  $CO_2$ , CaO, MgO ve kompleks oksit bileşiklerine dönüşürler. Sülfürler büyük oranda metalik oksitler (magnetit, spinel ve hematit) ve  $SO_2$  şeklinde yükseltgenirler. Klorürler, buharlaşma ve sülfürizasyon ile HCl ve sülfatlara dönüşürler. Kazan alevinde yüksek sıcaklık koşulları altında parçacıklarda bir dizi karışık fizikokimyasal dönüşümler olur. Parçacıklar erimeleri sırasında etkin olan yüzey gerilim kuvvetlerinin bir sonucu olarak hızla küresel bir yapıya dönüşürler[6]. Bunların soğuma hızları parçacık büyüklüğüne fazlasıyla bağlıdır. Büyük parçacıklar daha yavaş soğuyacak ve böylece kristallenme daha çok iç kısımda oluşacaktır. İnce partiküller çoğunlukla camsı yapıda soğur [7].

## 2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve minerolojik özellikleri çeşitli etkenlere bağlıdır. Bunlar kömürün bileşimi, yanma koşulları, emisyon kontrol cihazının tipi ve verimi ile kullanılan atma yöntemleri olarak özetlenebilir [8]. Bu nedenle küllerin bileşimi ve çevreye etkileri birinden diğerine çok değişebilir. Bununla birlikte küllerin belli başlı özellikleri ortaktır. Uçucu küller genelde küçük, camsı, oyuk yapılı, 0,01-100  $\mu m$  arasında tane boyutuna sahip ve yoğunluğu 2,1 ile 2,6  $g/cm^3$  arasında değişen taneciklerdir [9]. Yüzey alanları oldukça yüksektir ve tane boyutuna göre yaklaşık 1-16  $m^2/cm^3$  arasında değişir. Uçucu küllerin ısısal ve elektriksel iletkenlikleri içi boş küresel mikro yapılarından dolayı çok düşüktür ve bu yüzden iyi birer yalıtıcıdırlar [10].

## 2.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küller amorf ve kristalin fazlarda başlıca Al, Si, Fe, Ca, K ve Na elementlerini içeren ferroaluminosilikatlar karışımıdır [11]. Bunlar hemen hemen doğal elementlerin tümünü içerirler ve eser element bakımından kömüre göre daha zengindir. Çalışmalar, çoğu eser elementlerin daha küçük tane boyutundaki küllerde daha derişik olduğunu göstermiştir [12]. Genelde külde zenginleşen elementler sırasıyla As, B, Ca, Mo, S, Se ve Sr'dur, Küller yanma sırasında azotun uçmasından dolayı azot açısından toprağa göre daha fakirdir fakat çoğu besin bitkilerine göre daha zengindir[13]. Külün pH'ı kömürün kükürt ve Ca içeriğine bağlı olarak 4,5 ile 12 arasında değişir.

Yüksek kükürtlü ve düşük Ca'lu küller asidik küller, düşük kükürtlü ve yüksek Ca'lu küller bazik küllerdir [14].

Kimyasal olarak uçucu küller başlıca camsı aluminosilikatlardan oluşur. Önemli bileşenleri:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'tür. Uçucu külün ana bileşenleri silisyum, alüminyum, demir ve kalsiyum oksitleri toplam bileşimin yaklaşık %80-95'ini oluşturur. Magnezyum, titan, sodyum, potasyum, kükürt ve fosfor gibi minör bileşenler ise toplam bileşimin yaklaşık %0.5-10'unu oluşturur. Uçucu küller Sb, Ar, Ag, Ba, Be, B, Cu, F, Pb, Mn, Mg, Mo, Ni, Se, Te, Tl, Sn, Ti, U, V ve Zn gibi eser derişimlerde 20 ile 50 arasında element içerir [15,16].

Uçucu küller oluştukları kömürün cinsine göre ASTM C 618'e göre iki ana sınıfa ayrılmıştır. Bunlar F sınıfı ve C sınıfı küllerdir [17]. F sınıfı küller %10'dan daha az  $\text{CaO}$  içerir ve antrasit ve bitümlü kömürlerden oluşur. Linyit ve alt-bitümlü kömürlerden oluşan C sınıfı küller daha çok  $\text{CaO}$  içerir. C sınıfı küller pozzolanik özellik gösterir ve su varlığında kendiliğinden çimentolaşır [18]. Bu küllerin bileşimi çimentoya çok yakındır ve bu nedenle çimento katkı maddesi olarak kullanılır [19].

Uçucu kül tane boyutları arasında başlıca kül bileşenlerinin dağılımı aşağıdaki gibidir.

1. Litofil mineralleri (aluminosilikatlar) daha ince tane boyutunda daha derişiktir.
2. Manyetit, hematit mineralleri daha iri tane boyutunda daha derişiktir.
3. Alkaliler (Na, K) genellikle daha ince tane boyutunda daha derişiktir.
4. Daha ince tane boyutunda kızdırma kaybı daha yüksektir [15].

