

# TÜRKİYE KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİ

**Dr. Çağla Meral Akgöl**  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Dr. Selin Yoncacı**  
TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü



**TÜRKÇİMENTO**

# **Türkiye Kömür Yakıtlı Termik Santral Uçucu Külleri**

**Dr. Çağla Meral Akgül**  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Dr. Selin Yoncacı**  
TÜRKÇİMENTO  
Ar-Ge Enstitüsü

## Yazarlar hakkında

---



Dr. Çağla Meral Akgül lisans derecesini ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında almıştır. 2006 yılında ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını, 2012 yılında Kaliforniya Üniversitesi –Berkeley İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nde doktorasını tamamlamıştır. 2013 yılında Massachusetts Institute of Technology'de misafir öğretim görevlisi olarak bulunmuştur. Newton Fonu, Royal Academy of Engineering gibi kurumlardan fonlanan birçok uluslararası projede yürütücülük yapmıştır. Argonne Ulusal Laboratuvarı, Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve San Sebastian Malzeme Fiziği Merkezi gibi sayılı araştırma merkezleri ile birçok projede görev almıştır. 2008 yılında Roy W. Carlson - Milos Polivka Beton Teknolojisi Üstün Araştırma Ödülü'ne layık görülmüştür. İleri malzeme sentezi ve karakterizasyonu konusunda uzmandır. Ana çalışma alanı sürdürülebilir, dayanıklı ve çok işlevli inşaat malzemelerinin geliştirilmesi ve bunların etkin bir şekilde yapıli çevrede kullanımıdır. Halen ODTÜ İnşaat Mühendisliği ve ODTÜ Mikro ve Nanoteknoloji Bölümü'nde görev yapmaktadır.



Dr. Selin Yoncacı ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini 2006 yılında, yüksek lisans derecesini ise 2009 yılında almıştır. 2019 yılında ise aynı bölümde püskürtme betonların kırılma mekaniği üzerine çalıştığı doktorasını tamamlamıştır. 2008-2013 yılları arasında ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak birçok projede yer almış, jeoteknik çalışmalar ile ilgili tecrübe kazanmıştır. Kaya mekaniği, yeraltı ve yer üstü nümerik modellemeler konusunda uzmanlığı olup, mevcut çalışma alanları arasında kırılma mekaniği, çimento ve beton üretim süreçleri, yapı malzemelerinin fiziksel testleri ve öğütme bulunmaktadır. 2014-2021 yılları arasında TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü'nde Fiziksel ve Mekanik Testler Laboratuvarı'nda laboratuvar sorumlusu olarak görev yapmış ve Avrupa Birliği tarafından desteklenen Horizon2020 Hibe Programı kapsamındaki projelerde aktif olarak yer almıştır. 2021 yılından itibaren ise Limak Çimento Grup Koordinatörlüğü'nde Ar-Ge ve İnovasyon Şefi olarak görev yapmaktadır.



**Kitap adı:**

Türkiye Kömür Yakıtlı Termik Santral Uçucu Külleri

**Yazarların adı:**

Dr. Çağla Meral Akgül, Dr. Selin Yoncacı

**Tasarım:**

Gizem Buzacı, TÜRKÇİMENTO

**Baskı:**

Emsal Matbaa Tanıtım Hiz. San. ve Tic. Ltd. Şti.  
Bahçekapı Mh. 2477. Cad. No: 6 Etimesgut/Ankara  
Tel: (0 312) 278 82 00 • Fax: (0 312) 278 82 30  
Sertifika No: 46753

**Dili:**

Türkçe

**ISBN: 978-975-8136-33-9**

T.C. Kültür Bakanlığı Sertifika No: 53024

**Yayın Sahibi:**

Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği Derneği

**Adres:**

Tepe Prime A Blok Kat:18-19  
Eskişehir Devlet Yolu (Dumlupınar Bulvarı)  
9. km No: 266 06800 Ankara  
Telefon: 444 50 57  
Faks: (0 312) 265 09 06-05  
info@turkcimento.org.tr  
www.turkcimento.org.tr

**Baskı Yeri ve Yılı:** Ankara, 2021

Bu kitap Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği Derneği tarafından bastırılmıştır. Para ile satılamaz.

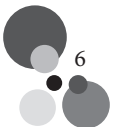
Kullanılan şekillerin telif hakları alınmıştır.



# İÇİNDEKİLER

Yazarlar hakkında .....	2
Teşekkürler .....	8
Önsöz .....	10
1. Genel bilgiler .....	12
1.1. Tanım .....	12
1.2. Hammadde .....	12
1.2.1. Kömür sınıfları .....	13
1.2.2. Kömür üretim ve tüketim eğilimleri .....	15
1.2.3. Kömürün mineral madde içeriği .....	16
1.2.4. Türkiye'de kömür .....	18
1.3. Üretim süreci .....	22
1.3.1. Termik santrallerde uçucu kül oluşumu .....	22
1.3.2. Kömürdeki mineral madde içeriğinin dönüşümü .....	29
1.3.3. Türkiye kömür yakıtlı termik santraller .....	30
1.4. Ayırma işlemleri .....	35
1.5. Bertaraf süreci .....	39
2. Temel özellikler .....	40
2.1. Kimyasal kompozisyon .....	40
2.2. Mineraller ve fazlar .....	42
2.2.1. İnorganik kısım .....	46
2.2.2. Organik kısım .....	61
2.3. Fiziksel özellikler .....	63
2.4. İz elementler .....	66
2.5. Sınıflandırma ve standartlar .....	69
3. Kullanım alanları .....	75
3.1. Mevcut kullanım eğilimleri .....	78
3.1.1. Çin .....	78
3.1.2. Hindistan .....	80

3.1.3.	A.B.D. ....	81
3.1.4.	Diğer ülkeler.....	83
3.2.	Yapı sektörü.....	86
3.2.1.	Çimento ve beton sektörü .....	86
3.2.2.	Zemin iyileştirme, stabilizasyon ve dolgu uygulamaları.....	102
3.2.3.	Asfalt için mineral filler.....	111
3.2.4.	Hafif agrega üretimi.....	112
3.2.5.	Blok malzeme üretimi.....	113
3.2.6.	Jeopolimer üretimi .....	114
3.2.7.	Mineral yün üretimi.....	115
3.3.	Toprak iyileştirme .....	116
3.4.	Seramik ve cam üretimi.....	115
3.5.	Katalizörler .....	118
3.5.1.	Katalizörlerde destek bileşen.....	119
3.5.2.	Katalizörlerde aktif bileşen .....	122
3.6.	Çevresel koruma.....	123
3.6.1.	Su kirliliği kontrolü .....	123
3.6.2.	Baca gazının temizlemesi .....	128
3.6.3.	Yapay resif betonları .....	128
3.6.4.	Atıkların stabilizasyonu/katılaştırılması.....	129
3.7.	Nano-Gözenekli malzeme sentezi .....	130
3.7.1.	Önişlemler .....	131
3.7.2.	Zeolit sentezi .....	134
3.7.3.	Mezopor malzeme sentezi .....	138
3.7.4.	Silika aerogel sentezi .....	140
3.8.	Ayrıştırılan yan ürünlerin kullanımı.....	141
3.8.1.	Karbon geri kazanımı .....	141
3.8.2.	Senosfer geri kazanımı.....	144
3.8.3.	Manyetik kısmın geri kazanımı.....	148
3.9.	Metal matrisli kompozitler .....	149
3.10.	Değerli metal geri kazanımı .....	150
3.10.1.	Alüminyum ve titanyum geri kazanımı .....	150
3.10.2.	Germanyum, galyum ve vanadyum geri kazanımı .....	162
4.	Türkiye uçucu küllerinin özellikleri.....	165
4.1.	Analiz yöntemleri.....	165



4.1.1.	Kimyasal analizler .....	165
4.1.2.	Mineralojik analizler .....	167
4.1.3.	Fiziksel ve morfolojik analizler .....	168
4.1.4.	Ek analizler .....	170
4.2.	Afşin-Elbistan B Termik Santrali uçucu külü .....	172
4.3.	Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü .....	180
4.4.	İçdaş-Biga Termik Santrali uçucu külü .....	186
4.5.	Kemerköy Termik Santrali uçucu külleri .....	193
4.5.1.	Kemerköy Termik Santrali, 1. Ünite uçucu külü .....	194
4.5.2.	Kemerköy Termik Santrali, 2. Ünite uçucu külü .....	200
4.5.3.	Kemerköy Termik Santrali, 3. Ünite uçucu külü .....	206
4.6.	Seyitömer Termik Santrali uçucu külleri .....	212
4.6.1.	Seyitömer Termik Santrali 1. Ünite uçucu külü .....	212
4.6.2.	Seyitömer Termik Santrali 2. Ünite uçucu külü .....	219
4.6.3.	Seyitömer Termik Santrali 4. Ünite uçucu külü .....	225
4.7.	Soma B Termik Santrali uçucu külü .....	232
4.8.	Tunçbilek Termik Santrali uçucu külleri .....	239
4.8.1.	Tunçbilek Termik Santrali 3. Ünite uçucu külü .....	239
4.8.2.	Tunçbilek Termik Santrali 4. Ünite uçucu külü .....	247
4.8.3.	Tunçbilek Termik Santrali 5. Ünite uçucu külü .....	253
4.9.	Yatağan Termik Santrali uçucu külleri .....	259
4.9.1.	Yatağan Termik Santrali 2. Ünite uçucu külü .....	259
4.9.2.	Yatağan Termik Santrali 3. Ünite uçucu külü .....	266
4.10.	Yeniköy Termik Santrali uçucu külleri .....	272
4.10.1.	Yeniköy Termik Santrali 1. Ünite uçucu külü .....	272
4.10.2.	Yeniköy Termik Santrali 2. Ünite uçucu külü .....	279
4.11.	Genel değerlendirme .....	286
Sonsöz .....		315
Ek- Biyokütle külleri .....		317
Kaynaklar .....		322

---

## Teşekkürler

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı ve TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü işbirliği ile tamamlanan bu kitapta birçok kişinin emeği vardır.

Öncelikle, bu kitabı mümkün kılan ODTÜ'ye ve TÜRKÇİMENTO Yönetim Kurulu'na teşekkür ederiz. Kitabın yayına hazırlanma sürecinde bize her zaman destek olan TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü Eski Direktörü Dr. Tülay Çağlayan Özlü'ye ve TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü Müdürü Serkan Türk'e çok teşekkür ederiz. Ayrıca, bilgi ve destekleriyle bize her zaman yol gösteren kıymetli hocalarımız Prof. Dr. Mustafa Tokyay, Prof. Dr. İsmail Özgür Yaman, Prof. Dr. Mustafa Ümit Atalay ve Dr. Bahar İpek'e teşekkürlerimizi sunarız.

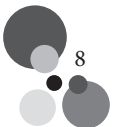
Çalışmanın başlangıcındaki büyük desteğinden ötürü Pelin Ayturan'a, kitabın yazılmasında kritik önem arz eden deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı Evrim Şengün, Elif Özdil, Çınar Uysal ve Merve Uysal ile beraber tüm TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Enstitüsü teknik ekibine teşekkür ederiz.

Kitabın gözden geçirilmesi süresince görüş ve önerileriyle katkıda bulunanlara, TÜRKÇİMENTO Ar-Ge Kalite ve İktisadi İşletmeler (AKİİ) Alt Komitesi Uçucu Kül Çalışma Grubu üyelerinden Ender Derin, Seher Ertaş, Mehmet Gökhan Gümüş ve Ebru Sipahioğlu ile komite dışından çalışmalara katılan Volkan Yaşar'a emeklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Ayrıca, deneysel çalışmalara katkı sunan ODTÜ öğrencilerimize, başta Sepheh Seyedian Choubi, Meltem Tangüler Bayramtan ve Ali Güzel olmak üzere, çok teşekkür ederiz.

Dr. Çağla Meral Akgül

Dr. Selin Yoncacı



Bana her zaman cesaret veren annem Nevin'e, kardeşim Murat'a ve eşim Ferit'e minnettarım.

Bu kitabın daha sürdürülebilir bir enerji sektörü ve yapılı çevre hayal eden tüm okurların ihtiyaç duyduklarında kolayca erişebilecekleri bir kaynak olmasını dilerim.

*Babam Hasbi'ye ve oğlum Atlas'a...*

Dr. Çağla Meral Akgül

## Önsöz

---

Uçucu küller genellikle kökenlerine, kimyasal ve mineralojik bileşimlerine bağlı olarak iki ana kategoriye ayrılır. Antrasit veya bitümlü kömürlerin yakılması sonucu genellikle düşük-kalsiyumlu uçucu küller açığa çıkarken; linyit veya alt-bitümlü kömürlerden yüksek-kalsiyumlu uçucu küller elde edilir. Her iki uçucu kül tipinde de ana bileşen az miktarda kuvars, mullit, manyetit, hematit ve yanmamış karbon içeren camsı alüminosilikat fazlar bulunabilir. Düşük kalitedeki kömürlerin yakımından elde edilen uçucu küller bu fazların bir kısmının veya tamamının yanında farklı fazlar da içerebilirler. Örneğin, anhidrit ( $CaSO_4$ ), trikalsiyum alüminat ( $Ca_3Al_2O_6$ ), dikalsiyum silikat ( $Ca_2SiO_4$ ), kireç ( $CaO$ ), gehlenit ( $Ca_2Al_2SiO_7$ ), periklaz ( $MgO$ ), mervinit ( $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ ), melilit (gehleniti ve akermaniti içeren kompleks bir  $Ca, Al, Mg$  silikat grubu) ve hayun (sodalit grubundan feldispatımsı bir mineral) gibi mineraller yüksek-kalsiyumlu küller içerisinde rapor edilmiştir <sup>1,2</sup>. Kömürlerdeki inorganik maddelerin çeşitliliği ve termik santrallerin çalışma koşullarındaki farklılıklar göz önüne alındığında, uçucu küller içerisinde bu fazların heterojen bir birleşimini bulmak şaşırtıcı değildir.

Kömür yakıtlı termik santrallerde, pulverize kömür yakma teknolojisi en sık kullanılan teknolojidir. Bu santrallerde yakma çoğunlukla 1300-1700°C aralığında gerçekleşir ve bu esnada baca gazına yüksek  $NO_x$  ve  $SO_2$  salımı olur <sup>3</sup>. Bu yüksek yakma ısısı neticesinde üretilen uçucu küller çoğunlukla küresel, yüksek derecede amorf faz ihtiva eden taneciklerden oluşur. Tane boyutları genellikle 1-200 µm aralığındadır. Puzolanik olarak oldukça reaktif oldukları için çimento ve beton sektöründe etkin kullanıma uygundur.

Günümüzde temiz kömür yakma teknolojileri arasında akışkan yatak teknolojisi de ön plana çıkmaktadır. Bu teknoloji ile düşük kalitede, yüksek sülfür ihtiva eden kömürler düşük  $NO_x$  ve  $SO_2$  salımı açığa çıkararak etkin ve ekonomik bir şekilde yakılabilmektedir <sup>4</sup>. Bu santrallerde genellikle sülfürü tutmak için kazana kömür ile beraber kireçtaşı da beslenir. Oluşan  $CaSO_4$  santrallerdeki düşük yakma ısısında (800-900°C arasında) ayrılmaz. Bu sayede,  $SO_2$  salımı pahalı baca gazı desülfürizasyon ünitelerine ihtiyaç duyulmadan azaltılır <sup>3,5</sup>. Bu tip santrallerden elde edilen uçucu küller pulverize kömür yakan santrallerden elde edilen uçucu küllerden kimyasal, mineralojik ve morfolojik olarak oldukça farklıdır. Tanecikler daha iri (1-300 µm) ve daha düzensizdir. Genellikle, amorf faz oranı daha düşük;  $CaO$ ,  $CaSO_4$  gibi kristal fazların oranı daha yüksektir. Bu sebeplerle, puzolanik reaktivitesi sınırlıdır. Yüksek sülfür oranı sebebi ile çoğunlukla çimento ikame malzemesi olarak kullanımı uygun değildir <sup>3,4,6</sup>. Bir kısmı iri, çok düzensiz ve gözenekli taneler içerdiği için kullanılmadan önce ayrıştırılmalı ya da yeterli inceliğe öğütülmelidir <sup>5,7</sup>. Bu ek bir zaman ve yatırım maliyeti getirmekte ve akışkan yataklı santrallerden temin edilen külün ticari kullanımın yaygınlaşmasını kısıtlamaktadır.

Türkiye ve Yunanistan gibi ülkelerde yerel linyit yakılması yaygın bir uygulamadır. Yüksek kalsiyumlu linyitlerin pulverize kömür teknolojisi ile yakılmasından elde edilen uçucu kül, düşük kalsiyumlu (yüksek silis-alümina-demir ihtiva eden) kömürlerin yakılmasından elde edilen külden oldukça farklıdır. Akışkan yatak teknolojisi ile elde edilen uçucu küle daha çok benzemektedir <sup>8,9</sup>. Linyit içerisindeki kalsiyum, akışkan yataklı teknolojilerde sisteme beslenen tutucuya benzer bir rol üstlenir. Kazan ısısı, tipik bir pulverize yakma ile akışkan yataklı yakma arasında kalır.

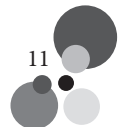
Neticede farklı termik santrallerden, hatta aynı termik santralin farklı ünitelerinden elde edilen uçucu küller çok farklı özelliklere sahip olabilir. Tek bir uçucu kül tanesi içerisinde bile heterojenliğe rastlanılabilir. Kullanılan kömürün tipi (taş kömürü, linyit gibi), kömür taşıma, depolama ve yakma sistemleri ve süreleri, kömür pulverzasyon derecesi, kül toplama ve emisyon kontrol sistemleri, varsa ikincil yakıtlar gibi birçok faktör uçucu küllerin özelliklerini etkiler <sup>10,11</sup>. Özellikle, son zamanlarda biyokütle ve kömürün beraber yakılmasına yönelik çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Önümüzdeki dönemde, Türkiye enerji üretimindeki dışa bağımlılığın yerli kaynakların etkin kullanımı ile azaltılması planlanmakta ve yerli kaynaklar arasında kömür rezervlerinin önemi vurgulanmaktadır <sup>12</sup>. Bu kapsamda, yeni kömür rezervlerinin bulunması, kömür kalitesinin iyileştirilmesi ve temiz/etkin yakma teknolojilerine dair çalışmalar devlet tarafından desteklenmektedir. Belirlenen enerji üretim hedefleri değerlendirildiğinde Türkiye uçucu kül üretim miktarlarında artış beklenmektedir.

Kitap kapsamında, Türkiye'deki 9 adet termik santralden 2013-2015 yılları içinde temin edilen 17 farklı uçucu kül numunesinin teknik özellikleri sunulmaktadır. Sunulan özellikler sadece numunelerin alındığı tarihi temsil eder ve mevcut durumu yansıtmayabilir. Bu küllerin ana kullanım alanı çimento ve beton sektörüdür. Ülkemizde, uçucu külün bu sektörde kullanılmasına yönelik son derece kapsamlı bir bilgi ve tecrübe birikimi mevcuttur. Fakat, uçucu küller, yalnızca çimento ve beton sektöründe hammadde/katkı malzemesi olarak düşünülmemelidir. Uçucu külün hafif agrega, tuğla, gaz beton, seramik, cam ve zeolit üretiminde kullanılacak; zemin, çevre koruma ve hatta tarım uygulamalarında etkin bir şekilde kendine yer bulabilecek bir malzeme olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Saygılarımızla,

2021, Ankara



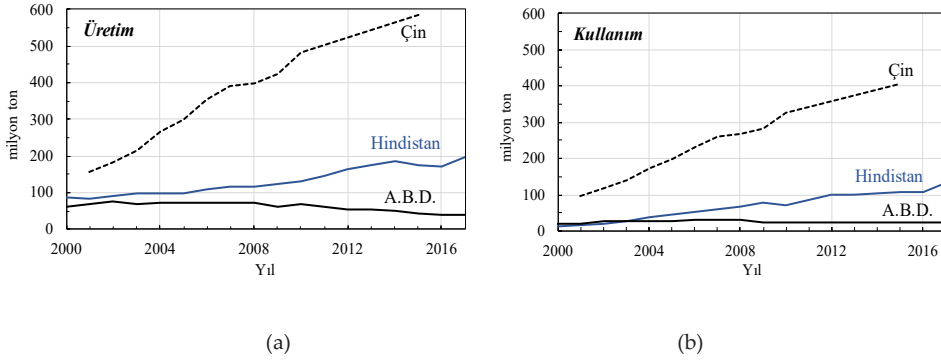


# 1. Genel bilgiler

## 1.1. TANIM

Kömür, elektriğin yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmasından günümüze elektrik üretiminde kullanılan en büyük kaynaklardan olmuştur. 2016 itibari ile dünya elektrik üretimi 25 bin TWh'i aşmıştır<sup>13</sup>. Bu üretimin %38,3'ü kömür yakıtlı termik santrallerden sağlanmaktadır<sup>13</sup>. Uçucu kül, kazanlarda kömürün (ve varsa ikincil yakıtların) yakımı sonucu açığa çıkan baca gazları içerisinde sürüklenen tozlu parçacıkların elektrostatik veya mekanik filtreler yardımıyla toplanması ile elde edilen bir yan üründür.

Kömür yakıtlı termik santraller yoğun miktarda uçucu kül açığa çıkarır<sup>14</sup>. 2017 itibari ile yıllık uçucu kül üretiminin 1 milyar tonu aştığı tahmin edilmektedir. Kömür tüketimindeki ve dolayısı ile uçucu kül üretimindeki başlıca ülkeler Çin, Hindistan ve A.B.D.'dir. Bu ülkeler, ürettikleri büyük miktarlardaki uçucu külün başta çimento ve beton sektörü uygulamaları olmak üzere farklı sektörlerde kullanımına büyük önem verir. Maalesef, uçucu kül kullanım oranı ülkeden ülkeye büyük farklılık gösterir. Dünya ortalaması sadece %25 civarında kalmıştır<sup>15</sup>.



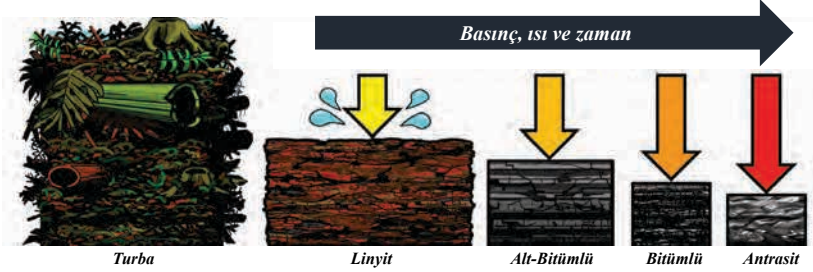
Şekil 1-1. 2000-2017 arasında A.B.D.<sup>16</sup>, Çin<sup>17</sup> ve Hindistan<sup>18</sup> uçucu kül (a) üretim ve (b) kullanım miktarları

Türkiye'de uçucu kül üretimine, kullanım ve bertarafına ilişkin veriler oldukça sınırlıdır. Ülkemiz 2018 uçucu kül üretiminin 18,6 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmekte; kullanım oranının ise oldukça düşük olduğu bilinmektedir<sup>19</sup>.

## 1.2. HAMMADDE

Uçucu külün ham maddesi kömürdür. Kömür yanabilen bir tortul, organik kayadır. Nemli ve çok yağış alan, yaz sıcaklıklarının düşük olduğu yörelerde bataklık ve benzeri tatlı sular altındaki arazilerde yetişen bitkilerin (genellikle yosunlar ve

bataklık sazları) su dibine çökmesi, su altında hava ile ilişkisi kesilmiş ortamda yıllarca çürüyüp kalın yataklar halinde birikmesi sonucunda bataklık kömürü (turba) olarak oluşmaya başlar. Zaman içerisinde olgunlaşma derecesine (kömürleşmeye) bağlı olarak farklı kalitede kömürlere (linyitten antrasite) dönüşür (Şekil 1 2).



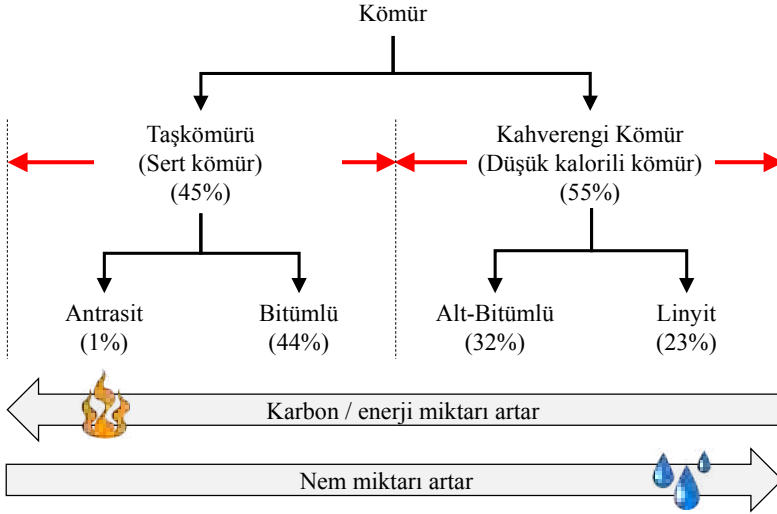
Şekil 1-2. Kömürün zaman içerisinde olgunlaşması (<sup>20</sup>den uyarlanmıştır.)

### 1.2.1. Kömür sınıfları

Kömür kalorifik değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, nem miktarı, sülfür miktarı, koklaşma ve kekleşme özellikleri temel alınarak sınıflandırılmaktadır. Kömür olgunlaştıkça sabit karbon miktarı artmakta ve nem miktarı düşmektedir. İki ana kömür sınıfı vardır: taşkömürü (sert kömür) ve kahverengi (düşük kalorili) kömür. Bu iki ana sınıf da kendi içerisinde alt sınıflara ayrılır (Şekil 1-3 ve Tablo 1-1). Taşkömürleri genellikle sert ve parlaktırlar. Nem oranları düşük, karbon oranları yüksektir. Linyit ve çoğu alt-bitümlü kömür ise daha yumuşak, kırılğan ve mattır; daha yüksek nem ve daha düşük karbon içerirler.

Bitümlü ve alt-bitümlü kömürler yüksek kalorifik değerleri ve uçucu madde içerikleri sebebi ile pulverize halde iken kolay yanarlar. Alt-bitümlü kömürler, bitümlü kömürlere kıyasla daha yüksek sülfür ve daha yüksek nem içeriğine sahiptir. Bu nedenle, yakıldıkları zaman bitümlü kömürlere göre daha çok  $SO_2$  ve  $NO_x$  salımı yaparlar.

Linyit, diğer kömür tiplerinden daha fazla sülfür içerir; dolayısı ile linyit kömürlerinin yakılması daha fazla salıma yol açar. Linyitin yüksek nem oranı kazan verimini düşürür. Ayrıca, birim enerji üretimi başına taşkömürlerine oranla çok daha fazla linyite ihtiyaç duyulur. Artan ihtiyaç, öğütme ve depolama gibi işlemlerin de yoğunlaşması anlamına gelir. Bu sebeplerle, termik santrallerde linyit ancak yerel olarak ve ucuza çıkarılabiliyorsa tercih edilir.



<sup>(1)</sup> Parantez içerisinde verilen değerler 2011 yılı itibari ile dünya erişilebilir rezerv yüzdeleridir <sup>21</sup>.

Şekil 1-3. Ana kömür sınıfları <sup>(1)</sup>

Tablo 1-1. Ana kömür sınıflarına ilişkin temel bilgiler <sup>(1)</sup>

<b>Taşkömürü</b> (Sert kömür)	<b>Kahverengi Kömür</b> (Düşük kalorili kömürler) <sup>(2) (3)</sup>
i. <i>Antrasit</i> (%1) Çok yüksek enerjili, pahalı, az tüketilen kömür tipi. Isıl değer: >7000 kcal/kg	i. <i>Alt-Bitümlü</i> (%32) <sup>(4)</sup> Bitümlüye göre daha az, linyite göre ise daha değerli, topaklaşma özelliği göstermeyen kömür tipi. Isıl değer: 4165-5700 kcal/kg
ii. <i>Bitümlü</i> (%44) Antrasite göre daha az enerjili, ana taşkömürü tipi. Isıl değer: 5700-7000 kcal/kg. İki alt sınıfa ayrılır: a. Kok kömürü <sup>(6)</sup> b. Diğer bitümlü kömürler (Buhar kömürü)	ii. <i>Linyit</i> (%22) Düşük karbon içerikli, düşük enerjili, topaklaşma özelliği göstermeyen kömür tipi. Isıl değer : <4165 kcal/kg

<sup>(1)</sup> Parantez içerisinde verilen değerler 2011 yılı itibari ile dünya erişilebilir rezerv yüzdeleridir <sup>21</sup>.

<sup>(2)</sup> Ülkemizde kahverengi kömür terimi yaygın değildir ve sıklıkla alt-bitümlü kömürler için de linyit terimi kullanılmaktadır. Bu kitap kapsamında da terimler bu şekilde kullanılacaktır.

<sup>(3)</sup> Petrolün tektonik hareketler sonucu kendi yatağından ayrılarak çevredeki yarık ve çatlaklara yerleşmesi sonucu oluşan asfaltit kahverengi kömürler arasında yer alabilir.

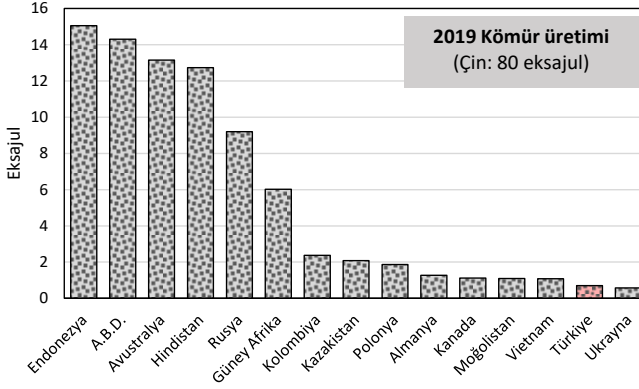
<sup>(4)</sup> Bazı ülkelerde alt-bitümlü kömürler buhar kömürü altında sıralanmaktadır.

<sup>(5)</sup> Isıl değerler nemsiz ve külsüz bazda verilmiştir.

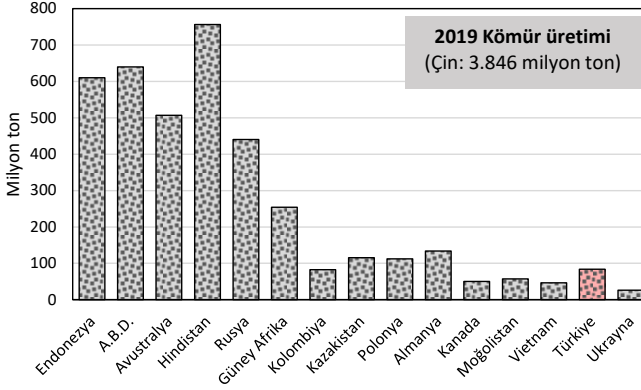
<sup>(6)</sup> Kok kömürü, diğer bir adıyla metalürjik kömür, yüksek fırınlarda kullanılabilir kalitede koklaşma özelliğine sahiptir ve başta demir-çelik ve kimya sektörleri olmak üzere farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

## 1.2.2. Kömür üretim ve tüketim eğilimleri

Dünya çapında sürekli artan enerji talebi ile beraber kömür tüketimi de artmaktadır. Dalgalanan petrol ve doğal gaz fiyatları, özellikle Çin, A.B.D. ve Hindistan gibi kömür zengini ülkelerde kömürün elektrik üretiminde kullanımını cazip hale getirmektedir. 2019 yılı dünya kömür üretimi 167 eksajul / 8.129 milyon ton olmuştur <sup>22</sup>. Üretimde eksajul cinsinden ilk sırada %47,6 ile Çin, ikinci sırada %9,0 ile Endonezya ve üçüncü sırada %8,5 ile A.B.D yer almaktadır (Şekil 1-4 a). Türkiye dünya kömür üretiminde 0,7 eksajul ile onbeşinci sıradadır. Üretilen kömürlerdeki kalite farkları üretim ağırlıklarına yansımıştır (Şekil 1- 4 b). Çoğunlukla, taş kömürüne göre düşük kalorifik değere sahip linyitin üretildiği Türkiye 84 milyon ton üretim ile ağırlık sıralamasında onbirincidir.



(a)



(b)

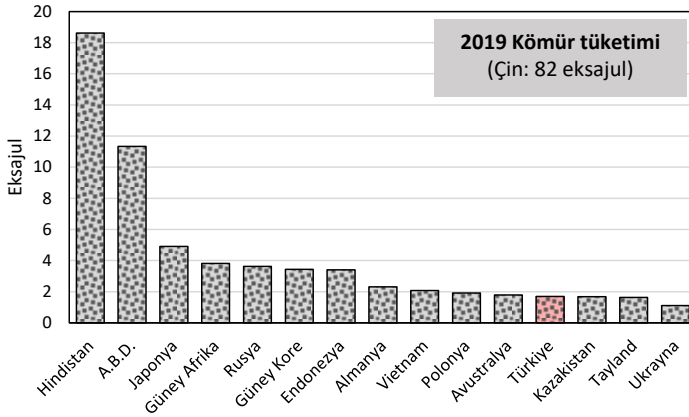
<sup>(\*)</sup> 2019 yılında Çin kömür üretimi 80 eksajul (3.846 milyon ton) olmuştur.

Şekil 1-4. Çin<sup>(\*)</sup> hariç başlıca kömür üreten ülkeler, 2019: (a) eksajul, (b) milyon ton <sup>22</sup>

Dünya kömür ticareti neredeyse taş kömürü üzerinedir. Üretilen linyitin neredeyse tamamı üretildiği yerde tüketilir.

Rusya dışındaki Avrupa ülkelerinde kömür üretimi her yıl sistematik olarak azalmaktadır. Öyle ki Avrupa Birliği'nde 1990'da 13 ülke taş kömürü üretirken 2019'da üretim yapan sadece iki ülke -Polonya ve Çek Cumhuriyeti - kalmıştır. Bu eğilim sonunda AB'de 1990'da 277 milyon tonu aşkın olan taş kömürü üretimi, 2019'da %77 azalarak 65 milyon tona kadar düşmüştür. Bu rakam AB iç tüketimlerinin sadece %37'sini karşılamaktadır. Aradaki taş kömürü arz farkı ithalat ile kapatılmaktadır. AB'de linyit üretimi de hızla düşmektedir. Yıllardan beri linyit üretiminde ilk sıralarda yer alan Almaya, 2038'de linyit-yakan termik santralleri kapatmayı planlamakta ve buna uygun olarak her sene linyit üretimini sistematik azaltmaktadır.

Dünyada tüketilen kömürün %59'u elektrik üretiminde, %36'sı sanayi sektöründe, kalan %4'ü ise diğer alanlarda (konutlar, ticari binalar) kullanılmaktadır. 2019 yılı dünya kömür tüketimi 158 eksajul olmuştur <sup>22</sup>. Tüketiminde ilk sırayı %51,7 ile Çin almıştır. Çin'den sonra %11,8 ile Hindistan ikinci, %7,2 ile A.B.D. üçüncü sırada yer almaktadır. Türkiye dünya kömür tüketiminde 1,7 eksajul ile onüçüncü sıradadır.



<sup>(1)</sup> 2019 yılında Çin kömür üretimi 82 eksajul olmuştur.

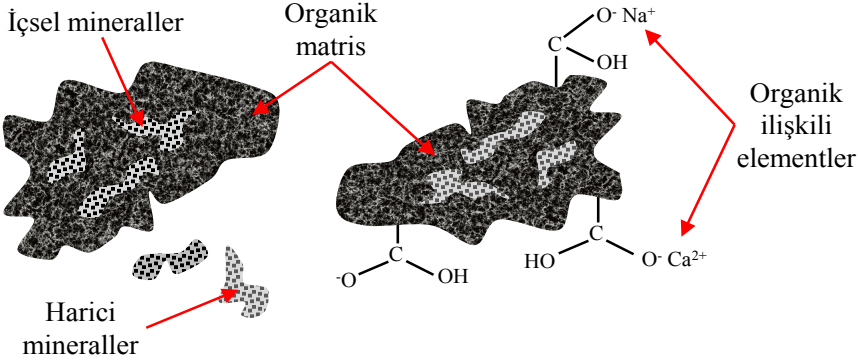
Şekil 1-5. Çin<sup>(1)</sup> harici başlıca kömür üreten ülkeler, 2019

### 1.2.3. Kömürün mineral madde içeriği

Kömür, organik maddenin yanısıra bir miktar mineral madde de içerir. Mineral madde, kömürdeki inorganik maddelerin ve elementlerin toplamı olarak değerlendirilir. Kömür içerisindeki mineraller iki ana grupta toplanır <sup>23</sup>:

- (i) *İçsel mineraller*: Yanma öncesinde ayrılmayan, organik kömür parçacıkları ile yakından ilişkili minerallerdir. Bu mineraller, genellikle organik parçacıkların ağırlıkça %10'unun (çoğunlukla ağırlıkça % 2-4) altında bir kısmını oluşturur.

- (ii) *Harici mineraller*: Yanma öncesinde organik parçacıklardan ayrılmış, ağırlıkça %90'dan fazla mineral madde içeren, genellikle organik parçacıklardan daha küçük boyutlu parçacıklarda bulunur.



Şekil 1-6. Kömür içerisindeki mineraller <sup>24</sup>

Kömürün içerdiği mineral maddenin %95'inden fazlasını içeren majör mineraller; (i) kil mineralleri, (ii) silikat mineralleri, (iii) karbonat mineralleri, (iv) sülfid mineralleri ve (v) sülfat mineralleri olmak üzere beş ana gruba ayrılır.

