



Tarama Makalesi / Literature Review

## İkincil bir kaynak olarak kömür uçucu külünden değerli metallerin ve nadir toprak elementlerinin geri kazanımı üzerine literatür çalışması

### *Review of recovery of valuable metals and rare earth elements from coal fly ash as a secondary resource*

Akad Büke<sup>a,\*</sup>, Birgül Benli<sup>a,\*\*</sup><sup>a</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği, İstanbul, TÜRKİYE

Geliş - Received: 13 Aralık/December 2020 • Kabul - Accepted: 5 Temmuz/July 2021

## ÖZ

İnsanlığın, Neolitik çağdan beri "siyah altın" olarak tanıdığı kömür, 18. yüzyıl sanayi devrimi sonrasında enerji ihtiyacını karşılayan popüler yakıt olmuştur. Son zamanlarda yanma sonrası uçucu kül gibi artıklar hem depolama hem de çevresel açıdan sorun teşkil etmektedirler. Kömür tüketimi tamamen sona erene kadar, bu tür artıklar ortaya çıkmaya devam edecektir. Kömür uçucu külleri, değerli metal ve nadir toprak elementleri açısından zengin bir ikincil kaynak olup, endüstriye tekrar geri kazandırılması önem arz etmektedir. Fiziksel zenginleştirme işlemlerle nihai konsantré üretimi kısıtlı olsa da, kimyasal zenginleştirme ve hidrometalurji (liç, solvent ekstraksiyonu vs.) sonrasında geri kazanıma yönelik cevher hazırlama çalışmalarının önemi büyüktür. Seçilecek yöntemlerin tercihinde, Nadir toprak elementlerinin uçucu kül içerisinde bulunma oranlarının incelenmesi, boyutun zenginleştirme işlemlerine etkisi ve özellikle entegre fiziksel-kimyasal zenginleştirme yöntemlerinin araştırılması önemlidir.

Kuşkusuz, önümüzdeki süreçte kömür tüketimine bağlı oluşan uçucu küller gibi artıkların bertaraf edilmesinde, cevher hazırlama işlemleri önemli rol oynayacaktır. Bu makalede, uçucu küllerinin genel özellikleri, içerikleri ve ikincil kaynak olarak zenginleştirilmesinde cevher hazırlamanın, özellikle fiziksel zenginleştirme işlemlerinin yeri ele alınıp, yakın zamanda bu konuda yapılan çalışmalar incelenmiştir.

**Anahtar sözcük:** Kömür, kömür uçucu külü, nadir toprak elementleri, cevher hazırlama, geri kazanım.

## A B S T R A C T

The "black gold" coal, which humanity has known since the Neolithic age, has been the popular fuel after the 18th century industrial revolution. Recently, residues such as fly ash after combustion pose a problem both in terms of storage and environmental aspects. Such residues will continue to appear until coal consumption ceases completely. Coal fly ash is a secondary source in precious metals and rare earth elements, and it is important to recycle it to the industry. Although the final concentrate production by physical enrichment processes is limited, the ore preparation studies together for chemical enrichment and hydrometallurgy (leaching, solvent extraction, etc.) recovery are of great importance. It is important to examine the ratio of rare earth elements in fly ash, the effect of size on enrichment processes and especially the integrated physical-chemical enrichment methods in the choice of the methods to be selected.

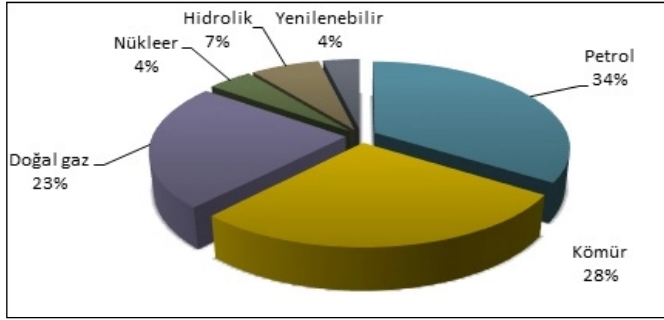
In this article, the general properties of coal ashes, and rare earths contents and especially physical enrichment processes of fly ash are discussed and recent studies on this subject are examined.

**Keywords:** Coal, coal fly ash, rare earth elements, mineral processing, recycle.

\* akadbuke@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0001-8158-0542>\*\* Sorumlu yazar / Corresponding author: benli@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7386-5003>

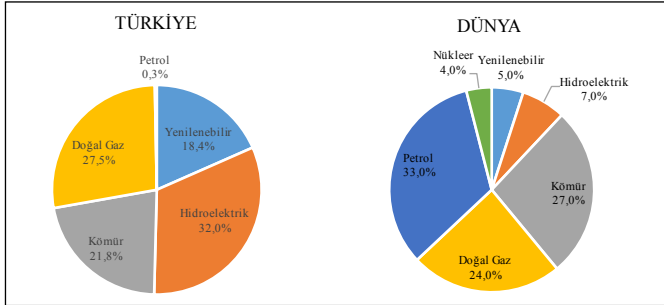
## Giriş

İnsanlık, varlığından bu yana özellikle yerleşik hayata geçişi sonrası enerjiye bağımlı halde yaşamını sürdürmüştür. Teknolojinin gelişmesi ve elektriğin hayatımıza girmesiyle beraber enerji de vazgeçilmez bir hal almıştır. İnsanlığın bu enerji ihtiyacını karşılamak için kömür ve nükleer enerji gibi yakıt bazlı enerji kaynakları ve hidroelektrik santralleri ile doğal sürdürülebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgâr enerjisi, güneş panelleri ve rüzgâr türbinlerinden sağlanmaktadır (EIA, 2020). Özellikle fosil yakıtlardan biri olan kömür, çevresel sorunları halen tartışma konusu olsa da, Şekil 1’de görüldüğü gibi enerji üretiminde en çok kullanılan kaynaklardır.



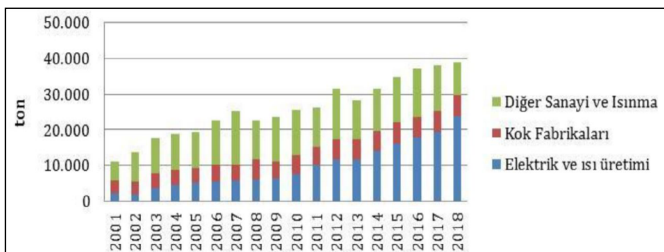
Şekil 1. Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı, 2017 (<http://www.tki.gov.tr>).

British Petroleum (BP)'un 2020’de paylaştığı verilere göre Dünya birincil enerji arzlarının kaynaklara göre dağılımı %33 petrol, %27 kömür, %24 doğal gaz, %7 hidroelektrik, %4 nükleer ve %5 yenilenebilir enerji olarak belirtilmiştir.



Şekil 2. Türkiye ve Dünya’daki enerji kaynaklarının dağılımının karşılaştırılması (TEİAŞ, 2020; BP, 2020).

Son yıllarda, enerji üretimi için alternatif metotlar ve kaynaklar olsa da, Dünya ve Türkiye genelinde kömür kullanım miktarının enerji üretiminde halen önemli bir paya sahip olduğu Şekil 2 ve 3’de görülmektedir. Türkiye’de taş kömürü tüketiminin 2001 yılından 2018 yılına kadar yaklaşık 30.000 ton artmıştır. Özellikle elektrik ve ısı üretimindeki artış dikkat çekicidir.



Şekil 3. Kullanım yerlerine göre Türkiye’de taş kömürü kullanımı (Tamzok, 2019).

Ülkemizde, kömür sanayi sektöründe, ısınma amaçlı konut ve iş yerlerinde ve elektrik üretimi amacıyla termik santrallerde tüketilmektedir. Türkiye’de yerli kömür kullanarak çalışan 39 adet elektrik santrali işletmededir (Türkiye Kömür İşletmeleri, 2020). Türkiye’de kömür yakıtlı çalışan termik santraller, ülkenin dört bir yanında bulunmaktadır. 2019 yılında, sadece yerli kömür ile çalışan termik santrallerden yıllık 11.316,8 MW enerji üretilmiştir (Türkiye Kömür İşletmeleri, 2020). Enerji Atlası’nın verilerine göre, Türkiye’de 42 adet kayıtlı kömür ve linyit yakıtlı termik santraller bulunmaktadır. Bu termik santrallerin toplam kurulu gücü 19.711 MW’dır (<https://www.enerjiatlası.com/kömür/>).