Türkiye'deki uçucu küllerin tane boyu analizlerine göre, yaklaşık %65-70'i  $45\mu\text{m}$ 'nin altında tane boyutuna sahiptir [20]. Bu incelik bazı fiziksel parametreleri de etkilemektedir. Örneğin külün su geçirgenliği çok düşüktür (0.01-71 cm/gün arasında değişir). Bu da kül içeriğinin yeraltı sularına taşınmasını güçleştirir [21,22].

### 3. UÇUCU KÜL ATIMININ ÇEVRESEL ETKİLERİ

Uçucu küllerin önemli çevresel etkileri Şekil 1'de şematik olarak görülmektedir.

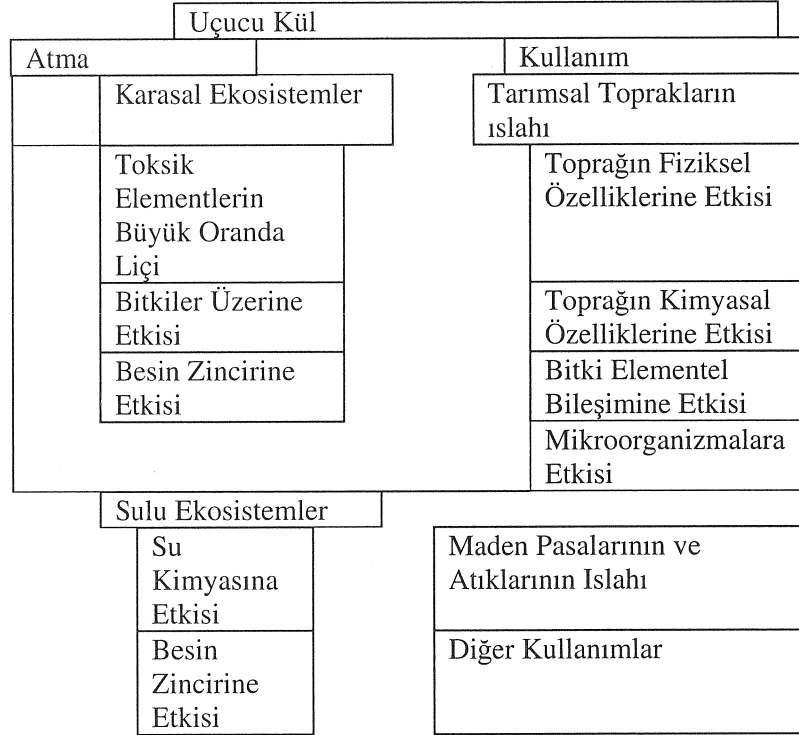
### 3.1 Atık Toplama Yöntemleri

Uçucu kül atımı için kullanılan temel iki yöntem vardır: Havuzlama ve karasal dolgu. Havuzlamada, su ile kül karıştırılarak bir bulamaç haline getirilir ve borularla havuza akıtılarak doldurulur. Kül tanecikleri havuzun tabanına çöker ve üstte kalan su ya alınarak akarsulara geri boşaltılır ya da tekrar kullanım için santrale geri pompalanır. Genellikle bir seri havuz kullanılır. Birinci havuzda su/kül bulamacı ve ikinci havuzda ırmağa boşaltılmadan önceki toplanan su vardır. Bu yolla külün büyük bir kısmı birinci havuzda çökerken, ikinci havuzda küçük bir kısmı kalır. Sonunda birinci havuz tamamen küle dolar, o zaman kül ya başka bir yere atılmak için kaldırılır ya da havuzun üstü kapatılır ve yeşillendirilir[23].

Islak havuzlar işlemin basitliği ve maliyetin ucuz olması nedeniyle eskiden beri kül atımında kullanılan oldukça yaygın bir yöntemdir. Bununla birlikte, son zamanlarda boş arazilerin doldurulması (karasal dolgu), ıslak havuzlara göre daha çok tercih edilmektedir[24]. Islak havuz ve doldurulmuş alanlar için örtülerin kullanımı yeraltı suyuna karışmalar için duyulan endişeler nedeniyle daha gerekli bir hale gelmiştir. Bir atık alanı dolduktan sonra külün üzeri bir toprak tabakası ile örtülerek bitkilerin yetişmesine terkedilir [24].

#### 3.1.1 Karasal Ekosistemler Üzerinde Kül Atımının Etkileri

Karasal ekosistemler üzerinde kül atımının en önemli olumsuz etkileri şunlardır: Külden liç yoluyla toprağa ve yeraltı sularına geçen ağır metaller, bitkilerin kül üzerinde büyümesinde ve oluşmasında azalmalar, bitki element bileşiminin değişmesi ve toksik elementlerin besin zincirine girmesindeki artıştır. Bunlar aşağıda ayrı ayrı anlatılmıştır.



Şekil 1. Uçucu Küllerin Önemli Çevresel Etkilerinin Şematik Gösterimi.