- Kil mineralleri kaolinitler (alüminosilikatlar), muskovit-illit (potasyum alüminosilikatlar) ve illit-montmorillonit karışımlarını kapsar. Genelde toplam mineral maddenin %50'sini teşkil eder; yıkanmış kömürlerde ise az miktarda bulunur.
- Silikat mineralleri çoğunlukla kuvars halinde bulunur; mineral maddenin %15-20'sini oluşturur.
- Karbonat mineralleri kalsit, siderit, dolomit ve ankeritin yanı sıra *Ca*, *Fe*, *Mg* ve *Mn*'nin çeşitli kompleks karbonatlarını da içerir.
- Sülfid mineralleri pirit ( $Fe_2S$  – kübik) ve markazit ( $Fe_2S$  – ortorombik) içerir.
- Sülfat mineralleri ise başta anhidrit ve alçı olmak üzere çeşitli kalsiyum sülfatlarda bulunur.

Kömürlerde bu beş ana grubun dışında, küllerin kazan kirlenme ve cürufleşme olaylarında önemli rol oynayan çözünebilir tuz mineralleri de minör olarak bulunabilir <sup>25</sup>. Ayrıca, kömürler çeşitli metal oksitler ve fosfat minerallerini de içerebilirler. Kömür içerisinde bulunan başlıca mineraller Tablo 1-2'de sunulmuştur.

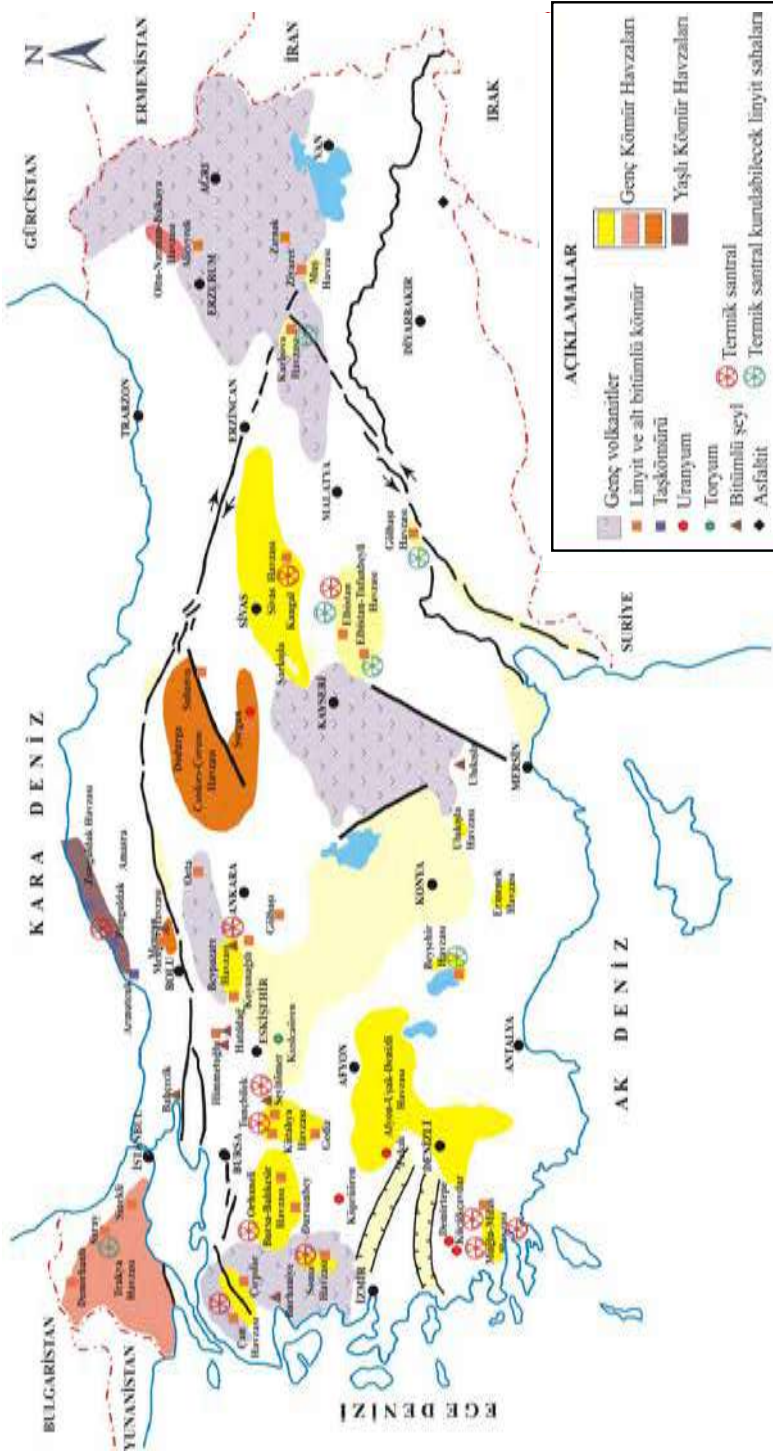
Tablo 1-2. Kömür içerisinde bulunan başlıca mineraller

Mineral	Formül	Mineral	Formül
<i>Kil mineralleri</i>		<i>Sülfat mineralleri</i>	
Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Pirit	$FeS_2$ (kübik)
Illit	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Markazit	$FeS_2$ (ortorombik)
Klorit	$Mg_3Al(AlSi_3O_{10})(OH)$	<i>Sülfat mineralleri</i>	
Muskovit	$KAl_2(OH,F)_2(AlSi_3O_{10})$	Anhidrit	$CaSO_4$
Montmorillonit	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$	Alçı	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
<i>Silikat mineralleri</i>		<i>Klor mineralleri</i>	
Kuvars	$SiO_2$	Kaya tuzu	$NaCl$
<i>Karbonat mineralleri</i>		Silvinit	$KCl$
Kalsit	$CaCO_3$	<i>Oksit mineralleri</i>	
Dolomit	$CaMg(CO_3)_2$	Hematit	$Fe_2O_3$
Siderit	$FeCO_3$	Manyetit	$Fe_3O_4$
Ankerit	$CaFe(CO_3)_2$	Rutit	$TiO_2$
		<i>Fosfat mineralleri</i>	
		Apatit	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$

#### 1.2.4. Türkiye’de kömür

Türkiye için kömür vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Türkiye’de 380 milyon ton kanıtlanmış taşkömürü rezervi ve 12,5 milyar ton kanıtlanmış linyit rezervi vardır <sup>26</sup>. Ülkemiz kömür sahaları ve potansiyel termik santral alanları Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan harita ile Şekil 1-7’de sunulmuştur <sup>27</sup>.

Ülkemizdeki en önemli taşkömürü rezervleri Zonguldak Havzası’ndadır. Linyit rezervleri ise ülke geneline yayılmıştır. Türkiye linyit rezervinin %68’i düşük kalitede, %23,5’i 2.000-3.000 kcal/kg aralığında, %5,1’i 3.000-4.000 kcal/kg aralığında ve kalan %3,4’ü 4.000 kcal/kg’ın üzerindedir <sup>28</sup>. Bu durum, ülkemiz için kömür hazırlama, iyileştirme ve zenginleştirme çalışmalarının önemini arttırmaktadır.

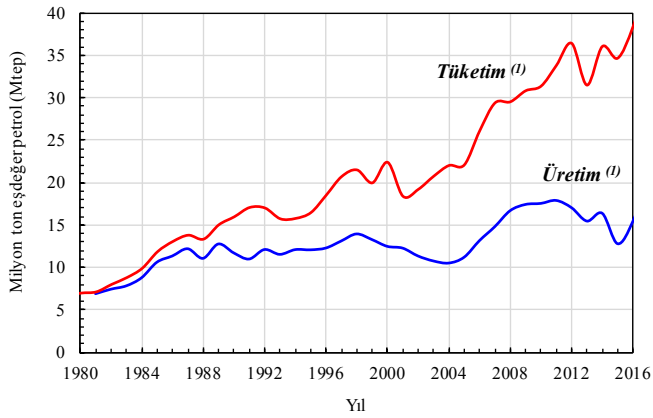


Şekil 1-7. MTA Türkiye kömür sahaları ve potansiyel kullanım alanları haritası <sup>27</sup>

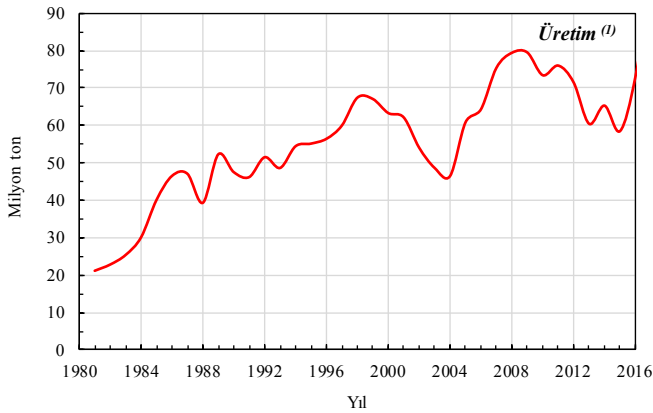


2015 yılı sonu itibariyle linyit rezervlerin %80'i Elektrik Üretim Anonim Şirketi (%54,6), Türkiye Kömür İşletmeleri (%23,5) ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) olmak üzere üç kamu kuruluşunun, kalan yaklaşık %20'lik kısmı ise özel sektörün ruhsat sınırları içerisinde bulunmaktadır<sup>29</sup>. Özel sektör rezervlerinin kaydı beyan usulüne göre tutulmakta, bu durum verilerin güvenilirlik derecesini düşürmektedir.

Yıllar içerisinde Türkiye kömür üretim ve tüketim değerlerinin değişimi Şekil 1-8'de verilmiştir.



(a)



(b)

<sup>(1)</sup> Hesaplamalarda sadece ticari olarak satılan kömürler ele alınmıştır (bitümlü, linyit ve yarı-bitümlü kömürler gibi).

<sup>(2)</sup> Ton cinsinden tüketim verisi mevcut değildir.

Şekil 1-8. Yıllara göre Türkiye kömür üretim ve tüketim değerleri<sup>30</sup>: (a) Mtep; (b) milyon ton

1980'lerden sonra ülkemizde kömür üretimi kömür tüketimini karşılayamaz hale gelmiş ve yurtdışından yüksek oranda kömür ithaline başlanmıştır. Ülkemizde çıkarılan kömürün büyük bir çoğunluğu linyittir. 2017 yılında 1,2 milyon ton taşkömürü, 71,5 milyon ton linyit ve 1,4 milyon ton asfaltit üretilmiştir <sup>31</sup>. Buna karşılık, yaklaşık 38 milyon ton taş kömürü ithal edilmiştir <sup>31</sup>. Bu ithalat çoğunlukla başta Rusya, Kolombiya ve A.B.D. olmak üzere uzak ülkelerden karşılanmaktadır. Linyit düşük kalorili bir kömür olduğu için ticareti çok yaygın değildir; çıkarıldığı yerde tüketilir.

2017 yılında ülkemizde yaklaşık 38,9 milyon ton taşkömürü ve 71,7 milyon ton linyit tüketilmiştir <sup>31</sup>. Bu miktarın büyük bir kısmı (19,5 milyon ton taşkömürü ve 62,8 milyon ton linyit) elektrik üretiminde kullanılmıştır. Kömür tüketimin sektörlere göre dağılımı Tablo 1-3'te özetlenmiştir.

Tablo 1-3. Türkiye kömür tüketimi (%), 2017 <sup>31</sup>

Türkiye kömür tüketimi (%), 2017	Kömür tipi	
	Taş kömürü	Linyit
Elektrik ve ısı üretimi <sup>(1)</sup>	50,1	87,7
Kok fırınları	14,9	-
Konut	9,1	3,1
Ticaret ve hizmetler	8,7	1,1
Metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı	8,5	1,8
Ana metal sanayi	4,7	0,1
Diğer	4,0	6,2

<sup>(1)</sup> Isı üretimi, ana faaliyet üreticileri ve otoprodüktörlerin sattıkları ısıya ilişkin verileri de kapsamaktadır.

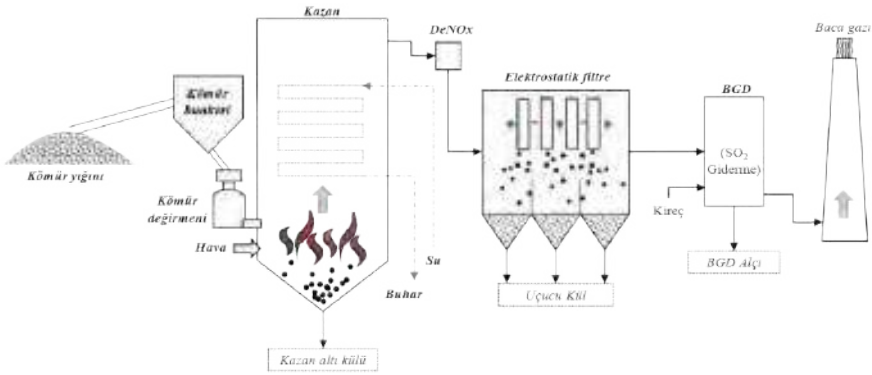
Koklaşabilir taş kömürleri (metalürjik kömür), yüksek fırınlarda kullanılabilir kalitede koklaşma özelliğine sahiptir ve başta demir-çelik ve kimya sektörleri olmak üzere farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Koklaşmayan, buhar kömürü olarak da bilinen, taş kömürleri ise çoğunlukla termik santrallerde elektrik üretimi için kullanılır. Linyit tüketiminin hemen hemen tamamı termik santrallerde gerçekleşir; düşük kalorili olduğu için sanayi ve konutlarda tercih edilmez. Ülkemizde linyitin termik santrallerde bu kadar yoğun kullanılmasının en büyük sebebi yerel olarak ve ucuza çıkarılabilmesidir. Termik santrallerde istenen özellikleri sağlamak için farklı kaynaklardan temin edilen kömürler harmanlanabilir (paçal yapılabilir) ve/veya ikincil yakıtlar eklenebilir.



## 1.3. ÜRETİM SÜRECİ

### 1.3.1. Termik santrallerde uçucu kül oluşumu

Kömür yakıtlı termik santrallerde, genellikle pulverize (püskürtme toz) kömür yakma sistemi tercih edilir. Bu tercihin ana sebebi, uzun süredir kullanılan ve kanıtlanmış bir teknoloji olmasıdır. Bu tip santrallerde, yüksek yanma sıcaklığına ulaşmanın çeşitli çevresel dezavantajları olsa da yıllar içerisinde hem yanma verimliliği, hem de oluşan emisyonları ( $NO_x$ ,  $SO_2$ ) azaltma teknolojileri açılardan ilerlemeler kaydedilmiştir. Pulverize kömür teknolojisinin kullanıldığı termik santrallerde taban külü ve uçucu kül oluşum süreci Şekil 1-9'da özetlenmiştir.

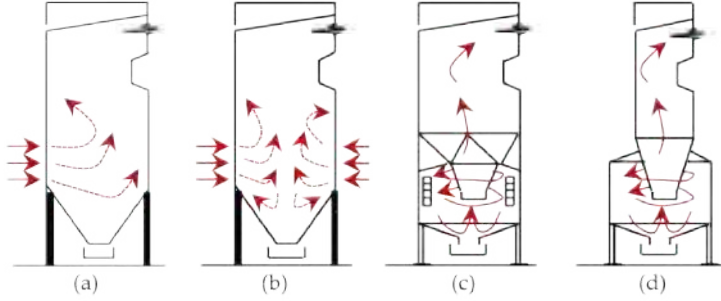


Şekil 1-9. Pulverize kömür yakma teknolojisinin kullanıldığı termik santrallerde uçucu kül oluşumu

Üretim ham kömürün madenlerden veya limanlardan ağır taşıma araçları, demiryolu vagonları, gemiler ve konveyörler ile termik santrale taşınması ile başlar. Uygunluğa göre istifleme alanlarında veya tane boyu küçültülüp kömür bunkerlerinde depolanır. Buradan kömür değirmenlerine (çoğunlukla dik valsli değirmen) iletilir. Öğütülmüş kömürlerin ağırlıkça %2'si  $300\mu\text{m}$ 'den kaba olmamalıdır. Linyit ve alt-bitümlü kömürlerin ağırlıkça %65-70'i, bitümlü kömürlerin ise ağırlıkça %80-85'i  $74\mu\text{m}$ 'den ince olmalıdır. Öğütme sonunda istenen inceliğe erişen ve tane boyu elek yöntemi ile belirlenen pulverize kömür yanma odasına taşınır. Yakma aşamasında iki farklı yakma sistemi kullanılır. Değirmen çıkışında öğütülmüş kömürün tamamı yanma odasına püskürtüldüğü sistemler direkt, bir kısmının ayrılıp kurutulup yanma odasına püskürtüldüğü sistemler indirekt yakma sistemleridir. Türkiye'de Afşin-Elbistan A ve B Santralleri dışındaki tüm santrallerde direkt yakma sistemi vardır. Saniyeler içerisinde gerçekleşen yanma işlemi pulverize kömürün karbon ve diğer yanıcı maddelerden oluşan organik kısmı tüketilir ve ısı açığa çıkar. Kömürün kil, şist, kuvars, feldspat gibi safsızlıklardan oluşan inorganik kısmı ise baca gazları içinde askıda kalır, çeşitli boyut ve kimyasal kompozisyonlarda kül partiküllerine dönüşür<sup>32</sup>.

Askıda kalan külün bir kısmı aglomere olarak kısmen daha büyük parçacıklar oluşturur. Bu parçacıklar kazan ve kömür tipine bağlı olarak katı halde kazan tabanına düşer ya da eriyik halde kazan tabanına akar. Pulverize kömür kazanları, kazandan kül çıkarılma şekline göre ikiye ayrılır. Kuru-tabanlı kazanlarda kül sistemden kuru halde, cüruf-akıtmalı (ıslak-tabanlı) kazanlarda ise erimiş halde çıkarılır.

Kuru-tabanlı kazan elektrik üretiminde en sık kullanılan kazan tipidir. Şuan A.B.D. ve Türkiye gibi ülkelerde satılan neredeyse tek tiptir. Kuru-tabanlı kazanların işletimi daha kolaydır, bu kazanlar daha güvenilirdir ve farklı yakıt özelliklerine daha esneklerdir<sup>33</sup>. Oluşan külün büyük bir kısmı (>%80) bacı gazı ile parçacık kontrol sistemlerine taşınacağından daha büyük ve daha pahalıdır. Cüruf-akıtmalı kazanlar baca gazlarında taşınan ince uçucu kül miktarını (<%20) azaltacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kazanlarda oluşan daha ağır ve granüler kül tanecikler kazanın içinde kalır. Örnek kuru-tabanlı ve cüruf-akıtmalı kazan konfigürasyonları Şekil 1-10'da sunulmuştur.



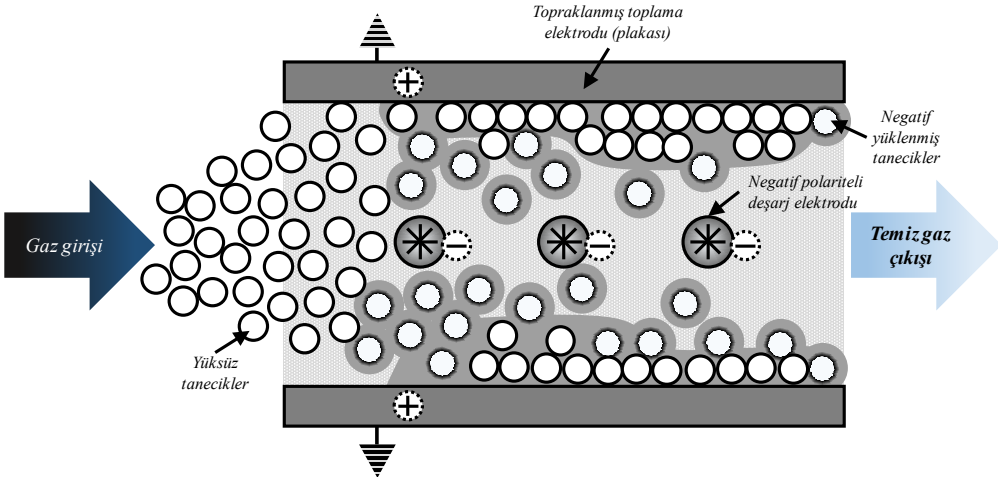
Şekil 1-10. Örnek (a,b) kuru-tabanlı ve (c,d) iki-aşamalı cüruf-akıtmalı kazan konfigürasyonları<sup>33</sup>

Kuru-tabanlı kazanlarda farklı konfigürasyonlar ile yüksek kül veya nem içeriği, düşük ısıtma değeri, düşük kül füzyon sıcaklığı ve yüksek kül biriktirme potansiyeli olan kömürler de dahil olmak üzere farklı kalitedeki kömürler yakılabilir. Kuru-tabanlı kazanlarda külün katı halde çıkarılması amaçlandığından kazan içerisindeki ısı transfer hızı ve sıcaklık kontrollü olmalıdır. Isı salım hızı cüruf-akıtmalı kazanlara kıyasla çok daha düşük ve baca gazı çıkış sıcaklığı külün ergime noktasının altında olmalıdır. Bu tip bir kazan tasarımında diğer tiplerine kıyasla daha büyük bir kazana ihtiyaç duyulur; fakat, cüruf oluşumu ve külün kazan duvarlarına yapışması etkin bir şekilde azaltılmış olur. Pulverize kömür yakan santrallerde alev sıcaklıkları tipik olarak en fazla 1500°C'dir. Kazanda ana ısı kaybı kazanda asılı olan buharlaştırıcı, kızdırıcı ve tekrar kızdırıcı borulara ışıma yoluyla olur. Kazandan çıkan baca gazının sıcaklığı tipik olarak 1000°C'dir. Türkiye'de kömür yakan santraller genellikle daha düşük sıcaklıklarda çalışırlar.

Kuru-tabanlı kazanların tabanında biriken taban külü askıda kalan parçaların %10-20'sine tekabül eder. Taban külü hava ya da su ile soğutulabilir. Su ile soğutma daha yaygındır. Taban külü toplanma sisteminde kül bunkerleri, daldırma sıyrıcı konveyörleri, taşma suyu haznesi, yüksek verimli konsantratör, kül soğutma kulesi, arıtılmış kül soğutma suyu pompaları, geri dönüş su pompaları gibi çeşitli alt üniteler kullanılır <sup>34</sup>. Taban külünün tane boyutu elektrostatik filtrelerde toplanan uçucu küle kıyasla son derece iridir; 75 mm'ye kadar çıkabilir. Hatta, bazı taban külleri beton üretiminde agrega olarak kullanılabilir. Taneler köşelidir. Gözenekli bir yapıya sahip olduğundan sıkışma ve yüklemeye maruz kaldığında dağılır. Yoğunluğu 2.080 – 2.730 kg/m<sup>3</sup> arasında değişir. Kül bazı yoğun ergimiş taneler de içerebilir. Ana bileşenleri  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ 'tir; bu bileşenlerin oranı yakılan kömürün cinsine ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişebilir <sup>35</sup>.

Yeni santrallerde daha az tercih edilen cüruf-akıtmalı kazanlar, külün erime noktasının üzerindeki sıcaklıklarda (1500-1700°C) çalıştırılırlar <sup>36</sup>. Bu yüksek sıcaklığa dayanabilmek için kazan duvarları özel seramik iç kaplama ile kaplanır. Yeterli akışkanlık kazanmış eriyik mineraller duvarlardan aşağı doğru akarak yakma sisteminde sorun oluşturmazlar. Bu tip kazanların temel avantajı kül işleme ve uzaklaştırma işlemlerinin daha kolay olmasıdır. Fakat, cüruf kaynaklı duyulur ısı kaybından dolayı düşen kazan verimi, basınçlı parçalarda cüruf birikimi ve artan korozyon, düşük yakıt esnekliği ve daha yüksek  $NO_x$  salımları bu tip kazanlara olan ilgiyi zamanla azaltmıştır <sup>33</sup>. Kazanın altındaki delikli taban sayesinde tabanda toplanan eriyik küller genellikle su ile hızlı bir şekilde soğutulur granüller, camsı bir cüruf oluştururlar <sup>36,37</sup>. En iri tane boyutu 8 mm'ye kadar çıkabilir. Kazan cürufu taneleri çok sert, kırılabilir ve siyah renklidir.  $CaO$  ve  $Fe_2O_3$  içeriğine bağlı olarak yoğunlukları 2.600-3.850 kg/m<sup>3</sup> aralığında değişir. Kimyasal bileşimi taban küllerine benzer <sup>35</sup>.

Baca gazları içerisindeki yoğunlukla ergimiş halde kalan ince mineral maddelerden oluşan kısım (kuru-tabanlı sistemlerde ~%80) baca gazlarıyla daha düşük sıcaklık bölgesine taşınarak soğutulur. Soğuyup katılaştıran parçacıklar camsı (amorf) içeriği yüksek kül taneciklerine dönüşür. İri ve ağır olan tanecikler varsa siklon veya mekanik filtrelerde tutulur. 130°C'ye kadar soğumuş olan baca gazı içerisinde kalan daha hafif ve ince tanecikler ise elektrostatik filtrelerde uçucu kül olarak tutulur <sup>38-40</sup>. Elektrostatik filtrelerde uçucu kül tutumu Şekil 1-11'de özetlenmiştir <sup>41</sup>. Baca gazının içinden geçtiği bu filtrenin en önemli kısmı arka arkaya paralel dizilmiş, yoğunlukla plaka şeklinde olan toplama elektrotlarıdır. Yüksek doğru gerilim kullanılarak elektrotların arasında oluşturulan elektrik alanı ile negatif yüklenen tanecikler toplama elektrotlarına doğru itilir <sup>42</sup>. Elektrotlarda biriken kül belirli aralıklarla silkelenerek elektrostatik filtre altında toplanır ve kül silosuna taşınır. Toplanan uçucu külün özellikleri yakma derecesi, kömürün tipi ve inceliği, kazanda kalma süresi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişir.



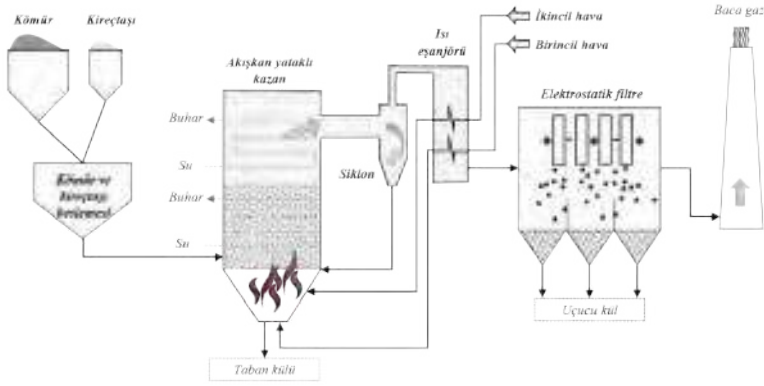
Şekil 1-11. Elektrostatik filtrenin çalışma ilkesi <sup>41</sup>

Kömür santrallerinde elektrostatik filtrenin tek alternatifi torba filtredir. Torba filtreler genelde teflon, fiberglas, polyester, cam elyafı veya uygulamaya özel seçilebilecek diğer malzemelerden yapılan binlerce silindirik hücreden oluşur. Uygun tasarlanmış ve bakımları düzenli yapılan bir torba filtre ile %99,9'un üzerinde toz tutma verimliliğine erişilebilir.

Bazı termik santrallerde  $NO_x$  giderim ( $DeNO_x$ ) ünitesi ve baca gazı desülfürizasyon (BGD) ünitesi gibi konvansiyonel arıtım sistemleri bulunur. Baca gazının çıkış rotasında, elektrostatik filtrelerden çıkış ile baca arasına yerleştirilen BGD ünitelerinin ıslak ve kuru gaz yıkayıcı olmak üzere iki ana tipi vardır. Dünyada ve Türkiye'de en yaygın kullanılan tip %95 üzerinde tutma veriminin yakalanabildiği, çoğunlukla kireç(taşı)-alçıtaşı işleminin kullanıldığı ıslak gaz yıkayıcılarıdır <sup>43</sup>. Kuru gaz yıkayıcılar yüksek sülfür içeren kömürlerde  $SO_2$  tutma verimi açısından yetersiz kaldığından daha az tercih edilir.

Pulverize kömür yakan termik santrallere kıyasla daha yeni ve daha az kullanılan bir teknoloji olan dolaşımli akışkan yataklı termik santraller son yıllarda önem kazanmıştır. Akışkan yataklı yakma sistemler kaliteli kömürlerin yanı sıra, düşük kalitedeki kömürlerin de yakılmasına olanak verir. Pulverize kömürün püskürtülerek yakıldığı sistemlerden farklı olarak akışkan yataklı yakma sistemlerinde daha kabaca öğütülmüş kömür taneleri akışkanlaştırılmış kum, kül ve/veya tutucu (çoğunlukla kireçtaşı veya dolomit) yatağında yakılır. Bu yatak içerisinde kömür 750-950°C yanma sıcaklıklarında uzun süre kalabilir ve büyük ölçüde tüketir. Kazandan siklona gazla taşınan küçük taneciklerin siklondan yeniden kazana beslenmesiyle

de taneciklerin kazanda kalma süreleri uzar ve daha etkili bir yanma gerçekleşir<sup>44</sup>. Kömür ile beraber beslenen kireçtaşı veya dolomit, bu sıcaklık aralığında  $SO_2$ 'nin çökeltilmesini sağlayarak  $SO_2$  salımını büyük oranda azaltır. Ayrıca, düşük yanma sıcaklığı sayesinde  $NO_x$  salımı da düşer. Akışkan yataklı sistemlerde genelde kül miktarı yüksek kömürler tercih edilir. Akışkan yatak teknolojisinin kullanıldığı termik santrallerde taban külü ve uçucu kül oluşum sürecinin ana hatları Şekil 1-12'de gösterilmiştir. Tablo 1-4'te pulverize ve akışkan yataklı kömür kazanları karşılaştırılmıştır.



Şekil 1-12. Akışkan yatak teknolojisinin kullanıldığı termik santrallerde uçucu kül oluşumu

Termik santrallerde kömür yakımı sonucu açığa çıkan uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin çeşitliliği, bunların farklı alanlarda değerlendirilmesine imkan tanır. Seçilen bir uçucu külün belirli özellikleri bazı uygulamalar için elverişli, bazı uygulamalar için etkisiz veya elverişsiz olabilir. Uçucu küllerin farklı kullanım alanları Kısım 3'te anlatılmıştır.

Tablo 1-4. Pulverize kömür ve akışkan yataklı yakma teknolojilerinin karşılaştırması <sup>34</sup>

	Pulverize Kömür	Akışkan Yatak
<b>1. Değirmenler</b>	Pulverize kömür (< 180 µm) elde etmek için bakım maliyeti yüksek, büyük kapasiteli değirmenlere ihtiyaç vardır. İhtiyaç duyulan ortalama tane boyutu 45 µm'dur.	Pulverizeye kıyasla daha kaba taneli (< 5 mm) kömür kullanıldığından değirmenler yerine sadece kırıcılara ihtiyaç vardır. Ortalama tane boyutu 1 mm civarında olmalıdır.
<b>2. Yakma</b>	Sistem sıcaklığı genellikle 1200°C'nin üzerindedir. Parçacık ısınma oranı 10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup> °C/s'dir. Tepki süresi son derece kısadır; uçucu maddeler için 0,1s'nin, charlar için 1s'nin altındadır.	Sistem/yatak sıcaklığı genellikle 815-985°C aralığındadır. Parçacık ısınma oranı 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> °C/s'dir. Tepki süresi uçucu maddeler için 10-50s, charlar için 100-500s aralığındadır.
<b>3. Desülfürizasyon</b>	AB limitlerini karşılamak için BGD ünitelerine ihtiyaç duyulur. Ünitelerde çoğunlukla verimleri en az % 95 olan kireç(taşı)-alçıtaşı işleminin kullanıldığı ıslak gaz yıkayıcılar tercih edilir.	Genellikle optimum yanmada desülfürizasyon verimleri %90 civarındadır. Ancak, AB limitleri dikkate alındığında, yüksek sülfür içeren kömürlerin kullanımı ile ek BGD ünitesi gerektirir.
<b>4. NO<sub>x</sub> Giderme</b>	Yanma odası sıcaklıkları ≥ 900°C olduğundan DeNO <sub>x</sub> ünitesine ihtiyaç duyulabilir. Ancak, Türkiye'de linyit yakan santrallerde genellikle NO <sub>x</sub> değerleri oldukça düşük olduğundan salımlar bazı temel önlemlerle AB limitlerinde istenen seviyeye çekilebilir.	Düşük yanma odası sıcaklıkları (~800-900°C) yakıt kalitesine de bağlı olarak ek DeNO <sub>x</sub> ünitesine ihtiyaç yoktur. NO <sub>x</sub> için AB limitleri karşılanabilir.
<b>5. Elektrofiltreler</b>	Akışkan yatağa göre daha küçük kapasitede elektrostatik filtreler kullanılır. Bu filtrelerin verimi %99,9'a kadar çıkabilir.	Kazanda büyük oranda kireç taşı tüketildiğinden CaO partikül miktarının yüksek olması, elektrostatik filtrelerinin toz tutma verimlerini düşürür. Daha büyük kapasitede elektrostatik filtreler kullanılmak zorundadır.





Tablo 1-5. Kömür yakıtlı termik santrallerde açığa çıkan başlıca yan ürünlerin tanımları

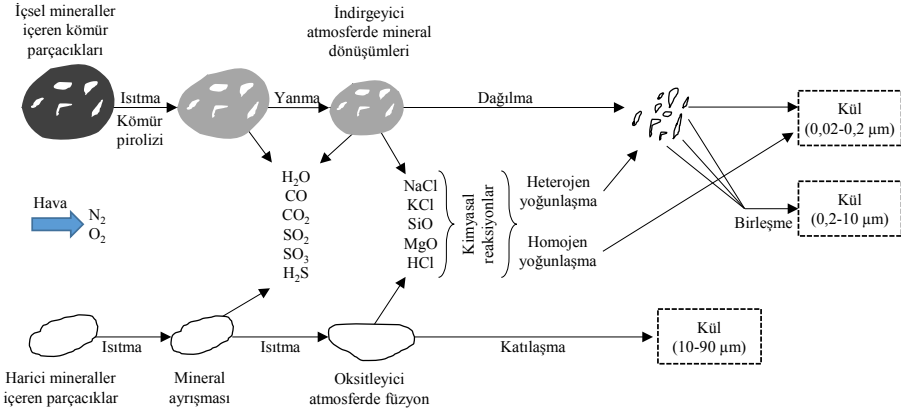
Terim	Tanım
<b>Kömür yakma ürünleri</b>	Kömürün yakılması veya baca gazlarının filtrelenmesi sonucunda elde edilen uçucu kül, taban külü, kazan cürufu, akışkan-yatak yakma külü ve baca gazı desülfürizasyon malzemelerini içerir.
<b>Uçucu kül</b>	Kömür yakıtlı bir termik santralde elektrostatik filtrelerde toplanan ince küldür. Bazı ülkelerde pulverize kömür külünü de uçucu kül olarak adlandırılır. Askıda kalan külün en az %80-85'i uçucu küldür.
<b>Taban külü</b>	Kuru-tabanlı kazanların dibinde toplanan granüler, kaba küldür. Genellikle üretilen külün %10-20'ini oluşturur. Çoğunlukla yapı sektöründe ince veya kaba agrega olarak, yol yapımında dolgu olarak veya çimento ve beton sektöründe kullanılır.
<b>Kazan cürufu</b>	Cüruf-akıtmalı kazanların dibinde toplanan erimiş minerallerin su ile hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilen camsı, granüler malzemedir. Taban külüne kıyasla daha pürüzsüz, camsı bir görünüme sahip siyah, açılabilir parçacıklardan oluşur.
<b>Senosfer</b>	Uçucu kül içerisindeki içi boş küresel parçacıklardır. Genellikle, su üzerinde yüzer ve kül-su bertaraf sistemlerinin olduğu lagünlerden toplanırlar. Üretilen külün sadece % 1-2'si senosferlerden oluşur, bu miktarın daha da azı ayrıştırılıp kullanılabilir.
<b>Nemli kül</b>	Uçucu külün satış, bertaraf veya depolama işlemleri için sıradan araçlarla toz problemi yaşamadan taşınması amacı ile bir miktar su (ağırlıkça kuru kütle için %10-20'si) ile karıştırılmış halidir.
<b>Baca gazı desülfürizasyon (BGD) alçısı</b>	Sülfürün tutulması için baca gazı çıkış rotasında elektrostatik filtrelerden çıkış ile baca arasına yerleştirilen, ıslak gaz yıkayıcıların kullanıldığı BGD ünitelerinde elde edilen alçıdır.

Kullanım amacına göre ihtiyaç duyulan standartların sağlanması için elde edilen uçucu küller sınıflandırma, seçme, elekten geçirme, kurutma, harmanlama, öğütme ve karbon azaltma gibi temel işlemlere tabi tutulabilir. Kömür yakıtlı termik santrallerde açığa çıkan başlıca yan ürünlerin temel tanımları Tablo 1-5'te özetlenmiştir.

### 1.3.2. Kömürdeki mineral madde içeriğinin dönüşümü

Isıtma ve soğutma, her partikülün kompozisyonu ve morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yakım esnasında kısım 1.2.3'te anlatılan kömürdeki mineral madde içeriği dönüşerek uçucu külü oluşturur (Şekil 1-13) <sup>23</sup>. Temelde yanıcılara iki tür parçacık gönderilir:

- i. İçsel mineraller içeren kömür parçacıkları: Bu parçacıklar ısıtıldığında içerdikleri uçucu maddeleri serbest bırakır ve yanarlar; harici mineraller içeren parçacıklarından daha yüksek sıcaklıklara ulaşırlar. İçerdikleri ince içsel mineraller (<0,1 µm) ise parçacık içerisinde dönüşür ve parçacığın dağılması sırasında yavaş yavaş serbest kalırlar<sup>23</sup>. Minerallerin ayrışması ve katı fazdaki dönüşümler gazların oluşmasına sebep olur. Gaz fazında çeşitli homojen kimyasal reaksiyonlar, sonrasında ise çeşitli heterojen/homojen yoğunlaşmalar gerçekleşir<sup>45</sup>. İçsel minerallerin homojen yoğunlaşması 0,02-0,2 µm tane aralığındaki uçucu küllerin oluşmasına sebep olur. Parçacıkların dağılması ve ince parçaların birleşmesi ile ise orta boyutta (0,2-10 µm) kül parçacıkları oluşur.
- ii. Harici mineraller içeren parçacıklar. Harici mineraller (%10'dan az organik madde) içeren parçacıklar bir dizi karmaşık transformasyon geçirek daha büyük boyuttaki (10-90 µm) kül parçacıklarını oluştururlar.