Diğer yandan, enerji üretimi için kömür kullanımı bu denli artış gösterince, buna bağlı olarak oluşacak çevresel sorunlar da aynı hızla artış göstermektedirler. Özellikle geniş alanlara yayılmış atık depolarının, su kaynaklarını, tarım arazilerinin ve doğal çevrelerinin olumsuz etkilenebileceği belirtilmiştir (Kaplan ve Gültekin, 2010).

Kömür, yanma mekanizması dolayısı ile oksitleyici ortam, yani hava ile temas ettiğinde, kendiliğinden bile yanmaya başlayabilir. Yanma tepkimesi sonucunda ortama CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> gibi baca gazları salınır (Demirbilek, 1987). Bu gazların yanı sıra, kömürün yanmayan, yani kül kısmı da atık olarak çıkmaktadır.

Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürlerden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür (Türker vd., 2009);

- İri taneli, baca gazlarıyla taşınmayan, kazan tabanına düşen “taban külü”,
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulmuş olarak uzaklaştırılmasından elde edilen “ham kül”,
- Çok ince taneli, baca gazlarıyla taşınan “uçucu kül”.

Kömür tüketiminin çevreyi olumsuz etkilememesi için, uçucu küllerin havaya karışması istenmez. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küllerin kapladıkları alan itibarı ile depolanması zorlaşabilir. Bu sebeple depolanan küllerin yeniden değerlendirilmeleri önemlidir. 2020 yılında Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü (NATEN) tarafından yayınlanan makaleye göre, Türkiye’de kömür tüketimine bağlı yılda 20 milyon ton kül üretilmekte ve bunlardan % 20-25’ini taban külleri, % 75-80’ini ise uçucu küller oluşturmaktadır (NATEN, 2020). Kömürün çevresel etkilerinden dolayı önümüzdeki zamanlarda kullanımının azalacağı ön görülse de, geriye kalan uçucu kül gibi artıkların büyük sorun teşkil edeceği yadsınamaz bir gerçektir. Bu sebeple kömür yanma artıklarından birisi olan uçucu küllerin tanımı, içeriklerine bağlı olarak zenginleştirilmesi ve endüstriye yönelik geri kazanımının incelenmesi bu derlemenin amaçlarındandır.

## 1. Kömür uçucu külleri

Uçucu küller, kömürün yanma tepkimesi ile birlikte açığa çıkan, içerik olarak Si, Al, Mg, Fe, Ca ve nadir toprak elementleri gibi yapıları barındıran endüstriyel artıklardır (Franus vd., 2015). Uçucu küller genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taş kömürlerden %10-15’i olarak, linyit kömürünün ise %20-50’si olarak ortaya çıkmaktadırlar. Yanma sonucu ortaya çıkan külün %75-85’i baca gazları ile birlikte taşınarak kazandan çıkar ve bu atıklar uçucu kül olarak tanımlanırlar (Güler vd., 2005).

Uçucu külden bulunan başlıca bileşenler SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO yanı sıra MgO, SO<sub>3</sub> ve minör bileşenler alkali oksitler bulunmaktadır. Bu bileşenlerin içerikleri uçucu külün yapısına göre değişiklik göstermektedirler. Yapı içerisindeki temel oksitler SiO<sub>2</sub> %25-60, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %10-30, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %1-15 ve CaO, %1-40 oranlarında bulunmaktadır (Sönmez ve Işık, 2019).

Uçucu küller ASTM C618-95 standardında belirtildiği üzere içerdikleri major oksit, SO<sub>3</sub>, nem, ateş zayıyatı ve alkali oksitlere göre iki farklı sınıfa ayrılırlar (ASTM):

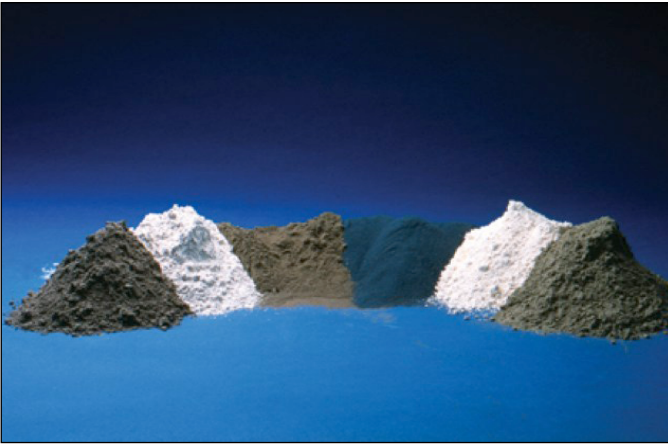
- F sınıfı uçucu küller
- C sınıfı uçucu küller

Uçucu kül içeriğine göre bir başka sınıflandırılması ise Çizelge 1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Uçucu küllerin içerik bakımından sınıflandırılması (Jayaranjan vd., 2014).

Kimyasal İçerik	F Sınıfı	C Sınıfı
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , minimum %	70	50
SO <sub>3</sub> , maksimum %	5	5
Nem içeriği, maksimum %	3	3
Ateş zayıyatı, maksimum %	6	6
Alkali oksitler (Na <sub>2</sub> O) şeklinde	1,5	1,5

Uçucu küller genellikle koyu gri renge sahip olup, renkleri yanma tepkimesinin verimine ve içerdiği Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi bileşenlere bağlı olarak değişiklik gösterir (Şekil 4). Tam yanma gerçekleştiğinde, karbon kısmı uzaklaştığından küller daha grimsi renge sahip olurken, yanma tam yoksa siyaha yakın bir renge sahip olmaktadır. Bilindiği üzere, demir oksit seviyeleri arttıkça renk skalası sarımsı turuncudan, koyu kırmızımsı toprak tonuna hematite ve yüksek demir içeriklerinde koyu siyah manyetik duyarlılık manyetite değişmektedir (Benli ve Gönül, 2021). Buna karşılık, Wattimena vd. (2017)'nin yaptığı çalışmaya göre Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği arttıkça, örneğin %24,28 içerikle kül renginin kırmızıya yaklaştığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.** Kömür uçucu külleri (<http://structpedia.com/ucucu-kul-ve-avantajlari/>).

Uçucu küller genellikle kömür içerisinde bulunan yanma reaksiyonuna dahil olmayan minerallerin, yüksek sıcaklık dolayısıyla eriyip camsı bir yapıya dönüşmesi ile oluşur. Bu çok yüksek kömür yanma sıcaklıkları, hematit, kuvars gibi minerallerin eriyip çok ince boyutlarda camsı karakterde malzemelere dönüşmesini sağlar (Sönmez ve Işık, 2020). Kömür uçucu küllerinin içerik olarak analizinin yapıldığı bir çalışmada, silis yapısının hem bu yanma reaksiyonu sonrası oluşan amorf camsı yapıda (senosfer) bulunduğu, hem de mineral kristalleri olarak bulunduğu tespit edilmiştir (Wang vd., 2019). Dolayısıyla, uçucu küller, ortalama 0,5 - 200 mikron arasında boyut dağılımına sahip, çoğunlukla camsı ve küre şekilli parçacıklar olan senosferleri de içeren mal-

zemelerdir (Güler vd., 2005; Büke, 2021). Bu bulgular, özellikle uçucu küllerin geri kazanımı için yapılacak olan planlamalarda önem arz etmektedirler.

### 1.1 Kömür uçucu küllerinin yarattığı sorunlar ve potansiyeli

Kömür uçucu külleri üretimleri sonrası genellikle tesis yakınlarında ya da farklı uygun hacme sahip alanlarda depolanırlar. Depolama işlemleri hem alan bakımından hem de lojistik anlamında ekstra iş yükü ve masraflar çıkartmaktadır. Kömür külünün bertarafında 4 temel yöntem uygulanabilir (Sönmez ve Işık, 2019);

- Dolgu şeklinde depolama,
- Maden ve taş ocaklarının rekültivasyon çalışmaları doğrultusunda doldurulması,
- Sulu kömür külü depolanması,
- Kömür uçucu küllerinin derin sulara okyanusa boşaltılması.