### 3.1.1.1 Ağır Metallerin Liçingi

Bu artıkların atılmasıyla ilgili endişelerin en büyüğü, uçucu kül sahalarında oluşan liç nedeniyle yeraltı suyundaki önemli kirlenmelerden kaynaklanır. Bu endişeler uçucu küldeki As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg ve Se gibi ağır metallerin ve çözünebilir tuzların derişimindeki artıştan kaynaklanmaktadır [22,25]. Ne yazık ki kül birikim alanlarının ve tarımsal toprakların tam olarak izlenmesi oldukça masraflı ve zor olduğundan bu bölgelerdeki durumu ortaya çıkaracak veriler oldukça azdır [26]. Kül atımının yeraltı sularına etkisi daha çok laboratuvarlarda yapılan liçing çalışmalarıyla belirlenmektedir, fakat alanda bulunan kompleksleştiriciler ve alandaki karmaşık etkileşim ve ilişkiler nedeniyle bu çalışmaları, alan şartlarına uydurmaya çalışmak gerçeğe pek uygun olmayabilir [27,28,29].

Kül atımının yeraltı suyu niteliği üzerindeki gerçek etkileri, küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, hidrojeolojik özelliklerine ve birikinti alanlarının

iklimine büyük oranda bağlıdır[30]. Henüz yeni olan kül yığınlarında başlangıçta liçe geçen çözünebilir tuz miktarı çok yüksektir ve aşamalı olarak liçteki çözünebilir tuz içeriği azalır. Bu nedenle dolan bir havuzdan alınan kül başka bir alana doldurulduğunda burada liçe geçen çözünebilir tuz derişimi çok daha düşüktür. Çünkü havuzlanmış kül su ile doymuştur ve içerisindeki çözünebilir tuzların çoğu önceden liçe geçmiştir [31,32].

Alanda ve laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar, kül liçlerinin çoğunda birçok ortak özellik olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu liçlerin genel özelliği, baskın olarak  $Ca^{+2}$  katyonu ve  $SO_4^{-2}$  anyonunu içermesi ve yüksek oranda çözünebilir tuz derişimleridir [25]. Yüksek kükürtlü kömür külleri genellikle asidik liç verir, düşük kükürtlü ve yüksek kalsiyumlu kömürlerin külü bazik bir liç verir. pH değerlerinin en düşük 3 en yüksek 12 değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber liç pH'ı ya kirliliğin olmadığı yeraltı suyu ya da alt toprak katmanlarıyla temas sonucu normal düzeye dönebilir [26,27,29].

### 3.1.1.2 Uçucu Küllerin Bitkiler Üzerinde Etkileri

Terkedilmiş uçucu kül havuzlarında ve kül birikim alanlarının yeşillendirilmesinin, külün su ve rüzgâr erozyonundan korunması, yabani hayat için doğal ortam, barınak ve daha güzel kır manzaraları yaratması gibi birçok avantajları vardır [33]. Bununla birlikte bu alanlarda yeniden bitki yetiştirilmesi küldeki olumsuz fiziksel ve kimyasal koşullar nedeniyle oldukça zor ve yavaş ilerler. Kül atık alanlarında bitki topluluğu oluşumunu engelleyen önemli faktörler şunlardır:

- i) Başta N ve P olmak üzere genellikle temel besin bileşenlerinin eksikliği
- ii) Yüksek pH ve/veya yüksek derişimde çözünebilir tuzlar, yüksek B ve diğer potansiyel zararlı eser elementlerin yüksek derişimlerinin yarattığı toksiklik
- iii) Kül tabakalarının çimentolaşması veya sıkışması [34]

Kömürdeki orjinal N yanma sırasında uçtuğundan dolayı, uçucu kül çok düşük oranda azot içerir. Küldeki P derişimi toprağa oranla daha yüksekken ( $400-8000 \text{ mg P kg}^{-1}$ ), yüksek baziklikteki küllerde P'un Ca ile ve tahminen küldeki Fe ve Al ile etkileşimlerinden dolayı bitkinin kullanabileceği durumda bulunmaz. Bu iki elementin eksikliği azotlu ve fosforlu gübrelerle kolayca giderilir [35].

Özellikle yeni oluşmuş uçucu kül alanlarında, kül üzerinde bitki yetişmesini sınırlayan faktörlerden biri de yüksek pH' dır. Bazı bazik küllerin pH'ı 12'yi

geçebilir, bu da P gibi temel besinlerin ve Cu, Fe, Mn ve Zn gibi ana eser elementlerin eksikliğine neden olur. Bazı küller, As, Se ve V gibi çözünlükleri pH'a bağlı ve gereksiz (nonessential) bazı eser elementlerin bitkide artarak birikimine neden olabilir [13,18,36].

Kül yığınlarının fiziksel özellikleri de başarılı bir bitki topluluğu oluşumunu sınırlayabilir. Bazı durumlarda kül yığınlarında çimentolaşmış ve sıkışmış tabakaların oluşumu solunumu, suyun içeriye süzülmesini ve kökün ilerlemesini azaltır [13]. Organik maddelerin ve/veya toprağın küle karıştırılması bu tabakaların parçalanmasına yardımcı olabilir [34]. Külün havuzlara dolduktan sonra önemli oranda pozzolanik özellikler göstermesiyle oluşan çimentolaşmış tabakalar başlı başına bir problemdir. Külün başka bir alanda biriktirilmek üzere havuzlardan çıkarılması tırmıklama yöntemiyle yapılırsa, bu tabakalar bozulur ve artık bir problem yaratmaz [33].