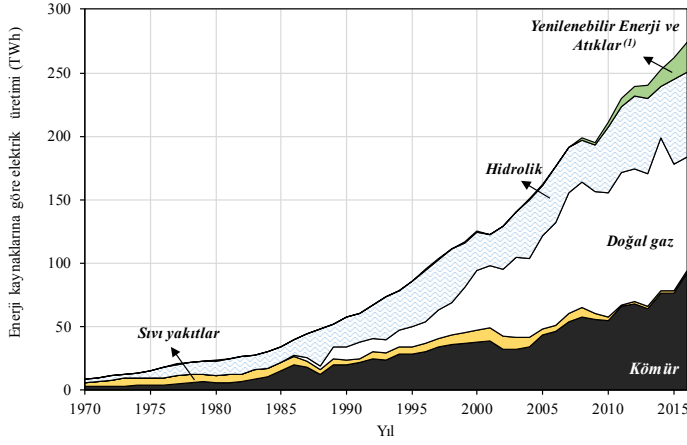
Şekil 1-13. Pulverize kömürün yakımı sırasında gerçekleşen mineral madde dönüşümünün sadeleştirilmiş mekanizması <sup>23</sup>

Şekil 1-14 yönlendirici olsa da tüm kül oluşum sürecini özetlemekte yetersiz kalır. Bir parçacığın içinde sıkışmış uçucu maddenin genleşmesi ile parçacık da genişleyerek içi boş bir senosfer oluşturabilir. Erime noktası yüksek mineraller nispeten değişmeden kalabilir. Birçok termik santralde oluşan küller 90 µm boyutunu aşar. Bu durum çeşitli şekillerde açıklanabilir <sup>46</sup>: (i) parçacıkların sıvı ve plastik halde iken gruplaşması; (ii) kürelerin, sferoidlerin, atıkların ve diğer parçacıkların bir araya gelmesi; (iii) birincil kökenli (kömür yanması sırasında faz dönüşümü olmamış orijinal kömür mineralleri veya fazları) parçacıklar; (iv) yüksek oranda organik bileşenlerden veya yanmamış kömür bileşenlerinden oluşan parçacıklar.

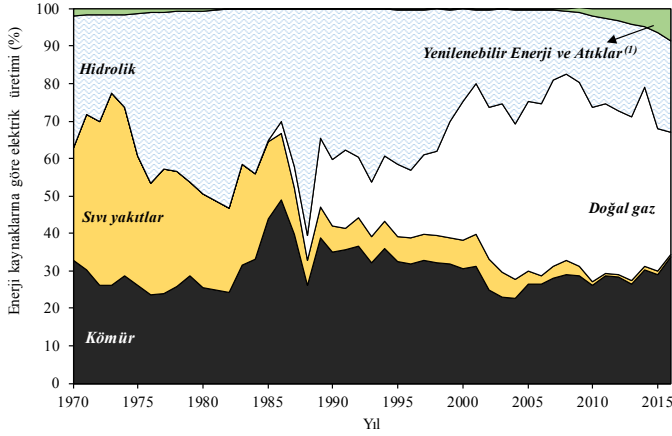
Uçucu küller üzerinde yapılan çalışmalar, daha iri tane dağılımına sahip küllerin daha yüksek oranda iri karbon parçacıkları içerdiğini göstermiştir <sup>47</sup>. Yüksek oranda organik veya yanmamış kömür bileşenleri içeren parçacıklar hafifçe değişmiş, kısmen koklaşmış veya tamamen koklaşmış parçacıklardan oluşur. Hafifçe değişen parçacıklar 550°C'ye kadar olan sıcaklıklara maruz kalanlardır; tipik olarak küllerin 100 µm üzerindeki kısmında gözlenirler. Tamamlanmamış oksidasyona maruz kalan parçacıklar daha kaba kısmı oluştururlar ve kömürden kalan düzensiz morfolojiyi korurlar<sup>46</sup>. Kısmen/tamamen koklaşmış parçacıklar ise çeşitli organik bileşenlerin kısmen/tamamen erimesi ve (çoğunlukla küreler ve sferoidler şeklinde) yoğunlaşması ile oluşur.

### 1.3.3. Türkiye kömür yakıtlı termik santraller

Türkiye elektrik enerjisi üretimi 1970'de 8,6 TWh iken 2017'de 297 TWh'e çıkmıştır<sup>48</sup>. 1970-2016 yılları arasındaki 45 yılı aşkın süreçte kaynaklarına göre elektrik üretim miktarı ve dağılımı Şekil 1-14'te verilmiştir. Zaman içerisinde sıvı yakıtların tüketimi oldukça azalmıştır. 1980'lerin ortasından itibaren boru hatlarının açılması ile doğal gaz kullanımı hızla artmıştır. Kömürün elektrik enerjisi üretimindeki rolü ise her zaman önem arz etmiştir. 2017 yılındaki 297 TWh'lik elektrik üretiminde kömürün önemli bir payı (97,5 TWh - %32,8) bulunmaktadır. Bu üretimin 51,1 TWh'ı (%17,2) ithal kömür, 40,7 TWh'ı (%13,7) linyit, 5,6 TWh'i ise taşkömürü ve asfaltit (%1,9) ile karşılanmaktadır <sup>48</sup>.



(a)



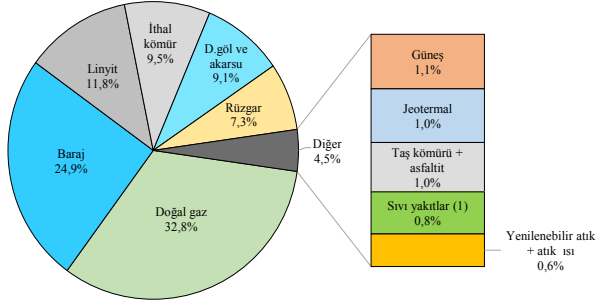
(b)

<sup>(1)</sup> Jeotermal, rüzgar, katı biyokütle, güneş, biogaz ve atık kaynaklarını içerir.

Şekil 1-14. Türkiye’de elektrik üretiminde kaynakların (a) üretim miktarı (TWh), (b) payı (%) <sup>48</sup>

Türkiye Elektrik İletim A. Ş. (TEİAŞ) verilerine göre Türkiye’nin 2016 yılı sonu itibarıyla kurulu gücü 78,5 GW mertebesinde (Şekil 1-15).

Kömüre dayalı santral gücü ise 17,5 GW’a ulaşmıştır. Bu değer, toplam kurulu gücün %22,3’üne karşılık gelir <sup>49</sup>. 10,0 GW’ı yerel (%12,9), 7,5 GW’ı ise ithal (%9,5) kömüre dayalıdır. Yerel kömüre dayalı kurulu gücün 9,3 GW’ı linyit (% 11,8) ve 755 MW’ı taşkömürü ve asfaltit (%1,0) kaynaklıdır.



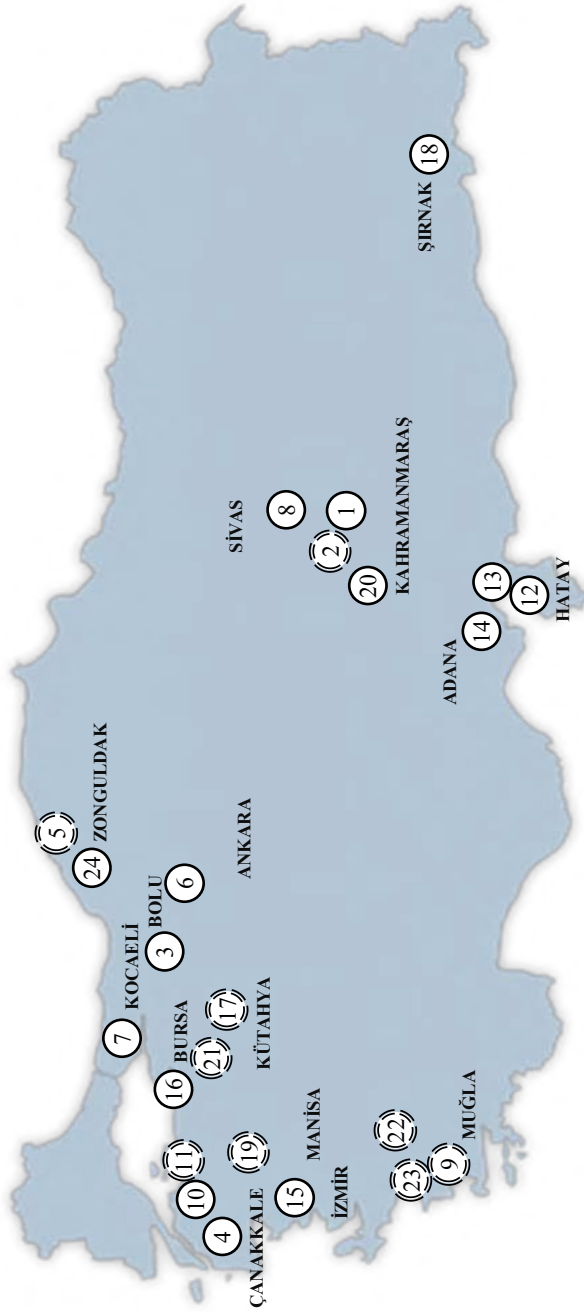
<sup>1)</sup> Sıvı yakıtlar fuel-oil, nafta ve motorini kapsamaktadır. Katı ve sıvı yakıtları kullanabilen çok yakıtlı tesisler bu kaleme dahil edilmiştir.

<sup>2)</sup> Çok yakıtlı santrallerin kurulu gücü ana yakıtlarına göre dağıtılmıştır.

Şekil 1-15. Türkiye’de kurulu güç içinde kaynakların payı, 2016 <sup>49</sup>

Türkiye’de son dönemde enerji üretiminde dışa bağımlılığın azaltılmasına yönelik adımlar atılmakta ve yerli kaynakların etkin kullanımı teşvik edilmektedir. Önümüzdeki dönemlerde yerli kaynaklar arasında ülkemizin hidrolik potansiyeli ve kömür rezervi ön plana çıkacaktır. Bu durum, ülkemizde alternatif kaynaklara kıyasla söz konusu bu kaynakların etkin kullanımında uzun yıllara dayanan bir araştırma ve uygulama tecrübesinin mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kömür diğer fosil yakıtlar ile karşılaştırıldığında sadece rezervinin büyüklüğü ile değil, ülkemiz coğrafyasına dağılmış olması, birim enerji üretim maliyetinin düşük olması, güvenli taşınabilmesi ve temin güvencesi gibi sebeplerle de daha avantajlı olmaktadır. 10. Kalkınma Planı’nda yer alan Yerli Kaynaklara Dayalı Enerji Üretim Programı Eylem Planı’nda (2014-2018) yerli kömüre dayalı elektrik üretiminin 2014’teki 43 TWh’den 2018’de 57 TWh’e çıkarılması hedeflenmiştir. Adılan adımlar sayesinde 2018 üretimi 97,5 TWh’a çıkmıştır. Bu yaklaşımın devam etmesi beklenmektedir. Bu sebeple, önümüzdeki dönemde ülkemizdeki - özellikle linyit yakımı sonucu açığa çıkan - uçucu kül üretiminde azalma beklenmemektedir.

Türkiye’nin hemen her bölgesinde kömür yakarak elektrik üreten termik santraller mevcuttur (Şekil 1-16). Bu santrallerde ithal kömürün dışında çoğunlukla yerel linyit, bazen de yerel taşkömürü yakılmaktadır (Tablo 1-6). Yeni kurulan termik santrallerde ithal kömür kullanımı ağırlıktadır; bu sebeple, çoğunlukla bir limanın yakınında konumlanmışlardır. Daha eski santrallerinin çoğu ise düşük kalorifik değerli, yerel linyite dayalı olduklarından kömür ocağının hemen yanında kurulmuşlardır<sup>34</sup>. Termik santrallerin büyük çoğunluğu pulverize kömür yakmakta, az bir kısmı ise akışkan yataklı yakma sistemi kullanmaktadır. Pulverize kömür yakan termik santrallerin birçoğunda BGD teknolojisi bulunmaktadır. Santrallerde, yakma sonucunda çok farklı oranlarda (kömür ağırlığının %17-46’sı aralığında) kül açığa çıkmaktadır.



Şekil 1-16. Türkiye’ de kurulu gücü 150 MW’ın üzerindeki kömür yakıtlı termik santrallerin konumu, 2018

(<sup>1)</sup> Kitap kapsamında uçucu kül numunesi temin edilen santraller çift çizgi ile gösterilmiştir.  
 (<sup>2)</sup> Rakamlara karşılık gelen termik santraller Tablo 1-6’da verilmiştir.

Tablo 1-6. Türkiye'de kurulu gücü 150 MW'ın üzerindeki kömür yakıtlı termik santrallere ilişkin ana bilgiler<sup>34</sup>

No	Termik santral	Şehir	Kurulum yılı <sup>(a)</sup>	Ana yakıt tipi <sup>(b)</sup>	Kurulu güç (MW)	Ünite sayısı	Ana teknoloji <sup>(c)</sup>	Üretim kapasitesi (MWh/yıl)	Kömür alt ısı değeri (kcal/kg) <sup>(d)</sup>	Kömür tüketimi (g/kWh) <sup>(e)</sup>	Yakıt kapasitesi (ton/yıl) <sup>(f)</sup>	Kömür kül -nem oranı (%)
1	Afşin-Elbistan A *	Kahramanmaraş	1984	L	1.355	4	PKY	8.800.000	1.050	2.500	10.970.167	18 - 50
2	Afşin - Elbistan B **	Kahramanmaraş	2006	L	1.440	4	PKY+BGD	9.360.000	950-1.500	2.250	-	15 - 48
3	Aksa Bolu Göynük	Bolu	2015	L	270	2	AYT+BGA	1.152.000	-	-	-	-
4	Çan (18 Mart) *	Çanakkale	2004	L	320	2	AYT	2.080.000	2.600	850	1.800.000	32 - 22
5	Çatalağzı (Çates) †	Zonguldak	1989 <sup>(g)</sup>	TK	300	2	PKY	1.950.000	3.300	827	1.658.630	47 - 15
6	Çayırhan	Ankara	1987	TK	620	4	PKY+BGD	3.640.000	-	-	3.696.266	-
7	Çolakoğlu	Kocaeli	-	İK	190	1	AYT	1.425.000	-	-	-	-
8	Kangal	Sivas	1987	L	457	3	PKY	2.970.500	1.300	2.190	5.194.456	25 - 40
9	Kemerköy †	Muğla	1993	L	630	3	PKY+BGD	4.095.000	1.750	1.462	4.563.781	33 - 30
10	İÇDAŞ Bekirli	Çanakkale	2011	İK	1.200	2	PKY+BGD	8.640.000	-	-	-	-
11	İÇDAŞ Biga †	Çanakkale	2005	İK	405	3	AYT	2.885.000	-	-	-	-
12	İskenderun Atlas	Hatay	2014	İK	1.200	2	PKY+BGD	8.500.000	-	-	-	-
13	İskenderun Demir Çelik	Hatay	2005	İK	220	-	-	772.000	-	-	-	-
14	İSKEN Sığirci	Adana	2003	İK	1.210	2	PKY+BGD	9.309.000	6.000	-	-	-
15	İzdemir Enerji Aliağa	İzmir	2014	İK	350	1	PKY+BGD	2.562.000	-	-	-	-
16	Orhaneli	Bursa	1992	L	210	1	PKY+BGD	1.365.000	1.780-2.560	996	1.413.436	31 - 26
17	Seyitömer †	Kütahya	1973	L	600	4	PKY	3.900.000	1.400-2.000	1.546	5.384.720	40 - 35
18	Silopi	Şırnak	2009	A	405	3	AYT	1.870.000	-	-	-	-
19	Soma B †	Manisa	1981	L	990	6	PKY	6.435.000	2.400 <sup>(h)</sup>	1.467	8.948.501 <sup>(i)</sup>	41 - 21
20	Tufanbeyli	Adana	2015	L	450	3	AYT	3.375.000	-	-	3.300.000	40 - 35
21	Tunçbilek †	Kütahya	1956	L	365	3	PKY	2.372.500	2.600-3.900	1.125	1.907.753	20 - 36
22	Yatağan †	Muğla	1982	L	630	3	PKY+BGD	4.095.000	2.100	1.099	5.538.297	31 - 33
23	Yeniköy †	Muğla	1986	L	420	2	PKY+BGD	2.730.000	1.750	1.352	3.412.505	-
24	Zonguldak Eren (ZETES)	Zonguldak	2009	İK	2.790	5	AYT + PKY	16.880.000	-	-	7.000.000	40 - 35

<sup>(a)</sup> Kurulum yılı - Termik santrallerin enerji üretimine başladığı yıl. <sup>(b)</sup> Kullanılan yakıtlar - L: Linyit; İK: İthal kömür; TK: Taşkömürü; A: Asfaltit kömür; yakama teknolojisi, AYT: Aksan yatacak teknolojisi, BGD: Baca gazı desulfürizasyonu, BGA: Baca gazı arıtma sistemi <sup>(c)</sup> Catabağzı Termik Santrali (A) ilk olarak 1948 yılında faaliyete geçmiştir 1991 yılında ise kapatılmıştır. Tabloda yer alan bilgiler şu an faaliyette olan B ünitesine aittir. <sup>(d)</sup> 1-4, ünite için 2.400 kcal/kg; 5. ve 6. ünite için 1.550 kcal/kg <sup>(e)</sup> Soma A (2x22 MW) ve Soma B (990 MW) ünilerinin toplam yakıt kapasitesi değeri. <sup>(f)</sup> 1-4, ünite için 2.400 kcal/kg; 5. ve 6. ünite için 1.550 kcal/kg <sup>(g)</sup> Soma A (2x22 MW) ve Soma B (990 MW) ünilerinin toplam yakıt kapasitesi değeri. <sup>(h)</sup> 1-4, ünite için 2.400 kcal/kg; 5. ve 6. ünite için 1.550 kcal/kg <sup>(i)</sup> Soma A (2x22 MW) ve Soma B (990 MW) ünilerinin toplam yakıt kapasitesi değeri. <sup>(j)</sup> Bu santraller halen Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) bünyesinde bulunan termik santrallerdir. Diğer santraller özelleştirilmiştir. <sup>(k)</sup> Kitap kapsamında teknik özellikleri incelenen uçucu küllerin tedanik edildiği termik santrallerdir.

Türkiye uçucu kül üretimine ve kullanımına ilişkin veriler oldukça sınırlıdır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından sağlanan veriler Tablo 1-7'de özetlenmiştir<sup>19,51-54</sup>. 2018 yılı verilere göre ülkemizdeki kömür, doğal gaz veya fuel oil yakan 55 termik santralden 14 bin tonu tehlikeli olmak üzere toplam 26,1 milyon ton atık oluşmuştur. Toplam atığın %89,2'sini (23,3 milyon ton) kül ve cüruf atıkları, %10,7'sini (2,8 milyon ton) ise metal, kağıt, plastik atıklar, atıksu arıtım çamurları ile evsel ve benzeri atıklar oluşturmaktadır. Verilerin yetersizliği sebebi ile uçucu kül miktarı ancak tahmin ile hesaplanabilir.

Doğalgaz ve fuel oil yakan santrallerin mineral atık oranı oldukça düşük olduğu gözönünde bulundurularak, mineral atığın çok büyük bir kısmının kömür santrallerden kaynaklandığı kabul edilebilir. Bu atığın yaklaşık %80'inin uçucu külden oluştuğu varsayılarak 2018 uçucu kül üretimi yaklaşık 18,6 milyon ton olarak tahmin edilmiştir. Kül üretiminde yıldan yıla oluşan farklılıklar doğalgaz kullanım oranına bağlıdır.

Tablo 1-7. Türkiye'de uçucu kül üretimi<sup>19,51-54</sup>

	2008	2010	2012	2014	2016	2018
Termik santral sayısı <sup>(1)</sup>	-	51	59	66	61	55
Üretilen mineral atık <sup>(2)</sup> (milyon ton)	25,6	18,5	19,0	23,8	17,1	23,3
Üretilen uçucu kül <sup>(3)</sup> (milyon ton)	20,5	14,8	15,2	19,1	13,7	18,6

<sup>(1)</sup> Kömür, doğal gaz veya fuel oil yakan, kurulu gücü 100 MW ve üzeri olan faal termik santralleri kapsar.

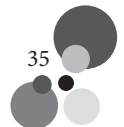
<sup>(2)</sup> Mineral atıklar kül, cüruf, uçucu kül ve alçıtaşı gibi atıkları kapsamaktadır.

<sup>(3)</sup> Uçucu kül miktarı mineral atığın %80'i olarak tahmin edilmiştir.

Türkiye'de uçucu kül kullanım oranı oldukça düşüktür. TÜİK 2018 yılı verilerine göre termik santrallerde üretilen toplam 26,1 milyon ton atığın %87,5'i (22,8 milyon ton) kül dağı, kül barajı veya düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilirken, sadece %12,4'ü (2,8 milyon ton) lisanslı atık işleme tesislerine gönderilmiş ve maden/taş ocaklarının geri doldurulmasında kullanılmıştır, %0,1'i ise diğer yöntemlerle bertaraf edilmiştir<sup>51</sup>.

## 1.4. AYIRMA İŞLEMLERİ

Uçucu kül içerisindeki inorganik (amorf/kristal) kısmı, organik kısmı, farklı mineral/fazları veya taneleri zenginleştirerek ayırmak için kullanılan en bilinen işlemler küllendirme işlemleri, fiziksel ayırma işlemleri, kimyasal özütleme ve ardışık fiziksel ve kimyasal ayırmadır (Tablo 1-8).





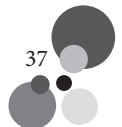
Uçucu küle kıyasla ayrılan ürünlerin tanımlaması ve karakterizasyonu çok daha eksiksiz ve güvenilir bir şekilde yapılabilir. Küllendirme ve ayırma işlemleri uçucu külü çoğu zaman geri dönüşü olmayacak bir şekilde değiştirir. Bu sebeple, ayrılan ürünler üzerinde yapılan analizleri kullanarak külün ham hali üzerine yorum yapılırken özen gösterilmelidir.

Ayırma işlemlerinin sanayi ölçeğinde uygulanması ile uçucu kül içerisinde mevcut senosferlerin, yanmamış karbon içeriğinin ve manyetik kısmın ayrılması ve geri kazanımı mümkündür. Uçucu külü temel bir fiziksel ayırma işlemi ile tane boyutuna göre sınıflandırmak bile külün kullanılabilirliğini son derece artırır. Ayrılmış ürünlerin farklı kullanım alanları Kısım 3'te detaylandırılmıştır.

Tablo 1-8. Uçucu kül üzerinde kullanılan ayırma işlemleri

Ayırma işlemi	Açıklama
<i>Küllendirme işlemleri</i>	
- Yüksek sıcaklıkta küllendirme	Uçucu külün yüksek sıcaklıkta küllendirilmesi, uçucu kül karakterizasyonu sırasında kullanılan, organik kısmın tamamen yakılması ve kül oranı, kızdırma kaybı ve organik kısmın tayini için 500-1000°C'de gerçekleştirilen bir işlemdir. Elde edilen inorganik kalıntı uçucu külün kimyasal analizleri için; bazen de bazı amorf, silikat, oksit ve sülfat fazların tanımlanmaları için kullanılır.
- Düşük sıcaklıkta küllendirme	Düşük sıcaklıkta kömürden organik kısmı uzaklaştırmak ve inorganik kısmı ve mineral fazları küle yoğunlaştırmak için kullanılan en yaygın işlem 150-200°C'de oksijen plazma küllendirmesidir. Bu işlemin uçucu kül karakterizasyonunda sınırlı bir uygulaması vardır <sup>55,56</sup> . Özel ekipman, numune hazırlama prosedürler ve deneysel şartlar gerektirir. Zaman alıcı bir süreçtir; birkaç güne kadar sürebilir. Az miktarda (~100 mg) kül üretilir. Bu yöntem sadece karakterizasyon için kullanılmaktadır.
<i>Fiziksel ayırma işlemleri</i>	
- Yoğunluk ayırımı	Uçucu kül ile kimyasal olarak reaksiyona girmeyen etil alkol, damutılmış ve/veya deiyonize su, parafin ve ağır sıvılardaki yoğunluk farklarından faydalanılarak (yüzdürme/çöktürme) uçucu kül bileşenlerinin ayırımı, zenginleştirilmesi, karakterizasyonu ve ticari bir ürün haline getirilmesi için çok önemli bir işlemdir <sup>46,57-66</sup> . Bu işlem, taneler arasındaki yüksek yoğunluk farklı nedeniyle uçucu kül için özellikle uygundur.

- Manyetik ayırma	<p>Hem kuru, hem de ıslak manyetik ayırma uçucu küldeki bazı <i>Fe</i>-, <i>Mg</i>-, <i>Mn</i>-, <i>Ti</i>- ve <i>Cr</i>-içeren mineral/fazların ayrılması için oldukça etkili işlemlerdir <sup>46,59-61,67-69</sup>. Ayrılacak fazlar uçucu kül içerisindeki ferromanyetik, ferrimanyetik veya paramanyetik demir bakımından zengin alüminosilikat cam, manyetit, maghemit, hematit, ferrosfenel, jakobsit, pirolösit, magnezyoferrit, ilmenit, hersinit, ulvöspinel, kromit, kromosfenel, pirotin ve olivindir <sup>46,68,69</sup>.</p> <p>Uçucu külden ayrılan manyetik kısmın miktarı çoğunlukla %0,5-5 aralığındadır. Nadiren %18'e kadar çıkabilir. Çok yüksek miktarda uçucu kül üretildiği düşünüldüğünde bu oranlar oldukça önemlidir. Manyetik kısım <i>Fe</i> (% 20-61) dışında <i>As</i>, <i>Au</i>, <i>Ba</i>, <i>Co</i>, <i>Cr</i>, <i>Cu</i>, <i>Ge</i>, <i>Mn</i>, <i>Mo</i>, <i>Ni</i>, <i>Sb</i>, <i>Sc</i>, <i>Ti</i>, <i>U</i>, <i>V</i>, <i>Zn</i> ve <i>Zr</i> gibi (özellikle kalkofil (<i>S</i>, <i>Se</i>, <i>Te</i>, <i>Sb</i> ve <i>As</i> ile bağ kuran) ve siderofil (<i>Au</i>, <i>Ir</i> gibi <i>Fe</i> ile metalik bağ kuran) çeşitli iz elementler ve bazı nadir toprak elementler açısından da zengindir <sup>58,59,69</sup>.</p>
- Tane boyu ayrımı	<p>Uçucu kül için tane boyu ayrımı (eleme, hava sınıflandırması), bu üründeki nispeten sabit boyutta bulunan bazı minerallerin, fazların ve tanelerin ayrılması ve zenginleştirilmesi için kullanılan bir işlemdir <sup>46,57-65,67-76</sup>. Uçucu külün uygun tane boyu dağılımına çekilmesi külün geri kazanım oranını son derece artırır. Ortalama bir uçucu külün ince kısmında &lt;63, &lt;20 ve &lt;5 µm boyut aralıkları ağırlıkça %97, %65 ve %40 kadardır <sup>77</sup>. Bununla birlikte, bazı küller çok ince (&lt;5 µm) taneler (≥%40-50 arası oranlarda dahi) içerebilir. İnce taneli kısım genellikle inorganik kısım, az bulunan mineraller, katı cam küreler, mullit, demir oksitler, anhidrit-jips, <i>Ca-Mg</i> silikatlar ve çoğu iz element açısından zengindir. Öte yandan külün daha iri kısmı (&gt;63-100 µm) kömür artığı, seramik senosferler/ plerosferler, cam aglomeratlar, kuvars, feldispatlar, rutil, zirkon, korundum ve kalsit gibi mineral ve fazlar ve açısından daha zengindir <sup>77</sup>. Bazı uçucu küllerin en iri kısmında (&gt;100 µm) <i>Ag</i>, <i>Cl</i>, <i>Cs</i>, <i>Cu</i>, <i>Mn</i>, <i>Mo</i>, <i>Rb</i>, <i>Sb</i>, <i>Sc</i>, <i>Se</i>, <i>Sr</i>, <i>Tb</i>, <i>U</i>, <i>V</i> ve <i>Zr</i> açısından zengin kömür artığı taneleri bulunur. Bu çok iri taneler kolayca ayrılabilirler <sup>58,69</sup> Bununla birlikte, uçucu küldeki başta az bulunanlar olmak üzere çoğu mineraller 0,01-10 µm aralığında yer alır <sup>59,70</sup>, ve tane boyuna göre ayrımları oldukça zordur.</p>
- Köpüklü yüzdürme	<p>Köpüklü yüzdürme, ya da diğer adıyla köpük flotasyonu, uçucu kül için tercih edilen ayırma yöntemlerinden biridir <sup>57,68,71,72,78-81</sup>. Uçucu kül içerisinde hidrofobik özellik gösteren kömür artığı ve mineraller (çoğunlukla metalik ve kovalent bağlar ile oluşmuş soy metaller, sülfidler gibi) ile hidrofilik özellik gösteren esasen iyonik ve iyonik-kovalent bağlı minerallerin ve fazların (kuvars, feldispat, diğer silikatlar, cam, sülfatlar, karbonatlar, fosfatlar gibi) ayrımında etkin bir şekilde kullanılabilir <sup>77</sup>. Çeşitli çalışmalarda köpük flotasyonu ile uçucu külden yüksek oranda kömür artığı içeren konsantreler elde edilmiştir <sup>68</sup>. Bu konsantreler çoğunlukla <i>Ag</i>, <i>Cs</i>, <i>Rb</i>, <i>Se</i>, <i>Sc</i>, <i>Tb</i> ve <i>Zr</i> açısından zengin anizotropik gözenekli, kaynaşmamış veya koklaşmış bileşenler içermektedir <sup>68</sup>. Yağ aglomerasyonu <sup>79</sup>, ultrasonik aglomerasyon <sup>72</sup> ve hava-püskürtmeli hidrosiklon <sup>71</sup> gibi diğer flotasyon varyasyonları denenmiştir.</p>



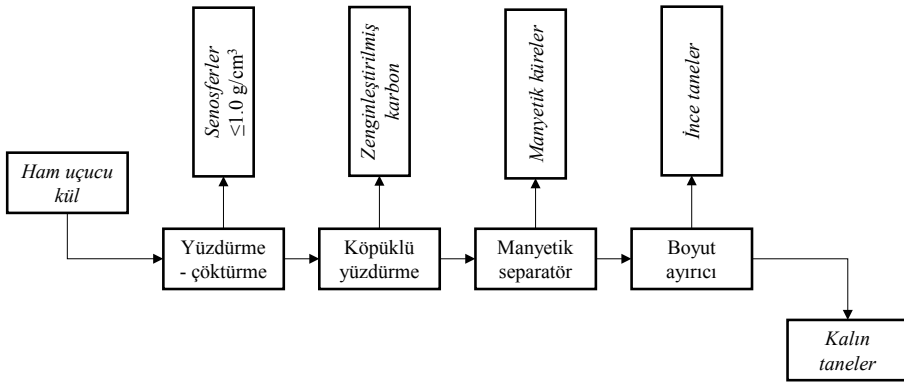
- Elektrostatik ayırma
- Bazı elektrostatik parçacık ayırma yöntemleri, kömür artığı ve inorganik kısmın uçucu külden ayrılması konusunda potansiyel göstermiştir<sup>72,74,78,82,83</sup>. Örneğin, kuru uçucu külün triboelektrostatik ayrımı sırasında karbon- zengin bileşenler negatif elektrot üzerine biriktirilirken, kül-zengin bileşenler pozitif elektrotta toplanır. Tamamen kuru olmayan veya neme maruz kalmış bazı uçucu küller zıt bir davranış sergileyebilir<sup>83</sup>. Bu yöntem, kömür artığının ayrılmasında köpüklü yüzdürme ve yağ aglomerasyonuna kıyasla daha düşük verim gösterir.

#### Kimyasal özütleme

- İnorganik maddenin çözünmesi
- Uçucu kül içerisindeki inorganik (amorf/kristal) kısmı, bazı mineralleri veya mineral gruplarını çözmek (veya aşındırmak için) için çeşitli (çoğunlukla asit ile) özütleme işlemleri kullanılabilir<sup>77</sup>. Uçucu kül ile yapılan asit demineralizasyonu, ağırlıklı olarak hidroklorik ve hidroflorik asitler ile yapılır. Daha az oranda Nitrik, sülfürik ve sitrik asitler, bazen de diğer çözücüler kullanılabilir.
- Organik maddenin çözünmesi
- Uçucu külün organik içeriğinin hidrojen peroksit<sup>68</sup>, mikrodalga koşullarında konsantre nitrik asit veya benzen ile çözdürülmesi için özütleme işlemleri denenmiştir. Fakat, bu kimyasal işlemler, uçucu kül içerisindeki sadece bazı organik maddeleri değil, inorganik maddeleri de bir arada çözebilirler.
- Sıralı özütleme
- Uçucu kül üzerinde açık veya kapalı sistem sıralı özütleme işlemleri de kullanılabilir.

#### Ardışık fiziksel ve kimyasal ayırmalar

Fiziksel ve kimyasal ayırma işlemlerinin ardışık uygulanması, nihai ürünün istenilen uygulama için en uygun şekilde getirilmesine olanak tanır.



Şekil 1-17. Ardışık uçucu kül ayırıştırma örneği<sup>57,58,68,70,84,85</sup>

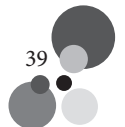
Şekil 1-17'de örnek olarak ardışık olarak uygulanabilecek bazı ayrıştırma teknikleri sunulmuştur. Boyut ayrıştırma dışında kalan çoğu yöntem henüz yüksek verimde çalışmamaktadır. Zaman içerisinde teknolojik gelişmelere paralel olarak bu yöntemlerin de verimleri artacaktır. Ayrıştırma süreçlerinden elde edilen ekonomik ve çevresel kazanımların iyileştirilmesi bu süreçlerin geliştirilmesindeki temel motivasyondur. Süreçlerin tam bir ekonomik ve çevresel analizini yapmak kolay değildir. Ayrıştırma sonucu elde edilen ürünlerin ve bu ürünlerin kısmen ikame ettiği malzemelerin ticari değeri oldukça değişkendir. Bu durum, yapılacak değerlendirmeleri zorlaştırır. Değerlendirmelerde ayrıştırma süreçleri sonucunda gereken kurutma işlemlerinin maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır.

## 1.5. BERTARAF SÜRECİ

Uçucu küller ıslak veya kuru olarak üretilebilir. Bazı uçucu küller kurutulurken, bazıları pompa ile nakliye için su ile karıştırılır. Kullanılmayan uçucu küller yaş halde ise saha-içi büyük yapay kül barajlarında, kuru halde ise saha-içi veya saha-dışı düzenli depolama alanlarında depolanır. Hatta, bir kısım kül, Türkiye'de de uygulandığı üzere, denize boşaltılabilir.

Uçucu küller civa, kadmiyum ve arsenik gibi kanser ve diğer ciddi sağlık sorunlarına yol açabilecek kirleticiler içerebilir. Uçucu küllerin iz element içeriği kısım 2.4'te detaylandırılmıştır. Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) potansiyel risk ve zarar durumları üzerine yaptığı değerlendirmeler, uygun önlemler alınmadığı takdirde, uçucu külün içerdiği kirleticilerin yeraltı sularına sızabileceğini ve potansiyel olarak içme suyu kaynaklarına karışıp önemli halk sağlığı sorunları yaratabileceğini ön görmektedir. Ayrıca, bu kirleticilerin toz olarak havaya karışması da olasıdır. TVA'nin Kingston-Tennessee'deki tesisinde olduğu gibi kül barajının tamamen çökmesi gibi felaketler de olasılık dışı değildir. Bu olası durumlar dört ana uygulamaya dikkat edilerek en aza indirgenebilir <sup>86</sup>: (i) uygun yer seçimi, (ii) toz yayılımının önlenmesi, (iii) sızıntı önleme ve (iv) akıntı önleme. Pratikte bu uygulamalar için aşağıdaki yöntemler önerilmektedir <sup>87</sup>:

- Kül barajlarının ve düzenli depolama alanlarının etrafındaki yeraltı sularının izlenmesi;
- Yeraltı sularını korumak için yeni yüzey barajları ve düzenli depolama alanları için kaplama uygulanması;
- Uçucu kül kaynaklı kirletici sorunu yaşanan yeraltı sularının temizlenmesi;
- Yeraltı sularını kirleten kaplamasız kül barajlarının kapatılması;
- Yapısal ve teknik standartları karşılamayan ya da içme suyu kaynağına çok yakın kül barajlarının kapatılması;
- Yeni kül barajlarının ve düzenli depolama alanlarının sulak alanlar ve deprem bölgeleri gibi hassas alanlarda inşa edilmemesi;
- Artık dolmuş kül barajlarının ve düzenli depolama alanlarının uygun şekilde kapatılması.



## 2. TEMEL ÖZELLİKLER

Uçucu küller çok bileşenli, heterojen ve değişken kompozisyona sahip, ince tane dağılımı gösteren, katı, sıvı ve gaz bileşenler içeren karmaşık inorganik-organik karışımlardır.

### 2.1. KİMYASAL KOMPOZİSYON

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu birçok çalışmaya konu olmuştur <sup>15,77,88,89</sup>. Bir uçucu külün kimyasal içeriği, yakılan kömürün özelliklerine ve tercih edilen kömür taşıma/depolama tekniklerine (kuru, işlenmiş veya ıslak) bağlı olarak değişir. Temel kimyasal bileşenler silika ( $SiO_2$ ), alümina ( $Al_2O_3$ ), demir oksit ( $Fe_2O_3$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ) ve yanmamış karbon içeriğinin göstergesi olan kızdırma kaybı olarak belirlenmiştir <sup>10</sup>.