Kömür uçucu küllerinin yüksek üretim miktarlarından ve çevresel etkilerinden dolayı, depolanmasından ziyade endüstriye geri kazanımı daha önemli olup, son yıllarda ilgi çekici bir konu olmuştur. Son yıllarda bu bağlamda özellikle uçucu kül içeriklerinin araştırılması üstüne çalışmalar hız kazanmıştır. Yapılan çalışmalarda uçucu küllerin Si, Al, Mg, Fe, Ca ve nadir toprak elementleri bakımından zengin oldukları belirtilmiştir (Jayaranjan vd., 2014; Franus vd., 2015; Pan vd., 2018; Wang vd., 2019). Örneğin, Polonya'da 10 farklı kaynaktan temin edilen 12 adet kömür uçucu külleri analiz edilip, major oksit ve minör element içerikleri tespit edildiğinde hepsinin nadir toprak elementleri bakımından benzer içeriklere sahip olduğu gösterilmiştir (Franus vd., 2015).

### 1.2 Kömür uçucu küllerinin kullanım alanları

Uçucu küller gerek içerik gerekse ince boyuta sahip olmaları sebebiyle değerli malzemelerdir. Uçucu küllerin başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Yao vd., 2015):

- Toprak iyileştirme çalışmaları
- İnşaat sektörü
- Seramik endüstrisi
- Katalizör üretimi
- Çevresel koruma çalışmaları
- Senosfer geri kazanımı
- Zeolit sentezi
- Değerli metallerin geri kazanımı

Uçucu küller, genellikle ince boyutlu olmalarından, düşük bulk yoğunluklarından, yüksek su tutabilme özelliklerinden ve P, S, K, Ca, Mg, Cu, Mn ve Zn gibi bitkisel yaşam için besleyici bir yapı sunduklarından toprak iyileştirme çalışmalarında tercih edilmektedirler. Ayrıca genellikle alkali yapıda olduklarından, pH ayarlayıcı olarak kullanılabilirler. Alkali uçucu küller, artan toprak pH'ında kimyasal olarak yaklaşık % 20 reaktif sınıfı CaCO<sub>3</sub> 'e eşdeğerdirler (Yao vd., 2015).

Uçucu küller dünyada çimento ve beton olarak baraj duvarlarında, köprü ayaklarında, maden ve diğer yapıların dolgu enjeksiyonlarında ve agrega olarak yol, köprü ve briket yapımı, asfalt için dolgu maddesi gibi diğer pek çok inşaat yapılarında kullanılmaktadırlar (Güler vd., 2005). Yüksek kalsiyum içeren C Sınıfı uçucu küller, puzolanik özellikleri ile beraber bağlayıcı yapıya sahip olduklarından dolayı önemli çimentolama özelliklerine, F Sınıfı uçucu küller yüksek silis, alüminyum içeriklerinden dolayı doğal puzolanik özelliklere sahiptirler (Yao vd., 2015).

Uçucu küller SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO diğer oksitler bakımından zengin olduklarından, tuğla yapımında, uçucu kül mineral

bazlı polimer kompozitlerde ve seramik sofa ve sanat eşyalarının üretiminde de kullanılırlar (Olgun vd., 2004).

Uçucu küller, ayrıca metal ve metal oksitlerden katalizör üretiminde de kullanılabilen ikincil kaynaklardandır. Metal ve metal oksitler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda katalizör olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Uçucu küller, esas olarak daha yüksek demir oksit içeriğine sahip çeşitli metal oksitlerden oluşurlar ve daha yüksek termal stabiliteye sahiptirler. Ana bileşeni alüminosilikatların daha yüksek stabilitesine bağlı olarak uçucu küller, çeşitli reaksiyonlarda katalizör olarak kullanılabilirler. Aktif uçucu külün çeşitli reaksiyonlarda katalitik rolü son yıllarda dikkat çekmektedir (Yao vd., 2015).

Uçucu küller çevresel koruma çalışmalarında da kullanılabilirler. Kömür uçucu külleri, yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip belirli hacimde yanmamış karbon içerirler. Uçucu küllerin, hem gazlı hem de sulu uygulamalarda adsorban olarak doğrudan kullanımı için araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin bir çalışmada, kömür uçucu küllerinden sentezlenen zeolit yapısı ile, atık suların civanın adsorbe edilerek temizlenmesi başarılı olmuştur (Attari vd., 2016). Uçucu kül bazı adsorbanlar ticari adsorbanlarla karşılaştırıldığında, boya, petrol bileşikleri ve ağır metaller içeren atık suların temizlemesinde verimli ve çevre dostu ürünler olarak kullanılabilirdiği ve CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, Hg, NO, BTX gibi gaz kirleticileri gidermede de iyi performansa sahip oldukları görülmüştür (Asl vd., 2018).

Kömür uçucu küllerinden zeolit sentezi için bir alkali hidrotermal reaksiyonda üç aşama; yani çözünme, yoğunlaştırma ve kristalleşme uygulanmaktadır (Yao vd., 2015). Bu şekilde uçucu kömür küllerinden sentetik zeolitlerin kontrollü olarak üretimi

sonrasında, doğal zeolitlerden çok daha verimli olarak kullanılabilirler.

Son yıllarda, kömür uçucu küllerinin değerli metal içeriklerinin araştırılıp zenginleştirme metodlarının geliştirilmesi sayesinde yeni kullanım alanlarının geliştirilmesinin mümkün olacağı açıktır; cevher hazırlama işlemleri yenilikçi çalışmalara yol gösterici olmaktadır. Çizelge 2' de ülkemizde ve dünyada faaliyet gösteren farklı kömür termik santrallerini konu alan çalışmalardan derlenen uçucu kül örneklerinin nadir toprak elementleri (NTE) ve değerli metal içeriklerinin kıyaslaması aynı tablo üzerinde birleştirilmiştir. Örneğin, Fransus vd.'nin 2015'de yapmış olduğu çalışmada Polonya'dan elde edilen 10 farklı kömür termik santralinden alınan toplam 12 ayrı numunede uçucu küllerin nadir toprak elementleri bakımından içeriği ve malzemenin matrisiyle ilişkisi araştırılmıştır. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı numuneler bitümlü kömür kullanan termik santrallerden, 10, 11 ve 12 numaralı numuneler ise linyit kömürü kullanan termik santrallerden alınmıştır. Ayrıca 2 ve 3 numaralı termik santrallerde bio-kütle ile birlikte yakma işleminin uygulandığı belirtilmiştir (Fransus vd., 2015). 1,2,4,5,8,9,10 ve 12 numaralı kömür külleri Çizelge 2'de gösterilmemiştir. Bu konuda Türkiye'den örneklerle ilerleyen Karçin (2019), Kurşun ve Terzi (2016) ve Karayığit ve Gayer (2001)'nin çalışmalarında, sırasıyla dördü de linyit kömürü ile çalışan Muğla Yatağan Termik Santrali, Soma Termik Santrali, Çayırhan Termik Santrali ve Kangal Termik Santrali'nden alınan uçucu kül verileri kullanılmıştır. Ayrıca Wang vd.'nin 2019'da hazırladığı Çin'in Luzhao Santrali'nden alınan kömür küllerinin ortalama sonuçları ve Ketris ve Yudovich'in 2019'da göstermiş olduğu Dünya kömür küllerinin ortalama nadir toprak elementi içerikleri de karşılaştırma tablosuna eklenmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı termik santral uçucu kül içeriklerinin karşılaştırılması (NTE içerikleri, g/ton)