Yukarıda tartışılan faktörlerin tümü kül yığılım alanlarında mikroorganizmaların kolonileşmesini sınırlayabilir. Uçucu kül yeni atıldığında sterildir. Kuvvetli bir mikrobiyal topluluğun gelişimi, külün konumunu bitki yetişmesi yönünde artıran bir etken olabilir. Bu alanlarda mikrobiyal nüfusu sınırlayan önemli faktör, N ve temel organik bileşiklerin az olmasıdır. Bir enerji kaynağı olarak basit organik bileşikler ve mikrobiyal büyüme ve gelişim için N'u sağlayan organik maddelerin ilavesi mikrobiyal nüfusun gelişimini ve çeşitliliğini artırır [37].

### 3.1.1.3 Küllerin Besin Zinciri Üzerine Etkileri

Bitkide kül yığınlarından gelen eser element birikimlerinin hayvanlar üzerindeki potansiyel sonuçlarını belirleme çalışmaları başlıca Se üzerinde yoğunlaşmıştır. Selenyum hayvanlar için önemli bir elementtir, fakat hayvanların günlük beslenmesinde Se'un eksik ve zehirli düzeylerinin aralığı dardır [38]. Uçucu kül üzerinde yetişen bitkilerde çoğunlukla yüksek düzeylerde Se birikmesi nedeniyle bu bitkileri tüketen hayvanlardaki potansiyel etkisini saptamak önemlidir. Bu alanlar Se eksikliği problemine yardımcı olabilir. Bununla beraber, hayvan beslenmesinde Se'un eksik ve toksik düzeyleri arasındaki aralığın dışına çıkmamak için kül havuzlarında yetişen bitkilerdeki Se düzeyleri ve onların hayvanlarca tüketimi yakından izlenmelidir [39,40].



### 3.1.2 Sulu Ekosistemler Üzerinde Kül Atıklarının Etkileri

Karalarda ve havuzlarda yığılan küller, kül havuzu dışakarlarının ve yüzeyde biriken suların doğrudan ve dolaylı olarak yüzey sularına ve yeraltı sularına karışması sonucu komşu sulu ekosistemleri etkileyebilir (Çizelge 1.)[41,42].

**Çizelge 1.** Uçucu Kül Havuzlarının Komşu Sulu Ekosistemler Üzerine Potansiyel Etkileri.

Özellik/İşlem	Kül Atımlarının Etkisi
Bulanıklık	Artar özellikle dışakarlar sulu ekosistemlere doğrudan boşalırsa
Sıcaklık	Dışakarlar (efluent) sulu ekosistemlere doğrudan boşalırsa artış olabilir
Kum birikimi	Artar, bentik organizmaları boğabilir
Su bazikliği	Genelde artar, yüksek sülfatlı dışakarlarda suyun azalabilir
pH'ı ve bazikliği	Artar
Su tuzluluğu	Artar, özellikle As ve Se için
Kimyasal çözünürlük	Azalırsa
Organik maddenin bozunması	Azalırsa
Fotosentez	Artar
Biyolojik oksijen ihtiyacı	Çoğu elementler için artar, Se için toksik seviyelere ulaşabilir
Elementlerin biobirikimi	Zorlanır
Hayvan metabolizması	Azalırsa
Yeniden hayvan üremesi	Artar
Ölüm oranı	Hassas türlerin kaybıyla azalırsa
Türlerin çeşitliliği	Azalırsa
Türlerin yoğunluğu	

### 3.2 KÜL KULLANIMININ ÇEVRESEL ETKİLERİ

Dünya'da üretilen uçucu külün çoğunluğu dolgu alanlarına ve havuzlara yığılsa da, başlıca inşaat endüstrisi olmak üzere yaklaşık %20 kadarı değerlendirilmektedir. Türkiye'de kül kullanımı yok denecek kadar azdır. Her yıl büyük miktarlarda kül tepelerinin oluşumu, araştırmacıları bu atıkların değerlendirilmesi için fikir üretmeye zorlamış ve tarım ve endüstride değerlendirme yolları aranmıştır. Bu araştırmaların çoğunluğu, tarımsal topraklar ve maden pasalarının külle ıslahı üzerine yoğunlaşır. Küllerden az da olsa metal ekstraksiyonu ve atıksu ıslahında yararlanılmaktadır.

### 3.2.1 Tarımsal Toprakların Külle Islahı

Uçucu kül, problemlili toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerini düzeltmedeki etkisi nedeniyle tarımsal toprakların verimini arttırmada kullanılabilir [43]. Uçucu külün toprağa katılması toprak dokusunun düzelmesini (kaba ve ince taneli toprakların her ikisi için), su tutma kapasitesinin artmasını (kaba taneli topraklar için), pH'ın artmasını (asidik topraklar için) ve çoğu makro ve mikro besinlerin derişiminin artmasını sağlar [44]. Bununla birlikte aşırı miktarlarda çözünebilir tuz, B ve toksik eser elementleri içermesi, mevcut N ve P miktarında azalma, aşırı yüksek pH gibi olumsuz yönleri elementel dengesizlik, toprağın sıkışması ve çimentolaşması gibi sorunlar yaratır (Çizelge 2.) [45,46].