Her kömür sınıfının kalorifik değeri, kimyasal bileşimi, kül içeriği ve jeolojik kökeni farklıdır. Ana kömür sınıflarından elde edilen uçucu küller için beklenen kimyasal kompozisyon aralıkları Tablo 2-1'de verilmiştir.

Tablo 2-1. Ana kömür sınıflarından elde edilen uçucu küller için beklenen kimyasal kompozisyon aralıkları <sup>10</sup>

Oksit (ağırlıkça%)	Bitümlü	Alt-bitümlü	Linyit
$SiO_2$	20–60	40–60	15–45
$Al_2O_3$	5–35	20–30	10–25
$Fe_2O_3$	10–40	4–10	4–15
$CaO$	1–12	5–30	15–40
$MgO$	0–5	1–6	3–10
$SO_3$	0–4	0–2	0–10
$Na_2O$	0–4	0–2	0–6
$K_2O$	0–3	0–4	0–4
KK <sup>(1)</sup>	0–15	0–3	0–5

<sup>(1)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı)

Bitümlü kömür uçucu külünün temel bileşenleri  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  ve kızdırma kaybıdır. Linyit ve alt-bitümlü kömür uçucu külleri, genellikle bitümlü kömür uçucu külüne kıyasla daha yüksek  $CaO$  ve  $MgO$  ile daha düşük  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  ve kızdırma kaybı içeriklerine sahiptir. Ayrıca, linyit uçucu külünün çoğunlukla  $SO_3$  içeriği alt-bitümlü ve bitümlü kömür uçucu küllerininkinden daha yüksektir. Termik santrallerde antrasit yakımı oldukça nadirdir; bu sebeple antrasit külüne tabloda yer verilmemiştir.

Uçucu külün kimyasal içeriği genellikle  $SiO_2 > Al_2O_3 > Fe_2O_3 > CaO > MgO > K_2O > Na_2O > TiO_2$  olarak sıralanır. Uçucu küllerin önemli bir miktarını oluşturan silikanın kaynağı kömür içerisinde bulunan kaolinit ve illit gibi kil mineralleri ve kuvarstır. Alümina içeriği de çoğunlukla kil minerallerinden kaynaklanır<sup>90</sup>. Demir oksit içeriği demir barındıran minerallerden; kalsiyum oksit içeriği  $CaCO_3$  ve  $CaSO_4$ 'ten; sülfat içeriği ise kömürde bulunan pirit ( $FeS_2$ ) ve alçıtaşından ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) kaynaklanır. Kömür içerisindeki dolomit ve ferromagnezyen mineraller  $MgO$  oluşumundan; sodyum ve potasyum içeren mineraller ise uçucu külün alkali içeriğinden sorumludur.

Kömürün tam olarak yanmaması ve toplama işlemi sırasında kullanılan organik katkılar uçucu külün yanmamış karbon içeriğini oluşturur. Farklı bölgelere ait uçucu küller için belirlenen kimyasal kompozisyon aralıkları Tablo 2-2'de verilmiştir. Tablodaki geniş kompozisyon aralıklarından da görüleceği üzere küllerin kimyasal kompozisyonu aynı bölge içerisinde bile belirgin farklılıklar gösterebilir.

Kömür yakımı esnasında kömür içerisinde bulunan  $Hg$  gibi çok uçucu elementler havaya salınır; bu salımları azaltmak için çeşitli teknolojiler mevcuttur. Çok uçucu elementler haricinde kalan  $As$ ,  $Cd$ ,  $Cr$ ,  $Mn$ ,  $Ni$ ,  $Pb$  ve  $Zn$  gibi birçok element ise uçucu külde zenginleşir<sup>2,91,92</sup>. Uçucu külün iz element içeriği Kısım 2.4'te detaylandırılmıştır.

Tablo 2-2. Bölgelere göre uçucu küllerin kimyasal kompozisyon aralıkları<sup>(\*)</sup>

Oksit (ağırlıkça%)	Avrupa <sup>(a)</sup>	ABD <sup>(b)</sup>	Çin <sup>(b)</sup>	Hindistan <sup>(b)</sup>	Avustralya <sup>(c)</sup>	Türkiye <sup>(d)</sup>
$SiO_2$	28,5 - 59,7	37,8 - 58,5	35,6 - 57,2	50,2 - 59,7	48,8 - 66,0	21,4 - 59,1
$Al_2O_3$	12,5 - 35,6	19,1 - 28,6	18,8 - 55,0	14,0 - 32,4	17,0 - 27,8	9,5 - 25,5
$Fe_2O_3$	2,6 - 21,2	6,8 - 25,5	2,3 - 19,3	2,7 - 14,4	1,1 - 13,9	4,0 - 14,0
$CaO$	0,5 - 28,9	1,4 - 22,4	1,1 - 7,0	0,6 - 2,6	2,9 - 5,3	1,2 - 46,5
$MgO$	0,6 - 3,8	0,7 - 4,8	0,7 - 4,8	0,1 - 2,1	0,3 - 2,0	1,4 - 5,9
$Na_2O$	0,1 - 1,9	0,3 - 1,8	0,6 - 1,3	0,5 - 1,2	0,2 - 1,3	0,02 - 1,0
$K_2O$	0,4 - 4,0	0,9 - 2,6	0,8 - 0,9	0,8 - 4,7	1,1 - 2,9	0,8 - 4,0
$P_2O_5$	0,1 - 1,7	0,1 - 0,3	1,1 - 1,5	0,1 - 0,6	0,2 - 3,9	0,1 - 0,4
$TiO_2$	0,5 - 2,6	1,1 - 1,6	0,2 - 0,7	1,0 - 2,7	1,3 - 3,7	0,4 - 1,1
$MnO$	0,03 - 0,2	(e)	(e)	0,5 - 1,4	(e)	0 - 0,2
$SO_3$	0,1 - 12,7	0,1 - 2,1	1,0 - 2,9	(e)	0,1 - 0,6	0,1 - 10,0
KK <sup>(h)</sup>	0,8 - 32,8	0,2 - 11,0	(e)	0,5 - 5,0	(e)	0,4 - 5,5

(\*) Aralıklar (a) 41 adet<sup>88,93</sup>, (b) 38 adet<sup>94-96</sup>, (c) 8 adet<sup>97,98</sup>, (d) 7 adet<sup>99,100</sup>, (e) 4 adet<sup>101</sup> uçucu kül verisi kullanılarak derlenmiştir. (f) Türkiye için bu çalışmada 17 adet uçucu kül için ölçülen değerler kullanılmıştır.

(g) Gözlenmemiştir.

(h) (KK= Kızdırma Kaybı)

## 2.2 MİNERALLER VE FAZLAR

Uçucu kül içerisindeki mineral ve fazlar kökenlerine göre birincil veya yeni oluşan (ikincil/üçüncül) olarak gruplanabilir (Tablo 2-3)<sup>88</sup>. Uçucu küllerdeki mineral ve fazlar, ağırlıklı olarak ikincil (çeşitli silikatlar, oksitler, sülfatlar, karbonatlar, kömür artıkları ve camlar), daha az miktarda birincil (bazı silikatlar, oksitler, sülfatlar, karbonatlar ve fosfatlar) ve nadiren de üçüncül (genelde sülfatlar, karbonatlar, klorürler ve bazı silikat kumları) kökenlidir<sup>57</sup>. Uçucu külün mineralojik karakterizasyonu oldukça karmaşıktır. Farklı uçucu kül örneklerinde yüzlerce farklı mineral ve mineral gurubu tanımlanmıştır.<sup>57,58,67-70,77,88,102</sup>

Tablo 2-3. Uçucu kül içerisindeki ana minerallerin ve fazların kökenleri (<sup>88,103</sup> den uyarlanmıştır.)

Köken	Oluşum süreci ( <sup>4</sup> )	Oluşum zamanı	Oluşum mekanizması
Birincil	Doğal	Kömür oluşum sürecinde	Yanma sırasında faz dönüşümü geçirmemiş, göreceli olarak yüksek ayrışma veya erime sıcaklıklarına sahip bazı kararlı silikatlar, oksitler, sülfatlar, fosfatlar ve karbonatlar gibi orijinal kömür mineral veya fazları
İkincil	Antropojenik	Yanma esnasında	Yanma esnasında mevcut veya yeni oluşan bileşikler arasındaki katı, sıvı ve gaz reaksiyonları (amorflaşma, karbonatlaşma, (de)karbonizasyon, birleşme, ayrışma, (yeniden) kristalleşme, (de)hidrasyon, (de)hidroksilasyon, (de)sülfürizasyon, indirgenme, katı-hal reaksiyonları, buharlaşma, erime, yumuşama, çekirdeklenme, oksidasyon, polimorfik dönüşüm, çözülme, çökme gibi) sonucunda yeni oluşan çeşitli silikatlar, oksitler, sülfatlar, karbonatlar, sülfidler, camlar ve charlar gibi mineral ve fazlar
Üçüncül	Doğal	Uçucu külün nakliyesi, depolanması ve bertarafı esnasında	Uçucu külün taşınması ve depolanması sırasındaki çeşitli reaksiyonlar (amorflaşma, (de)karbonizasyon, ayrışma, (yeniden) kristalleşme, (de)hidrasyon, (de)hidroksilasyon, (de)sülfürizasyon, katı-hal reaksiyonları, buharlaşma, polimorfik dönüşüm, çözülme, çökme gibi) sonucunda yeni oluşan portlandit, brusit, alçıtaşı, Fe-sülfat, kalsit, dolomit, Fe- ve Al-hidroksitler ve çeşitli camsı fazlar gibi mineral ve fazlar

<sup>(4)</sup> Uçucu kül bileşenleri doğal veya antropojenik süreçler sonrasında oluşabilir.

Tablo 2-4' te uçucu küldeki ekonomik veya çevresel önem arz eden belli başlı mineral ve fazlar listelenmiştir. Cam ve kömür artığı (char) fazları dışında listede altı ana grup göze çarpar: (i) silikatlar, (ii) karbonatlar, (iii) oksit-hidroksitler, (iv) sülfatlar, (v) fosfatlar ve (vi) diğer mineraller.

Tablo 2-4. Uçucu küller içerisindeki belli başlı mineraller ve fazlar <sup>57</sup>

Mineral / Faz	Kimyasal Formül	Bulunma oranı <sup>(4)</sup>	Köken <sup>(5)</sup>		
			1	2	3
<i>Silikatlar</i>					
Kuars	SiO <sub>2</sub>	Ma	•	o	
Kristobalit	SiO <sub>2</sub>	Mi		•	
Opal	SiO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	A			•
Kaolinit	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Mi-Ma	•	o	
Mullit	Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	Ma-E		•	
Plajjoklaz	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> -CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Mi	•	o	
K-feldispat	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Mi	•	o	
Selsiyan	BaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	A	•	o	
Volastonit	Ca <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	A-Mi		•	
Belite	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	A		•	
Melilit	Ca <sub>2</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> -CaAl(SiAl) <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	A-Mi		•	
Zirkon	ZrSiO <sub>4</sub>	A	•	o	
Zeolit	NaCaKH <sub>2</sub> O alüminosilikat	A			•
Ca-Fe silikat		A		•	
Ca-Fe alüminosilikat		A		•	
Fe-Mg alüminosilikat		A		•	
Ca-Fe-Mg alüminosilikat		A		•	
<i>Oksitler ve Hidroksitler</i>					
Manyetit	Fe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Mi		•	
Magemit	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A		•	
Hematit	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mi-Ma		•	
Ilmenit	FeTiO <sub>3</sub>	A		•	
Spinel	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Feryan spinel	Mg(AlFe) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Magnezyoferrit	MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Jakopsit	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Hersinit	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Ulvöspinel	TiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Kromit	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A	o	•	
Kromospinel	CrFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	A		•	
Kalsiyum Oksit	CaO	A		•	
Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>	A		o	•
Periklaz	MgO	A		•	
Korundum	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A-Mi	o	•	
Rutil	TiO <sub>2</sub>	A	o	•	
Tenorit - Kuprit	CuO - Cu <sub>2</sub> O	A		•	
Piroluzit	MnO <sub>2</sub>	A		•	
Badeleyit	ZrO <sub>2</sub>	A		•	
Ba oksit		A		•	
Ba-Ca oksit		A		•	
Ce-oksit		A		•	



Tablo 2-4. Uçucu külde bulunan belli başlı mineraller ve fazlar <sup>57</sup> (devamı)

Mineral / Faz	Kimyasal Formül	Bulunma oranı <sup>(*)</sup>	Köken <sup>(*)</sup>		
			1	2	3
<i>Karbonatlar</i>					
Kalsit	CaCO <sub>3</sub>	A	o	o	•
Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	A	o	o	•
Ankerit	Ca(Mg,Fe)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	A	o	o	•
<i>Sülfatlar</i>					
Alçıtaşı (Jips)	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	A		o	•
Basanit	CaSO <sub>4</sub> ·0.5H <sub>2</sub> O	A			•
Anhidrit	CaSO <sub>4</sub>	Mi		•	o
Jarosit	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	A	o	o	•
Alunit	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	A	o	o	•
Barit	BaSO <sub>4</sub>	A	o	•	
Anglezit	PbSO <sub>4</sub>	A		•	
Fe-sülfat		A	o	•	o
<i>Fosfatlar</i>					
Apatit	Ca(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (Cl,F,OH)	A	•	o	
Monazit	(Ce,La,Y,Th) (PO) <sub>4</sub>	A	•	o	
<i>Kloridler</i>					
Kaya tuzu	NaCl	A			•
<i>Diğer</i>					
Cam		E		•	
Char		Ma		•	

(\*) (Mineral/fazın uçucu küldde bulunma oranı: E – esas: >10%; Ma – major: > 1–10%; Mi – minor: 0.5–1%; A – az: <0.5%)

(\*) (Tablo 2-3'e göre uçucu küllemin kökenleri: 1 - birincil; 2 - ikincil; 3 – üçüncül; • = baskın; o = yanal)

Çok bileşenli uçucu küllemin geri kazanımında kül içerisindeki elementlerin, minerallerin ve fazların bulunma biçimleri ve oranları önemli rol oynar. Örneğin, kömürdeki kuvars, feldispat, zirkon, kromit, korundum, rutil, barit, apatit ve monazit gibi yüksek erime veya ayrışma sıcaklıklarına (>1100°C) sahip minerallerin bir kısmı uçucu küldde birincil kökenli mineraller olarak kalır. Bu mineraller çoğunlukla ayrı taneler, kristaller ve agregalar halinde bulunur; fiziksel yöntemlerle uçucu külden başarıyla ayrıştırılabilirler. Öte yandan, yeni oluşan ikincil mineral ve

fazlar ağırlıklı olarak cam ve kömür artığı matrisleri içerisinde/üzerinde kristalleşir veya kompleks parçacıklar olarak oluşur. Dolayısıyla, bu minerallerin matrislerden basit fiziksel yöntemler ile ayrıştırılması oldukça zor ve karmaşıktır. Ayrıştırma için bazı ek fiziksel ve kimyasal yöntemler gerekir. Üçüncül mineraller ise ağırlıklı olarak yüzeylerde zenginleşir, iri parçacıkların üzerinde kabuklaşma gösterir veya ayrı parçacıklar halinde oluşurlar. Fiziksel ve kimyasal ayrımları başarıyla uygulanabilir <sup>57</sup>.

Uçucu küllerin içeriği iki ana grupta toplanır. Bu iki ana grup Tablo 2-5'te özetlenmiştir <sup>88</sup>.

Tablo 2-5. Uçucu külün ana içerik grupları <sup>88,103</sup>

İçerik <sup>(*)</sup>	Açıklama
<i>İnorganik kısım</i> (hacimce %50-90)	
Amorf yoğun katı fazlar	Küresel ve sfeoid cam parçacıkları (masif, veziküler, senosferler, plerosferler, dermasferler ferrosferler, ferrisferler ve diğerleri)  Köşeli, düzensiz ve diğer asferik cam parçacıkları (masif, boşluklu, veziküler, lifsi, iğnemi, silindirik, plaka, süngerimsi, gözenekli, uzun taneli, yuvarlak, aglomera ve diğerleri)
Kristal veya yarı-kristal yoğun katı fazlar	Çeşitli minerallerin veya zayıf kristalize mineraloidlerin (silikatlar, oksitler ve hidroksitler, sülfatlar, sülfidler, sülfotuzlar, sülfürler, tiyosülfatlar, fosfatlar, karbonatlar, klorürler, kloritler, kloratlar, nitratlar, doğal elementler, saf metaller, metalik alaşımlar gibi) kristalleri, taneleri, agregaları, kümeleri, ferrosferleri, ferrisferleri, sferoidleri, aglomeraları ve diğerleri
<i>Organik kısım</i>	
Kristal katı fazlar	Organik minerallerin kristalleri, taneleri ve agregaları (vevelit-vedelit ve diğer gruplar)
Kristal olmayan veya yarı-kristal olan katı fazlar	Hafifçe değişmiş, yarı-koklaşmış, koklaşmış, kurum ve katran parçacıkları (köşeli, düzensiz, yuvarlak, masif, içi boş, veziküler, süngerimsi, gözenekli, iğnemi, kılı, lifsi, pulsu, plaka, silindirik, küresel, sferoid, kümeleşmiş ve aglomera dahil olmak üzere)

<sup>(\*)</sup> Organik ve inorganik içerik gruplarının yanı sıra uçucu kül içerisindeki sıvı ve gazlar da bir içerik grubunda toplanır. Bu akışkan kısım, kül içerisindeki inorganik veya organik kısımlar ile ilişkili sıvı (nem), gaz ve gaz-sıvı inklüzyonları kapsar.

## 2.2.1 İnorganik kısım

İnorganik kısım esas olarak alümina silikat bazlı camsı parçacıklar<sup>102,104,105</sup> ile hematit ( $Fe_2O_3$ )-manyetit ( $Fe_3O_4$ ) ve soğutma sırasında oluşan mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) ve kuvars ( $SiO_2$ ) gibi kristal fazlardan oluşur. Bunların yanında, uçucu küller çeşitli miktarlarda anhidrit ( $CaSO_4$ )-alçı, feldispatlar, kireç ( $CaO$ )-portlandit ( $CaOH_2$ ), kil ve mika mineralleri, kristobalit-tridimit, kalsit ( $CaCO_3$ )-ankerit, korundum, jarosit ve bazı *Ca* ve *Ca-Mg* silikatlar da içerebilir. Uçucu külden az miktarlarda da olsa *Ba*, *Ce*, *Cl*, *Cr*, *Cu*, *F*, *La*, *Mn*, *P*, *Nb*, *Pb*, *Sb*, *Sr*, *Th*, *Ti*, *U*, *Y*, *W*, *Zn* ve *Zr* içeren kayaç mineralleri görülebilir. Ayrıca, çeşitli fazlar *Ag*, *As*, *Ga*, *Ge*, *Hf*, *Mo*, *Sn* ve *V* da içerebilir.

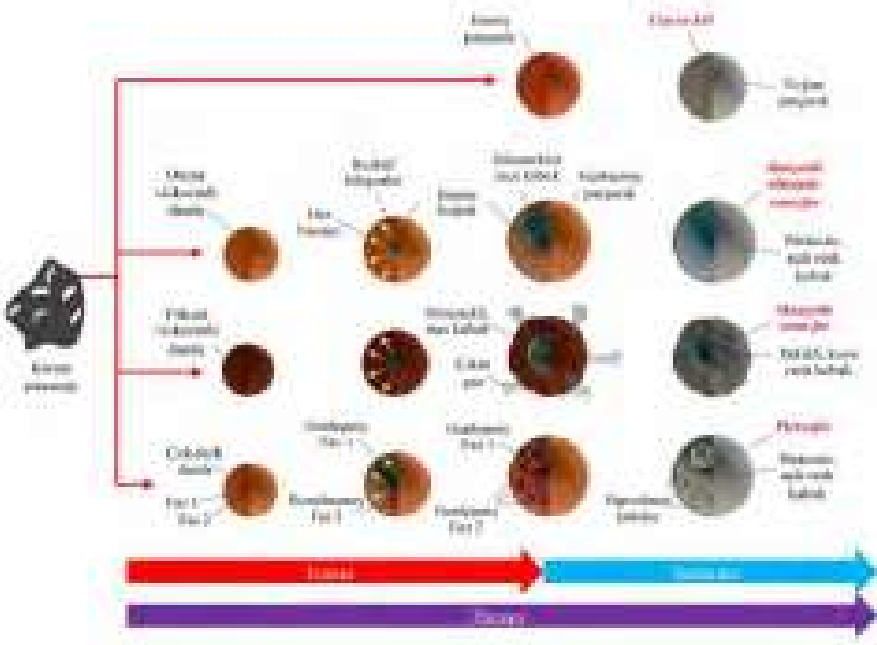
### 2.2.1.1. İnorganik, amorf yoğun kısım

Uçucu külün inorganik, amorf yoğun kısmında iki ana morfolojiye rastlanır<sup>46,106</sup>: (i) küresel ve sferoid parçacıklar; (ii) köşeli, düzensiz ve diğer asferik parçacıklar. Bu parçacıklar içerisinde camsı matris ile çeşitli kristaller iç içe geçmiş şekilde bulunur.

Küreler ve sferoidler kil mineralleri, klorit, mika, feldispat, kuvars gibi kömür minerallerinin ve daha düşük erime noktasına sahip mineral ve fazlarının yumuşaması, kısmen/tamamen erimesi ve vitrifikasyonu sonucu oluşurlar. Uçucu külün hacimce %10-80'ini oluştururlar. Miktarları daha ince granülometrik fraksiyonlarda (<63 µm) yoğunlaşır. Yoğun kürelere, vesiküler kürelere, senosferlere ve plerosferlere daha sık, dermasferlere ve ferrosferlere ise daha seyrek rastlanır.

Çeşitli minerallerin tamamen degazifike olmuş eriyiklerinden yoğun küreler, kısmen degazifike olmuş eriyiklerinden ise vesiküler küreler oluşur. Boyutları çoğunlukla 1-50 µm aralığındadır. Farklı renklerde olabilirler; ancak gri, beyaz, yeşil, siyah ve bunların karışımı en çok gözlenen renklerdir.

Senosferler ince duvarlı, içi boş kürelerdir. Hacimce uçucu külün %15-20'sini oluştururlar. Bazen bütün, bazen de kırık olarak uçucu kül içerisinde yer alırlar. Yoğun ve vesiküler kürelerden daha büyüktürler. Boyutları 10-250 µm aralığında değişir. Senosfer oluşumu eriyik maddenin göreceli olarak daha yüksek viskozitesinden dolayı gaz kabarcıklarının sertleşme sırasında daha uzun süre kararlı tutulması ile açıklanır. İç boşluk etrafındaki sıvı daha sonra bazen bütün bir film, bazen de gözenekli bir film halinde kristalleşir. Senosferlerin içi boş olduğu için uçucu külün hafif fraksiyonun büyük bir bölümünü oluştururlar. Plerosferler, daha küçük agrega, tane ve aglomeraları saran senosferlerdir. Gaz çıkışında kısmen düzensizlik olması nedeniyle oluşurlar. İçi boş küreler, ince dağılmış illit ve kuvars açısından zengin kömürün yakımı sonrasında daha sık gözlenir. Termik santrallerde uçucu kül içerisindeki kürelerin, senosferlerin ve plerosferlerin oluşum süreci Şekil 2-1'de özetlenmiştir.



Şekil 2-1. Termik santrallerde uçucu kül içerisindeki kürelerin, sensosferlerin ve plerosferlerin oluşum süreci (<sup>106'</sup>dan uyarlanmıştır)

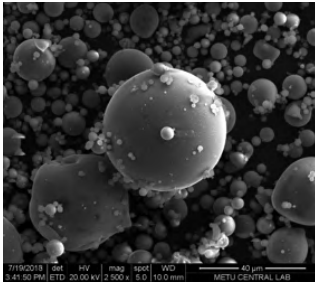
Dermasferler mullit, hematit ve diğer minerallerden oluşan kristal bir çekirdeğin alüminosilikat cam ile kaplanması sonucu oluşan plerosferlerdir. Yapılan kimyasal analizler dermasferlerin  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  ve  $SO_3$  içeriklerinin sensosfer-plerosferlere kıyasla daha düşük;  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve  $K_2O$  içeriklerinin ise daha yüksek olduğunu göstermiştir <sup>46</sup>.

Ferrosferler  $Fe$  açısından zengin küreler olup amorf veya kristal bileşenler ihtiva edebilirler. Amorf alümina ve silika üzerine yerleşmiş demir kristalleri olarak da tanımlanabilirler <sup>68</sup>. Çoğunlukla kırık halde gözlenirler. Yarı-küresel parçalarından anlaşıldığı kadarı ile bazılarının içi boştur; bazıları ise diğer küreleri ve parçacıkları kabuk gibi kaplar. Yüzeyleri sensosferlerin yüzeyinden daha pürüzlüdür. Demirin oksidasyon durumu, demir miktarı ve (taramalı elektron mikroskobu ile gözlenebilen) yüzey topoğrafyasına bağlı olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler <sup>107</sup>. Demir türüne ( $Fe^{2+}$  veya  $Fe^{3+}$ ) göre ikiye ayrılırlar: (i) esasen manyetitten oluşan ferrosferler; (ii) esasen hematit ve limonitten oluşan ferrisferler <sup>46</sup>.

Sferoidler kürelerden önemli ölçüde farklılık göstermezler. Daha gözenekli ve veziküler yapıdadırlar. Boyutları ağırlıklı olarak 10-80  $\mu m$  arasında değişir. Sferoidler iki, üç veya daha fazla kabarcıktan oluşabilir. En ince yoğun küreler ve sferoidlerden bazıları plastik halde iken patlayan ve parçalanmış sensosferlerin sonucunda oluşur. Oluşan damlalar sıklıkla soğumuş kaba taneli parçacıkların

yüzeylerine yapışır, bazen de hala sıvı veya plastik haldeki diğer parçacıklarla karışır. Uçucu kül içerisinde rastlanabilecek küre ve sferoid parçacık örnekleri Şekil 2-2'de sunulmuştur.

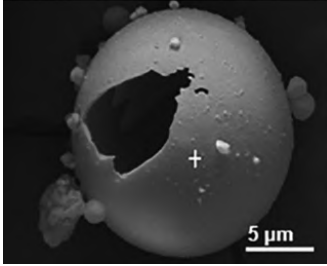
Kömür içerisindeki inorganik maddenin yumuşaması, erimesi veya vitrifikasyonunun sonucunda köşeli ve düzensiz alüminosilikat cam parçacıklar da oluşabilir. Bu parçacıklar yoğun ya da vesiküler olabilir. Yüzeyleri çoğunlukla sıvı ve plastik halde gruplaşan parçacıkların kümelenmesi ile, veya küreler, sferoidler, atıklar ve diğer parçacıkların bir arada büyümesi ile oluşur. Tane boyları genellikle 60-500  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Birkaç mikron çapında, uzunluğu 500  $\mu\text{m}$ 'ye varan camsı fiberlere de rastlanmıştır <sup>46</sup>.



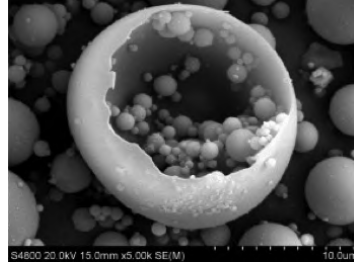
(a) Küreler ( $\times 2,5\text{K}$ , SEM)



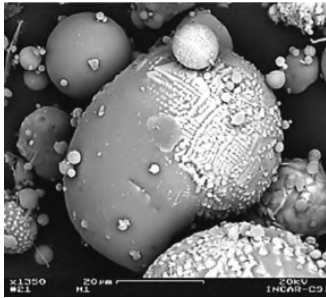
(b) Kırık senosfer ( $\times 992$ , SEM) <sup>108</sup>



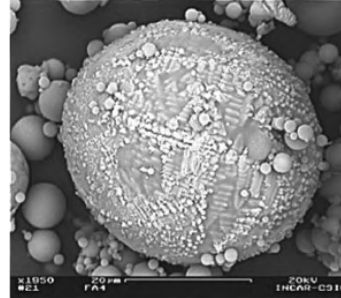
(c) Kırık senosfer (SEM) <sup>109</sup>



(d) Kırık plerosfer ( $\times 5000$ , SEM) <sup>110</sup>



(e) Alüminosilikat camın (sol) ve manyetit ferrosferin (sağ) plastik halde iken birleşmesi sonucunda oluşmuş bir sferoid ( $\times 1350$ , BSE) <sup>57</sup>

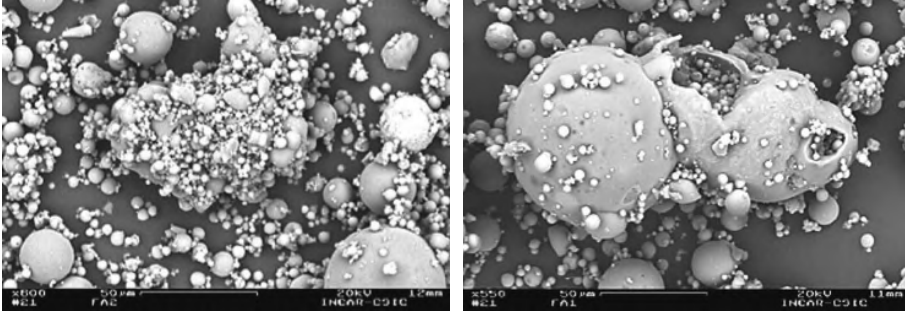


(f) Alüminosilikat camda dendritik manyetit kristalleşmesi olan bir ferrosfer ( $\times 1950$ , BSE) <sup>57</sup>

Şekil 2-2. Uçucu kül içerisindeki küre ve sferoid örnekleri (SEM: Taramalı elektron mikroskobu; BSE: Geri saçılmış elektron)

Küllerde kalsiyum oranı yükseldikçe küresel taneciklerin yerine köşeli ve düzensiz taneciklerin görülme oranı artar; ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de düşük kalsiyumlu küllere kıyasla daha pürüzlü hale gelir.

Bu parçacıkların kimyasal kompozisyonu kömürdeki kil minerallerine, çözülmüş eritken minerallerden bazılarına ve eriyik içerisine emilmiş uçucu elementlere bağlıdır. Uçucu kül içerisine kömürden bozulmadan geçen birincil kökenli alüminosilikat cam parçacıklarına da rastlanabilir. Şekil 2-3'te uçucu kül içerisindeki açılı, düzensiz ve asferik cam parçacıklara örnekler verilmiştir.



(a) Cam aglomeratı ( $\times 600$ , BSE)<sup>57</sup>

(b) Plastik halde iken birleşmiş alüminosilikat cam bir küre (sol) ile gözenekli, alüminosilikat cam bir sferoid (sağ) ( $\times 550$ , BSE)<sup>54</sup>

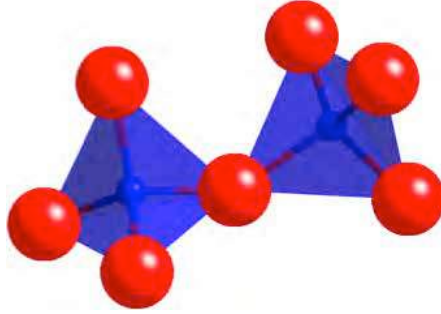
Şekil 2-3. Uçucu kül içerisindeki açılı, düzensiz ve diğer asferik cam parçacık örnekleri (BSE: Geri saçılmış elektron)

### 2.2.1.2. İnorganik, kristal yoğun kısım

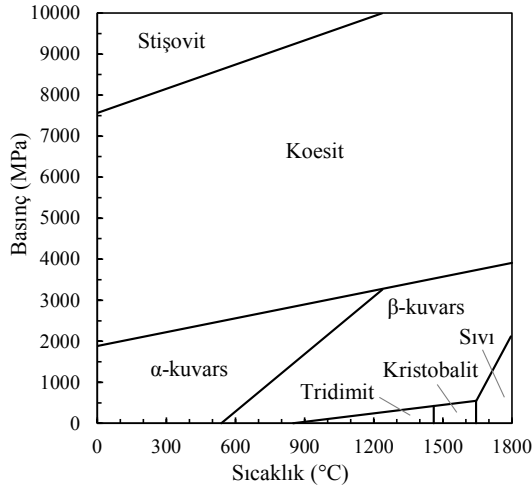
Uçucu külün inorganik, kristal kısmı bazen amorf matris ile içiçe, bazen de ayrı taneler halinde gözlenir. Kristal kısımda yer alan mineraller altı ana grupta toplanmıştır Tablo 2-4: (i) silikatlar, (ii) karbonatlar, (iii) oksit-hidroksitler, (iv) sülfatlar, (v) fosfatlar ve (vi) diğer mineraller.

#### 2.2.1.2.1. Silikatlar

Uçucu kül içerisindeki silikat fazlar birincil, ikincil ve nadiren de üçüncül kökenli olabilir. Kuvars, triadmit ve kristobalit dahil olmak üzere bilinen 35 taneden fazla iyi bilinen kristal silika fazı vardır. Düşük basınçta tüm silikatların yapıtaşı, merkezde bir silisyum, köşelerde dört oksijen atomundan oluşan  $SiO_4$  tetrahedronudur (Şekil 2-4).  $SiO_2$  polimorfların kararlılık alanlarını gösteren basınç-sıcaklık faz diyagramı Şekil 2-5'te verilmiştir.



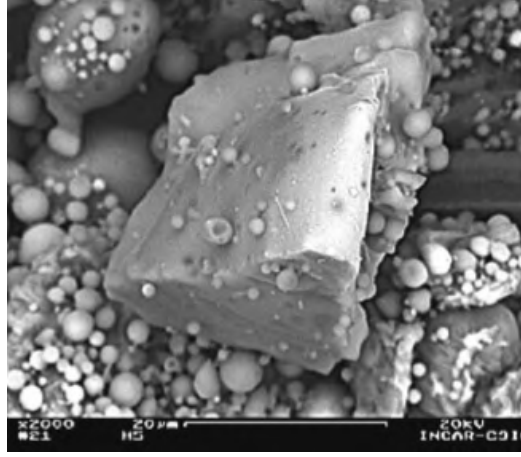
Şekil 2-4.  $\text{SiO}_4$  tetrehadron: oksijen (kırmızı), silisyum (mavi)



Şekil 2-5.  $\text{SiO}_2$  polimorfların kararlılık alanlarını gösteren basınç-sıcaklık faz diyagramı <sup>111</sup>

Kuvars, kül içerisindeki en yaygın silikat mineralidir<sup>46</sup>. Köşeli, yuvarlaklaşmış veya parçalanmış taneler halinde bulunabilir. Genellikle parçacık boyu 5-70  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Kuvarın erime sıcaklığı oldukça yüksektir. Bu sebeple, kül içerisindeki kuvarın bir bölümü birincil kökenli olabilir. İkincil kuvars ise 900°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalan kil mineralleri, mika ve feldispatların faz geçişleri esnasında serbest kalan silika ile oluşabilir. Bazı kuvarlar (esas olarak iskelet tipi) eriyiklerin kristalleşmesi ile oluşabilir. Kül içerisindeki kuvarın büyük bir bölümü eriyikler ile kaynaşık, yarı-kaynaşık (Şekil 2-6) ya da eriyikler içinde çözünmüş halde bulunur.





Şekil 2-6. Yarı kaynaşık bir kuvars tanesi ( $\times 7k$ , BSE) <sup>57</sup>

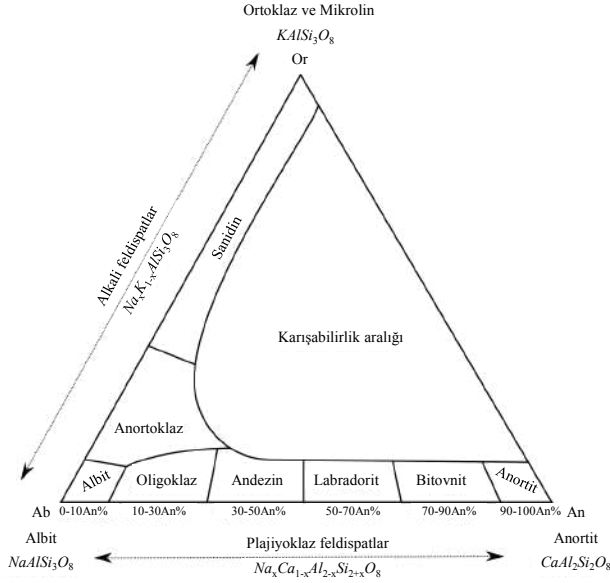
Uçucu kül içerisinde silikanın en yüksek sıcaklık polimorfu olan kristobalite de rastlanır. Kristobalit, teorik olarak  $1470^{\circ}\text{C}$ 'den sonra kararlıdır. Fakat, kuvarsa ya da tridimite dönüşümü yeniden yapılanma gerektirdiği için termodinamik kararlılık aralığının dışında da kristobalite rastlanır. Uçucu kül içerisindeki kristobalit, birincil veya ikincil kökenlidir. İkincil kristobalit organik bağlı veya amorf silikanın kristalleşmesinin; ya da kömür içerisindeki opal, kalsedon, kil ve diğer silikat minerallerinin tekrar kristalleştirilmesinin bir sonucudur. Kristobalit, bazen eriyiklerin kristalleşmesinden de oluşabilir <sup>46</sup>.

Uçucu küllerin çoğunda bulunan tipik bir mineral olan mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  veya  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) ikincil kökenlidir.  $1000^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ağırlıklı olarak kaolinit gibi kil minerallerinin, daha az oranda mika, feldispat ve diğer alüminosilikatların ayrışması/dönüşümü ve eriyiklerin kristalleşmesi ile oluşur <sup>112,113</sup>. Mullitin erime sıcaklığı  $1810^{\circ}\text{C}$ 'dir. Doğada oldukça az bulunur. Nadir de olsa volkanik kayalarla ilişkili kömürlerden elde edilen küllerdeki bazı küçük mullit kristalleri birincil kökenli olabilir. Mullitin iki yaygın morfolojisi vardır: biri düşük en-boy oranına sahip plakalar, diğeri de yüksek en-boy oranına sahip iğnemi kristaller. Uçucu kül içerisinde bu iki morfoloji çeşitli boylardaki plakalar,  $0,2-15 \mu\text{m}$  uzunluğundaki iğnemi kristaller ve cam ile dolmuş sferoid iskeletler halinde gözlemlenir <sup>46</sup>. Camsı kül tanelerinin ve senosferlerin yüzeyinde de sıklıkla ince mullit ya da kuvars bir kabuk görülebilir <sup>114</sup>. Mullit kristalleri, bazen de dermasferlerin çekirdeğini oluşturur. Yüksek kaolinit konsantrasyonlarına sahip kömürlerin külleri mullit bakımından daha zengindir.