Element	Karçin, 2019.	Kurşun ve Terzi, 2016.	Karayığıt ve Gayer, 2001.	Wang vd, 2019.	Ketris ve Yudovich, 2009.			Fransus vd, 2015.			Seredin ve Dai, 2012.		
	Muğla Yatağan Termik Santrali	Soma Termik Santrali	Çayırhan Termik Santrali	Kangal Termik Santrali	Çin Luzhao Santrali	Dünya Kömür Külleri Ortalama	3	6	7	11	Rusya Pavlovka-2, Bölüm 1/b	Belarus Lel'chitsk	Çin Songzao Bölüm 12
Sc	19,00	14,00	10,00	14,00	25,85	24,00	31,00	45,00	32,00	22,00	N/A	N/A	N/A
Y	75,80	31,40	17,00	18,00	105,20	57,00	53,60	73,20	57,20	63,30	3540,00	590,00	462,00
La	65,90	49,40	27,00	25,00	134,40	76,00	62,30	81,70	64,70	76,40	819,00	839,00	300,00
Ce	132,70	82,30	53,00	48,00	266,40	140,00	127,60	172,50	133,30	142,20	924,00	1784,00	522,00
Pr	15,40	10,23	6,20	5,50	29,78	26,00	14,65	20,51	15,34	17,67	182,00	239,00	74,00
Nd	58,50	39,80	23,00	20,00	114,70	75,00	57,40	81,30	59,40	69,20	823,00	967,00	303,00
Sm	12,62	6,69	4,80	3,90	21,97	14,00	11,50	17,00	12,60	12,90	244,00	170,00	58,00
Eu	2,29	1,55	1,30	1,10	4,10	2,60	2,90	3,81	2,85	2,69	15,00	19,00	9,00
Gd	12,48	5,96	4,90	3,90	22,99	16,00	9,68	14,65	10,75	11,36	463,00	154,00	59,00
Tb	2,02	0,85	0,80	0,60	3,37	2,10	1,78	2,40	1,76	1,86	80,00	21,00	9,00
Dy	12,54	4,96	4,50	3,30	20,46	15,00	8,82	12,18	9,66	9,77	527,00	111,00	62,00
Ho	2,67	0,97	0,90	0,60	3,97	4,80	1,77	2,58	1,93	1,90	116,00	19,00	14,00
Er	7,66	2,88	2,60	1,80	12,03	6,40	5,28	7,41	5,47	5,36	337,00	54,00	45,00
Tm	1,13	0,40	0,40	0,30	1,65	2,20	0,78	1,07	0,86	0,86	46,00	8,00	6,00
Yb	7,17	3,03	2,60	1,70	11,07	6,90	5,02	6,74	5,09	5,09	270,00	51,00	38,00
Lu	1,04	0,44	0,40	0,30	1,56	1,30	0,72	1,03	0,80	0,76	38,00	9,00	6,00
Hafif NTE	304,12	202,42	124,00	116,40	593,10	355,00	304,45	418,01	317,34	340,37	2992,00	3999,00	1257,00
Orta NTE	105,13	44,72	28,50	26,90	156,12	92,70	76,78	106,24	82,22	88,98	4625,00	895,00	601,00
Ağır NTE	19,67	7,72	6,90	4,70	30,28	21,60	13,57	18,83	14,15	13,97	807,00	141,00	109,00
Toplam	428,92	254,86	159,4	148	779,5	469,3	394,8	543,08	413,71	443,32	8424,00	5035,00	1967,00
SiO <sub>2</sub> (%)	48,86	40,58	N/A	N/A	N/A	N/A	50,84	52,12	49,74	42,63	N/A	N/A	N/A
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	20,61	20,16	N/A	N/A	N/A	N/A	25,65	32,19	27,62	17,74	N/A	N/A	N/A
CaO (%)	15,50	28,91	N/A	N/A	N/A	N/A	4,03	1,16	3,80	29,45	N/A	N/A	N/A
Si-Al-Ca Toplam	84,97	89,65	N/A	N/A	N/A	N/A	80,52	85,47	81,16	89,82	N/A	N/A	N/A
Si-Al Toplam	69,47	60,74	N/A	N/A	N/A	N/A	76,49	84,31	77,36	60,37	N/A	N/A	N/A



Karayiğit ve Gayer (2001), Franus vd. (2015), Kurşun ve Terzi (2016) ve Karçin (2019)'nin çalışmalarından alınan içeriklerin karşılaştırması sonucunda, özellikle hafif nadir toprak elementi içeriğinin (Sc, La, Ce, Pr, Nd, Sm), SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile genellikle pozitif bağlantılı olduğu gözükürken, CaO içeriğinin gözle görülür bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Franus vd.'nin yapmış olduğu çalışmada farklı kömür tiplerindeki numunelerin arasında NTE içeriği açısından ilgi çekici ve önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Numunelerdeki toplam NTE içeriği ise 150-750 g/ton arasında değişmektedir. Seredin ve Dai'nin 2012 yılında hazırladığı makalede ise, farklı ülke ve tesislerden aldıkları uçucu kül içerik sonuçları incelendiğinde NTE oksit içerikleri yaklaşık %1'e çıkan örneklerle karşılanmaktadır. Çizelge 2'de bu çalışmadan Rusya, Belarus ve Çin kaynaklı sonuçlar gösterilmiştir. (Seredin ve Dai, 2012). Yapılan araştırmalar sonucu, kömür uçucu küllerinin önemli bir ikincil kaynak olduğu belirlenmiştir (Pan vd., 2018; Lanzerstorfer, 2018; Mondal vd., 2019; Wang vd., 2019; Middleton vd., 2020).

1.3 Alternatif NTE kaynağı olarak kömür uçucu küllerinin değerlendirilmesi

Nadir toprak elementleri, 57 ile 71 atom numaraları arasındaki lantanitler;

- Lantan (La)
- Seryum (Ce)
- Praseodim (Pr)
- Neodimyum (Nd)
- Prometyum (Pr)
- Samaryum (Sm)
- Evropeyum, (Eu)
- Gadolinyum (Gd)
- Terbiyum (Tb)
- Disprozyum (Dy)
- Holmiyum (Ho)
- Erbiyum (Er)
- Tulyum (Tm)
- İterbiyum (Yb)
- Lutesyum (Lu)

ile genellikle aynı cevher yataklarında bulunan ve lantanitlerle benzer kimyasal özellikler gösteren 21 atom numaralı Skandiyum (Sc) ve 39 atom numaralı İtiryum (Y) dan oluşmaktadır (Balaran, 2019). Prometyum (Pm) hariç diğer tüm nadir toprak elementleri doğada bileşikler halinde bulunmaktadır.

NTE'ler, doğada nabit halde bulunmazlar. Ana yatakları alkali kayaç kompleksleri, karbonatitler ve plaserlere bağlıdır. Ayrıca ikinci derece pegmatitler ile çeşitli metamorfik kayaçların yapısında da yer alırlar. Nadir toprak elementlerinin başlıca mineralleri bastnasit, monazit, ksenodim, serit, oyxsenit, samarskit ve fergusonittir (Önal vd., 1995).

Nadir toprak elementlerinin tek kaynağı mineraller değildir. Doğada her ne kadar mineral yapılarından elde edilseler de, son yıllarda nadir toprak elementlerinin ikincil kaynakları da, arz talep ilişkisini koruyabilmek adına düşünülmeye başlanmıştır. Nadir toprak elementlerinin zenginleştirilmesinde potansiyel ikincil kaynaklar olarak, fosfat üretimi yapan tesislerin yan artıkları ve ürünleri ve elektronik artıklar sayılabilirler (NATEN, 2020). Nadir toprak elementlerinin bir diğer ikincil kaynağı da uçucu küllerdir.

NTE'ler otomotiv katalitik konvertörlerinde, sabit miktatlara, hibrit ve elektrikli araçlar için şarj edilebilir pillerden, çok sayıda tıbbi cihazlara, savunma sanayiindeki uygulamalara, pigment üretiminden ve diğer birçok konuda geniş kullanım alanları

bulmaktadır. Bu kadar geniş kullanım alanı bulunmasından dolayı, dünyanın nadir topraklara olan talebindeki hızlı artışı, aynı zamanda hayati önem taşıyan arz kırsızlığını da gündeme getirmektedir (Pan vd., 2018). Bu süreçte nadir toprak madenlerine alternatif olarak kömür uçucu küllerinin değerlendirilmesi, hem nadir toprak elementlerinin ekonomik olarak geri dönüştürmesinde hem de nadir toprak kaynaklarının mevcut durumunun iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır.