**Çizelge 2.** Uçucu Kül Islahının Toprak Özellikleri Üzerinde Gözlenen Etkileri

Toprak Özelliği	Tipik tarımsal toprak	Yeni dökülen külle ıslah edilmiş toprak	Eski külle ıslah edilmiş toprak
Havalandırma	Yüksek	Daha yüksek	Daha yüksek
Yığın yoğunluğu	1.3 (ort.)	Daha düşük	Daha düşük
Katyon deęiştirme kapasitesi	Orta yükseklikte	Daha düşük	Daha düşük
Çimentolaşma	Düşük	Düşük	Bazik küllerin ilavesi ile artabilir
Elektriksel iletkenlik	Düşük	Daha yükseğe ılımlı	Daha yüksek
Hidrolik iletkenlik	Yüksek	Düşük oranlarda artma, yüksek oranlarda azalma	Düşük oranlarda artma, yüksek oranlarda azalma
Mikrobiyal aktiflik/çeşitlilik	Yüksek	Düşük oranlarda artma veya azalma olabilir. Yüksek oranlarda azalma	Düşük oranlarda artma veya azalma olabilir. Yüksek oranlarda azalma
Kırılma modülü	Yüksek	Daha düşük	Daha düşük
Besin bulunumu	Besin ihtiyacına göre dengeli	N, P ve etkili Cu, Mn, Zn'da eksiklik B'un olası fototoksikliği ve besin zincirine Mo ve Se etkisi	N, P ve etkili Cu, Mn, Zn'da eksiklik B'un olası fototoksikliği ve besin zincirine Mo ve Se etkisi
Besin içeriği	Tüm besinler var	Çok düşük N, yükselen B; ve dięerleri	Çok düşük N, sık sık fazla B; ve diğerleri
Organik madde	Yüksek	Daha düşük	Daha düşük
pH	6.0-7.5	<6.0 ila $\cong$ 8.0	<6.0 ila $\cong$ 12.0

Toprak Özelliği	Tipik tarımsal toprak	Yeni dökülen külle ıslah edilmiş toprak	Eski külle ıslah edilmiş toprak
Bitkide mevcut su	Yüksek	Büyük artışlarda etkisiz, toprak tipine ve yağın yağmur miktarına bağlı	Büyük artışlarda etkisiz, toprak tipine ve yağın yağmur miktarına bağlı
Tuzluluk	Düşük	İlımlı	Yüksek fakat 2-3 yıl sonra düşmekte
Sıcaklık	Yeterli	Daha yüksek	Daha yüksek
Zararlı tuzlar	Yok	Duyarlı bitkilere zararlı seviyelerde B bulunabilir	Yüksek B ve Ca, K, Mg ve Na'un çözünür tuzları
Su erozyonu	Dirençli	Daha hassas	Daha hassas
Su tutma kapasitesi	Yüksek	Daha yüksek	Daha yüksek
Rüzgar erozyonu	Dirençli	Daha hassas	Daha hassas

### 3.2.2 Maden Pasa ve Atıklarının Külle Islahı

Uçucu kül maden pasaları ve maden atıklarının asidik yüzeyleri için bir ıslah edici olarak kullanılabilir. Birçok maden pasalarında ve maden atıklarında yüksek oranda pirit ( $\text{FeS}_2$ ) olması ve yükseltgenmeyle sülfürik asit oluşturması yüksek asitli pasaları oluşturur ( $\text{pH} \leq 3.5$ ) [47]. Buna ilaveten bu maddeler yüksek yığın yoğunluğu, düşük su tutma kapasitesi ve kökün ilerlemesi ve suyun süzülmesini engelleyen sıkışmış tabakaları içeren olumsuz fiziksel özelliklere sahiptir [48]. Sonuçta bu olumsuz koşullar giderilmeden bu alanlarda bitki yetiştirmek imkânsız veya çok zordur. Maden pasalarına ve atıklarına bazik uçucu küllerin eklenmesi asitliğin nötralleşmesine, yığın yoğunluğunun azalmasına, su-tutma kapasitesinin artmasına ve sıkışmanın azaltılmasına yarar [49].

Maden pasalarını ve atıklarını ıslah etmede uçucu kül kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar, külün bitkisel örtünün yeniden oluşması ve bu alanlardaki olumsuz etkilerin giderilmesi için bir alternatif olduğunu ispatlamaktadır. Bununla birlikte kül ıslahının gerçek etkileri, külün fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olduğundan, kömür atıkları veya pasanın külle ıslahında tercih edilecek uygulama ve oranların külün önceden belirlenen fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılması gerekir.

### 3.2.3. DİĞER KULLANIMLAR

Kömür uçucu külünün en fazla kullanıldığı yer inşaat endüstrisidir. Portland çimentosu ve beton karışımlarına katılarak inşaatlarda, yol yapımında, otoyol inşaatında yapı malzemesi olarak kullanılır.