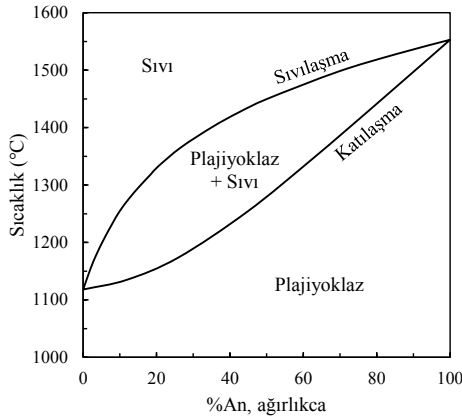
Feldispatlar ( $X\text{Al}(\text{Si},\text{Al})\text{Si}_2\text{O}_8$ :  $X=\text{K},\text{Na},\text{Ca},\text{Ba},\text{Sr}$ ) sodyum, potasyum, kalsiyum, ve kimi zaman baryum ve stronsiyum içeren bir alümina silikat grubudur (Şekil 2-7). Feldispatların katı bir erime noktası yoktur. Plajiyoklazlar için erime eğrisi Şekil 2-8'de verilmiştir; ve kompozisyona göre erime sıcaklıkları  $1118-1553^{\circ}\text{C}$  arasında değişir. Uçucu küldeki feldispatlar birincil veya ikincil kökenli olabilir. İkincil feldispatlar çoğunlukla silikat bir eriyikten kristalleşir. Bazı feldispatlar,



özellikle temel plajiyoklazlar, yanma esnasında açığa çıkan  $Ca$ ,  $K$  ve  $Na$  oksitler ile alüminosilikatlar arasındaki katı faz reaksiyonlarından da oluşabilir. Ayrıca,  $K$ -feldispat  $900^{\circ}C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda polimorf dönüşüm geçirerek sanidin oluşturabilir <sup>46</sup>. Kül içerisindeki feldispatlar,  $20-30 \mu m$  boyutlarında, köşeli ya da yuvarlaklaşmış, yarı-kaynaşık, yüzeyi gözenekli tanecikler halindedir.

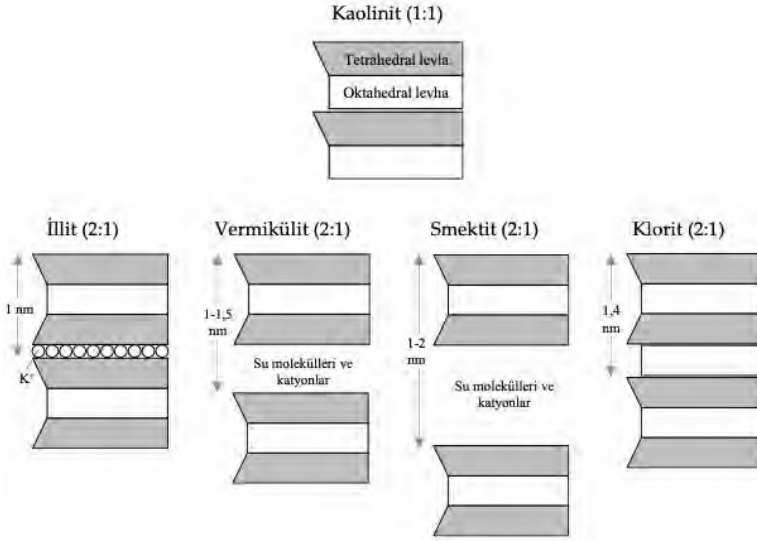


Şekil 2-7. Feldispatlar



Şekil 2-8. Plajiyoklazlar için sadeleştirilmiş kompozisyon (% Anortit)-sıcaklık faz diyagramı

Kil mineralleri, esas itibariyle değişken kompozisyon ve su içeriğine sahip alüminyum içeren hidrate levha silikatlardır (fillosilikat). Kil mineralleri 1:1 (kaolinit gibi) veya 2:1 (montmorillonit, illit, talk, ve vermikülit gibi) olarak sınıflandırılırlar. Rakamlar tetrahedral silikat levhaların oktahedral hidroksit levhalarına oranını anlatır. Killer, mineralojik özelliklerine göre ise kaolinit, illit, smektit (montmorillonit), klorit ve diğer gruplar olmak üzere beşe ayrılır. Farklı kil yapıları Şekil 2-9'da gösterilmiştir.

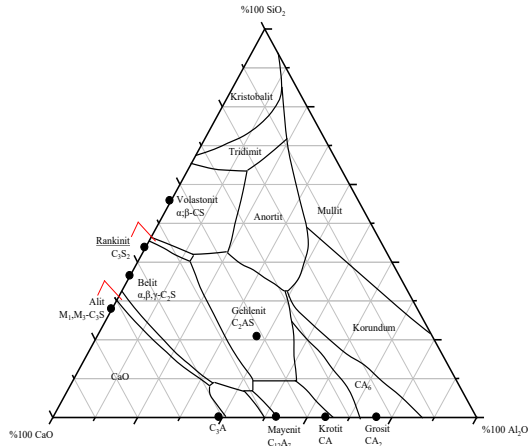


Şekil 2-9. Tetrahedral Si ve oktahedral Al levhalarından oluşan farklı kil yapıları

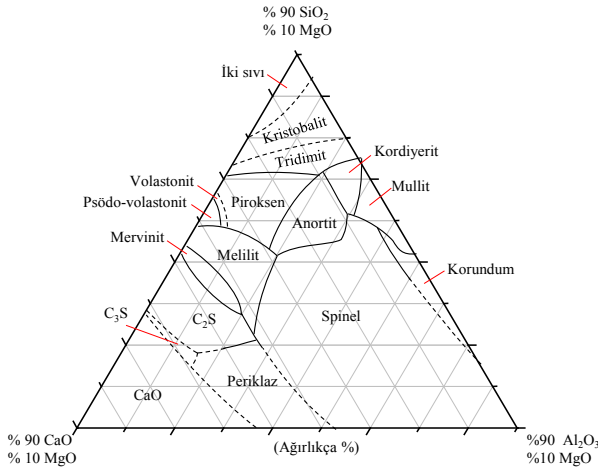
1650-1810°C aralığında eriyen kaolinit, kül içerisinde yarı-bozulmuş, amorflaşmış, metakaolinite yaklaşmış ikincil oluşumlar olarak kalabilir. Bu amorflaşmış parçacıklar çok farklı morfolojiler gösterebilir. Bu sebeple, morfolojik özellikleri incelenerek değil, XRD analizi yapılarak ayırt edilir <sup>111</sup>. Yüksek konsantrasyonda kaba taneli kaolinit içeren kömürlerin yakımı sonucunda oluşan uçucu küller, kaolinit-metakaolinit agregatları bakımından daha zengindir. Kömür içerisindeki illit ve montmorillonit 1000-1300°C arasında erir, kaolinite kıyasla daha yüksek oranda camsı fazlara geçerler. 1200°C civarında eriyen klorit grubu mineralleri de  $(Mg, Fe, Li)_6AlSi_3O_{10}(OH)_8$  muhtemelen birincil kökenlidir. Vermikülit muhtemelen biyotit değişiminden kaynaklanırken; talk  $(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2)$  dolomit ile kuvars arasındaki reaksiyonun bir sonucu oluşabilir.

Başta muskovit olmak üzere çeşitli mika grubun minerallerine de uçucu külden rastlanır. Erime sıcaklığı 1000-1300°C aralığında değişen bu mineraller kül içerisinde çoğunlukla birincil kökenlidirler. Forsterit  $(Mg_2SiO_4)$  ile fayalit  $(Fe_2SiO_4)$  arasında bir katı çözelti oluşturan olivinler, uçucu kül içerisindeki cam matriste kılı ve iğnemsı kristaller olarak görülürler. Kül içerisinde diyopsit gibi piroksenlere de rastlanabilir. Olivinler 1205-1890°C, piroksenler ise 1392- 1557°C aralığında erirler. Olivinlerin ve piroksenlerin bir kısmı birincil kökenli olsa da çoğunluğu ikincil kökenlidirler. Kül içindeki Fe ve Mg zengini silikat eriyiklerden kristalleşirler.

Ca ve Mg silikatlar (rankinit ( $Ca_3Si_3O_7$ ), volastonit ( $CaSiO_3$ ), belite ( $Ca_2SiO_4$ ), melilit, mervinit ( $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ ), montiselit ( $CaMgSiO_4$ ) ve Ca-Mn silikatlar ikincil fazlardır. Serbestleşen toprak-alkali oksitler ile silikat/alüminosilikatlar arasındaki katı faz reaksiyonları esnasında oluşurlar; ya da silikat eriyiklerden kristalleşirler<sup>46</sup>. Melilit grubu gehlenit ( $Ca_2Al_2SiO_7$ ), akermanit ( $Ca_2MgSi_2O_7$ ) ve Na-meliliti ( $NaCaAlSi_2O_7$ ) içerir. Bu grupta Al ve Mg-Fe ile yer değiştirebilir<sup>90</sup>. Saf ve ağırlıkça %10 MgO içeren CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sistemleri için faz diagramları Şekil 2-10'da verilmiştir. CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> sistemi için verilen faz diyagramları, belirli bir oksit bileşeninin ilgili eriyikten kristalleştiği farklı bölgeleri gösterir. Şekilde bulunabilecek fazlar ve polimorfları için Tablo 2-6'da verilen çimento kimyası gösterimi kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2-10. (a) CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<sup>115</sup>den uyarlanmıştır.) ve (b) ağırlıkça %10 MgO içeren CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<sup>116,117</sup>den uyarlanmıştır.) sistemleri için faz diagramları

Tablo 2-6. Portland çimentosu klinkerinde de bulunabilecek bazı fazlar ve polimorfları için çimento kimyası gösterimi

Mineral	Polimorf	Formül	ÇKG (*)
Alit	M <sub>3</sub>	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	C <sub>3</sub> S
Belit	α, β, γ	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> S
Rankinit	-	Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
Volastonit	α, β	CaSiO <sub>3</sub>	CS
-	-	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> A
Krotit	-	Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub>	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>
Grosit	-	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	CA
Mayenit	-	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	CA <sub>2</sub>
Gehlenit	-	Ca <sub>2</sub> A <sub>12</sub> SiO <sub>7</sub>	C <sub>2</sub> AS

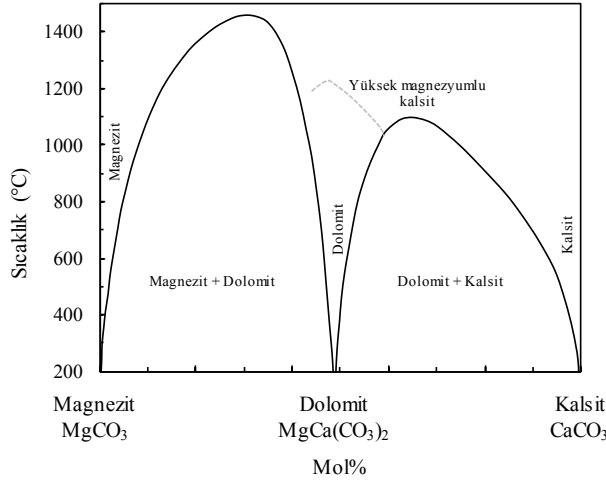
(\*) Çimento kimyası gösterimi

2552°C'de eriyen zirkon ( $ZrSiO_4$ ) refrakter bir mineraldir; ve büyük oranda birincil kökenlidir. 1030-1140°C aralığında eriyen amfibol süpergrubu ve kloritoid grubu ( $Fe, Mg, Mn$ )<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>4</sub> mineralleri de birincil kökenli olabilir.

#### 2.2.1.2.2. Karbonatlar

Karbonat fazları çoğunlukla birincil veya üçüncül kökenli, nadiren de kömürdeki organik madde ile ilişkili olarak ikincil kökenlidir. Birincil kalsit ve dolomitin kökeni, düşük sıcaklıklarda ( $\leq 700-950^\circ C$ ) kaba taneli parçacıkların ayrışmasıdır (Şekil 2-11).

Kalan kalsit ve dolomitin bir kısmı ikincil, büyük bir çoğunluğu ise Ca ve Mg oksihidroksitlerin termik santral baca gazları ile veya depolama alanlarındaki hava ve su ile karbonatlaşması sonucu üçüncül kökenlidir <sup>46</sup>. Manganokalsit ((Ca, Mn)CO<sub>3</sub>), viterit (BaCO<sub>3</sub>) ve serüzit (PbCO<sub>3</sub>) oluşumu da muhtemelen kalsit ve dolomit ile benzerdir <sup>46</sup>.



Şekil 2-11. CaCO<sub>3</sub>-MgCO<sub>3</sub> sistemi için sıcaklık-kompozisyon faz diyagramı<sup>111</sup>

### 2.2.1.2.3. Oksitler-hidroksitler

SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> de dahil olmak üzere tüm mineral türlerinin yaklaşık %10'u oksit ve hidroksit gruplarında toplanır. Gruplarının her biri yaklaşık 200 mineral içerir. Doğada 40'tan fazla element oksit biçiminde bulunur. Esas olarak bunlar metaller ve geçiş elementleridir, ancak Si, As ve Sb gibi bazı metalik olmayan elementler de oksitler oluşturabilir. Hidroksitlerin kimyasal bileşimi daha az çeşitlidir. Doğada Al, Mn ve U dahil olmak üzere yaklaşık 25 element hidroksit olarak bulunur. Hem oksitler, hem de hidroksitler iki tipe ayrılabilir: basit ve karmaşık. Birinci grup periklaz (MgO) ve korundum (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gibi katyon olarak tek bir element içeren bir minerallerdir. Kompleks oksitler ve hidroksitler ise spinel grubu (AE<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: spinel serisi E = Al, manyetit serisi E = Fe ve kromit serisi E = Cr) gibi iki veya daha fazla ana element içerir <sup>111</sup>.

Uçucu kül içerisindeki oksit-hidroksit fazları ağırlıklı olarak ikincil ürünler, bazen birincil mineraller ve nadiren de kömür içerisindeki tortu minerallerinin, otijenik minerallerin veya organik maddenin üçüncül ürünleri olarak bulunur. Erime aralıkları 1567-1592°C arasında değişen manyetit (Fe<sup>2+</sup>Fe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>), hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magemit (Fe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>3</sub>), limonit (FeO(OH)·nH<sub>2</sub>O) ve magnezyoferrit (MgFe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>) birincil ya da ikincil kökenlidir. Bu mineraller, ikincil olarak dört farklı şekilde oluşabilir <sup>46</sup>: (i) pirit, markasit, siderit, ankerit, jarosit ve manyetit oksidasyonu ile; (ii) Fe-oksitin karbon ve hidrojen ile indirgenmesi ile; (iii) Fe-hidroksitlerin dehidroksilasyonu sonucunda; ve (iv) kömürdeki Fe içeren mineralleri kapsayan eriyiklerden kristal büyümesi ile. Bazı morfolojilerin yanında kalkofilik (oksijen harici kalkojen elementler ile bağ kuran Ag, As, Cd, Pb, S, Se, Te, Sb ve Zn gibi elementler) ve siderofil (Fe ile metalik bağ kuran Au, Ir, Ni gibi elementler) iz elementlerin zenginleşmesi Fe-oksit-hidroksitlerin göstergesidir.

Manyetit *Ti*, *Al*, *Mg*, *Cr*, *V*, *Mn* ve *Si* ile izomorf yer değiştirmelerden ötürü kompleks bir fazdır; ve demir içeriği önemli ölçüde değişebilir. Bu kompleksite ve çeşitli kanyonların yapısal olarak eş değer olmayan konumlar arasındaki dağılımı düşük sıcaklıkta faz dönüşümlerine sebep olabilir. Yüksek sıcaklıklarda homojen bir faz olarak kristalize olan manyetit, daha düşük sıcaklıklarda kimyasal açıdan daha saf bir manyetit ile ilmenit, spinel, ulvöspinel gibi mineral fazların bir karışımına dönüşebilir. Uçucu külden manyetit, 1-10 µm boyutlarında köşeliden yuvarlatılmış çok farklı şekillerde parçacıklar halinde bulunabilir. Ayrıca, cam matris içerisinde dendritler ve oktahedral kristaller halinde de gözlenebilir. *Ti* ve *Cr* bakımından zengin yuvarlak oktahedral kristallere de rastlanabilir.

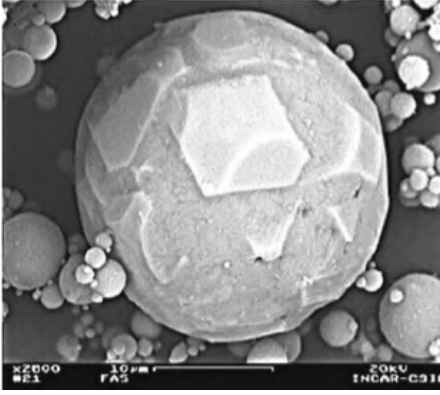
Hematit pul pul, altıgen plakalar halinde veya daha kompleks yassı formlarda görülebilir. Nadiren de olsa birincil pirit kristal formunu koruyarak kübik ve kübik-oktahedral kalıntı kristaller olarak da gözlenebilir. Hematit tanelerinden bazıları muskovitleşme izlerine sahiptir.

Genellikle, iri taneli uçucu küller manyetit, ince taneli küller ise hematit bakımından daha zengindir. Bunun sebebi, ince küllerin oluşum sırasında nispeten daha yüksek oksitlenme sergilemesidir.

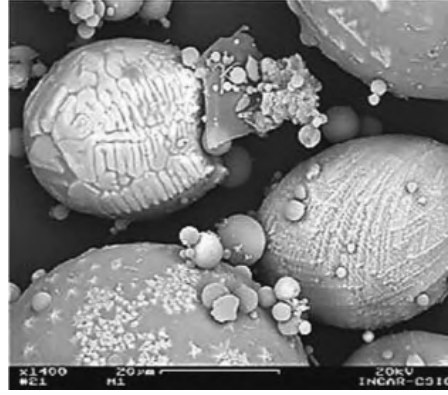
Kristal ferrosferler ağırlıklı olarak 10-40 µm boyutundadır; içleri boş veya dolu olabilir. Ferrosferler semir türüne göre ( $Fe^{2+}$  veya  $Fe^{3+}$ ) ikiye ayrılır. İlk grup dendritik, tabakalı ve iskelet manyetit kristalleri ve daha az oranda hematit ve magnezyoferrit kristalleri içeren camsı alüminosilikat bir matristen oluşur. İkinci grup ise ferrisfer olarak tabir edilen hematit ve limonit bakımından daha zengin ferrosferlerden oluşur. Dermasferlere özgü camsı alüminosilikat zarf bazı ferrisferlerde de gözlenir. Şekil 2-12'de uçucu kül içerisinde rastlanabilecek ferrosfer ve ferrisfer örnekleri verilmiştir.

*Ca* ve *Mg* oksihidroksit mineralleri ikincil ve üçüncül ürünlerdir. Karbonatların bozulmasından ya da organikler veya sülfatlar ile birleşmiş *Ca* ve *Mg*'lerden kaynaklanırlar. Erime noktaları 2572°C ve 2800°C olan kireç (*CaO*) ve periklaz (*MgO*) genellikle kaba portlandit ( $Ca(OH)_2$ ) ve brusit ( $Mg(OH)_2$ ) tanelerinin içerisinde bozulmamış çekirdekler şeklinde bulunur. Kireç aynı zamanda kısa prizmatik kristaller ya da pul pul agregaler halinde, çoğunlukla erimemiş kümeler olarak cam matrisin üzerinde veya içinde görülür. *Ca* ve *Mg* hidroksitler ağırlıklı olarak külün depolanması sırasında kireç ve periklaz hidrasyonu ile daha kararlı portlandit ve brusitin oluşumu ile açığa çıkar; sonrasında karbonatlaşabilirler. Kireç hidrasyonu ve daha sonra karbonatlaşması sonucunda üçüncül kalsit senosferleri gözlenmiştir. *Ca* ve *Mg* oksihidroksitler daha çok düşük sülfürlü ve düşük silisli kömürlerden üretilen küllerde görülür. Yüksek sülfürlü kömürlerde daha çok sülfat bileşenleri, yüksek silisli kömürlerde ise *Ca-Mg* silikatlar oluşur.

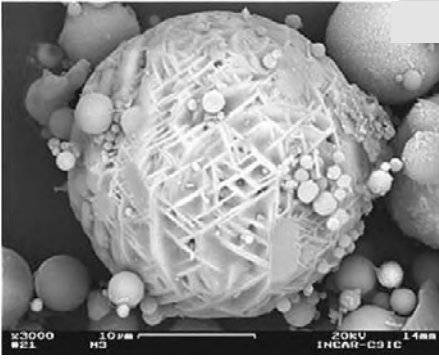




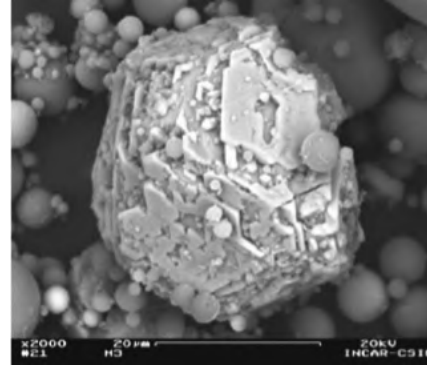
(a) Alüminosilikat camda oktahedral manyetit kristalleri olan bir ferrosfer ( $\times 2k$ , BSE) <sup>57</sup>



(b) Dendritik (sağ), iskelet (sol) ve oktahedral (aşağı) manyetit kristalleşmelerinin içeren ferrosferleri ( $\times 1,4k$ , BSE) <sup>68</sup>



(c) Anortit arasında manyetit ve jakopsit kristalleşmeleri içeren bir ferrosfer ( $\times 3k$ , BSE) <sup>68</sup>



(d) Prizmatik hematit kristalleşmesi (muhtemelen kömürdeki bir fromboidal pirit-markazit kaynaklı) içeren bir ferrisfer ( $\times 2k$ , BSE) <sup>57</sup>

Şekil 2-12. Uçucu kül içerisindeki kristal ferrosfer ve ferrisfer örnekleri  
(BSE: Geri saçılmış elektron)

Erime noktası  $2135^{\circ}\text{C}$  olan spinel birincil kökenli olabilir. İkincil olarak  $\text{Mg}$ -,  $\text{Al}$ - ve  $\text{Fe}$ -oksitler arasındaki muhtemel katı-faz reaksiyonu veya kil ve mika minerallerinin yeniden kristalleşmesi ile de oluşabilir. Erime noktası  $2050^{\circ}\text{C}$  olan korundum birincil kökenli olabilir; ancak, çoğunlukla kil minerallerinin yeniden kristalleşmesi ile, bazen de organik olarak bağlı alüminanın kristalleşmesi ve  $\text{Al}$ -hidroksitlerin dehidroksilasyonu sonucunda oluşur.  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ise muhtemelen mika ve kil minerallerinin yeniden kristalleşmesinden oluşur.

Erime noktaları  $1827^{\circ}\text{C}$  ve  $1592^{\circ}\text{C}$  olan rutil ( $\text{TiO}_2$ ) ve ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) ile erime aralığı  $1450\text{-}2180^{\circ}\text{C}$  arasındaki kromit ( $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$ ) ısıya dayanıklı minerallerdir. Kül içerisinde çoğunlukla birincil kökenlidirler. Organik bağlı  $\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}$  ve  $\text{Cr}$ 'un

oksidasyonu sonucunda ikincil kökenli de olabilirler. İkincil rutil, eriyik içinde kristalleşerek ya da  $TiO_2$ 'nin diğer kristal formları olan anataz ve brukitin polimorf dönüşümü sonucunda da oluşabilir.

Uçucu kül içerisindeki çinkotaşı ( $ZnO$ ), pirolösit ( $MnO_2$ ), kuprit ( $Cu_2O$ ) ve tenorit ( $CuO$ ) muhtemelen ikincil ürünlerdir. Kökenleri sfalerit ( $(Zn, Fe)S$ ) ile  $Mn$ - ve  $Cu$ -sülfidlerin oksidasyonu veya organik bağlı  $Zn$ ,  $Mn$  ve  $Cu$ 'nun kristalleşmesi ile bağlantılıdır. Kalkofanit ( $(Zn, Fe, Mn)Mn_3O_7 \cdot 3H_2O$ ) ve  $W-Nb-Pb$  oksitleri de muhtemelen organik maddelere bağlı  $Zn$ ,  $Mn$ ,  $W$ ,  $Nb$  ve  $Pb$ 'nin oksidasyonundan kaynaklanır <sup>46</sup>.

#### 2.2.1.2.4. Sülfatlar

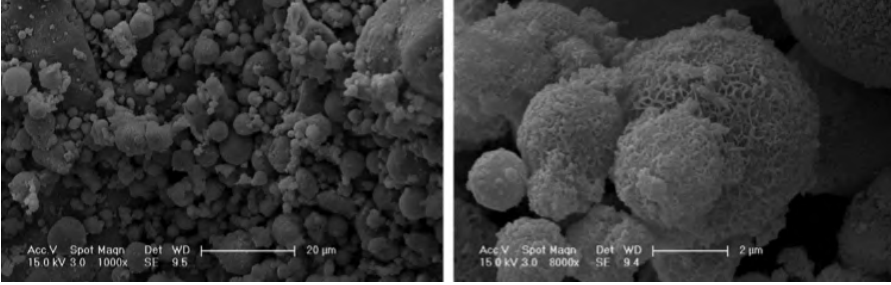
Sülfat mineralleri, sülfirik asidin ( $H_2SO_4$ ) doğal tuzlarıdır. Bunlara asidik, alkali ve ara tuzlar ve kristalhidratlar dahildir. Sülfatlar doğada yaygın değildir; en yaygın bulunan mineraller alçıtaşı ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ) ve barit ( $BaSO_4$ ) 'dir. Bütün bu minerallerin, yapılarında tetrahedron biçiminde kompleks anyon grupları yer alır. Alçıtaşında üst üste sıralanmış  $SO_4^{2-}$  tetrahedronlardan oluşan iki kolon,  $Ca^{2+}$  ve su molekülleri kolonlarına bağlanır <sup>111</sup>.

Sülfat fazları nadiren birincil, çoğunlukla ise kömür içerisindeki otijenik (yerinde oluşan) minerallerin ve organik maddenin dönüşümü ile ikincil ve üçüncül olarak oluşurlar. Alçıtaşı ve anhidrit plaka veya iğne biçiminde bulunurlar. Radyal anhidrit agregaları da gözlenmektedir. Ağırıklı olarak cam küreler ve sferoitler üzerinde kristalleşirler. Alçıtaşının oluşumu ikincil ve üçüncül kökenlidir. Anhidrit, tamamlanmamış ayrışma ( $\leq 900-1220^\circ C$ ) sebebi ile birincil kökenli olabilir. Fakat çoğunlukla ikincil kökenlidir; ve üç şekilde oluşabilir: (i) alçıtaşının dehidrasyonu, (ii) gözenek suyunun kristalleşmesi ve (iii) karbonatların, anhidritin ve organik maddenin ayrışması sonucu açığa çıkan kalsiyum oksit ile organik maddenin veya sülfür içeren minerallerin yakımı sırasında açığa çıkan sülfür oksit ve sülfirik asit ile reaksiyona girmesi sonucunda <sup>46</sup>.

Şekil 2-13'te ıslak depolama alanlarından temin edilen düşük kalsiyumlu bir uçucu kül örneği görülmektedir. Kül yüzeyi depolama sırasında oluşan basanit ( $CaSO_4 \cdot 0,5(H_2O)$ ) kristalleri ile kaplanmış ve pürüzlü bir görünüm kazanmıştır <sup>80</sup>.







a) Alçıtaşı oluşumu (×1k, SEM)

(b) Basanit oluşumu (×8k, SEM)

Şekil 2-13. Depolama alanından temin edilen uçucu kül örneği üzerindeki alçıtaşı ve basanit oluşumları<sup>80</sup>

Ayrıştırma sıcaklığı 480-810°C arasında değişen *Fe*-sülfatlar birincil veya ikincil kökenli olabilir. Tamamlanmamış *Fe*-sülfid oksidasyonundan ( $\leq 400-700^\circ\text{C}$ ) veya organik madde içerisindeki demir ile sülfürün birleşmesinden oluşabilir. Ayrıştırma sıcaklığı 1582°C olan baritin, ayrıştırma sıcaklığı 1122-1112°C aralığında değişen *Mg*-sülfatların ve 884-1069°C aralığında eriyen alkali-sülfatların kökenleri de anhidritinki ile benzerdir. Birincil kökenli olabilirler; veya kömür ve baca gazı içerisindeki organik bağlı *Ba*, *S*, alkali ve toprak-alkali elementlerin ve bunları içeren minerallerinin dönüşümleri ve reaksiyonları ile ikincil olarak oluşabilirler. Alkali- ve *Ca*-sülfatlar uçucu külün ince kısmında (<20 µm) zenginleşirler ve kül parçacıklarının yüzeyinde daha sık rastlanırlar<sup>46</sup>. Ferrosferler ve ferrisferler üzerinde görülen kompleks *Fe*-, alkali- ve toprak-alkali-sülfatlar görülebilir.

### 2.2.1.2.5. Fosfatlar

Fosfat fazları birincil veya ikincil kökenli olabilir. Erime sıcaklığı 1270-1660°C aralığında olan apatit ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ ) birincil kökenli refrakter bir mineraldir. Svanbergit ( $\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ), vivianit ( $\text{Fe}^{2+}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ ), goyazit ( $\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot (\text{H}_2\text{O})$ ) ve ningyoit ( $(\text{U}, \text{Ca}, \text{Ce})_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 1-2(\text{H}_2\text{O})$ ) gibi mineraller birincil olabilir; ancak, cam küreler yüzeyine yapışmış bazı fosfat fazları muhtemelen ikincil kökenli de olabilir.

### 2.2.1.2.6. Diğer

Sülfid ve sülfosalt mineralleri, kömürde otijenik minerallerin birincil ve ikincil ürünleridir. Erime sıcaklığı 1027-1175°C aralığında olan pirotin ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ,  $x=0-0,2$ ) tamamlanmamış pirit oksidasyonu, kalkopiritin ( $\text{CuFeS}_2$ ) katı-faz dönüşümleri veya

hematitin muskovite dönüşmesi süreçlerinin ürünü olarak oluşur. *Pb-Sb* sülfosalt mineralleri ise birincil kökenlidir. Erime sıcaklığı 1130°C olan kalkosit ( $Cu_2S$ ) hem kömürden gelebilir, hem de kalkopiritin yanma esnasındaki katı-faz dönüşümleri sonucunda oluşabilir. Erime noktası 1580°C olan şelit ( $CaWO_4$ ) ısıya dayanıklı bir mineraldir ve kökeni baskın şekilde birincildir. Sementit olarak da bilinen demir karbür ( $Fe_3C$ ) muhtemelen yanma işlemi sırasında karbonla demirin indirgenmesi ile oluşan ikincil bir üründür. Aynı zamanda termik santrallerdeki metal yüzeylerinin aşınmasının sonucunda da oluşabilir. Erime noktası 3527°C olan grafit birincil veya ikincil kökenli olabilir.

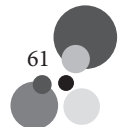
Uçucu küldeki iz elementler sadece cam, kristal ve organik fazlarda safsızlık olarak bulunmaz. İz elementlere ilişkin mineral ve fazlar mineralojik olarak yüksek çeşitlilik gösterir. Bu mineral ve fazlar külün çok ince kısmında (0,1-1µm) yoğunlaşırlar. Bazen iri parçacıkların yüzeylerinde veya matrisler içersindeki inklüzyonlarda görülürler. Bazen ayrı taneler olarak da bulunabilirler. Çoğunun son derece ince tane boyutlarına sahip olması ve çok düşük miktarlarda bulunması bu mineral ve fazların güvenilir bir şekilde tanımlanmasını zorlaştırır. Uçucu kül içerisindeki iz elementlere ilişkin ilgili bilgiler Kısım 2.4'te özetlenmiştir.

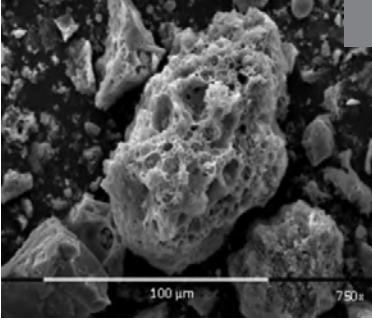
### 2.2.2. Organik kısım

Uçucu külün organik kısmı ağırlıkça %0,1-25,0 aralığındadır. Organik içerik veya yanmamış kömür (char) bileşenleri hafifçe değişmiş, kısmen koklaşmış veya tamamen koklaşmış parçacıklardan oluşur. Kısmen/tamamen koklaşmış parçacıklar ise çeşitli organik bileşenlerin kısmen/tamamen erimesi ile oluşur. Hafifçe değişenler 550°C'den yüksek olmayan sıcaklıklara maruz kalan parçacıklardır. Bu parçacıklara külün 100 µm'nin üzerindeki iri kısmında daha sık rastlanır.

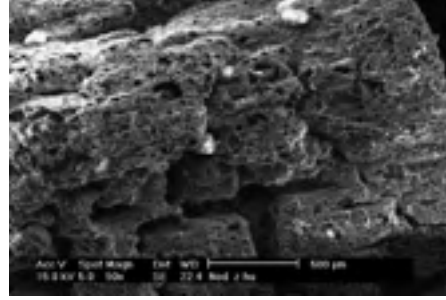
Gözenekliliğin artması karbon açısından zengin parçacıkların yüzey alanının (45-400 m<sup>2</sup>/g), uçucu küldede bulunan inorganik kısma (0,7-0,8 m<sup>2</sup>/g) kıyasla çok daha yüksek olmasına sebep olur<sup>19</sup>. Yüksek yüzey alanı yanmamış karbonun yüksek adsorpsiyon kapasitesini de açıklar.

Senosferler, karbon içeriği ve manyetik kısımlar ayrıştırıldıktan sonra hidrosiklon kullanılarak ince ve iri olmak üzere ikiye ayrılan bir uçucu külün SEM görüntüleri Şekil 2-15'te verilmiştir. En temel fark ince kısmın çoğunlukla kürelerden, iri kısmın ise daha düzensiz parçacıklardan oluşmasıdır<sup>85</sup>.

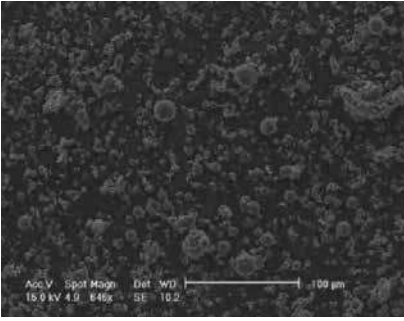




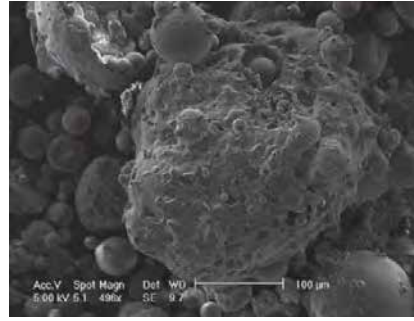
(a) PKY linyit uçucu külü  
( $\times 750$ , SEM) <sup>81</sup>



(b) AKY linyit uçucu kül  
( $\times 50$ , SEM) <sup>118</sup>

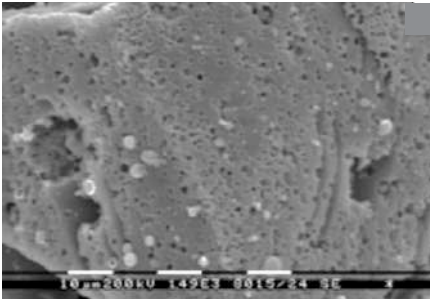


(c) PKY bitümlü kömür  
uçucu külü ( $\times 1490$ , SEM) <sup>81</sup>

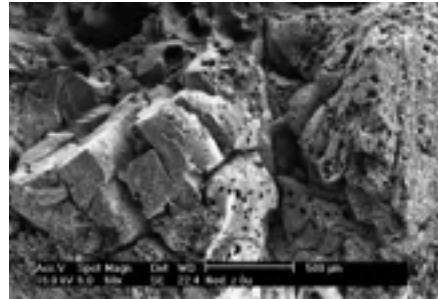


(d) AKY bitümlü kömür  
uçucu külü ( $\times 50$ , SEM) <sup>118</sup>

Şekil 2-14. Uçucu küldeki yanmamış karbon içeriğinin gözenekli yapısı



(a) İnce taneler ( $\times 646$ , SEM) <sup>85,108</sup>



(b) Kaba taneler ( $\times 496$ , SEM) <sup>85,108</sup>

Şekil 2-15. Senosferler, karbon içeriği ve manyetik kısımlar ayrıştırıldıktan sonra hidrosiklon kullanılarak ince ve kaba olmak üzere ikiye ayrılan bir uçucu kül <sup>85</sup>

## 2.3. FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Uçucu külün kullanımında rol oynayan en önemli parametrelerin başında fiziksel özellikler gelir. Uçucu kül içerisindeki farklı tane çeşitleri Kısım 2.2'de anlatılmıştır. Bu tanelerden oluşan uçucu küllerin yoğunluğu  $1.900-2.800 \text{ kg/m}^3$  aralığında değişir<sup>120</sup>. Gevşek birim hacim ağırlıkları ise  $800-1.100 \text{ kg/m}^3$  aralığındadır<sup>121</sup>. İri tanelerin gözenekli yapısı, iri küllerin yoğunluğunun ince küllere kıyasla daha düşük olmasına sebep olur. Ayrıca, yüksek oranda demir içeren uçucu küller, yüksek alümina, silika ve karbon içeren küllere göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler<sup>122</sup>.