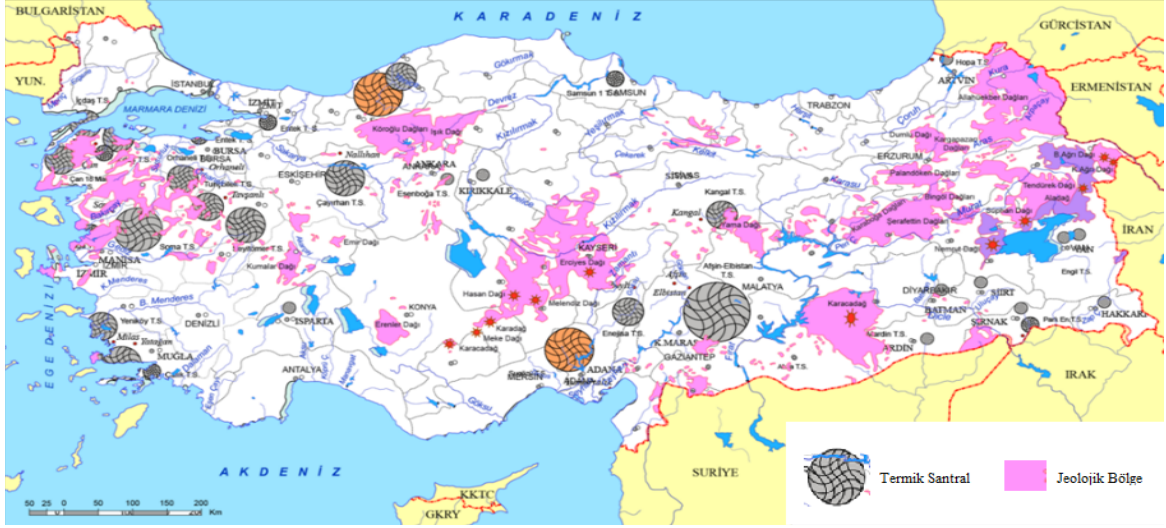
## 2. Nadir toprak elementlerinin kömür uçucu külden zenginleştirilmesi

Nadir toprak elementleri, dünya yüzeyinde yaygın bir şekilde bulunmalarına rağmen oluşturdukları mineraller düşük konsantrasyonlarda bulunur. Dünya üzerinde 160'dan fazla mineral bulunsada, üretimleri için yeterli içeriğe sahip mineral yapıları kısıtlıdır. Konvansiyonel olarak nadir toprak elementleri genellikle, bastnasit, monazit, ksenotim mineralleri ile uranyum ve apatit madenciliği yan ürün olarak üretilmektedirler (Önal vd., 1995). Bunların yanısıra az da olsa loparit cevherleri ve iyon adsorpsiyon killeri de NTE üretiminde kullanırken, atık miktatlarda, floresan lambalar, katalizörler ve şarj edilebilir piller de ikincil bir kaynak olarak NTE üretiminde kullanılabilirler (Celep vd. 2020). Gün geçtikçe artan arz talep oranını yakalamak için ise, yakın zamanlarda nadir toprak elementlerinin ikincil kaynaklarının zenginleştirme performansları üzerine çalışmaların son yıllarda gündeme geldiği görülmektedir.

Nadir toprak elementleri, minerallerden konvansiyonel olarak başlıca gravite ayırması, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma, flotasyon, pirometalurji ve hidrometalurji yöntemleri ile zenginleştirilmektedirler (Zhang vd., 2015). Uygun zenginleştirme işlemleri seçilirken, zenginleştirme yapılacak minerallerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik yapılarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu özelliklere bağlı olarak seçilecek zenginleştirme yöntemleri cevherden cevhere farklılık göstermektedir. Nadir toprak elementlerinin konvansiyonel olarak zenginleştirilmesi için uygulanan fiziksel zenginleştirme işlemleri, hidrometalurji (liç, solvent ekstraksiyonu vs.) gibi cevher hazırlama işlemlerinin bir kısmı, aynı zamanda uçucu küllere de uygulanabilmektedir. Bu konuda yakın zamanda birçok araştırmalar yapılmıştır ve halen devam etmektedir (Lin vd., 2017; Lin vd., 2018; Pan vd., 2018; Kursun Unver ve Terzi, 2018; Lanzerstorfer, 2018; Pan vd. 2020).

Kömür külünün içeriği, bulunmuş olduğu bölgeye ve kömürün yapısına göre değişiklik göstermektedir. Kömür termik santralleri uygun kalitede enerji üretebilmek adına farklı paçallanmış kömür türleri kullanabildiğinden, kömür türünün kül içeriğine etkisi bazı durumlarda tespit edilemeyebilmektedir (Mardon ve Hower, 2004). Yapılan bazı çalışmalar sonucunda kömür türünün (linyit, bitümlü vs.) nadir toprak elementleri bakımından uçucu kül içeriğine etkisi bulunmadığı gözükse de, başka çalışmalarda nadir toprak elementleri açısından kesin bir bulgu olmadan, kömür türünün kül içeriğine etkisi olduğu gösterilmiştir (Wang vd., 2019; Mastalerz vd., 2004; Mardon ve Hower, 2004). Bu sebeple kömürün bulunduğu jeolojik bölgenin, uçucu kül içeriğine etki ettiği belirtilmiştir.

Türkiye'deki nadir toprak elementleri alkalin-ultramafik ve karbonatit komplekslerinin yanı sıra yaygın bir şekilde peralkalin ve peraliminyumlu volkanikler, granitler ve granitik pegmatitler ile beraber bulunmaktadır (Yıldız, 2016). Türkiye'nin jeolojik yapısı incelendiğinde genellikle Ege, İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesi'nin volkanik kayaçlar tarafından zengin olduğu görülmektedir. Bu bölgelere yakın bulunan termik santrallere örnek olarak; Çan 18 Mart, İctaş, Tunçbilek, Aliğa, Orhaneli ve Kangal Termik Santralleri gösterilebilmektedir (Şekil 5).



**Şekil 5.** Türkiye'deki volkanik araziler ile termik santrallerin bulunduğu bölgelerin karşılaştırılması (<http://cografyaharita.com>).

Kömür uçucu külünden değerli metallere ve nadir toprak elementlerin zenginleştirilmesi üzerine çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Örneğin, Muğla Yatağan Termik Santrali'nden alınan uçucu küllerinde bulunan nadir toprak elementlerinin Knelson konsantratörü ile zenginleştirilme olanakları araştırılmıştır. Zenginleştirme deneylerinde değişken parametreler olarak pülpte katı oranı, su basıncı ve santrifüj kuvvetinin ayırmaya etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, ağır nadir toprak elementleri ve Zr tenörü açısından en iyi sonuç 90G santrifüj kuvveti, %35 pülpte katı oranı ve 20 kPa su basıncı şartlarında, ağır nadir toprak elementleri ve Zr zenginleştirme verimi açısından da en iyi sonuç ise sırasıyla %36,06 ve %42,11 ile 120G santrifüj kuvveti, %50 pülpte katı oranı ve 15 kPa su basıncı şartlarında elde edildiği gösterilmiştir (Yıldız, 2019). Çin'in farklı bölgelerinden temin edilen kömür uçucu kül numunelerine yönelik bir başka çalışmada, nadir toprak elementleri ve İtiryum içerikleri bakımından incelenmiş, çalışmada yapılan minerolojik analizlerin sonucunda, uçucu külün >%70 amorf cam ve <%30 mullit, kuvars ve demir oksitler gibi kristal yapılardan oluştuğu belirlenmiş ve %4 lük HF çözeltisiyle yapılan çözme işlemleri sonucunda, uçucu kül numunesindeki NTE'lerin yaklaşık %90'ının amorf cam yapısında bulunduğu gösterilmiştir (Wang vd., 2019). Başka bir çalışmada ise, NTE ve Y'nin uçucu kül içerisindeki oluşumunu incelemek için parça boyut analizi, kademeli kimyasal ekstraksiyon prosedürü (SCEP) ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. SCEP sonuçlarına göre NTE ve Y nin farklı modları ve bulunma oranları; silikat-alüminat > organik/sülfür > asitte çözünür > metal oksit > iyon değiştirilebilir form olarak belirlenmiştir. Ayrıca uçucu küllerdeki NTE oluşumunda Al'nin Si'den daha yüksek oranda etkili olduğu belirtilmiştir (Pan vd., 2018).