Uçucu kül beton teknolojisinde mineral katkı maddesi olarak kullanılan ve pozzolanik özelliğe sahip olabilen toz bir malzemedir[50]. Betonun pek çok niteliğini iyileştirmesi ve ekonomik yarar sağlamasının yanısıra bu atığın beton içinde kullanılması ile çevre kirliliği yaratan bu atıktan yararlı ürünler elde edilmiş olacaktır [51]. Öte yandan bunların betonda kullanımı içerdikleri toksik bileşenlerin çözünerek çevreye yayılımını da önler. Bununla ilgili çok sayıda katılaştırarak- kararlılaştırma çalışması yayınlanmıştır [52].

Birçok araştırmacılar atıksu ve göllerden fazla P'u uzaklaştırmak için uçucu kül kullanmayı düşündüler. Külün büyük miktarlarda Al ve Fe içermesi, çözünmeyen fosfor bileşikleri oluşturarak, su kolununda çözünmüş P derişimlerini azaltır. Çalışmalar uçucu küllerin yüksek P'lu suların izlenmesi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Bununla beraber küldeki Al ve Fe'in P'u tutma potansiyeli nedeniyle yüksek P'lu küller geleneksel gübrelerle karşılaştırıldığında bitkiler için bir P kaynağı olarak etkin değildir[53].

Uçucu kül metaller için bir cevher olarak da önerilmiştir. Uçucu külden metallerin kazanımı için birçok proses önerilmiştir ve ekonomik olarak kullanılabilceği gösterilmiştir. Bu yolla kullanılan uçucu küller, kül birikimlerini azaltacak fakat yeni çevresel proplemler ortaya çıkaracaktır, örneğin ekstraksiyon işlemlerinden oluşan asit atıklarının birikmesi gibi. Külden metal kazanımına eşlik eden çevresel etkilerin saptanması için daha fazla araştırma gerekir [54,55].

## 4. SONUÇ

Ülkemizde ve Dünya'da enerji ihtiyacını karşılamak için her geçen gün kömürle çalışan termik santrallerin sayısı artmakta, bu da her yıl milyonlarca tonluk uçucu kül tepelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu atığın fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı biriktirilmesi ve kullanılması karasal ve sulu ekosistemler üzerinde önemli etkiler doğurur. Bu olumsuzlukların en büyüğü atık alanında oluşan liç nedeniyle yüzey ve yeraltı sularında oluşan kirlenmelerdir. Araştırmaların büyük bir kısmı uçucu külün çevresel

etkileriyle ilgili olmasına rağmen daha açıklanması gereken birçok nokta vardır.

Her yıl büyük miktarlarda uçucu kül oluşması, araştırmaların büyük bir kısmını tarımda ve endüstride bu atıkların değerlendirilmesine yöneltmiştir. Şimdilik uçucu külün ancak %20'si değerlendirilmekte, bu değerlendirme yüzdesi, gelişmiş ülkelerde artarken, az gelişmiş ülkelerde düşmektedir. Ülkemizde termik santrallerden çıkan uçucu kül sadece çimento endüstrisinde kullanılmaktadır. Uçucu kül üretimi ile ilgili gerekli önlemler alınmazsa çok büyük çevresel problemlerin ortaya çıkacağı açıktır. Bu zararlı üründen yararlı ürünler elde etmek hem çevresel hem de ekonomik açıdan yarar sağlayacaktır. Bu atıktan yararlı ürünler elde etmek için daha çok araştırmaya ihtiyaç vardır.

## KAYNAKLAR

1. Ray, S.S.; Parker, F.G., 'Characterization of Ash From Coal-Fired Power Plant', EPA-600 (7-77-010), Interagency Energy Environment Research and Development Program Report, EPA, Washington (1977).
2. Yalçın, E., Mordoğan, H. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Kütahya (1996).
3. Atılgan, İ., 'Türkiye'nin Enerji Potansiyeline Bakış' Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt15, No:1 (2000).
4. Perçinel, S., 'Termik Santrallerde Kömür Kullanımının İnsan Sağlığı Üzerinde Etkileri' Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 23-26 Mayıs 2000, Zonguldak Kdz. Ereğli, Türkiye.
5. Hemmings, R.T. and Berry, E.E. On The Glass in Coal Fly Ashes; Recent Advances in Fly Ash Coal Conversion By - Product: Characterization, Utilization and Disposal-II Edits. G.J. Mc Carty; F.P. Glasser and Proceeding V. 65, (3-38) (1986).
6. Türkdoğan, E.T., Physicochemical Properties of Molten Slags and Glasses. The Metal Society, London (1983).
7. Güler R., Hess T.R., Cocks D.L. 'Engineering and Physicochemical Properties of Texas Lignite Fly Ash' Proc. Xth. Int. Coal Ash Conf. Orlando (1992).
8. Hook V. R.I. 'Potential health and environmental effects of trace elements and radionuclides from increased coal utilization' Environ. Health Perspect.' 33:227-247(1979).
9. Adriano, D.C., Page A.L., Elseewi A.A., Chang A.C., and Straughan I. 'Utilization. and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems': A review. J. Environ. Qual. 9:333-334 (1980).
10. Schure, M.; Surface Area and Porosity of Fly. Ash; Environ. Sci. Technol. 19,82-86 (1985).
11. Page, A.L., Elseewi, A.A and Straughan I.R. 'Physical and chemical properties of fly ash from coal/fired power plants with reference to environmental impacts.' Residue Rev. 71:83/120 (1979).