Tablo 2-7. Uçucu küllerin temel fiziksel özellikleri

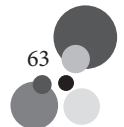
Fiziksel özellik	Birim	Aralık	Kaynak
Yoğunluk	$\text{kg/m}^3$	1.900-2.800	<sup>120</sup>
Gevşek yoğunluk	$\text{kg/m}^3$	800-1.100	<sup>121</sup>
Ortalama tane boyutu, $D_{50}$	$\mu\text{m}$	10-30	<sup>121</sup>
BET yüzey alanı	$\text{cm}^2/\text{g}$	10.000-50.000	<sup>121</sup>
Blaine yüzey alanı	$\text{cm}^2/\text{g}$	2.500-5.500	<sup>123</sup>

Uçucu küllerin inceliği kömürün pulverize olma derecesine, termik santral içerisindeki yakma işlemine, sonrasındaki soğutma hızına ve elektrofiltrelerin özelliklerine bağlıdır. Uçucu kül tane boyutları genellikle  $0,1-200 \mu\text{m}$  aralığındadır. Daha iri tanelere de - özellikle kızdırma kaybı yüksek küllerde ve linyit küllerinde - sıklıkla rastlanır. Uçucu külün tane boyu analizi, sadece yanma verimi tahmini için değil, aynı zamanda üretilen külün kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi için de önemlidir<sup>45,124</sup>. Uçucu külün inceliğinin belirlenmesinde iki yaklaşım kullanılır: (i)  $45 \mu\text{m}$ 'den daha küçük boyutlu parçacıkların miktarı ve (ii) özgül yüzey alanının belirlenmesi. Fiziksel özellikler arasından tane boyu dağılımı, uçucu küllerin reaktivitesini en çok etkileyen özelliktir. Uçucu külün tane boyu dağılımı elek ile eleme veya lazer kırınımı (LK) yöntemleri ile belirlenir. İki yöntem de ıslak veya kuru olarak uygulanabilir.

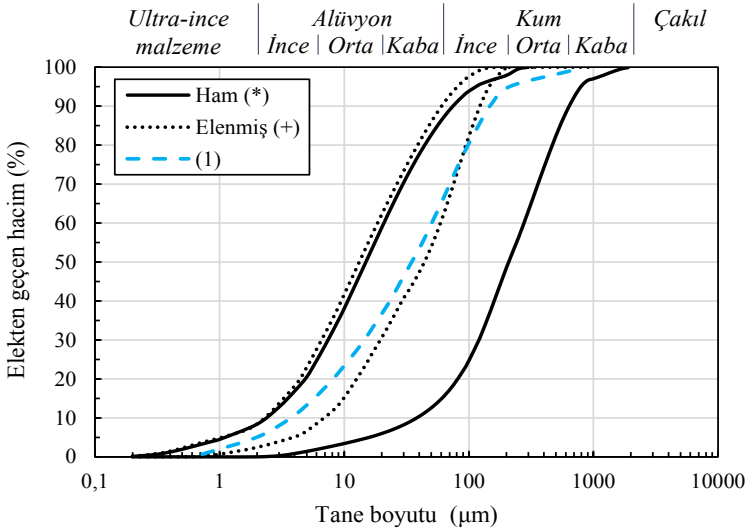
Elek analizi basit, maliyeti düşük, fakat zaman alıcı bir yöntemdir. Eleklerin tartılıp birleştirilmesi, numunenin tartılıp en üst eleğe dökülmesi, titreşimli eleme süresi ve son tartımlar düşünüldüğünde oldukça zahmetlidir.

LK yöntemi ise parçacıkların seyreltik dispersiyonundan bir lazer ışığının geçirilmesi, elde edilen kırınım açısının saptanması ve analiz edilmesini içerir<sup>125</sup>. Hızlı, yüksek tekrarlanabilirliğe ve geniş ölçüm aralığına sahip bir yöntemdir. İki yöntem de düzensiz şekilli tanelerin boyutlarının tanımlanmasında eksik kalır; dolayısıyla sadece tane boyut dağılım tahmini sağlar.

Lazer kırınım yönteminin avantajı sürekli bir tane boyu dağılım eğrisi sağlamasıdır. Bu sürekli eğri, ayrıntılı bir veri analizinin yapılmasına ve farklı tane boyu dağılım sınıflandırma sistemlerinin esnek bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Ayrıca, küresel parçacıkların çap dağılımından yüzey alanı da hesaplanabilir.



Şekil 2-16'da İngiltere uçucu külleri için tipik bir tane boyu dağılımının <sup>85</sup> yanısıra, kitap kapsamında incelenen uçucu kül örneklerinin üst ve alt tane boyu dağılımları sunulmuştur. Ham Türkiye külleri için ölçülen  $D_{50}$  tane boyutu 15-105  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Basit bir kuru eleme işlemi ile (125  $\mu\text{m}$ 'lik elek) bu aralık 13-45  $\mu\text{m}$ 'a çekilmiştir.



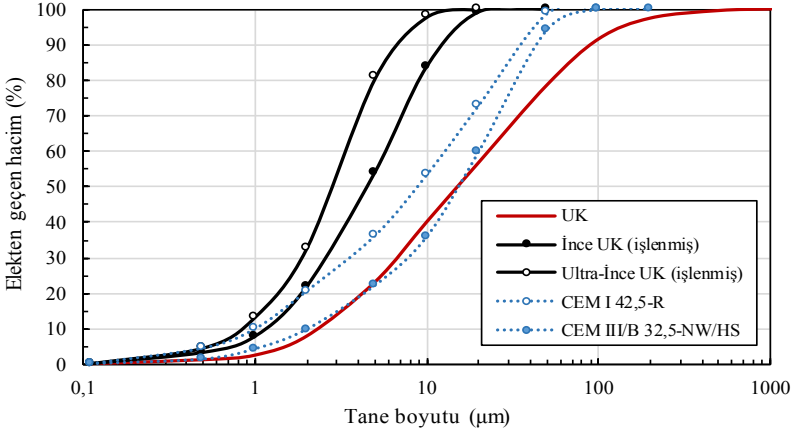
<sup>(1)</sup> Kesikli çizgi: İngiltere için tipik uçucu kül tane boyu dağılımı <sup>85</sup>

<sup>(\*)</sup> Düz çizgiler: Kitap kapsamında ham uçucu kül örnekleri için ölçülen üst ve alt tane boyu dağılımları

<sup>(+)</sup> Noktalı çizgiler: Kitap kapsamında 125  $\mu\text{m}$ 'lik elekten elenmiş uçucu kül örnekleri için ölçülen üst ve alt tane boyu dağılımları

Şekil 2-16. Uçucu kül tane boyu dağılım aralığı

Uçucu külün inceliği çimentoya benzer, ancak tane boyu dağılımı farklı bir model izler. İdeal küresel parçacıklar, daha çok külün ince kısmında yoğunlaşırken, düzensiz ve gözenekli parçacıklar külün iri kısmında daha zengindir. Uygun tarama ve eleme işlemleri ile iri parçacıklar ayrıştırılabilir, ve Şekil 2-17'de gösterildiği gibi istenilen parçacık şekline ve tane boyu dağılımına sahip ince veya çok ince uçucu küller üretilebilir.



<sup>1)</sup> (UK: Uçucu kül)

Şekil 2-17. Ham uçucu kül (kırmızı), işlenmiş uçucu kül (siyah) ve portland çimentosu (mavi) için tane boyu dağılımları (<sup>121</sup>'den uyarlanmıştır.)

Özgül yüzey alanının belirlenmesi için iki yaklaşım kullanılır: (i) Blaine yöntemi, ve (ii) BET yüzey alanı:

- Blaine yöntemi göreceli bir yöntemdir. Çalışma prensibi ince bir parçacık yatağının geçirgenliğinin parçacıkların inceliğiyle orantılı olması üzerine kuruludur. Blaine yönteminde, bir tarafında vakum ve diğer tarafında atmosferik basınç olan bir parçacık yatağı boyunca havanın geçiş zamanı, dolayısıyla akış hızı ölçülür. Özgül yüzey alanı tahmini için tozun tek boyutlu küresel parçacıklardan oluştuğunun varsayılarak Kozeny-Carman teorisi kullanılır. Yöntemi göreceli yapan, elde edilen değerlerin parçacıkların şekline ve toz yatağının sıkıştırılma seviyesine veya gözenekliliğine göre değişkenlik göstermesidir. Uçucu küller bazen küresel, bazen de düzensiz farklı büyüklük ve gözeneklilikteki parçacıklardan oluşur. Bu durum, uçucu küller için Blaine yönteminin güvenilirliğini azaltır. Çeşitli çalışmalarda uçucu küller için Blaine yöntemi ile ölçülen özgül yüzey alanı değerleri 2.500-5.500 cm<sup>2</sup>/g aralığındadır.
- BET yöntemi, toz parçacıkların yüzeyine bir gazın tek katmanlı emilimine dayanır. Tozun toplam yüzey alanı, Langmuir teorisi ve BET genellemesi <sup>126</sup> kullanılarak hesaplanır. BET ölçümlerinde çimentolar ve uçucu küller için çoğunlukla 76,93 K'deki nitrojen akışı kullanılır. Nitrojen moleküllerinin erişebildiği tüm yüzeylerin dahil edildiği bu yöntem en temel toplu yüzey alanı ölçümü olarak kabul edilir. Daha küçük ölçekteki yüzeylerin de dahil edilmesi ile ölçülen yüzey alanı artar <sup>127</sup>. Uçucu küller için ölçülen BET yüzey alanları 10.000-50.000 cm<sup>2</sup>/g aralığındadır.

## 2.4. İZ ELEMENTLER

Kömür yakımı esnasında kömür içerisinde bulunan *Hg* gibi çok uçucu metaller havaya salınır; bu salımları azaltmak için çeşitli teknolojiler mevcuttur. Çok uçucu elementler dışında kömürde kalan *As*, *Cd*, *Cr*, *Mn*, *Ni*, *Pb* ve *Zn* gibi birçok toksik element ise uçucu külde zenginleşir <sup>2,91,92</sup>. *As*, *Se* ve *Pb* gibi orta derecede uçucu metaller/metaloidler uçucu külde yoğunlaşır; havaya ise az miktarlarda salınır. Bu metaller çoğunlukla uçucu kül yüzeyinde demir oksitlerin ve silikat matrisinin adsorpsiyonuna bağlı olarak zenginleşir; bu durum, bu elementler açısından zengin uçucu küllerin bertarafını zorlaştırabilir. Bazı doğal ortamlarda (Tablo 2-8) ve uçucu küllerde (Tablo 2-9) görülen iz element konsantrasyonları aşağıda sunulmuştur.

Tablo 2-8. Bazı doğal ortamlar için iz element konsantrasyonları (ppm) <sup>130</sup>

Element	Magmatik kayaçlar <sup>(*)</sup>	Şistler <sup>(*)</sup>	Topraklar	Göl sedimanları	
Krom	Cr	117	90	5 - 1000	25-180
Kobalt	Co	18	19	1 - 40	3-40
Nikel	Ni	100	68	5 - 500	30-250
Bakır	Cu	70	45	2 - 100	20-80
Çinko	Zn	80	95	10 - 300	45-220
Civa	Hg	0,06	0,4	0,03 -0,3	0,15-1,2
Kurşun	Pb	16	20	2 - 200	8-75

<sup>(\*)</sup> Ortalama değer

Uçucu küller tehlikeli atık kapsamına girmez; buna rağmen, içme suyu kaynaklarında sıkıntı yaratabilecek iz elementlerin olası geçişini önlemek için özel olarak tasarlanmış depolama alanları ve kül barajlarında depolanırlar <sup>65</sup>. İz elementlerin liç derecesi, uçucu kül içerisindeki konsantrasyonlarına bağlıdır; ancak doğrudan bir ilişki yoktur <sup>128</sup>. Liç miktarı aynı zamanda elementin yakılan kömürdeki konsantrasyonu ve oluşum şekli, yanma koşulları, emilme/salma kolaylığı, redoks koşulları ve en önemlisi pH ile ilişkilendirilir.

Kömür içerisindeki iz elementlerin oluşma biçimi, yakma sonrasında bu elementlerin kül parçacıkları içerisindeki dağılımında önemli bir rol oynar. Uçucu küldeki arseniğin önemli bir bölümü aluminosilikat matris içerisinde yer alır <sup>131</sup>. Geri kalanı çoğunlukla pirit ( $FeS_2$ ) ve inorganik sülfidler içerisinde yoğunlaşır, ya da ince parçacıkların yüzeyinde birikir. <sup>132-134</sup>

Tablo 2-9. Kömür ve uçucu kül için iz element konsantrasyonları (ppm) <sup>129</sup>

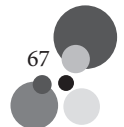
Element	Kömür (ppm)	Uçucu kül (ppm)
<i>Litofil elementler</i>		
Ba Baryum	70 - 120	90 - 13.900
Ce Seryum	11 - 41	28 - 320
Cs Sezyum	0,4 - 6	1,4 - 17
Li Lityum	( <sup>1</sup> )	77 - 120
Mo Molibden	6,5 - 500	
Rb Rubidyum	9 - 63	25 - 300
Sr Stronsiyum	30 - 550	40 - 9.600
Zr Zirkonyum	8 - 90	100 - 5.000
<i>Siderofil elementler</i>		
Co Kobalt	1,5 - 34	6 - 1.500
Cr Krom	10 - 90	11 - 7.400
Mn Manganez	2,5 - 15	31 - 4.400
Ni Nikel	6,5 - 29	1,8 - 8.000
V Vanadyum	15 - 70	20 - 1.180
<i>Kalkofil elementler</i>		
As Arsenik	0,8 - 100	2,3 - 1.700
Cd Kadmiyum	0,1 - 0,6	0,1 - 250
Cu Bakır	5 - 30	30 - 3.020
Ge Germanyum	<10 - 11.000	
Pb Kurşun	1 - 18	3,1 - 1.600
Sb Antimon	( <sup>1</sup> )	0,8 - 1.000
Se Selenyum	1,75 - 9	1,2 - <500
Sn Kalay	0,2 - 8	<3,0 - 4.250
Zn Çinko	2 - 125	14 - 13.000
<i>Soy metaller</i>		
Ag Gümüş	0,01 - 0,06	1 - 50
Au Altın	( <sup>1</sup> )	0,004 - 0,5
Rh Rodyum	( <sup>1</sup> )	0,02 - -
Pd Paladyum	( <sup>1</sup> )	0,2 - -
Pt Platinyum	( <sup>1</sup> )	0,7 - -
<i>Diğer elementler</i>		
Be Berilyum	0,27 - 2,6	1 - 1.000
Hg Civa	0,05 - 0,48	0,01 - 22
Tl Talyum	( <sup>1</sup> )	1,1 - 100
U Uranyum	0,4 - 3	0,8 - 30,1

(<sup>1</sup>) Litofil elementler: Oksijenle kolayca birleşme eğilimi gösteren, oksijene karşı kimyasal yakınlığı fazla olan elementlerdir.

(<sup>2</sup>) Siderofil elementler: Metalik demirle birlikte bulunma eğilimi gösteren, yüksek-yoğunluklu geçiş elementleridir. Oksijen ile birleşme eğilimi göstermezler.

(<sup>3</sup>) Kalkofil elementler: Sülfürle kolayca birleşme eğilimi gösteren, sülfüre karşı kimyasal yakınlığı olan elementlerdir.

(<sup>4</sup>) Veri yoktur.





Selenyum, daha hareketli elementlerden biridir<sup>94</sup> ve çoğunlukla kömürdeki organik bileşenlerle, bir kısmı ise kömürdeki pirit başta olmak üzere sülfid mineralleri ile ilişkilendirilir<sup>2</sup>. Ayrıca, uçucu küldeki silikatlar ve oksianyonlar içinde de bulunabilir. Ayrıca *Se*, uçucu kül yüzeylerinde zenginleşir<sup>135</sup>. Liç sularındaki *Se* konsantrasyonları yıkama çözeltisinin asitliğine ve alkalinitesine bağlıdır. Kadmiyum çoğunlukla kömürdeki mineral fazlar, özellikle de sfalerit ( $ZnS$ ) ile ilişkilidir<sup>2</sup>. Diğer sülfid mineralleri de az miktarda *Cd* içerebilir. Uçucu küldeki kobalt da genellikle pirit ve diğer sülfid mineralleri içerisinde. Bakır,  $CuFS_2$  ile yakından ilişkilidir. Çinko, genellikle uçucu kül minerallerinden  $ZnS$  ve  $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$  içerisinde yer alır. Kurşun çoğunlukla sülfidler olarak veya sülfid mineralleri ile birlikte bulunur; galenit ( $PbS$ ) kömürün içinde en yaygın kurşun formudur<sup>2,136</sup>. Uçucu kül parçacıklarının iç kısımlarında zenginleştirilmiş elementler doğrudan liçe maruz kalmaz; fakat, yüzeydeki elementler sulu bir ortamda daha kolay sızabilir. Bu nedenle, uçucu külün oluşum şekli, belirli bir elementin çevreye kolayca bırakılabileceğini veya hareketsiz kalacağını büyük ölçüde kontrol eder.

İz elementlerin sudaki mobilitesi pH'a son derece bağlıdır<sup>128</sup>. Su-uçucu kül sistemlerinin pH'ı, uçucu küllerde her zaman bulunan *Ca* ve *S* konsantrasyonları arasındaki oran ile kontrol edilir<sup>137</sup> ve 4,5-12 aralığında değişir. *Mg* gibi diğer küçük alkaliler veya alkali toprak katyonları da dengeye katkıda bulunabilir<sup>138</sup>. Küldeki *Ca* içeren fazların oluşumu ve seviyeleri, kömürün çökme ortamıyla yakından ilgilidir. Uçucu küller *Ca/S* dengesine ve pH'a bağlı olarak 3 ana gruba ayrılır (Tablo 2-10).

Uçucu kül-su sistemi dinamiktir. pH'ı kontrol eden elementler liç ile yer değiştirirken hem alkali, hem de asidik küller daha nötr pH değerlerine doğru meyil ederler. Bu durum bazı elementlerin hareketliliklerinin zaman içerisinde değişmesine sebep olur.

Tablo 2-10. pH seviyesine göre uçucu kül grupları<sup>130</sup>

Uçucu kül pH sınıfı	Açıklama
<i>Kuvvetli alkali</i>	Serbest kirecin çözünmesi liçe yön verir; tipik olarak pH 11-13 aralığındadır ve sızıntı suyunda büyük miktarda <i>Ca</i> vardır. <i>Ca</i> , <i>S</i> 'ın önüne geçmiştir ( $Ca/S \gg 1$ ).
<i>Hafif alkali</i>	Anhidrit çözünmesi liçe yön verir; göreceli olarak daha düşük <i>Ca</i> seviyeleri ve dengeli <i>Ca/S</i> oranı hafif alkali (pH 8-9) bir ortam oluşturur <sup>137</sup> .
<i>Asidik</i>	Sülfat içeriğine kıyasla <i>CaO</i> ve <i>MgO</i> tükenmiştir <sup>138</sup> . Bu nedenle, orjinal asitli özelliklerini muhafaza eder. (pH<7) Uçucu kül parçacıklarının yüzeyinde yoğunlaşan asidik bileşenler ilk olarak sülfürik asit olarak çözülür <sup>2</sup> .

*Be*, *Cd*, *Co*, *Cu*, *Fe*, *Mg*, *Mn*, *Ni*, *Pb*, *Si*, *Sn*, *Th*, *Tl*, *U* ve *Zn*, pH 7-10 aralığında minimum liçe sahiptir. Bu elementler, alkali uçucu küller içerisinde ise çevresel koşullar altında ciddi sorun yaratmazlar. Sızıntı miktarları düşüktür; ve küldeki konsantrasyonlarına değil pH'a bağlıdır. Bu nedenle, bu elementler açısından aşırı zengin bir kömürün yakılması sonucu oluşan uçucu kül içerisindeki yüksek konsantrasyonlar birçok

uygulama için bir sınırlama oluşturmaz. Fakat, bu elementlerin hareketliliği pH düşüşüyle birlikte arttığı için asidik uçucu küllerde daha dikkatli olunmalıdır.

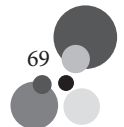
*As, B, Cr, Mo, Sb, Se, V* ve *W* gibi oksianyon oluşturan elementlerin liç miktarı ise pH 7-10 aralığında en yüksek seviyeye ulaşır. Bu belirgin hareketlilik, bu elementleri içeren alkali uçucu küllerin bertarafında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Bu elementler arasında asıl özen *As, B, Cr, Mo* ve *Se* elementlerine yöneltilmelidir. Bu elementler hem bitki örtüsü, hem de hayvanlar için potansiyel olarak zararlıdır; suda yüksek çözünürlüğe sahiptirler ve dolayısıyla yüzey ve yeraltı sularında hareketlidirler. *Ca* varlığında, *As* ve *V*'nin liç miktarı çözünürlük sınırlayıcı fazların oluşması nedeniyle daha zayıftır. Etrenjit *As, B, Cr, Sb, Se* ve *V*'yi yakalamadaki güçlü yatkınlığı nedeniyle metalloid temizleme için büyük bir potansiyel gösterir. Fakat, etrenjit anında oluşmaz; dolayısıyla daha çok uzun vadeli maruz kalma senaryoları için uygundur. Ayrıca, etrenjit yeniden karbonasyon reaksiyonlarına karşı kararsızdır. Bu durum, çevre koşullarına maruz kalındığında etrenjiti oksianyonlar için geçici bir tutucu yapar<sup>139</sup>.

## 2.5. SINIFLANDIRMA VE STANDARTLAR

Uçucu küllerin kimyasal, mineralojik ve fiziksel özellikleri çok geniş bir yelpazeye yayılır. Mevcut uçucu kül sınıflandırmaları, bir uçucu külün temel kullanım alanı olan çimento ve beton sanayi için uygunluğunu esas alır. Çeşitli sınırlamalara dayanan bu sınıflandırmalar ile külün çimento ve beton sanayii için uygunluğu kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler açısından değerlendirilir. Fakat, uçucu küllerin özelliklerindeki zengin çeşitlilik, uçucu küllerin çimento ve beton sanayii dışındaki farklı sektörlerde de kullanımını olası hale getirir, ve kabul gören sınıflandırmalardan farklı sınıflandırmaların da kullanılmasına imkan tanır.

Amerikan Malzeme ve Test Derneği, ASTM C618 standardına (Betonda kullanılacak kömür kaynaklı uçucu kül ve ham veya kalsine doğal puzolan için standard özellikler)<sup>140</sup> uygun olarak uçucu külleri F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayırır (Tablo 2-1). F ve C sınıfı uçucu küllerde toplam  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  yüzdesinin en az %50 olması istenir. Tablo 2-1, farklı kömür türlerinin yakımı sonucu elde edilen uçucu küllerde beklenebilecek genel kimyasal kompozisyon aralıklarını sunmaktadır. Görüldüğü üzere antrasit veya bitümlü kömürlerden çoğunlukla F sınıfı, alt-bitümlü kömürlerden veya linyitlerden ise çoğunlukla C sınıfı uçucu kül elde edilir<sup>15,85</sup>. Bu genelleme her zaman geçerli değildir; farklı tip kömürlerden farklı sınıflarda küller de elde edilebilir<sup>141</sup>.

F ve C sınıfı olarak yapılan bu kaba sınıflandırma, uçucu küllerin kimyasal kompozisyonunu belirli uygulamalara bağlamada önem taşır. F sınıfı bir kül çoğunlukla puzolanik bir malzeme olarak kabul edilir. Bir puzolan, kendinden bağlayıcılık özelliği taşımayan, silisli veya alüminosilisli, yüksek oranda amorf bir malzemedir. Ancak, yüksek incelikte, sıradan sıcaklıklarda ve nem varlığında  $Ca(OH)_2$  ile kimyasal olarak reaksiyona girer ve bağlayıcı özellikli bileşikler



oluşturur. C sınıfı uçucu küller yüksek  $CaO$  içeriği ile ve  $Ca(OH)_2$ 'nin yokluğunda dahi bağlayıcı ürünlerinin oluşmasına olanak tanır. Bu sebeple, bu sınıfa ait küller çoğunlukla hidrolik/puzolanik özellik taşıır.

Ülkemizde uçucu küller ile ilgili uzun süre kullanılmış TS 639 (Uçucu küller - Çimentoda kullanılan), TS 640 (Çimento - Uçucu küllü çimento) ve TS EN 450 (Uçucu kül- Betonda kullanılan - Tarifler, özellikler ve kalite kontrol) standartları geçtiğimiz senelerde yürürlükten kaldırılmıştır. Halihazırda uçucu küller için Türk Standartları Enstitüsü tarafından yayınlanan TS EN 197-1, TS EN 450-1, TS EN 451-1, TS EN 451-2 standartları kullanılmaktadır (Tablo 2-11).

Tablo 2-11. Uçucu küllere ilişkin yürürlükteki Türk Standartları

TS No	Başlık
TS EN 450-1	Uçucu kül – Betonda kullanılan – Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri
TS EN 451-1	Uçucu kül – Deney metodu – Bölüm 1: Serbest kalsiyum oksit muhtevasının tayini
TS EN 451-2	Uçucu kül – Deney metodu – Bölüm 2: Islak eleme ile incelik tayini
TS EN 197-1	Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri

Türkiye’de ve Avrupa Birliği’nde, çimento üretiminde kullanılacak uçucu küller TS EN 197-1 standardına <sup>142</sup> göre silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere ikiye ayrılır (Tablo 2-12). V sınıfı silissi uçucu küller çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip, esas olarak  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$ ; geri kalanı ise  $Fe_2O_3$  ve diğer bileşikler içeren küllerdir. V sınıfı uçucu küllerin reaktif  $CaO$  içeriği %10’un altında, reaktif  $SiO_2$  içeriği ise %25’in üzerinde olmalıdır. W sınıfı kalkersi uçucu küller ise hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan esas olarak reaktif  $CaO$ ,  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$ ; geri kalanı  $Fe_2O_3$  ve diğer bileşikler içeren küllerdir. Bu sınıfa ait uçucu küllerde reaktif  $CaO$  içeriği en az %10 olmalıdır. Reaktif  $CaO$  içeriği %10 ile %15 arasında olan W sınıfı uçucu küllerin reaktif  $SiO_2$  içeriği ise %25’in üzerinde olmalıdır <sup>143</sup>.

Betonda kullanılacak küller için TS EN 450-1 standardına<sup>144</sup> göre farklı bir sınıflandırma mevcuttur. Standartta küllerin,  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  oranının %70’in üzerinde olması istenir. Küller kızdırma kaybı oranlarına göre kategori A ( $\leq 5$ ), B (%2-7) veya C (%4-9) olarak ve inceliklerine göre sınıflandırılır. TS EN 450-1 standardı, betonda kullanılan uçucu küllü termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu ortaya çıkan, puzolanik özellik gösteren, çoğunlukla küresel ve camsı taneciklere sahip ince toz alüminosilikatlar olarak tanımlar<sup>144</sup>. Bu sebeple, akışkan yataklı veya ızgaralı yanma sistemleri kullanan termik santrallerden elde edilen küller bu standard kapsamında yer almaz.

Uçucu küllerin çimento ve betonda kullanılabilmesi için yapılan temel sınıflandırmalar ve sağlanması gereken kimyasal kriterler Tablo 2-12 ve fiziksel kriterler Tablo 2-13'te özetlenmiştir. İstenilen standartların sağlanması için elde edilen uçucu küller sınıflandırma, seçme, elekten geçirme, kurutma, harmanlama, öğütme ve karbon azaltma gibi temel işlemlere tabi tutulabilir.

Tablo 2-12. Çimento ve betonda kullanılan uçucu küller için kimyasal kompozisyon uygunluk kriterleri

Bileşen (%)	ASTM C618		TS EN 450-1		TS EN 197-1	
	F	C	PK <sup>(*)</sup>	İY <sup>(*)</sup>	V (Silissi)	W (Kalkersi)
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 50,0	≥ 50,0	(*)	≥ 70	-	-
MgO	-	-	(*)	≤ 4	-	-
SO <sub>3</sub>	≤ 5,0	≤ 5,0		≤ 3	-	-
Na <sub>2</sub> O eş. (**)	-	-	(*)	≤ 5	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	(*)	≤ 5	-	-
KK <sup>(#)</sup>	≤ 6,0	≤ 6,0		Kategori A ≤ 5 Kategori B ≤ 7 Kategori C ≤ 9	a) 0 ≤...≤ 5 b) 2 ≤...≤ 7 c) 4 ≤...≤ 9	
Cl <sup>-</sup>	-	-		≤ 0,10	-	-
Çözünabilir P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	(*)	≤ 100 (mg/kg)	-	-
Serbest CaO	-	-		(1)	≤ 1 <sup>(2)</sup>	-
Reaktif CaO	-	-		≤ 10	< 10	≥ 10 <sup>(3)</sup>
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	(*)	≥ 25	≥ 25	(4)
Rutubet	≤ 3,0	≤ 3,0	-	-	-	-

(\*) PK: Pulverize kömürden elde edilen uçucu kül; İY: İkincil yakıt kullanılarak elde edilen uçucu kül

(\*) Gereklerin sağlandığı varsayılır. (\*\*) (Na<sub>2</sub>O eş. = Na<sub>2</sub>O + 0,658 K<sub>2</sub>O)

(#) KK: Kızdırma Kaybı

(1) Eğer Serbest CaO > 1,5 ise hacim genişmesi ≤ 10 mm'yi sağlamalıdır.

(2) Eğer 1 < Serbest CaO < 2,5 ise hacim genişmesi ≤ 10 mm'yi sağlamalıdır.

(3) Eğer Reaktif CaO > 15 ise 28 günlük basınç dayanımı, σ<sub>28</sub> ≥ 10 MPa'ı sağlamalıdır.

(4) Eğer 10 < Reaktif CaO < 15 ise Reaktif SiO<sub>2</sub> ≥ 25'i sağlamalıdır.

ASTM C 618 standardının 2019 yılında yayımlanmış olan versiyonunda F ve C sınıfı uçucu küller CaO içeriği limiti getirilmiştir. Buna göre F sınıfı küllerin en fazla %18,0 CaO, C sınıfı küllerin ise en az %18,0 CaO içeriğine sahip olması gerekmektedir. <sup>140</sup>



Tablo 2-13. Çimento ve betonda kullanılan uçucu küller için bazı fiziksel özellik uygunluk kriterleri

Özellik	ASTM C618	TS EN 450-1		TS EN 197-1	
		PK <sup>(*)</sup>	İY <sup>(*)</sup>	V (Silissi)	W (Kalkersi)
45 µm elek bakiyesi (%)	≤ 34	Kategori N ≤ 40 Kategori S ≤ 12		-	
Hacim genişmesi (mm)	≤ % 0,8 (Otoklav genişmesi)	Serbest CaO > % 1,5 ise ≤ 10 mm (Le chatelier genişmesi)		(1)	Maks. 10
Su ihtiyacı (%)	≤ 105	Kategori N: - Kategori S ≤ 95		-	
Aktivite indeksi (%) <sup>(*)</sup>					
7-günlük	≥ 75 <sup>(3)</sup> (%20 UK ikamesi için)	-		-	
28-günlük	≥ 75 <sup>(3)</sup> (%20 UK ikamesi için )	≥ 75 (%25 UK ikamesi için)		-	
90-günlük	-	≥ 85 (%25 UK ikamesi için)		-	
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Beyan edilen değerden ±%5 sapma	Beyan edilen değerden ± 200 kg/m <sup>3</sup> sapma		-	
Priz başlangıcı (dakika)	-	-	≤ Referans çimentonun priz başlangıcının iki katı	-	
28-günlük basınç dayanımı (%100 UK)	-	-	-	(2)	

(\*) PK: Pulverize kömürden elde edilen uçucu kül; İY: İkincil yakıt kullanılarak elde edilen uçucu kül

(\*) Aktivite indeksi mekanik bir özellik olmasına rağmen standartlarda fiziksel koşullar arasında sıralanmaktadır.

(\*) UK: Uçucu kül

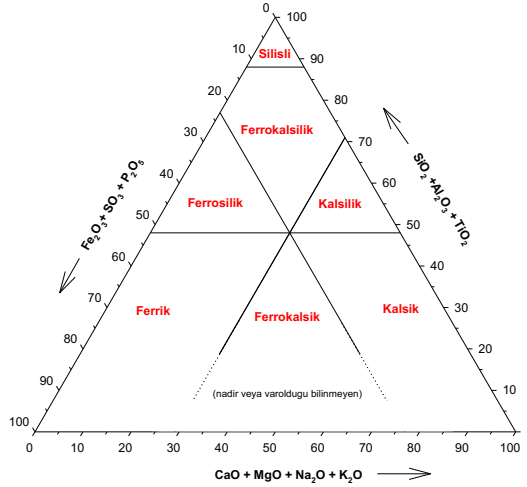
(1) Eğer 1,0 < Serbest CaO < 2,5 ise hacim genişmesi ≤ 10 mm 'yi sağlamalıdır.

(2) Eğer Reaktif CaO > 15,0 ise 28 günlük basınç dayanımı ≥ 10,0MPa'ı sağlamalıdır.

(3) ASTM C618 standardı kapsamında 7 veya 28 günlük aktivite indeksinden bir tanesini sağlaması yeterlidir.

ASTM ve Avrupa standart kuruluşları tarafından geliştirilen standart sınıflandırma sistemleri, çimento ve beton sektörü için uygun kül tiplerini ayırt etmek için tasarlanmıştır. Bu standartlarda uygunluk değerlendirmeleri performansa değil, kurallara dayalıdır. Bu durum, pratikte sıralanan kriterleri sağlayamayan (çoğunlukla yüksek CaO içeren) küllerin performansa bakılmaksızın kullanım dışı kalmasına sebep olur <sup>141</sup>.

Literatürde küller için daha farklı sınıflandırmalar da mevcuttur. Bu sınıflandırma sistemlerinin kullanımı, çimento ve beton dışındaki uygulamalarda kullanılacak uçucu küllerin daha etkin değerlendirilmesine yardımcı olabilir. Örneğin, 1980'lerden başlayarak çeşitli çalışmalarda uçucu küller kireç ve  $SO_3$  içeriklerine göre silikoalüminoz (genellikle taş kömürünün yakılmasıyla elde edilen ve esas yapısını silikoalüminatlardan oluşan), sülfokalsik (genellikle linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen kireç ve  $SO_3$  zengini) ve silikokalsik (genellikle linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen  $CaO$  ve  $SiO_2$  zengini) uçucu küller olarak sınıflandırılmıştır<sup>145,146</sup>. Uçucu küller üzerine yapılan ve belli kapsamda kullanılan kimyasal sınıflandırmalardan biri silisli ( $SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$ ), kalsik ( $CaO+MgO+Na_2O+K_2O$ ) ve ferrik ( $Fe_2O_3+SO_3+P_2O_5$ ) uç elemanları kullanılarak hazırlanan bir üçgen grafiğe dayanır (Şekil 2-18)<sup>147</sup>.



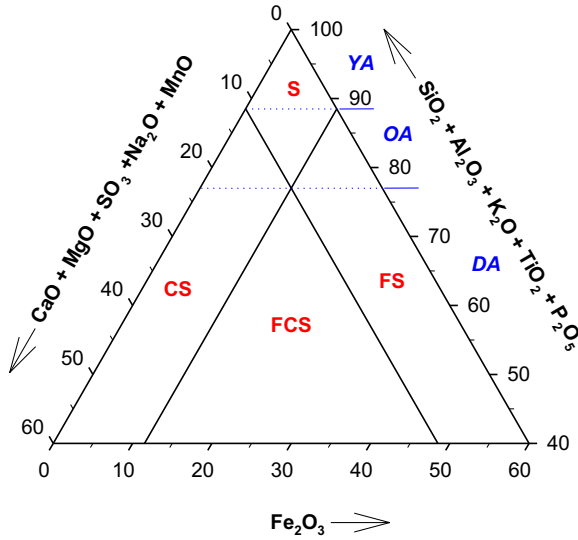
Şekil 2-18. Roy'a göre uçucu kül sınıflandırması<sup>147</sup>

Bu sınıflandırmada küller kimyasal kompozisyonlarına göre silisli, ferrik, kalsik, ferrokalsilik, ferrosilik, kalsilik, ve ferrokalsik olmak üzere yedi kategoride toplanır (Tablo 2-14).

Tablo 2-14. Roy'a göre uçucu kül sınıflandırma sınırları<sup>147</sup>

Sınıf	%( $SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$ )	%( $CaO+MgO+Na_2O+K_2O$ )	%( $Fe_2O_3+SO_3+P_2O_5$ )
Silisli	>88	0-12	0-12
Ferrosilik	48-88	0-29	23-52
Kalsilik	48-71	>29-52	0-23
Ferrokalsilik	>48-88	0-29	0-23
Ferrik	<48	0-29	>23
Kalsik	<48	>29	0-23
Ferrokalsik	<48	29-77	>23-71

Literatürde mevcut bir diğer sınıflandırma da Vassilev ve Vassileva'nın 41 Avrupa uçucu külünü inceleyerek oluşturduğu sınıflandırmadır <sup>77,88,148,149</sup>. Araştırmacılar, temel oksitleri kullanarak külleri Şekil 2-19'da gösterilen üçgen grafiği oluşturmuştur. Grafiğin uç elamanları oksitler arasındaki belirgin pozitif veya negatif korelasyon katsayıları dikkate alınarak ( $SiO_2+Al_2O_3+K_2O+TiO_2+P_2O_5$ ), ( $CaO+MgO+SO_3+Na_2O+MnO$ ) ve ( $Fe_2O_3$ ) olarak belirlenmiştir. Grafiğin ilk köşesi, esas itibarıyla alümino-silikat camlar ile mullit, kuvars-kristobalit-tridimit, kil ve mika mineralleri ve K-feldispat gibi silikat ve alümino-silikatların varlığını gösterir. İkinci köşe ise *Ca-Mg-Na* bakımından zengin cam, oksitler-hidroksitler (kireç, portlandit, periklaz, brusit), sülfatlar (anhidrit-jips, heksahidrit, tenardit), karbonatlar (kalsit, dolomit, ankerit), *Ca-Na* alumino-silikatlar (plajiyoklaz), *Ca*-silikatlar (volastonit, larnit, rankinit) ve *Ca-Mg* silikat ve aluminosilikatları (montiselit ve melilit) gösterir. Öte yandan, üçüncü köşe  $Fe_2O_3$ 'ün katkısını içerir. Bu köşe, *Fe* ile zenginleştirilmiş camı ve hematit, manyetit, maghemit, goetit, ilmenit ve limonit gibi *Fe* oksit-hidroksitleri temsil eder. Bazı mineral ve fazların farklı köşelere de katkısı olabilir. Vassilev ve Vassileva <sup>88</sup> bu üçgen grafikte uçucu külleri dört ana sınıfa bölünür: silisli, silikokalsik, ferrosilik ve ferrokalsilik. Ayrıca, *Si*, *Al*, *K*, *Ti* ve *P* oksitlerin toplamına göre yüksek asit (YA), orta asit (OA) ve düşük asit (DA) gibi üç hakim eğilim de kategorize edilmiştir.