Bir başka çalışmada, uçucu küllerden NTE zenginleştirilmesi için boyut etkisi, manyetik ayırma ve yoğunluk ayırmasının verimleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, uçucu küldeki nadir toprak elementi içeriğinin, manyetik olmayan fraksiyonda bulunduğu ve iki yöntem arasından etkili yöntemin yoğunluğa bağlı zenginleştirme işlemlerinde gerçekleştiği gösterilmiştir. Ayrıca numune içerisindeki Al ve Si yapısının NTE içeriği ile pozitif bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Lin vd., 2017).

Bir diğer çalışmada, entegre fiziksel ayırma ve asit liçi yoluyla kömür uçucu külünden nadir toprak elementlerinin geri kazanımı araştırılmış ve önceki çalışmaya paralel olarak sonucunda NTE içeriğinin ince partikül boyutunda, manyetik olmayan kısımda ve orta yoğunluklu fraksiyonda bulunduğu belirlenmiştir. Fizik-

sel ayırma ürünü ise asit liçine tabi tutulup optimum koşullarda %79,85 oranında liç verimi elde edilmiştir (Pan vd., 2020). Son olarak yakın zamanda kömür uçucu küllerinin içerikleri üzerine yapılmış diğer çalışmalar Çizelge 3' de özetlenmiştir. Bu bulguların özellikle uçucu kül içeriğindeki değerli metallere ve nadir toprak elementlerinin zenginleştirilmesi üzerine önemli kaynak oluşturacağı ortadadır.

## Sonuçlar

Enerji ihtiyacını karşılamada, fosil yakıtlardan biri olan kömür uzun yıllar boyunca yoğun olarak kullanılmış ve halen kullanılmaktadır. Kömürün çevresel etkilerinin belirlenmesiyle beraber, temiz yakıtla olan ihtiyaç artmış, termik santrallerde yakıtın ardından ortaya çıkan küller, kömür uçucu külü gibi artıklar hem depolama, hem de çevresel açıdan sorun teşkil etmektedirler. Ayrıca kömür tüketimi tamamen sona erene kadar, bu tür yan ürün ve artıklar ortaya çıkmaya devam edecektir. Bu sebeple, kömür uçucu külü gibi artıkların endüstriye tekrar geri kazandırılması önem arz etmektedir.

Kömür uçucu küllerinin birçok element ve içerik bakımından, özellikle de nadir toprak elementleri açısından zengin bir ikincil kaynak olduğu birçok çalışma tarafından belirlenmiştir (Franus vd., 2015; Pan vd., 2018; Wang vd., 2019; Yıldız, 2019; NATEN, 2020). Nadir toprak elementlerinin konvansiyonel olarak zenginleştirilmesinde uygulanan cevher hazırlama işlemleri, aynı zamanda uçucu küllerden nadir toprak elementlerinin zenginleştirilmesi için de uygulanabilen başlıca yöntemlerdir. Bu konuda yapılan araştırmalar sonucunda nadir toprak elementlerinin uçucu kül içerisinde manyetik olmayan kısımda bulunduğu, daha ince boyut fraksiyonlarında konsantrasyonlarının arttığı ve yoğunluk farkına bağlı zenginleştirme işlemlerinin NTE'lerin zenginleştirilmesinde daha iyi cevap verdiği belirlenmiştir (Lin vd., 2017; Yıldız, 2019; Pan vd., 2018; Kursun Unver ve Terzi, 2018; Pan vd., 2020). Yapılan çalışmalar ışığında, uygulanan fiziksel zenginleştirme işlemlerinden nihai konsantrite üretimi mümkün olmasa da, kimyasal zenginleştirme işlemleri öncesinde bir ön konsantrite oluşturulmasında, fiziksel zenginleştirme işlemlerinin yeri halen önemini korumaktadır. Bu konuda yapılacak olan ön konsantrasyon işlemleri ile, kimyasal zenginleştirme işlemlerinin verimi, maliyeti ve çevresel etkileri azaltılabilmektedir (kimyasal tüketimi, zaman gibi). Bu konuda entegre fiziksel ve kimyasal zenginleştirme işlemlerini bir arada kullanan çalışmalar, halen devam etmektedir.