12. El-Mogazi, D., Lisk D.J., and Weinstein L.H. 'A review of physical, chemical, and biological properties of fly ash and effects on agricultural ecosystems'. *Sci. Total Environ.* 74:1-37 (1988).
13. Mattigod, S.V., Rai D., Eary L.E. and Ainsworth C.C. 'Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements.' *J. Environ Qual.* 19:188-201(1990).
14. U.S. Environmental Protection Agency. 'Wastes from the combustion of coal by electric utility power plants'. USEPA Rep. 530-SW-88-002. Usepa, Washington, DC (1988).
15. Tripodi, R.A., Cheremisinoff, P.N. 'Coal Ash Disposal Impacts', *Tecnomical Publ.* 1980.
16. Holcombe, L.J., Eynon, B.P., Switzer, P., 'Variability of Elemental Concentrations in Power Plant Ash', *Environ. Sci. Technol.* 19,615-620 (1985).
17. Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. High-Performance Concrete Incorporating Large Volume of ASTM Class F Fly Ash. *Proceedings of the ACI International Conference, held November 15-18, 1994, Singapore; Ed. V.M. Malhotra; American Concrete Institute, Detroit, MI, pp 177-193. (ACI SP-149).*
18. Naik, T. R. Singh, S. S. and Hossain, M. M. Abrasion Resistance of Concrete as Influenced by Inclusion of Fly Ash. *Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 2, pp 303-312 (1994).*
19. Carette, G. G.; Bilodeau, A., Chevrier, R. L. and Malhotra, V. M. Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S. *ACI Materials Journal, Nov-Dec, Vol. 90, No. 6, pp 535-544 (1993).*
20. Bayat O., Toraman, O.Y. 'Physical and Chemical Properties of Some Turkish Fly Ashes' *Geosound, Vol 26, June 1995, pp 187-195.*
21. Arslan, M., Boybay, M., Kaya, M., Cici, M. ve Alkan, C., 'Türkiye Termik Santralleri Uçucu Küllerinin Bazı Özellikleri' İTÜ, 'Endüstriyel Kirlenme Sempozyumu' S:90,24-26 Eylül İstanbul (1990).
22. Berry, E.E., Hemmings, R.T., Cornelius C. 'Speciation in size and density fractionated fly ash. The influence of HCl leaching on the glassy constituents of a high-Ca fly ash' *Materials Research Society Symposia Proceedings, Fly Ash and Coal Conversion by-Products: Characterization, Utilization and Disposal, vol:113 (1988).*
23. U.S. Environmental Protection Agency. 1988. Wastes from the combustion of coal by electric utility power plants. USEPA Rep. 530-SW-88-002. Usepa, Washington, DC.
24. Sinha, R. & Dayal, U. 'Effluent management in ash disposal ponds' 13<sup>th</sup> International Conference on Solid Waste Disposal Management & Technology, Philadelphia, U.S.A, Nov. 16 -19<sup>th</sup> (1997).
25. Theis, T.L., Ripp, J.A and. Villaume, J.F. 'Physical and chemical characteristics of unsaturated pore water and leachate at a fly ash disposal site.' p. 161-172. In 43<sup>rd</sup> Purdue Industrial Waste Conf. Proc. Lewis Publishers, Chelsea, MI. (1989).
26. Hjelmar, O. 'Leachate from land disposal of coal fly ash.' *Waste Manage. Res.* 8:429-449. (1990).