Şekil 2-19. Vassilev ve Vassileva'ya göre uçucu kül sınıflandırması: Silisli (S), silikokalsik (CS), ferrosilik (FS) ve ferrokalsilik (FCS) <sup>77,88</sup>

### 3. KULLANIM ALANLARI

Uçucu külün bileşimi - karmaşık olmasına rağmen - ağırlıklı olarak aluminosilikat cam, kuvars, mülit, demir spinel ve tuz fazları, Ca silikat-oksihidroksitler ve karbon içeriğinin kısmi oranda ayrıştırılabilir bir karışımından oluşur<sup>57</sup>. Bu karmaşık bileşim, birçok farklı alanda kullanım potansiyeline sahiptir. Başlıca mevcut ve potansiyel uçucu kül uygulamaları ile bu uygulamaların temel avantaj ve dezavantajları Tablo 3-1'de özetlenmiştir. Farklı uygulamalar için uçucu kül bileşenlerinin etkin, etkisiz ve hatta zararlı olabileceği unutulmamalıdır. Örneğin, betonda çimento ikame malzemesi olarak kullanılacak bir uçucu külün olası yüksek karbon içeriği, hava kabarcıklarını stabilize etmek için kullanılan hava sürükleyici katkı malzemelerindeki yüzey aktif maddeleri adsorbe edip katkının işlevselliğini azaltabilir<sup>119,150</sup>. Öte yandan, karbon içeriğinin adsorpsiyon kapasitesi, kirlilik kontrolü uygulamalarında avantajlı olabilir.

Tablo 3-1. Başlıca uçucu kül uygulamalarının avantajları ve dezavantajları  
(<sup>17,85'</sup>den uyarlanmıştır.)

Uygulama	
<i>Yapı sektörü</i> <i>Avantajlar</i>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Uçucu külün en yoğun ve en katma-değeri yüksek kullanım alanıdır.</li><li>2. Çimentonun uygun bir uçucu kül ile kısmen ikame edilmesi su ihtiyacını azaltır; betonun işlenebilirliğini artırır; beton üretim maliyetlerini ve beton üretim esnasında oluşan sera gazı emisyonlarını düşürür.</li><li>3. Uçucu küller için bazı uygulamalarda (akışkan dolgu için kullanılan uçucu küller gibi) katı gereklilikler yoktur.</li></ol>
<i>Dezavantajlar ve Sınırlamalar</i>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Mevsimsel faktörlerden oldukça etkilenen inşaat sektörünün ve termik santrallerin faaliyetleri farklı zamanlarda zirveye ulaşır. Bu durum, uçucu kül depolama gibi maliyetleri artırır.</li><li>2. Özellikle soğuk hava koşullarında veya çimentonun %40'tan fazla oranda ikame edilmesi durumunda betonun erken dayanımını azaltır.</li><li>3. Külün üretim alanından kullanım alanına taşınması nedeniyle ortaya çıkan ek maliyet uygulamayı sınırlayabilir.</li><li>4. Uçucu küldeki yanmamış karbon miktarı taze betonun hava sürükleyicilik performansını ve akışkanlık özelliğini negatif olarak etkiler.</li></ol>
<i>Uyarılar</i>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Beton veya çimento performansını olumsuz etkilememek için uygun kalitede uçucu kül seçilmelidir.</li><li>2. Proje amacına uygun bir uçucu kül ikame oranı kullanılmalıdır.</li><li>3. Uçucu küldeki yanmamış karbon miktarı ~% 3'den daha az olmalıdır. Elektrostatik ayırma, yerçekimi ile ayırma veya köpüklü yüzdürme (flotasyon) gibi kuru veya ıslak işlemlerle uzaklaştırılabilir.</li></ol>





---

**Toprak iyileştirme**  
*Avantajlar*

1. Uygun maliyetli ve çevre dostu bir alternatif olarak kireç ve dolomit yerine ikame için kullanılabilir; fakat, kimyasal gübre veya organik gübrenin yerini alamaz.
2. Toprağın pH değerini dengeler.
3. Organik C ve N haricindeki bitki besinlerini artırır; tarıma elverişli topraklarda çözülmüş P'yi azaltır.
4. Toprakların fiziko-kimyasal özellikleri üzerinde olumlu etki yapar; mikrobiyolojik aktiviteyi iyileştirir ve böylece bitkisel kaynaklı biyokütle üretimini artırır.

*Dezavantajlar ve Sınırlamalar*

1. Uçucu kül sızıntı suyundaki daha yüksek konsantrasyonlu toplam çözülmüş katılar, toplam sertlik, katyonlar ve anyonlar toprak tuzluluğunda artışa yol açar.
2. Bazı toksik metalleri içerdiği için toprak, bitkiler ve yer altı suları için kontaminasyon riski oluşturur.
3. Uygulama kül ve toprağın özelliklerine göre özel olarak yapılmalıdır.
4. Nispeten yüksek uçucu kül oranları uygulandığında potansiyel fitotoksik etkilere sahiptir.

*Uyarılar*

1. Taze külden ziyade kül havuzlarından toplanan, çevre etkilerine maruz kalmış uçucu kül tercih edilmelidir.
2. Sinerjistik etkileşimlerden fayda sağlamak için uçucu kül ile birlikte mevcutta bulunan düzelticiler (çiftlik gübresi, kanalizasyon çamuru vb.) ilave edilmelidir.
3. Uçucu külün ilave miktarı uygun bir şekilde kontrol edilmelidir.
4. Uçucu külün toprak sağlığı ve mahsul kalitesi üzerindeki etkilerinin uzun süreli olarak çalışmaları yapılmalıdır.

---

**Seramik endüstrisi**  
*Avantajlar*

1. Kimyasal bileşimi ve uygun tane boyut aralığı nedeniyle bazı uçucu küller hemen hemen hiç önışlem yapılmaksızın doğrudan seramik hamurlarına katılabilir.
2. Kaolinit, feldspat ve kuvars yerine kısmi olarak ikame edilebilir. Böylece sınırlı doğal kaynakların korunmasında ciddi fayda sağlanır.

*Dezavantajlar ve Sınırlamalar*

1. Uçucu küldeki demir oksitler, ürünün termal genişleme katsayısı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.
2. Uçucu kül-kil ürün fırınlamadan sonra yüksek büzülme gösterir.
3. Fırınlama büzülmesi, ürünün gözenekliliğini ve baca gazlarındaki sülfür dioksit içeriği arttırmak pahasına akışkan yataklardan elde edilen küllerin eklenmesi ile telafi edilir.
4. Yüksek kül içeriği aşırı genişleme nedeniyle fayanslarda deformasyonlara ve kusurlara neden olur.

*Uyarılar*

1. Demir oksit içeriği asit ile yapılan önışlemler veya manyetik ayırma gibi yöntemlerle azaltılmalıdır.
2. Seramik ürünün bileşimi değiştirilerek ve ısıtma işlemi ayarlanarak gelinebilir dezavantajların üstesinden gelinebilir.

---

**Katalizörler**  
*Avantajlar*

1. Uçucu küller çeşitli reaksiyonlar için katalizör veya katalizör desteği olarak kullanılabilir.
2. Nispeten az miktarda kül tüketilmesine rağmen, en iyi katma-değerli uygulamalardan biridir.

*Dezavantajlar ve Sınırlamalar*

1. Uçucu kül katalizörleri endüstriyel uygulamalarda kullanılmamıştır.
2. Uçucu kül, kullanım sırasında salınıp ikincil kirliliğe yol açabilecek Hg gibi bazı iz elementler içerir.

*Uyarılar*

1. Katalizörlerin uzun süreli kararlı performansının daha fazla araştırılması gerekmektedir.
2. Uçucu kül katalizörünün büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda kullanımında reaksiyon mekanizması ve kinetiği büyük önem taşımaktadır.

---

**Çevresel koruma**  
*Avantajlar*

1. Uçucu kül, hem gaz hem de sıvı uygulamalarda doğrudan kullanılabilen düşük maliyetli potansiyel bir adsorbandır.
2. Baca gazı sülfür giderme işleminde kullanılan tutucular, kül üretimine yakın olmaları nedeniyle uygun olabilirler.

*Dezavantajlar ve Sınırlamalar*

1. Uçucu kül adsorbanlarının sınırlı adsorpsiyon kapasitesi vardır.
2. Uçucu küllerin özellikleri oldukça değişken olduğu için adsorpsiyon kapasitesiteleri de büyük farklılıklar gösterirler.

*Uyarılar*

1. Uygun uçucu kül tipinin seçilmesi ve adsorpsiyon kapasitesinin artırılması için önışlemden geçirilmesi gereklidir.
2. İkincil kirliliğin önlenmesi için adsorbanların rejenerasyonu ve bertaraf edilmesi gereklidir.

---

**Ayrıştırılan yan ürünler**  
*Avantajlar*

1. Potansiyel endüstriyel sinerji fırsatlarını artırır.
2. Senoferlerin, yanmamış karbon ve manyetik içeriğin geri kazanımı, ekonomik ve çevresel yararlar sağlar.

*Dezavantajlar ve Sınırlamalar*

1. Yaygın yaş ayırma işlemleri geniş sahalar, yüksek miktarda su ve flotasyon reaktifleri gerektirir. Ayrıca kolayca ikincil kirliliğe yol açar.
2. Verimlilik ve ekonomi, çeşitli ayırım yöntemlerinin başlıca sınırlayıcı unsurlarındandır.

*Uyarılar*

1. Ayrıştırma performansı için kül deşarj yöntemi, kül özellikleri, mevcut arazi ve uçucu kül nihai ürünü, vb. gibi parametreler dikkate alınmalıdır.

---

**Zeolit sentezi**  
*Avantajlar*

1. Su arıtma, gaz arıtma ve zemin ıslahı için çeşitli mühendislik ve tarımsal uygulamalarda kullanılan potansiyel adsorbanlardır.
2. Nispeten az miktarda kül tüketmesine rağmen, en iyi katma-değerli uygulamalardan biridir.

*Dezavantajlar ve Sınırlamalar*

1. Elde edilen ürün, genellikle, özellikle geleneksel hidrotermal işlem için orijinal kristal fazlar (örneğin, kuartz, mullit) ile birlikte kristalleşmiş olan zeolitler'dir.
2. Verimlilik ve ekonomi başlıca sınırlayıcı unsurlardandır.

*Uyarılar*

1. İkincil kirliliğin önlenmesi için adsorbanların rejenerasyonu ve bertaraf edilmesi gereklidir.
2. Hazırlama işlemi geliştirilmeli ve yüksek adsorpsiyon kapasiteli zeolitler üretmeye çalışılmalıdır.



<i>Değerli metallerin geri kazanımı</i>	
<i>Avantajlar</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Potansiyel endüstriyel sinerji fırsatlarını artırır.</li> <li>2. Önemli ekonomik ve çevresel yararlar elde edilir.</li> </ol>
<i>Dezavantajlar ve Sınırlamalar</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alüminyum geri kazanım yöntemlerinin bazı dezavantajları vardır ve şimdiye kadar bildirilen çalışmaların çoğu laboratuvar ölçeğinde kalmıştır.</li> <li>2. Verimlilik ve ekonomi başlıca sınırlayıcı unsurlardandır.</li> </ol>
<i>Uyarılar</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alüminyum geri kazanımı ölçeklenerek daha ekonomik hale getirilebilir.</li> <li>2. Uçucu kül kaynakları ve geri dönüşüm sahaları arasındaki mesafenin dikkate alınması gerekmektedir.</li> <li>3. Yanmamış karbon, senosfer, alumina ve galyum gibi daha değerli malzemelerin eşzamanlı olarak geri kazanımı yapılabilir.</li> </ol>

Uçucu kül kullanım oranının arttırılmasının birçok temel faydası vardır <sup>10</sup>:

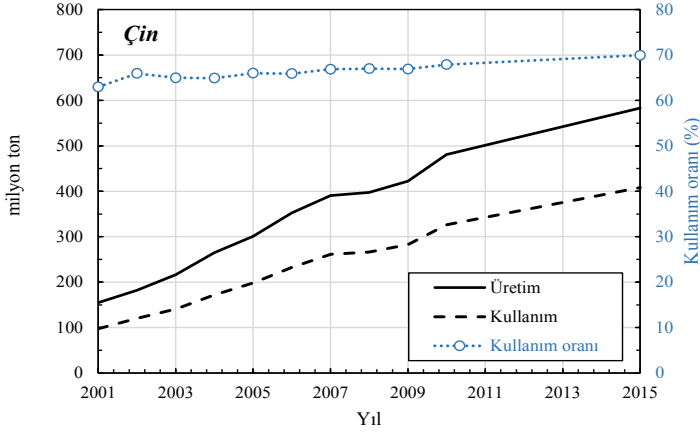
- (i) Artan geri kazanım oranı ile bertaraf masraflarının en aza indirilmesini sağlar;
- (ii) Uçucu külün satışından veya en azından işleme ve bertaraf masraflarının mahsubundan mali kazanımlar elde edilir;
- (iii) Kül barajlarına ve düzenli atık depolama alanlarına olan ihtiyaç azalır; böylece, bu alanların farklı bir şekilde kullanımı mümkün olur;
- (iv) Uçucu küller bazı az bulunan veya pahalı doğal kaynakların yerini alabilir.

### 3.1. MEVCUT KULLANIM EĞİMLERİ

Kömür tüketimi ve dolayısı ile uçucu kül üretimi en yoğun ülkeler A.B.D. <sup>151</sup>, Çin <sup>17</sup> ve Hindistan'dır <sup>152</sup>. Bu ülkeler, ürettikleri külün farklı sektörlerde geri kazanımına büyük önem verirler. Avrupa Birliği ülkelerinin çoğunda kül kullanım oranı son derece yüksektir <sup>17,121,153</sup>. Maalesef, kullanım oranı ülkeden ülkeye büyük farklılık gösterir. Dünya ortalaması yaklaşık %25'tir <sup>15</sup>. Türkiye'de kullanım oranının %25'in de altında olduğu tahmin edilmektedir.

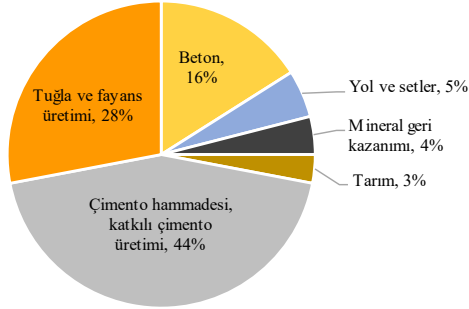
#### 3.1.1. Çin

Çin 600 milyon tona varan uçucu kül üretiminin ~400 milyon tonunu etkin bir şekilde kullanmakta, ~200 milyon tonunu ise bir şekilde depolamakta veya bertaraf etmektedir (Şekil 3-1) <sup>154</sup>. Çin'de halihazırda birincil enerji kaynakları arasında kömürün oranı %60'ın üzerindedir. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük yatırımlar yapmakta olsa da, enerji sektöründe kömürün payının yakın zamanda büyük oranda azalması beklenmemektedir. Bu durum yüksek miktarda uçucu kül üretiminin devamı anlamına gelir. 9,6 milyon m<sup>2</sup> alanındaki ülkede uçucu kül üretimi kuzey batıda, uçucu külün tüketildiği büyük şehirler ise güney doğuda yoğunlaşmıştır. Biriken 3 milyar tona yakın küle her yıl eklenen 200 milyon ton uçucu kül Çin için önemli bir çevresel konu haline gelmiştir.



Şekil 3-1. Çin uçucu kül üretimi, kullanımı ve kullanım oranları <sup>17</sup>

Çin'de üretilen kül Ulusal Kalkınma ve Reform Komisyonu tarafından 2013'te yayınlanan yıllık kaynak kullanımı raporuna göre, başta çimento (%44), tuğla ve fayans (%28) ve beton (%16) üretiminde kullanılmıştır (Şekil 3-2) <sup>154</sup>. Kalan miktar yol ve setlerin yapımında, tarımda ve alümina, manyetit, karbon, senosfer ve galyum gibi değerli malzemelerin geri kazanımında değerlendirilmiştir. Açıklanan verilerin güvenilirliği Greenpeace tarafından sorgulanmış ve gerçekte geri kazanılan kül miktarının yaklaşık %30 olduğu rapor edilmiştir <sup>86</sup>.



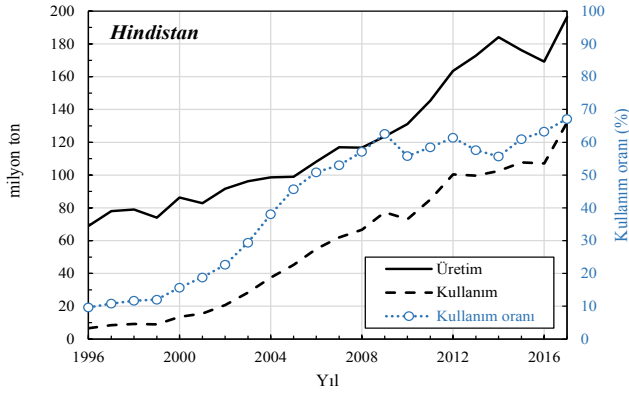
Şekil 3-2. Çin uçucu kül kullanım eğilimleri, 2013 <sup>154</sup>

Çin'de geçtiğimiz yıllarda hızla büyüyen inşaat sektörü yavaşlama eğilimindedir. Bu sebeple, Çin uçucu kül için yeni kullanım alanları açmaya çalışmakta, geri dönüşüm teknolojisindeki yeniliklere ve kullanım ölçeğini arttırmaya büyük önem vermektedir. Buna en büyük örnek alümina geri kazanımında yapılan iyileştirmelerdir. İç Moğolistan ve Shanxi Eyaleti'nde gerek devlet, gerekse yerel yönetim tarafından benimsenen bir dizi teşvik politikası ile uçucu külden yoğun bir şekilde alümina geri kazanılmaktadır. Uçucu külün kullanımı geleneksel inşaat endüstrisi uygulamaları ile sınırlı kalmayıp, katma değeri daha yüksek malzemelerin geri kazanımına yönelmekte ve bu alanda verimi arttırmak için birçok akademik çalışma yapılmaktadır.

### 3.1.2. Hindistan

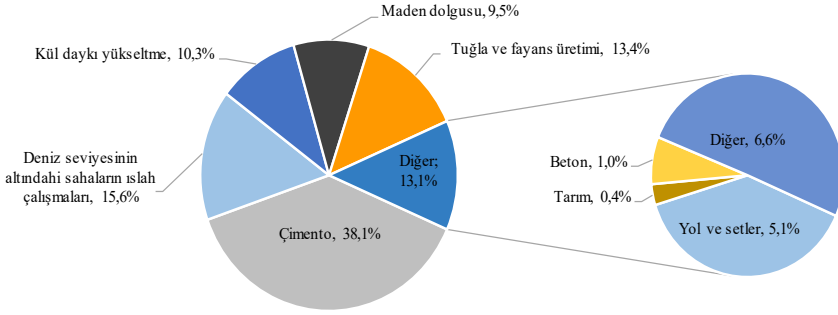
Hindistan'da mevcutta elektrik üretiminin %80'i kömür yakan termik santrallerden karşılanmaktadır. Yakın gelecekte de kömürün rolünün azalması beklenmemektedir. Düşük kaliteli Hindistan kömüründen %30-45 arası kül açığa çıkar. Halihazırda kül üretiminin kül tüketiminin üzerinde olması (Şekil 3-3) her yıl daha da artan bir kül stoğu anlamına gelir. Giderek artan depolama ve bertaraf alanları Hindistan'da önemli bir çevresel sorun haline gelmiştir.

Uçucu külün daha iyi anlaşılması ve farklı sektörlerde kullanımının artırılması için Hindistan hükümeti tarafından yürütülen sistematik teşvik politikaları sayesinde kül kullanım oranı 1996'da %20 civarında iken, 20 yıl sonra %65'in üzerine çıkmıştır.



Şekil 3-3. Hindistan uçucu kül üretimi, kullanımı ve kullanım oranları <sup>18</sup>

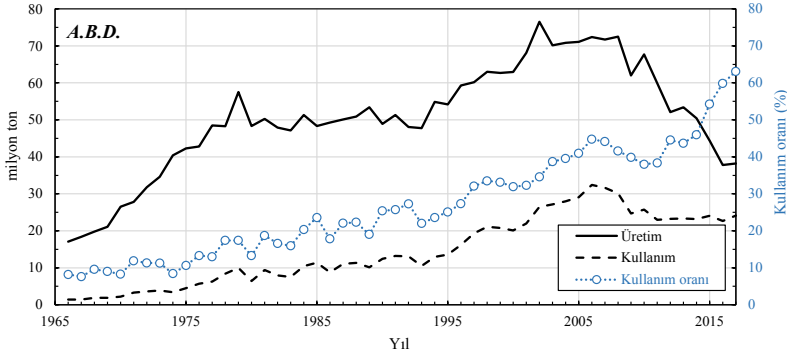
Hindistan'da 2017 yılı için üretilen 196 milyon ton uçucu külün %67'si geri kazanılmış, 64,6 milyon tonu depolanmış ya da bertaraf edilmiştir<sup>18</sup>. Merkezi Elektrik İdaresi'nin 2017-18 yıllarında uçucu kül üretimi-kullanımı raporuna göre uçucu kül en çok çimento (%38,1) sektöründe tüketilmiştir <sup>152</sup>. Sonra sırasıyla ıslah çalışmaları (%15,6), tuğla ve fayans üretimi (%13,4), kül daykının yükseltilmesi (%10,3), madencilik uygulamaları (%9,5), yolların ve setlerin yapımı (%5,1) ve beton üretimi (%1,0) izlemiştir. Hindistan için uçucu kül kullanım eğilimleri Şekil 3-4'te özetlenmiştir.



Şekil 3-4. Hindistan uçucu kül kullanım eğilimleri, 2017 <sup>17</sup>

### 3.1.3. A.B.D.

A.B.D'de tüketilen kömürün %93'ü elektrik sektöründedir. Son yıllarda gerek eskiyen kömür santrallerinin kapatılması, gerekse yerel doğal gaz ve yenilenebilir enerji kaynakların daha etkin ve yaygın kullanımı ile A.B.D. kömüre dayalı elektrik üretimi azalmaktadır. Yıllık uçucu kül üretimi de bu gelişmelere paralel olarak düşmektedir. Uçucu kül kullanım oranı ise uçucu külün geri kazanımına yönelik birikmiş tecrübe birikimi, artan çevresel duyarlılık ve ekonomik avantajlarından dolayı artmaktadır (Şekil 3-5).



Şekil 3-5. A.B.D. uçucu kül üretimi, kullanımı ve kullanım oranları <sup>151</sup>

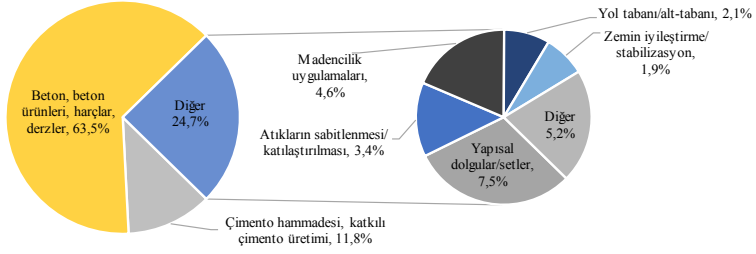
2016 yılı için A.B.D. için kömür yakma ürünlerinin üretim ve kullanım miktarları Tablo 3-2'de detaylandırılmıştır. Yakma ürünlerinin %35'i (37,8 milyon ton) pulverize uçucu kül olmuştur. Üretilen uçucu külün sadece 22,6 milyon tonu (%60) çeşitli uygulamalarda kullanılmış; kalanı bertaraf edilmiştir. A.B.D. uçucu kül kullanım eğilimleri Şekil 3-6'da özetlenmiştir.

Tablo 3-2. A.B.D. kömür yakma ürünleri üretim ve kullanım anketi sonuçları, 2016 <sup>155</sup>

	Uçucu kül	Taban külü	Kazan cürufu	BGD malzemeleri <sup>(3)</sup>				AYT külü <sup>(2)</sup>	Toplam
				Alçı	IY	KY	Diğer		
Üretim (bin ton)	37.817	10.135	2.188	32.007	9.557	1.449	7,5	14.267	107.428
Kullanım (bin ton)	22.634	3.775	1.311	18.373	896	311	-	12.869	60.170
Kullanım Oranı (%)	59,9	37,3	59,9	57,4	9,4	21,4	-	90,2	56,0
Beton, beton ürünleri, harçlar, derzler	14.363	504	-	469	-	-	-	-	15.336
Çimento hammadesi, katkılı çimento üretimi	2.681	1.016	35	1.009	0	52	-	-	4.792
Yapısal dolgular/setler	1.696	745	-	1.490	896.141	-	-	-	4.828
Madencilik uygulamaları	473	246	-	-	-	-	-	-	718
Atıkların sabitlemesi/katılaştırılması	433	43	-	2	-	-	-	-	478
Yol tabanı/alt-tabanı	255	3	-	177	-	-	-	-	435
Zemin iyileştirme/stabilizasyon	190	-	-	-	-	8	-	-	198
Kömür yakma atığı havuzu kapama işlemleri	84	-	-	-	-	-	-	-	84
Petrol/gaz sahası hizmetleri	41	-	11	-	-	9	-	-	60
Akrıcı dolgu	3	4	-	770	-	1	-	-	778
Asfalt için mineral dolgu malzemesi	-	343	12	-	-	-	-	-	356
Tarım	-	18	1.253	-	-	-	-	-	1.271
Kar ve buz kontrolü	-	-	-	9.919	-	-	-	-	9.919
Püskürtme kumu, çatı granülleri	-	206	-	-	-	-	-	-	206
Alçı levha ürünleri	473	246	-	-	-	-	-	-	718
Agrega	433	43	-	2	-	-	-	-	478
Diğer uygulamalar	606	117	-	110	-	-	-	-	833

<sup>(1)</sup> 2016 yılında senosier satılmamıştır.

<sup>(2)</sup> AYT: Akışkan yatak teknolojisi; <sup>(3)</sup> BGD: Baca gazı desülfürizasyonu; IY: Islak yıkayıcı; KY: Kuru yıkayıcı



© Pulverize kömür yakan termik santral uçucu külleri için

Şekil 3-6. A.B.D. uçucu kül<sup>(c)</sup> kullanım eğilimleri, 2016

Kullanılan uçucu külün, %63,5'i beton, beton ürünü, harç veya derz imalatında kullanılmıştır. Çimento hammaddesi veya katkılu çimento üretiminde kullanılan uçucu kül oranı %11,8'dir. Bu oran, yapısal dolgu ve setlerde %7,5; atıkların sabitlenmesinde ve katılaştırılmasında %3,4; madencilik uygulamalarında ise %4,6 olmuştur. Belirtilen oranlar seneden seneye değişiklik gösterse de, uçucu kül için ana kullanım alanı çimento ve beton sektörü olarak kalmaktadır. Üretilen 14,3 milyon ton akışkan yatak külünün ise 12,9 milyon tonu (%90) madencilik uygulamalarında kullanılmıştır.

### 3.1.4. Diğer ülkeler

İngiltere inşaat sektöründe UK kullanımı oldukça yaygındır. UKQAA tarafından hazırlanan bir rapora göre, 2014 yılında üretilen 4 milyon ton UK'ün 2 milyon tondan fazlası çimento fabrikalarında doğrudan klinkere eklenmekte, prekast beton ve beton bloklarda çimento ikame malzemesi olarak katılmakta ve toprak stabilizasyonunda kullanılmaktadır<sup>624</sup>. EN 450 ve BS 8500 gibi farklı standartlar ile yüklenici firmalar inşaatlarda UK kullanmaya teşvik edilmektedir. Fakat, İngiltere 2024 yılına kadar tüm kömür yakan termik santralleri kapatmayı planlamaktadır. Değişen bu arz-talep dengesini düzenlemek iki farklı çözüm önermektedir: yurtdışından UK ithal etmek ve depolanan UK'leri yeniden değerlendirmek<sup>625</sup>.

Avrupa Birliği Kömür Yakma Ürünleri Birliği'nin (ECOBA) açıkladığı verilere göre AB15 ülkelerinde 2016 yılı toplam kömür yakma ürünü üretim miktarı 40 milyon ton civarındadır. AB ülkelerinin çoğunda kül kullanım oranı (Danimarka, İtalya ve Hollanda'da %100, Almanya ve Fransa'da %85) oldukça yüksektir<sup>17,121,153</sup>. ECOBA'ya göre 2010 yılı Avrupa kömür yakma ürünlerinin üretim ve kullanım verileri Tablo 3-3'te sunulmuştur. Buna göre, üretilen yakma ürünlerinin %65'i (31,6 milyon ton) uçucu küldür. Üretilen uçucu külün %93'ü (29,5 milyon ton) farklı uygulamalarda etkin bir şekilde değerlendirilmiştir. İngiltere gibi Avrupa Birliği ülkelerinde de kömür kaynaklı enerji üretimi aşamalı olarak azaltılmaktadır. Almanya en geç 2038'de kömür yakıtlı termik santralleri kapatacağı duyurmuştur. İleride yerel arz-talep dengesinin bozulması ile yurtdışından UK ithali ve depolanan UK'leri yeniden değerlendirilmesi önem kazanacaktır.



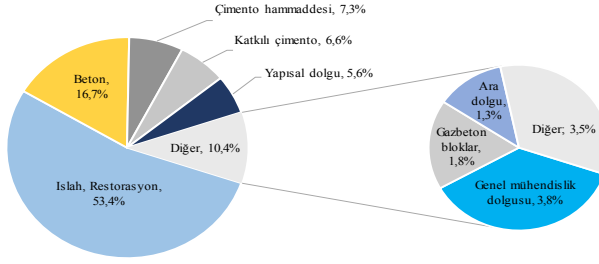
Tablo 3-3. Avrupa Birliği (AB 15) kömür yakma ürünleri üretim ve kullanım değerleri, 2010 <sup>156</sup>

	Uçucu kül	Taban külü	Kazan çürüfütü	AYT küfütü <sup>(1)</sup>	SKA ürünleri <sup>(1)</sup>	BGD alçığı <sup>(1)</sup>	Diğfer <sup>(2)</sup>
Üretim (bin ton)	31.616	4.052	-	1.000	912	10.227	107
Kullanım (bin ton)	29.556	3.973	1.000	1.000	699	9.110	104
Kullanım oranı (%)	93	98	100	100	77	89	97
İslah, restorasyon	15.771	2.083	-	488	41	1.023	53
Beton	4.947	62	3	-	-	-	-
Çimento hammaddesi	2.152	178	-	24	-	-	-
Katkılı çimento	1.947	1	-	5	-	-	-
Yapısal dolgu	1.668	120	-	22	142	-	-
Genel mühendislik dolgusu	1.126	393	-	42	-	-	-
Gaz beton bloklar	536	8	-	-	-	-	43
Ara dolgu	380	-	-	48	76	-	-
Derz dolgusu	253	-	36	-	-	-	-
Beton bloklar	224	790	-	-	-	-	-
Alt-taban stabilizasyonu	154	140	-	40	-	-	-
Zemin ıslahı	115	-	-	-	2	-	-
Tuğla + seramik	83	16	-	-	-	-	-
Asfalt dolgu malzemesi	59	-	-	-	-	-	-
Yol tabanı	5	144	-	315	-	-	-
Hafif agrega	-	18	-	-	-	-	-
Püskürtme kumu	-	-	620	-	-	-	-
Bitki besini	-	-	-	-	-	-	-
Çimento için geciktirici	-	-	-	-	-	612	-
Püskürtme sıva alçısı	-	-	-	-	-	694	-
Alçık levha ürünleri	-	-	-	-	-	5.171	-
Alçık bloklar	-	-	-	-	-	256	-
Kendiliğinden yerleşen zemin şapları	-	-	-	-	-	1.300	-
Diğfer kullanımlar	136	20	26	30	46	54	8
Geçici depolama	201	87	-	6	-	765	3
Bertaraf	2.260	87	-	207	447	-	106
Depolanmış ürünlerin yeniden kullanımını	401	95	-	-	-	95	-

<sup>(1)</sup> AYT: Akışkan yatak teknolojisi; SKA: Sprey kurutucu absorpsiyon sistemleri; BGD: Baca gazı destüflürizasyon

<sup>(2)</sup> Senosterler, atık çamurlar, kömür gazlaşmasında gelen uçucu kül ve çürük

Kullanım eğilimleri Şekil 3-7’de özetlenmiştir. Uçucu kül kullanımında yapı sektörü uygulamaları Avrupa için de lider konumdadır. Kullanılan uçucu külün %53’ü arazi ıslahı ve restorasyonunda, %16,7’si beton üretiminde, %13,9’u çimento hammaddesi olarak veya katkılı çimento üretiminde, %5,6’sı yapısal dolgularda yer bulmuştur.



Şekil 3-7. Avrupa Birliği (AB 15) için uçucu kül kullanım eğilimleri, 2010

Maalesef, kullanım oranı ülkeden ülkeye büyük farklılık gösterir. Dünya ortalaması yaklaşık %25’tir<sup>15</sup>. Afrika ve Türkiye’ye ait uçucu kül üretim ve kullanım verileri oldukça yetersizdir. Türkiye 2015 uçucu kül üretimi yaklaşık 19 milyon ton olarak tahmin edilmiştir. Bu üretimin, %80’inin atık olarak depolandığı ya da denize döküldüğü öngörülmektedir<sup>51</sup>. Bazı ülkeler için detaylı güncel uçucu kül kullanım verilerine ulaşmak oldukça zordur.

Ülkeler arası genel bir kıyaslama yapabilmek için 2010 yılı için kömür yakma ürünlerine (uçucu kül, taban külü, kazan cürufu gibi tüm ürünler) ilişkin üretim ve kullanım tahminleri Tablo 3-4’te verilmiştir.

Tablo 3-4. Yıllık kömür yakma ürünleri üretim ve kullanım tahminleri, 2010<sup>157</sup>

Ülke	Üretim (milyon ton)	Kullanım (milyon ton)	Kullanım oranı (%)	Üretim (milyon ton/kişi)	Kullanım (milyon ton/kişi)
A.B.D.	118,0	49,7	42,1	0,37	0,16
Avrupa (AB15)	52,6	47,8	90,9	0,11	0,10
Avustralya	13,1	6,0	45,8	0,60	0,27
Çin <sup>(*)</sup>	395,0	265,0	67,1	0,29	0,20
Diğer Asya <sup>(*)</sup>	16,7	11,1	66,5	0,05	0,03
Hindistan <sup>(*)</sup>	105,0	14,5	13,8	0,09	0,01
Japonya	11,1	10,7	96,4	0,09	0,08
Kanada	6,8	2,3	33,8	0,20	0,07
Orta Doğu ve Afrika	32,2	3,4	10,6	0,02	0,01
Rusya Federasyonu	26,6	5,0	18,8	0,19	0,04

<sup>(\*)</sup> Dünya Kömür Yakma Ürünleri Konseyi (WWCCPN) üyesi olmayan ülkeler

## 3.2. YAPI SEKTÖRÜ

Uçucu küller en yoğun yapı sektöründe kullanılır. Bu sektörde uçucu külün kendine yer bulduğu başlıca alt alanlar: çimento ve beton üretimi; zemin iyileştirme; stabilizasyon ve dolgu uygulamaları; hafif agrega üretimi; blok malzeme üretimi; jeopolimer üretimi ve mineral yün üretimidir. Ayrıca, uçucu kül yeni yeni gelişmekte olan 3-boyutlu yazdırılabilir beton uygulamalarında da sıklıkları kullanılmaktadır.

Yapı malzemeleri piyasaya sunulurken ürünün kullanıma uygunluğu uyumlaştırılmış standart kapsamında CE ile; iç piyasaya sunulurken ise eğer mevcut standart kriterlere göre değerlendirildiğinde uygun olmayan bir parametre söz konusu ise Ulusal Teknik Onay (UTO) ile yönetilebilir. “UTO, yapı malzemelerinin kullanım amaçlarına göre asgari olarak Türkiye’de yürürlükte bulunan temel gerekleri karşıladığını gösteren bir teknik şartnamedir.” Ulusal Teknik Onay’ın temel ve yasal dayanağını G Yönetmeliği oluşturur. Bu yönetmeliğe göre, bir standart kapsamında olmayan ürünlerin uygunluk değerlendirme ile teyit edilecek performans değerlerinin “G” işareti ile beyan edilmesi ürüne düzenlenecek Ulusal Teknik Onaya göre yapılabilmektedir.