**Çizelge 3. Kömür uçucu küllerinin içerikleri üzerine yapılmış bazı çalışmalar.**

İNCELENE YAPI	YAPILAN İŞLEM	SONUÇ	REFERANS
Kömür Uçucu Külü	Entegre fiziksel ayırma ve asit liçi yoluyla uçucu kömürden NTE geri kazanımı	- NTE ve Y'nin ince partikül büyüklüğünde kazanıldığı, manyetik olmayan ve orta yoğunluklu fraksiyonlarda yoğunlaştığı gözlemlendi. - Fiziksel zenginleştirme sonrasında % 79,8 oranında liç verimliliği elde edildi.	Pan vd., 2020.
Kömür Uçucu Külü	Çin'in farklı bölgelerinden kömür uçucu kül numunelerinin NTE ve Y içerikleri bakımından incelenmesi	- Besleme kömürün kaolin ve ilit/smektit karışım katmanları ile ankerit ve az miktarda anataz ve jarosit içeren karbonat minerallerini içerdiği, - Mineralojik analizler sonucu, uçucu külün >%70 amorf cam ve <%30 mullit, kuvars ve demir oksitler gibi kristal yapılardan oluştuğu, - %4 lük HF çözeltilisiyle yapılan çözme işlemleri sonucu, uçucu kül numunesindeki NTE'lerin yaklaşık %90'ının amorf cam yapısında olduğu, - NTE'lerin kazanılması için alkali-asit kombine çözme yöntemi (NaOH-HCl) sonrası ulaşılan çözme veriminin %88,2 olduğu gösterildi.	Wang vd., 2019.
Kömür Uçucu Külü	Havali sınıflandırma yardımı ile uçucu küllerin farklı boyut fraksiyonlarına ayrılması, NTE'lerin dağılımının taneçik boyutuna göre incelenmesi	- En ince boyut fraksiyonunda, tüm NTE'ler 1.05 ile 1.65 faktörü ile zenginleştirildi. - En kaba boyut fraksiyonunda ve ikinci en ince boyut fraksiyonunda NTE miktarlarında düşüş görüldü (0,63 ile 0,78 ve 0,58 ile 0,92). - Orta büyüklükte fraksiyonda zenginleşme olmadı, uçucu külün içindekilere yakın değerler elde edildi. İkinci en büyük boyut fraksiyonunda hafif NTE'ler (La, Ce, Pr, Nd ve Sm) 1.19 ile 1.35 faktörü ile zenginleştirilirken, diğer NTE'ler uçucu küldesine benzer kaldı.	Lanzerstorfer, 2018.
Kömür Uçucu Külü	Kömür uçucu külündeki NTE'lerin oluşumu ve kimyasal ekstraksiyon yöntemlerinin incelenmesi	- Partikül boyut analizlerine göre, toplam NTE+Y içeriğinin parça boyutu küçüldükçe artış gösterdiği ve NTE+Y'nin daha küçük parçacıklarda orta derecede bir zenginleşme gösterdiği belirlendi. - NTE+Y içeriğinin, Pearson korelasyon ve regresyon korelasyon analizi aracılığıyla silikon ve alüminyum içeriği ile güçlü ve pozitif bir korelasyon içinde olduğu bulunmuştur. - NTE+Y ve Si / Al arasında bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu sayede bilinen Si ve Al içeriğine sahip NTE içeriğinin tahmin edilebileceği gösterilmiştir. - Kömür külü içinde NTE+Y için sıralı bir kimyasal ekstraksiyon prosedürü tasarlandı ve bu testlerin sonuçları silikat ve alüminosilikat formunun NTE+Y'nin baskın oluşum şekli olduğunu gösterdi; bu formun, materyalin % 80'ini oluşturdugu belirtildi.	Pan vd., 2018.
Kömür Uçucu Külü	NTE ve Y'nin uçucu kül içerisindeki oluşumunu incelemek için parça boyut analizi, kademeli kimyasal ekstraksiyon prosedürü (SCEP) VE SEM-EDS analizleri yapıldı	- Parçacık boyutunun etkisi olduğu belirlendi. - SCEP sonuçlarına göre NTE ve Y'nin farklı modları ve bulunma oranları sırasıyla: silikat-alüminat> organik veya sülfür> asitte çözünür> metal oksitler> iyon değiştirilebilir olduğu bulundu. - SEM-EDS analizleri NTE ve Y'nin Al ve P ile ilişkili olduğunu, ayrıca uçucu küllerdeki NTE için Al'nin Si'den daha yüksek bir rol oynadığı belirlendi.	Pan vd., 2018.
Kömür Uçucu Külü	Kömür külünden nadir toprak elementlerinin karakterizasyonu ve zenginleştirilmesi için sıralı ekstraksiyon ve hidrotermal işlem uygulaması	- Kömür külünün yedi aşamalı ardışık ekstraksiyonu ile, toplam NTE'nin % 86,1'inin külün camsı fazıyla ilişkili olduğunu, geri kalan NTE'nin esas olarak organik ve sülfat fazında (% 8,3), değiştirilebilir fazda (3,7 %) ve karbonat fazı (% 1,5)'nda olduğu belirlendi. - NTE'nin kömür külünden zenginleştirilmesi için fiziksel ayırmaları, yani partikül boyutu ayırma ve manyetik ayırma ile hidrotermal alkali arıtmayı birleştiren bir işlem önerilmiştir. - NTE, optimum hidrotermal alkalin arıtma koşulları altında önerilen işlemle 325 mg / kg'dan 877 mg / kg'a zenginleştirildi.	Lin vd., 2018.
Kömür Yan Ürünleri	Kömür yan ürünlerinin fiziksel zenginleştirme işlemleri ile zenginleştirilebilirliğinin incelenmesi	- Kömür, kömür külü, kil ve şist numuneleri üzerinde partikül boyutu, manyetik ve yoğunluk ayırma yapılmıştır. - Tüm kül örnekleri için, daha yüksek NTE konsantrasyonlarının ince fraksiyonlarda bulunduğu tespit edildi. - Manyetik ayırma, NTE'nin tüm kül örnekleri için manyetik olmayan fraksiyonlarda zenginleştiğini gösterdi. - Üç yöntem arasında NTE zenginleştirilmesi için en yüksek konsantrasyon verimlerinin yoğunluk ayırma ile elde edildiği görüldü. - NTE'lerin Al / Si grubu ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğu gösterildi.	Lin vd., 2017.
Kömür Uçucu Külü	Brezilya'dan elde edilen kömür uçucu külü numunesinin, hava koşullarından etkilenme oranı incelendi	- Sonuçlar, önemli bir NTE kaybına işaret etmedi ve bu durum kömür uçucu küllerini ümit verici bir NTE kaynağı olarak gösterdi.	Lange vd., 2016.
Kömür Uçucu Külü	Polonya'nın farklı bölgelerinden gelen numuneler üzerinde NTE içeriği tespitleri yapıldı.	- Analizi yapılan tüm uçucu küller genel olarak benzer bir NTE dağılımına sahip olduğu ve hafif NTE'lerin baskın olduğu tespit edildi.	Franus vd., 2015.
Kömür Uçucu Külü	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve SiO <sub>2</sub> 'nin çeşitli alkali hidrotermal koşullar altında yüksek alüminalı uçucu kül içindeki reaksiyon davranışlarının incelenmesi	- Hidrotermal işlem sıcaklığının 75 ° C'den 160 ° C'ye yükseltilmesiyle, fillipsit-Na, zeolit A, zeolit P ve hidroksisodalit sırayla oluşurken, mullit ve korundum fazlarının hala korunduğu gözlemlendi. - Zeolit P, düşük alkali konsantrasyonunda kitlesel olarak oluşturulmuş ve hidroksisodalit, ağırlıklı olarak yüksek alkali konsantrasyonunda elde edilmiştir. - Alüminosilikat camın çözünmesi ve zeolitlerin birlikte oluşması ile SiO <sub>2</sub> 'nin liç verimliliğinin, 2,19: 1'e varan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub> kütle oranıyla % 42,13'e ulaşabildiği gösterildi.	Jiang vd., 2015.
Kömür Uçucu Külü	Kömür uçucu küllerinin H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> asidi ile çözünülebilirliğinin incelenmesi	- Kömür uçucu külündeki NTE'ler zamanla H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 'te kademeli olarak çözünür. Bu şekilde kömür uçucu kül partiküllerinde NTE'lerin iki tür oluşumu olduğu gösterilmiştir. - Reaksiyona girmemiş çekirdek modeli uygulanarak, bir H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltilisinde NTE'lerin çözünme davranışı incelenirse, her iki oluşum türünün de açıklanabileceği belirtilmiştir.	Kashiwakura vd., 2013.
Kömür Kaynakları	Kömür kaynakları ve uçucu kül gibi kaynakların NTE ve Y içeriği bakımından incelenmesi	- Kömür havzasında NTE ve Y zenginleştirmesinin dört genel türü tanımlanabileceği belirtildi: 1) yüzey suları tarafından NTE girdisi ile karasal tip; 2) asit ve alkali volkanik külün düşmesi ve süzülmesi ile bağlantılı tüflü tip; 3) infiltrasyonel veya meteorik yer altı suyu tahrikli tip ve 4) artan termal maden suyu ve derin akışkan akışlarıyla bağlantılı hidrotermal tip. - Yüksek NTE+Y kömürlerinde NTE+Y oluşumunun esas olarak ince taneli otojenik mineraller (alunit süper grubunun NTE+Y içeren alüminyum fosfatlar ve sülfatlar, su içeren fosfatlar ve karbonatlar) ve organik bileşiklerde olduğu gösterilmiştir. - Sunulan veriler, kömür yataklarının ve uçucu kül gibi yan ürünlerinin NTE+Y geri kazanılması için ümit verici kaynaklar olarak görülmesi gerektiğini göstermektedir.	Seredin, Dai., 2012.

Bu sebeple, önümüzdeki süreçte kömür tüketimine bağlı oluşan kömür külleri gibi artıkların bertaraf edilmesinde, cevher hazırlama işlemleri önemli rol oynayarak kıymetli katkılar sağlayacaktır.

## Kaynaklar

ASTM C618-19, 2019. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).

Attari, M., Bukhari, S.S., Kazemian, H., Rohani, S. 2017. A low-cost adsorbent from coal fly ash for mercury removal from industrial wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(1), 391-399. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.014>.

Balaram, V. 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 10(4), 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.

Benli, B., Gönül, E.A. 2021. Maden atıklarının sürdürülebilir manyetik pigment olarak tekstil sektörüne geri kazanımı. *ESOGÜ Müh. Mim. Fak. Derg.* 29(2), 1-13.

BP, 2020. *Statistical Review of World Energy, 2020*, 69th Edition.

Büke, A. 2021. Kömür Termik Santrali Uçucu Küllerinden Değerli Metal ve Nadir Toprak Elementlerinin İkincil Bir Kaynak Olarak Kazanılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı. Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı. Yüksek Lisans Bitirme Tezi.

Celep, O. Yazıcı, E.Y., Deveci, H. 2020. Nadir toprak elementlerinin birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi. DOI: 10.17714/gumusfenbil.765981

Demirbilek, S. 1987. Kömür kullanımı ve ilgili çevre kirlenmesi. *Madencilik*. 26(3), 33-43.

Energy Information Administration (EIA). 2020. *Electricity Explained*. Erişim adresi: <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/electricity-in-the-us.php#:~:text=The%20three%20major%20categories%20of,geothermal%2C%20and%20solar%20thermal%20energy>.

Enerji Atlası. (n.d.). Kömür. Erişim adresi: <https://www.enerjiatlası.com/komur/>.