27. Murarka, I.P., Mattigod, S.V and Keefer R.F. 'An Overview of Electric Power Research Institute (EPRI) research related to effective management of coal combustion residues'. In R.F. Keefer and K. Sajman (ed.) Trace elements in coal and coal combustion residues. Advances in Trace Substances Research book series. Lewis Publishers, Chelsea, MI. (1993).
28. Daniels, L. W., Zelanzy, L. 'Characterization of acid leaching reactions in coal refuse/ coal fly ash bulk blends.' Proceedings of 1999 International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky Center for Applied Energy Research, Lexington, KY USA, (Oct. 1999).
29. Sheps, S., Cohen, H. 'Evaluation of the leaching potential of trace elements from coal ash to the (groundwater) Aquifer.' Proceedings of 1999 International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky Center for Applied Energy Research, Lexington, KY USA, (Oct. 1999).
30. Kopsick, D.A., and Angino, E.E. Effect of leachate solutions from fly and bottom ash on ground water quality. *J. Hydrol.* 54:341-356 (1981)
31. Singh G., Kumar, S. 'Environmental evaluation on leaching of trace elements from coal ashes: a case of Chandrapura thermal power station.' *J. Environ. Std. Policy*, 2(2) (1999).
32. Singh G., Kumar, S. 'Environmental evaluation of coal ash from Chandrapura thermal power station of Damodar Valley Corporation.' *Indian J. Environ. Prot.* 18 (12), 884-888 (1998).
33. Duggan, J.C., and D.H. Scanlon. Evaluation of municipal refuse compost for ash ponds stabilization. *Compost Sci.* 15:26-30 (1974).
34. De Vleeschauwer, I.D., and Imler, R., Vegetation establishment on fly ash ponds by means of hydroseeding. p.352-354. In K.J.A. De Waal and W.J. Van Den Brink (ed.) *Environmental technology*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, the Netherlands (1987).
35. Church, D.A., Raad, L., Tumeo, M. 'Experimental study of leaching of fly ash' Transportation Research Board Series: Transportation Research Record 1486 PP:3-12 (1995).
36. Wasay, S.A. 'Leaching study of toxic trace elements from flyash in batch and column experiment.' *J. Environ. Sci. Hlth*, A27 (3), 697-712, (1992).
37. Adriano, D.C. 'Trace elements in the terrestrial environment.' Springer-Verlag, New York. (1986).
38. Combs, G.F., Mandisodza, J. K.T., Gutenmann, W.H. and Lisk, D.J. 'Utilization of selenium in fly ash and in white sweet clover grown in fly ash by the chick.' *J. Agric. Food Chem.* 29:149-152 (1981).
39. Gissel-Nielsen, G., Gupta U.C, Lamand, M. and Westermack, T. 'Selenium in soils and plants and its importance in livestock and human nutrition.' *Adv. Agron.* 37:397-461 (1984).
40. Kumar, V. 'Fly Ash Utilisation. A Mission Mode Approach in Ash Ponds and Disposal Systems. Raju, V.S., Dutta, M., Seshadri, V., Agarwal, V.K. & Kumar, V., Eds. Narosa Publishing House, New Delhi, 365, (1996).
41. Benson, W.H., and Birge, W.J. 'Heavy metal tolerance and metallothionein induction in fathead minnows: Results from field and laboratory investigations.' *Environ. Toxicol. Chem.* 4:209-217(1985).

42. Jacobs, L.W., Erickson, A.E. Berti, W.R. and Mackellar, B.M. 'Improving crop yield potentials of coarse textured soils with coarse fly ash amendment' P:59-1 to 59-16. In proc Ninth Int. Ash Use Symposium. Vol:3 EPRI GS-7162 Am. Coal Ash Assoc. Washington, D.C. (1991).
43. Barman, S.C., Kisku G.C., Bhargava S.K. 'Accumulation of heavy metals in vegetables, pulse and wheat grown in flyash amended soil.' J. Environ Bio, 20(1),15-18, (1999).
44. Das R.K., Kumar V., Singh, R.S. 'Impact of fly ash pond effluent on selected leguminous plants' Eco. Env. Conservn, 6(1),63-66, (2000).
45. Pichtel, J.R. 'Microbial respiration in fly ash/sewage sludge-amended soils.' Environ. Pollut. 63:225-237 (1990).
46. Pichtel J.R., and Hayes, J.M. 'Influence of fly ash on soil microbial activity and populations.' J. Environ. Qual. 19:593-597, (1990).
47. Taylor, E.M. Jr., and Schuman. 'G.E. Fly ash and lime amendment of acidic coal spoil to aid revegetation.' J. Environ. Qual. 17:120-124, (1988).
48. Fail, J.L., Jr. 'Growth response of two grasses and a legume on coal fly ash amended strip mine spoils.' Plant Soil 101:149-150, (1987).
49. Jastrow, J.D., Zimmerman, C.A., Dvorak, A.J. and Hinchman. R.R. 'Plant growth and trace element uptake and acidic coal refuse amended with lime or fly ash.' J. Environ. Qual. 10:154-160, (1981).
50. Malek, R.I.A. and Roy, D.M., 'Electrochemical Stability of Embedded Steel and Toxic Elements' in Flyash and Coal Conversion By:Product: Characterization, Utilization and Disposal-III Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol:86 P:49-58 (1987).
51. Poon, C.S. and Perry, R. 'Studies of Zinc, Cadmium and Mercury Stabilization in OPC/PFA' in Flyash and Coal Conversion By:Product: Characterization, Utilization and Disposal-III Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol:86 P:67-76 (1987).
52. Agamuthu, P. And Alamin, M. 'Waste Characterization and Solidification/Stabilization Studies' University of Malaya, Centre of Environmental Studies and Management, Malaya (2001).
53. Fine, L.O. and Jensen, W.P. 'Phosphate in waters: I. Reduction using northern lignite fly ash.' Water Resour. Bull. 17:895-897 (1981).
54. Gabler, R.C. Jr., and Stoll, R.L. 'Extraction of leachable metals and recovery of alumina from utility coal ash' Resour. Conserv. 9:131-142 (1982).
55. William, T.M., Canon, R.M., Egan, B.Z., Kelmers, A.D., Seeley, F.G. and Watson, J.S. 'Economic metal recovery from fly ash.' Resour. Conserv. 9:155-168. ( 1982).