Franus, W., Wiatros-Motyka, M.M., Wdowin, M. 2015. Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(12), 9464-9474.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H. 2005. Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir. 419-423.

Hosseini Asl, S. M., Javadian, H., Khavarpour, M., Belviso, C., Taghavi, M., Maghsudi, M. 2019. Porous adsorbents derived from coal fly ash as cost-effective and environmentally-friendly sources of aluminosilicate for sequestration of aqueous and gaseous pollutants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1131-1147.

IACES METU LC. 2019. Erişim adresi: <http://structpedia.com/ucu-cu-kul-ve-avantajlari/>

IEA World coal consumption 1978-2019. (t.y.). Erişim Adresi: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-coal-consumption-1978-2019>.

Jayaranjan, M.L.D., van Hullebusch, E.D., Annachhatre, A.P. 2014. Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 13(4), 467-486. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9336-4>.

Jiang, Z. Q., Yang, J., Ma, H. W., Wang, L., Ma, X. 2015. Reaction behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> in high alumina coal fly ash during alkali hydrothermal process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(6), 2065-2072. [https://doi.org/10.1016/S1003-326\(15\)63816-X](https://doi.org/10.1016/S1003-326(15)63816-X)

Kaplan, G., Gültekin, A. 2010. Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi (The Investigation of Fly Ash Usage in Terms of Environmental and Social Effects in Construction Sector).

Karayigit, A., Gayer, R. 2001. Characterisation of Fly Ash from the Kangal Power Plant, Eastern Turkey.

Karçin, A. 2019. Yatağan Termik Santrali Uçucu Küllerindeki Bazı Kıymetli Metallerin Manyetik Ayırma Yöntemi ile Kazanım Olanaklarının Araştırılması. İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi. Bitirme Tezi.

Ketris, M., Yudovich, Y.E. 2009. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*. 78(2), 135-148.

Kömür ve Linyit Yakıtlı Termik Santraller. (t.y.). Erişim adresi: <https://www.enerjiatlası.com/komur/>.

Kursun Unver, I., Terzi, M. 2018. Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review. Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, İstanbul University, İstanbul, Turkey. <https://doi.org/10.22044/JME.2018.6855.1518>.

Kursun, I., Terzi, M. 2016. Research on the solubility of radioactive elements in the ashes from the soma in Turkey. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 37(1), 27-33. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1072710>

Lange, C.N., Camargo, I.M.C., Figueiredo, A.M.G.M., Castro, L., Vasconcellos, M.B.A., Ticianelli, R.B. 2017. A Brazilian coal fly ash as a potential source of rare earth elements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 311(2), 1235-1241.

Lanzerstorfer, C. 2018. Pre-processing of coal combustion fly ash by classification for enrichment of rare earth elements. *Energy Reports*. 4, 660-663. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.10.010>.

Lin, R., Stuckman, M., Howard, B.H., Bank, T.L., Roth, E.A., Macala, M.K., Lopano, C., Soong, Y., Granite, E.J. 2018. Application of sequential extraction and hydrothermal treatment for characterization and enrichment of rare earth elements from coal fly ash. *Fuel*. 232, 124-133.

Mardon, S.M., Hower, J.C. 2004. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: Examples from a Kentucky power plant. *International Journal of Coal Geology*. 59(3-4), 153-169.

Mastalerz, M., Hower, J.C., Drobniak, A., Mardon, S.M., Lis, G. 2004. From in-situ coal to fly ash: A study of coal mines and power plants from Indiana. *International Journal of Coal Geology*. 59(3-4), 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2004.01.005>.

Mert, B.A. 2016. Taş ocaklarında rekültivasyon uygulaması : uçucu küllerin depolanması örneği reclamation of limestone quarry : A case study for the storing of fly ash. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi. 31, 103-117.

Middleton, A., Park, D.M., Jiao, Y., Hsu-Kim, H. 2020. Major element composition controls rare earth element solubility during leaching of coal fly ash and coal by-products. *International Journal of Coal Geology*. 227, 103532.

Mondal, S., Ghar, A., Satpati, A. K., Sinharoy, P., Singh, D. K., Sharma, J. N., Kain, V. 2019. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using TEHDGA impregnated resin. *Hydrometallurgy*. 185, 93-101.

MTA. Zeolit. (t.y.). Erişim adresi <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/zeolit>

Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü (NATEN), 2020. Kömür NTE ile küllerinden doğuyor. Erişim adresi: <http://www.naten.gov.tr/uploads/galeri/575899-komur-nte-ile-kullerinden-doguyor.pdf>.

Olgun, A., Erdogan, Y., Ayhan, Y., Zeybek, B. 2005. Development of ceramic tiles from coal fly ash and tincal ore waste. *Ceramics International*. 31(1), 153-158.



<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.04.007>.

Önal, G., Kayabalı, İ., Gündüz, M. 1995. Nadir toprak elementleri çalışma grubu raporu.

Pan, J., Nie, T., Vaziri Hassas, B., Rezaee, M., Wen, Z., Zhou, C. 2020. Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*. 248, 126112. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126112>.

Pan, J., Zhou, C., Liu, C., Tang, M., Cao, S., Hu, T., Zhang, N. 2018. Modes of occurrence of rare earth elements in coal fly ash: a case study. *Energy and Fuels*. 32(9), 9738-9743.

Pan, J., Zhou, C., Tang, M., Cao, S., Liu, C., Zhang, N., Ji, W. 2019. Study on the modes of occurrence of rare earth elements in coal fly ash by statistics and a sequential chemical extraction procedure. *Fuel*. 237, 555-565. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.139>.

Seredin, V. V., Dai, S. 2012. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*. 94, 67-93. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.001>.

Sönmez, G., Işık, M. 2020. Kömür yanma atıklarının çevresel etkileri ve kullanım alanları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 9(1), 72-83.

Tamzok, N. 2019. Dünya'da ve Türkiye'de kömür. *Türkiye'nin Enerji Görünümü*. 217-236.

TEİAŞ, 2020. Kurulu Güç Raporu-Ekim 2020. Erişim adresi:<https://www.enerjihukuku.org.tr/storage/2020/11/teia%C5%9F-kuru-lu-g%C3%BC%C3%A7-raporu.pdf>.

TKİ, 2019. Kömür Sektör Raporu, Linyit. Erişim adresi: [http://www.tki.gov.tr/depo/2019%20K%C3%96M%C3%96R%20SEKT%C3%96R%20RAPORU%20\(1\)](http://www.tki.gov.tr/depo/2019%20K%C3%96M%C3%96R%20SEKT%C3%96R%20RAPORU%20(1)).

TKİ, 2020. Enerji ve Kömür. (t.y.). Erişim adresi <http://www.tki.gov.tr/bilgi/komur/enerji-ve-komur/232>.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A. 2009. Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri.

Türkiye Genç Volkanik Alanlar Haritası. (t.y.). Erişim adresi: <http://cografyaharita.com/haritalarim/2bturkiye-genc-volkanik-alar-haritasi.png>.

Türkiye Kömür Santralleri Haritası. (t.y.). Erişim: <http://cografyaharita.com/haritalarim/4eturkiye-komur-santraller-haritasi.png>.

Wang, Z., Dai, S., Zou, J., French, D., Graham, I.T. 2019. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction. *International Journal of Coal Geology*. 203(January), 1-14.

Wattimena, O.K., Antoni, Hardjito, D. 2017. A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer. <https://doi.org/10.1063/1.5003524>

Yao, Z.T., Ji, X.S., Sarker, P.K., Tang, J.H., Ge, L.Q., Xia, M.S., Xi, Y.Q. 2015. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 141, 105-121.

Yıldız, N. 2016. Nadir Toprak Elementleri. Ankara: Dijital Yayın.

Yıldız, T. 2019. Yatağan termik santral uçucu küllerindeki bazı kıymetli metallerin knelson konsantratörü ile kazanım olanaklarının araştırılması. İstanbul Üniversitesi, Bitirme tezi.

Zhang, W., Rezaee, M., Bhagavatula, A., Li, Y., Groppo, J., Honaker, R. 2015. A review of the occurrence and promising recovery methods of rare earth elements from coal and coal by-products. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 35(6), 295-330.