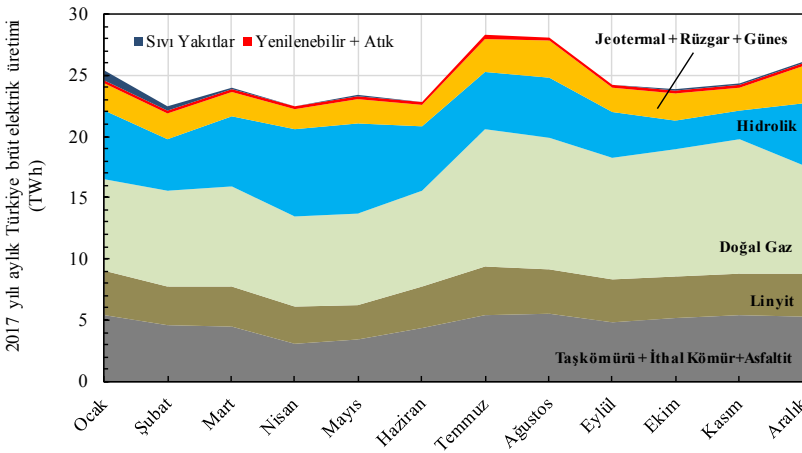
### 3.2.1. Çimento ve beton sektörü

Beton, bağlayıcı bir matrikse gömülü agrega parçalarından oluşan kompozit bir malzemedir. Çimento, agrega ve suyun yanı sıra gerektiğinde mineral ve kimyasal katkıların birlikte karılması sonucu elde edilir. Nihai ürün olması sebebiyle işlenebilirlik, dayanım ve kalıcılık beklenir. Aynı zamanda düşük maliyetli, yüksek su ve yangın direncine sahip, istenilen formda üretilebilen bir malzeme olan beton, çevresel etmenlere karşı yüksek dayanıklılık gösterir ve çoğu coğrafyada kolaylıkla ulaşılabilir malzemelerden imal edilir. Bu özellikler, betonu dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi haline getirmiştir.

Her yıl kullanılan milyarlarca ton beton için milyarlarca ton çimento, agrega ve su tüketilir. Bu denli büyük bir tüketimin çevresel etkilerinin olması kaçınılmazdır. Günümüzde artan çevresel bilince paralel olarak ulusal ve uluslararası çevresel politikalar da giderek katılaşmaktadır. Çimento ve beton sektörü gerek büyük miktarda doğal kaynak ve enerji tüketmesi, gerekse çimento üretimi kaynaklı başta CO<sub>2</sub> olmak üzere emisyonların yüksek olması sebebi ile eleştirilmektedir. Bu haklı eleştiriler alternatif çözüm yollarıyla aşılmaya çalışılmaktadır.

Endüstriyel atıkların etkin kullanımı ile hem çimentonun, hem de sıva, harç ve beton gibi çimento temelli sistemlerin üretiminde doğal kaynak ve enerji gereksinimi azaltılmakta, maliyet tasarrufu sağlanmakta ve sera gazı salımları ciddi oranlarda düşürülmektedir<sup>158</sup>. Böylece çimento temelli sistemler çok daha sürdürülebilir olarak üretilebilmektedir. Kömür yakıtlı termik santrallerden açığa çıkan uçucu küller kolay ulaşılabilir olmaları, kimyasal yapılarının uygunluğu ve öğütme ihtiyaçlarının düşük olması gibi sebeplerden dolayı bu sektörde en çok yer bulan endüstriyel atıklar arasındadır. Günümüzde çimento ve beton sektörü uçucu külün en yaygın kullanım alanı haline gelmiştir.

Uçucu külün çimento ve beton sektöründe kullanımı mevsimsellikten oldukça etkilenir. Zira, birçok ülkede termik santrallerde kömür yakılması mevsimselliğe bağlıdır ve uçucu kül üretiminin büyük bir kısmı kış aylarında gerçekleşir. Lakin, çimento ihtiyacı inşaat koşullarının en uygun olduğu yaz aylarında zirve yapar. İki sektörün yoğunluklarının farklı zamanlarda artması, uçucu kül içeren çimento ve betonların üretiminde ek malzeme depolama maliyetini beraberinde getirir <sup>159</sup>. Ayrıca, bazı ülkelerde, yaz aylarında kömür yakımının sadece çift vardiya (sabah ve akşam saatlerinde) yapılmasına izin verilmektedir <sup>108</sup>. Bu durum, yanma verimini düşürerek oluşan uçucu külün kızdırma kaybının, dolayısıyla da yanmamış karbon oranının artmasına sebep olabilir. Ülkemizde kömür kaynaklı enerji üretimi oldukça stabil olup (Şekil 3-8), diğer ülkelerde yaşanan dalgalanma problemleri gözlenmez.

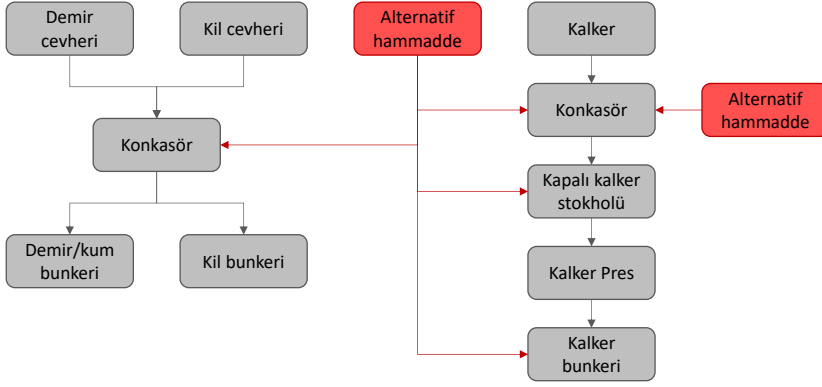


Şekil 3-8. 2017 yılı için Türkiye brüt elektrik üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre aylık dağılımı <sup>160</sup>

Uçucu kül bu sektöre iki ana şekilde dahil edilebilir: çimento klinkeri üretiminde ham madde olarak, ya da katkı çimento ve beton üretiminde çimento ikame malzemesi olarak <sup>161</sup>. Uçucu külün çimento ve beton sektörlerindeki temel kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir.

### 3.2.1.1. Çimento klinkeri üretimi

Çimento kuru, yarı kuru, yarı yaş ve yaş işlem üretim prosesleri ile üretilebilir. Uçucu kül, çimento üretimi için son derece uygun bir malzemedir <sup>162</sup> ve tüm bu farklı çimento üretim proseslerinde farin bileşeni olarak etkin bir şekilde kullanılabilir, (Şekil 3-9). Yüksek oranda  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  içeren uçucu kül ile farin karışımında kil ve şist gibi doğal ham maddeler kısmi olarak ikame edilebilir.  $Fe_2O_3$  içeriği yüksek küller ise farin içerisindeki demir dengesine de katkı yapar; böylece doğal demir cevherleri korunur.



Şekil 3-9. Alternatif ham madde ile farin hazırlama işlemi <sup>163</sup>

Ülkemizdeki tesislerin tamamına yakınında daha enerji-etkin bir proses olan kuru-işlem ile çimento üretimi yapılır. Bu proseste, uçucu kül diğer ham maddeler ile önceden karıştırılır ya da yanma bölgesine doğrudan verilir. Oluşan klinker çoğunlukla yeterli homojenlik gösterir. Uçucu kül doğrudan yanma bölgesine beslendiğinde klinker fazlarında bir miktar heterojenlik gözlenebilir. Nadir kullanılan yaş işlem üretim proseslerinde ise uçucu kül, ham madde bulamacına kül özelliklerine ve bulamaç davranışına uygun oranlarda eklenir. Örneğin, yüksek kalsiyumlu bir uçucu külün kullanılması, bulamacı kalınlaştırabilir ve bu nedenle gerekli akışkanlığın korunması için ek su ya da bulamaç inceltici ihtiyacı doğurabilir.

Kuru ya da yaş işlem ile çimento üretiminde kil ve şişt ikamesi olarak kullanılmak üzere temin edilen uçucu külün ilk olarak kompozisyon değişkenliğinin sınırlı olması istenir. Böylece, uygun farin bileşimini korumak için sık sık yapılması gereken, maliyet ve zaman isteyen kontrol ve ayarlamalar azaltılabilir. Uçucu külden aranan diğer bazı temel özellikler Bhattı'nın 2006'daki çalışmasını temel alarak aşağıda özetlenmiştir <sup>164</sup>:

- *Kimyasal kompozisyon:* Kullanılacak uçucu külün kimyasal kompozisyonu ikame edilecek ham maddeler ile kıyaslanır olmalıdır. Standart limitlerine uygun kompozisyona sahip bir çimento elde etmek için (örneğin eşdeğer  $\text{Na}_2\text{O}$  limiti) farin karışımı eklenen uçucu külün özellikleri göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenir.
- *Tane boyu dağılımı:* Çimento üretiminde farinin %80'i  $75\mu\text{m}$ 'nin altındadır. Uçucu külün doğası gereği neredeyse her zaman ince taneli olması çeşitli işleme ve işletim avantajları sağlar; ön-işleme gerekmeksizin kolayca farin ile harmanlanabilir. İnce tane boyutu, geniş bir özgül yüzey sağlar. Yakın partikül-partikül etkileşimi farinin yüksek sıcaklıktaki kalsinasyonunu iyileştirirken, klinkerleşme sürecinde kireç ile reaktiviteyi artırır.
- *Nem seviyesi (kuru veya yaş uçucu kül):* Çimento üretiminde kullanılan ham maddeler çoğunlukla kurudur. Çimento fabrikaları, kullanım kolaylığı için kuru, serbest-akan partiküllü malzemeleri tercih eder. Kuru uçucu külün avantajı, kolay taşınabilmesi (yükleme / boşaltma) ile ön-işleme ve öğütme

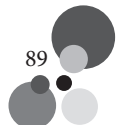
olmadan farin ile karıştırılabilmektedir. Fakat, günümüzde uçucu kül sadece kuru olarak depolanmaz. Hidrolik kül taşıma sistemleri ile taşınıp kül barajlarında da depolanabilir. Bu durumlarda, külün kullanılmadan önce yeterince kurutulması gerekir. Zira, kuru küllere kıyasla, yaş küllerin - özellikle kuru-işlem çimento fabrikalarında - farin ile harmanlanması zordur. Yaş-işlem çimento fabrikalarında ise farine yapılacak uçucu kül ikamesi için ayrı bir değerlendirme gerekebilir.

- Mineralojik içerik: Uçucu külün yüksek sıcaklıkta diğer çimento ham maddeleri ile birleştirilebilirliği, uçucu külün camsı içeriğinden etkilenir. Camsı içerik, klinkerleşme sırasında kalker zengini farinin reaktivitesini artırır.
- *Yakıt değeri:* Çoğu alanda kendine yer bulamayan yüksek yanmamış karbon içeriğine sahip uçucu küllerin farinde kullanımı ile çimento üretiminde ciddi yakıt tasarrufu sağlanabilir <sup>165,166</sup>. Ham madde olarak kullanılacak bu tip küllerin sıcaklığa göre davranışı, ısı salınan kritik termal noktaları ve yakıt değeri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile belirlenir. Elde edilen DSC eğrilerinde 450°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda büyük ekzotermik pikler karbon içeriğinden kaynaklanan enerji içeriğinin varlığını, 450°C'nin altındaki negatif pikler ise uçucu külün ısı alma kapasitesini gösterir. Bu özellikleri ile yüksek yanmamış karbon içeriğine sahip uçucu küller ön-ısıtıcıda farinin ve döner fırın içerisindeki zincir bölgelerinin aşırı ısınmasını önlemek için kullanılabilir. Uçucu küller üzerinde yapılan kızdırma kaybı deneyleri de mevcut külün yakıt değerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu tip küllerin ikamesi ile yapılan yaş-işlem çimento üretimlerinde hazırlanan bulamaçta hafif karbon parçacıklar yüzerek ayrışabilir.
- Emisyon performansı: Uçucu küllerin - özellikle yüksek yanmamış karbon içeriğine sahip küllerin - çimento üretimi kaynaklı emisyonlara etkisi de üzerinde durulması gereken bir husustur. Eğer kül içerisindeki karbon yanma için kullanıldan daha düşük bir sıcaklıkta buharlaşırsa açığa çıkan uçucu organik bileşen (UOB) emisyonlarını arttırabilir. Bu sebeple, toplam organik karbon (TOC) emisyon limitlerinin olduğu ülkelerdeki süspansiyonlu önısıtıcı fırın sisteminin kullanıldığı fabrikalarda bu tür küllerin farin değirmeninde öğütülmesi kısıtlanabilir. Bununla birlikte, eski yarı-kuru ızgaralı önısıtıcı (LEPOL) fırınlarda farin hazırlığı için yüksek karbonlu uçucu kül kullanıldığında TOC sorun olmayabilir. Uçucu külün doğrudan yanma bölgesine beslenmesi ile bu sorun önlenecektir. DSC eğrisinde 400°C'nin altındaki ekzotermik piklerin yokluğu külün farin içerisinde kullanıldığında UOB emisyonlarına sebep olmayacağını gösterir.

Akışkan yatak külü ve taban külü gibi yüksek silika ve alumina oksit içeren diğer küller de çimento üretiminde ham madde olarak kullanılabilir.

### 3.2.1.2. Çimento ikame malzemesi

Uçucu küller uygun kimyasal ve mineralojik yapıları, kolay ulaşılabilir olmaları ve düşük öğütme ihtiyaçları sebebi ile katkılı çimento ve beton üretiminde çimento ikamesi olarak en sık kullanılan endüstriyel atıklardır. İkame malzemesi olarak



uçucu külün kullanımı ile enerji tüketimi ve maliyetlerde önemli bir tasarruf sağlanırken, sera gazı salımları da ciddi miktarlarda azaltılabilir<sup>158</sup>. Yüksek kalorili taş kömüründen düşük kalorili yerel linyite birçok farklı kömürün yakıldığı Türkiye çok geniş bir uçucu kül yelpazesine sahiptir. Bazı küller her hangi bir işlem yapılmadan doğrudan, bazıları ise kısmi ayırma ve öğütme işlemleri sonunda Kısım 2.5'te özetlenen şartlar sağlandığı sürece katkılı çimento ve beton üretiminde kullanılabilir<sup>167</sup>.

Çimento fabrikalarında kalite kontrol süreçleri beton santrallerine kıyasla daha iyi tanımlanmıştır. Bu sebeple, günümüzde ikame malzemelerinin betondan ziyade katkılı çimento üretiminde kullanımı daha yaygındır. Puzolanik özelliği olan, uygun seçilmiş bir uçucu külün katkılı çimento üretiminde kullanımı ile birim üretim başına düşen klinker miktarı büyük ölçüde azaltılabilir. Böylece hem enerji ve maliyet tasarrufu sağlanır, hem de CO<sub>2</sub> salımları düşer. Ayrıca, alternatif ham madde kullanımı doğal kaynaklara olan ihtiyacı azaltır ve doğal kaynak kullanımından doğan çevresel ayak izini iyileştirir. Uçucu kül katkılı çimentonun kullanıldığı sistemler yüksek dayanıklılık, düşük hidratastın ısısı ve eşdeğer ya da daha yüksek dayanım gösterirler. Erken beton dayanımları bir miktar düşük olsa bile nihai ürünün kalitesine her hangi bir olumsuzluk gözlenmez.

Uçucu kül ikamesi beton üretimi esnasında da yapılabilir. İkame miktarı genellikle ağırlıkça % 15-35 arasında değişir. Yol ve otopark gibi yapılarda ağırlıkça % 70'e, otoklavlanmış gaz betonda ise % 80'e kadar çıkabilir<sup>168</sup>. Bu durum, aksi takdirde depolanacak olan bu yan-ürünün, çevresel etkilerini ve depolama maliyetlerini asgariye indirerek ekonomik ve çevresel açıdan birçok fayda sağlar<sup>169</sup>. TS EN 450-1 standardında "Betonda kullanılan uçucu kül" termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu ortaya çıkan, puzolanik özellik gösteren, çoğunlukla küresel ve camsı taneciklere sahip ince toz alüminosilikatlar olarak tanımlanır<sup>144</sup> ve beton için kullanılacak uçucu külü pulverize kömür yakan termik santrallerden elde edilenler ile sınırlar.

İkame malzemesi olarak kullanılacak uçucu kül standartlara uygun olsa bile tanelerin şeklinden ve boyut dağılımından dolayı taze betonun su ihtiyacı, işlenebilirlik ve pompalanabilirlik gibi reolojik özellikleri üzerinde her zaman olumlu etki yaratmayabilir. Genellikle küresel ve yüzeyi pürüzsüz küller taze betonun reolojik özelliklerini iyileştirirken, şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip küller kötüleştirilebilir. Uçucu küllerin kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklerinin çok geniş bir yelpazeye yayıldığı ülkemizde, çimento temelli sistemlerde kullanılması planlanan uçucu külün uygunluğu önceden araştırılmalıdır.

Çimento temelli sistemlerde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise termik santrallerde kullanılan *DeNO<sub>x</sub>* üniteleridir. Kömür yakıtlı termik santrallerde baca gazının arındırılması için, düşük *NO<sub>x</sub>* brülörlerin ve amonyak kullanan ( $NH_3 + NO_x \rightarrow N_2 + H_2O$ ) seçici, seçici olmayan veya hibrit sistemlerin tercih edilmesi uçucu külün kızdırma kaybı oranını arttırabilir<sup>170</sup>. Yüksek karbon içeriği, uçucu kül içeren çimento temelli sistemlere eklenenecek olası hava sürükleyici katkıların etkinliğini azaltır. Betonda renk bozulmalarına ve taze beton karışımında ayırışmalara sebep olabilir<sup>171</sup>.



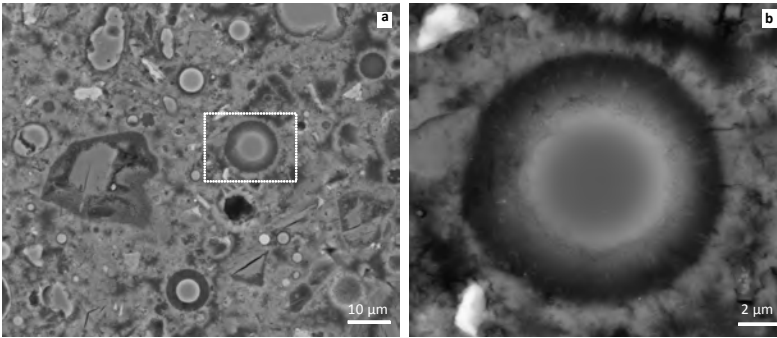
### 3.2.1.2.1. Etki mekanizması

Uçucu küller  $CaO$  içeriğine bağlı olarak kendinden bağlayıcı veya puzolanik olarak değerlendirilir. Portland çimentosu temelli sistemlerde kullanılan çoğu uçucu kül puzolanik özellik göstermekte<sup>172</sup>; yüksek kalsiyum içeren bazı uçucu küller ise puzolanik özelliğe ek olarak kendinden bağlayıcılık özelliği de taşımaktadır<sup>173,174</sup>. Uçucu küllerin, çimento temelli sistemlerde bu kadar etkin olmasının sebebi, nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta çimento hidrasyonu sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$  ile kimyasal reaksiyona girip bağlayıcı özellikteki bileşenler üretmeleridir<sup>175</sup>. Ayrıca, bu reaksiyon sonunda kapiler gözeneklerin toplam hacim ve boyutunda azalma gözlenir. Bu durum da dayanıma olumlu etki eder. Puzolanik reaksiyon adı verilen bu reaksiyonun ana aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

Tablo 3-5. Puzolanik reaksiyon

Reaksiyon	Reaksiyon süresi
<i>Kalsiyum silikat hidrasyonu</i>	
$2C_2S + 6H \xrightarrow{\text{hızlı}} C-S-H + CH$	Saatlerden günlere
$2C_2S + 4H \xrightarrow{\text{hızlı}} C-S-H + CH$	Günler
<i>Puzolanik reaksiyon</i>	
$\text{Uçucu kül} + CH + H \xrightarrow{\text{yavaş}} C-S-H$	Günlerden aylara

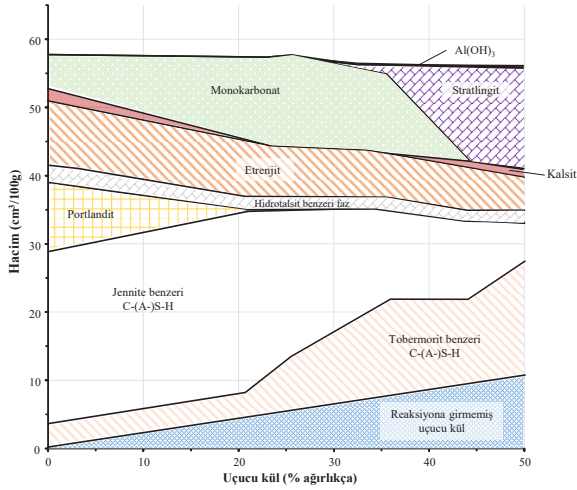
Uçucu kül ile kalsiyum hidroksit arasında kül tanelerinin yüzeyinde başlayan bu ikincil reaksiyon, ana çimento hidrasyonu reaksiyonlarına göre oldukça yavaştır. İkincil reaksiyonların hızı kül yüzeyinin yapısından büyük ölçüde etkilenir. Bazalt andıran camı fazlar daha hızlı çözülürken, mullit ve kuvarın çözülme hızları çok daha düşüktür<sup>176</sup>. İkincil reaksiyonlar ortam koşullarına göre zamanla kül tanesinin merkezine doğru ilerler; fakat, çoğunlukla kül tanesi tükenmeden durur. Ortalama tane boyutu büyüdükçe reaksiyon hızı ve reaksiyon tamamlanma oranı düşer. Bu sebeplerle, bir külün yüzey yapısı ve ortalama tane boyutu nihai sistemin performansını büyük ölçüde etkiler. Şekil 3-10'da ikincil reaksiyonların büyük ölçüde yavaşladığı hidrate olmuş bir portland çimentosu-düşük kalsiyumlu uçucu kül numunesi görülmektedir<sup>177</sup>.



Şekil 3-10. 2 yıllık hidrate olmuş %20 çimento - %80 düşük kalsiyumlu uçucu kül numunesi için geri saçılmış elektron (BSE) görüntüsü<sup>177</sup>.



Farklı oranlarda düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren portland çimentosu temelli sistemler için termodinamik modelleme aracılığı ile hesaplanan hidratlar hacimce Şekil 3-11'de sunulmuştur<sup>178</sup>. Düşük kalsiyumlu küllerin yüksek *Al* içeriği, alüminyumca zengin fazların oluşumunu desteklemektedir. *C-S-H*'in yapısına bir miktar *Al* girer; fakat, bu konudaki sistematik bilgiler henüz eksiktir. Hesaplamalarda *C-(A-)S-H* için *Al/Si* oranı 0,1 olarak alınmıştır. Bu sebeple, hesaplamalarda hata payı olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Uçucu kül ikamesi ile, hidrate sistemde portlandit kararsızlaşırken daha düşük *Ca/Si* oranına sahip ilave *C-(A-)S-H* oluşmaktadır. Uçucu küller önemli miktarda  $Al_2O_3$  ve düşük oranda  $SO_3$  içerir; bu durum, ikili sistemlerde etrenjitin azalmasına ve AFm içeriğinin ise artmasına neden olur. %40'dan yüksek uçucu kül ikamesi monokarbonatı tamamen kararsızlaştırır. Daha yüksek ikame oranlarda etrenjit de kararsız hale gelir. Ayrıca, yüksek oranlarda uçucu kül ikamesi stratlingit oluşumunu destekler.

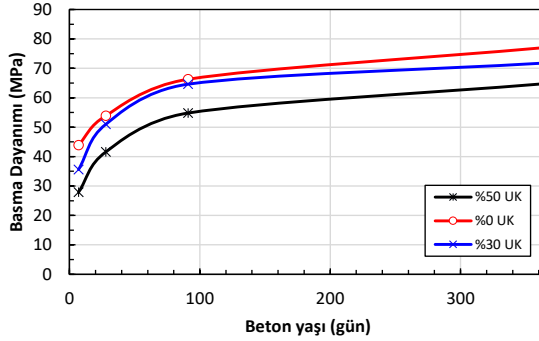


Şekil 3-11. Termodinamik modelleme ile Portland çimentosu - düşük kalsiyumlu uçucu kül sistemlerinde oluşan hidratların tahmini (Hesaplamalarda portland çimentosunun tamamının reaksiyona girdiği varsayılmıştır. Hidratlar 100 g hidrate olmamış bağlayıcı başına düşen hacim olarak sunulmuştur.)<sup>178</sup>

### 3.2.1.2.2. Teknik performans

Uçucu kül ikamesinin çimento temelli sistemlerin teknik performansına etkisi esas olarak puzolanik reaksiyonun üç ana özelliğinden kaynaklanır<sup>161</sup>. İlk olarak, yavaş gelişen puzolanik reaksiyonlar sebebi ile hidrasyon ısı çıkışı ve dayanım gelişimi yavaşlar. İkinci olarak, puzolanik reaksiyon sonunda  $Ca(OH)_2$  üretimi yerine tüketimi gerçekleşeceği için hidrate çimento matrisinin asidik ortamda durabilitesi önem kazanır. Üçüncü olarak uçucu kül içeren çimento temelli sistemlerdeki gözenek boyu dağılımları incelendiğinde reaksiyon ürünlerinin kapiler boşlukları doldurmada çok daha verimli olduğu görülür; böylece sistemin dayanımı ve sızdırmazlığı artar.

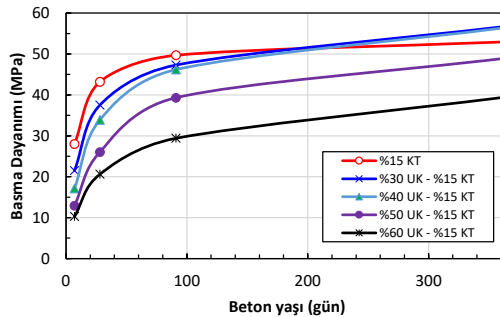
Uçucu küllerin uygun kullanımı ile betonda yeterli hatta daha üstün teknik performans elde edilebilmektedir<sup>179</sup>. Uygun hazırlanmış uçucu küllü bir betonun işlenebilirliği daha yüksek, hidrasyon ısı ise daha düşüktür<sup>180</sup>. Bu betonlarda büzülme çatlak oluşumu azalır; beton karışımları daha zor ayrışır, daha az terler, daha rahat pompalanır; yüksek geçirimsizlik gösterir, çevresel etmenler sebebiyle oluşabilecek bozulmalara karşı daha dayanıklıdır<sup>1,11,102,105,161,181</sup>. Bu tip betonların kullanımını sınırlayan temel sebep bu bağlayıcılar ile hazırlanan betonların erken yaş (<14 gün) dayanımlarının çoğunlukla istenilen seviyede olmamasıdır<sup>65,182,183</sup>. Erken yaş basınç dayanımları bir miktar düşük olsa bile, ileri yaş dayanımları neredeyse aynı, hatta bazen daha yüksek seviyelere ulaşır. Şekil 3-12'de düşük-kalsiyumlu uçucu kül ikamesi ile hazırlanan kendinden yerleşen betonlar için dayanım değerleri sunulmuştur<sup>102</sup>.



(UK: Uçucu kül, KT: Kireçtaşı tozu)

Şekil 3-12. Farklı oranlarda düşük-kalsiyumlu uçucu kül içeren betonlar için basma dayanımı (MPa)<sup>102,105</sup>

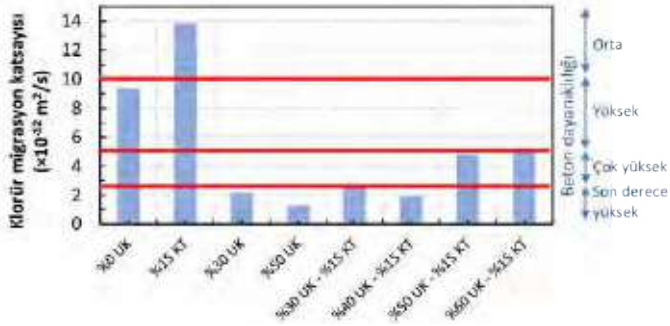
Uçucu kül içeren betonları daha sürdürülebilir yapmak için kireçtaşı tozu da kullanılabilir, Şekil 3-13<sup>102</sup>. Eklenen kireçtaşı tozunun iki ana işlevi vardır<sup>184</sup>; erken yaşlarda hidrasyon sürecine sınırlı oranda katılmak ve/veya nispeten inert bir kalkerli dolgu maddesi olmak. Portland çimentosu hidrate oldukça, kireçtaşı tozu çeşitli kalsiyumalüminat hidratlarla reaksiyona girerek farklı karboalüminat formları oluşturur.



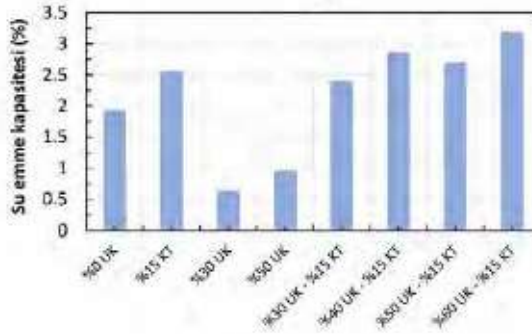
(UK: Uçucu kül, KT: Kireçtaşı tozu)

Şekil 3-13. Farklı oranlarda düşük-kalsiyumlu uçucu kül ve kireçtozu içeren betonlar için basma dayanımı (MPa)<sup>102,105</sup>

Kireçtaşı tozu içeren betonlarda ilk olarak kalsiyum hemikarboalüminat oluşurken, yaklaşık 28 gün sonra bu faz neredeyse tamamen stabil bir AFm fazı olan kalsiyum monokarboalüminata dönüşür. Çalışmalar monokarboalüminat fazının stabilizasyonunun etrenjitin de stabilizasyonuna, ve dolayısıyla hidrate çimento matriksinin hacminin artmasına ve gözenekliliğin azalmasına yol açtığını göstermiştir<sup>185</sup>. Uçucu kül ve kireçtaşı tozunun sinerjisi daha yüksek doldurma yoğunluğuna ve dolayısıyla daha yoğun bir mikroyapıya yol açar<sup>102</sup>. Bu tip betonlarının dayanıklılıklarının göstergesi olarak Şekil 3-14'de klorür migrasyon katsayısı ve su emme kapasitesi değerleri sunulmuştur<sup>102</sup>. Sadece uçucu kül ilavesi içeren betonlar iki deneyde de çok yüksek performans göstermiştir. Uçucu küle ek olarak kireçtaşı tozunun da kullanıldığı betonlar da ise klorür migrasyon direnci yine çok yüksek olmuştur. Fakat, su emme kapasitesi düşmemiştir.



(a)



(b)

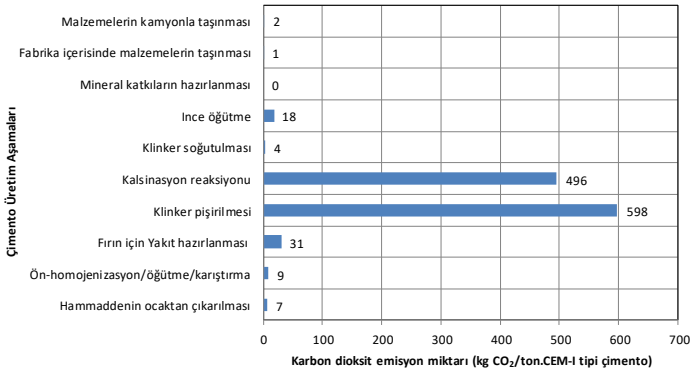
(UK: Uçucu kül, KT: Kireçtaşı tozu)

Şekil 3-14. Farklı oranlarda düşük-kalsiyumlu uçucu kül içeren betonlar için dayanıklılık göstergeleri<sup>102,105</sup> (a) klorür migrasyon katsayısı ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), (b) su emme kapasitesi (%)

### 3.2.1.2.3. Çevresel performans

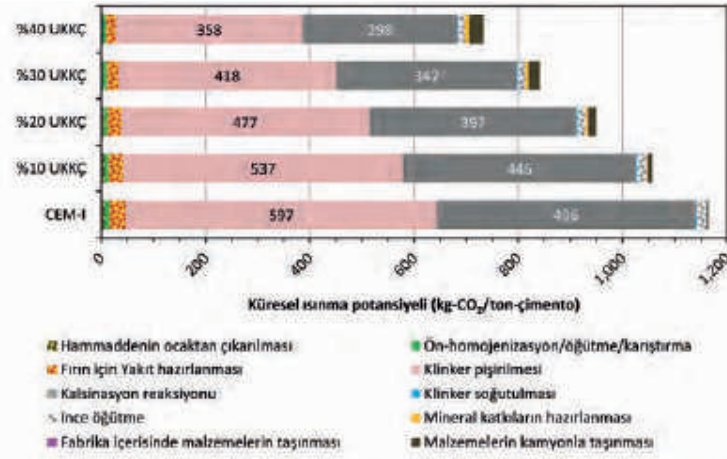
Betonun ana bağlayıcısı olan portland çimentosu üretiminde yüksek miktarda ham madde ve enerji tüketilir. Bu üretim, aynı zamanda dünya CO<sub>2</sub> salımlarının ~%5-8'ine sebep olur<sup>186,187</sup>. Çevre bilinci ile hareket eden Türk çimento sektörü çevresel etkilerin denetimi, kontrolü ve iyileştirilmesi amacıyla teknolojik gelişmeler paralelinde araştırmalar ve çoğunlukla partikül maddelerin (toz) kontrol ve azaltılmasına ilişkin çözümlere yönelik yatırımlar yapmaktadır. Çimento fabrikalarının modernleştirilmesi ve daha verimli hale getirilmesi enerji tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır. Uygun yakıt seçimi ve elektrik üretiminin karbonsuzlaştırılması toplam emisyonları son derece düşürür. Fakat, bu iyileştirme ve modernizasyonlara rağmen kalsinasyon sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyon miktarı değişmez. Alternatif malzemeler ile çimento ikamesi ise kullanılan klinker miktarını doğrudan azaltarak sera gazı salımlarını, enerji ve ham madde tüketimini ciddi oranlarda düşürür.

Türkiye’de bir ton CEM I tipi çimento üretiminde ortalama 1.165 kg CO<sub>2</sub> açığa çıkar, Şekil 3-15<sup>158</sup>. Toplam CO<sub>2</sub> emisyonların yaklaşık %94’ü klinkerin pişirilmesi ve kalsinasyon reaksiyonları, %5’i ise yakıt, ham madde ve klinkerin öğütülmesi için gerekli elektriğin üretimi kaynaklıdır. Geri kalan %1 ise ham maddenin ocaktan çıkarılması, kamyonla taşınması, malzemelerin fabrika içinde konveyörlerle taşınması ve klinkerin soğutulması süreçlerinde salınır.



Şekil 3-15. Türkiye’de üretim süreçlerine göre CEM-I tipi çimento üretimi kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonları (kg-CO<sub>2</sub>/ton-çimento), 2012<sup>158</sup>

Türkiye için kullanılabilirliği ve arzı yüksek olan uçucu kül ile yapılan katkılı çimentoların yaklaşık küresel ısınma potansiyelleri Şekil 3-16’da sunulmuştur<sup>170,171</sup>.



\* Hesaplamalarda uçucu külün termik santralden çimento fabrikasına taşınması ve hazırlanması aşamalarındaki etkiler de göz önünde bulundurulmuştur.

Şekil 3-16. CEM-I ve farklı oranlarda uçucu kül içeren katkıli çimentoların (UKKÇ) küresel ısınma potansiyelleri <sup>170,171</sup>

Beton üretimini de daha sürdürülebilir yapmanın en etkin yollarından biri de çimentonun uçucu kül ile ikamesidir. Poon'un 2000 yılındaki bir çalışmasında sunduğu tipik uçucu kül içeren beton karışımları kullanılarak bu etki gözler önüne serilmiştir. İncelenen betonların karışım oranları Tablo 3-6 ve Tablo 3-7'te özetlenmiştir <sup>188</sup>.

Tablo 3-6. Uçucu kül içeren beton karışım oranları <sup>188</sup>

Bileşenler (kg/m <sup>3</sup> )					UK (%)	Su/ Bağlayıcı Oranı	SA (*) (l/m <sup>3</sup> )
Su	Çimento	UK <sup>(+)</sup>	İnce agregası	Kaba agregası			
150	637	0	711	936	0	0,24	18,4
150	475	158	681	924	25	0,24	18,3
148	347	283	639	920	45	0,24	23,7

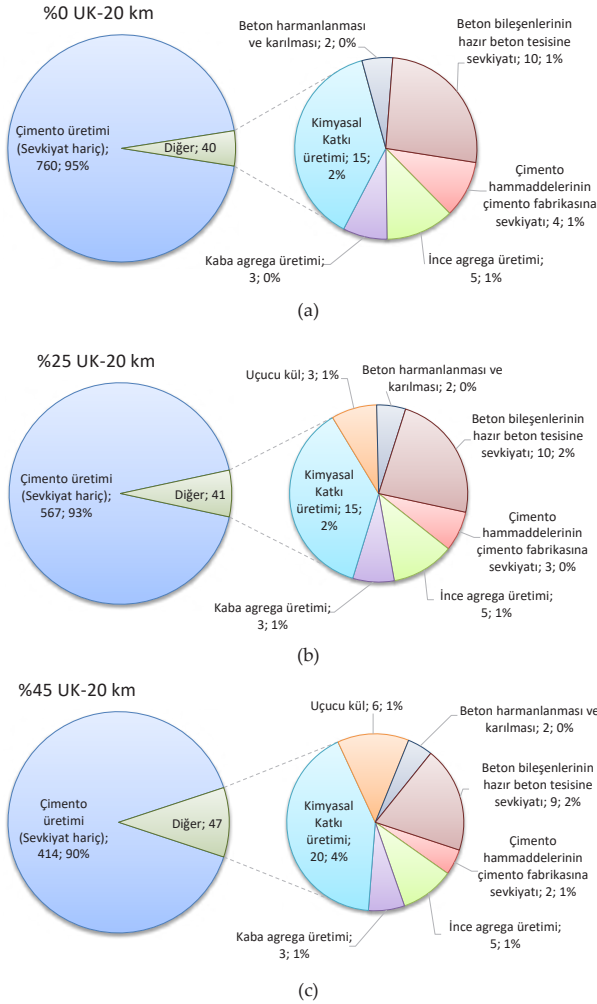
(\*) SA: naftalin bazlı süper-akışkanlaştırıcı

(+) UK: uçucu kül. Karışımlarda kullanılan UK 3860 cm<sup>2</sup>/g Blaine inceliğine sahiptir. Ağırlıkça %56,8 SiO<sub>2</sub>, %28,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %5,3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %5,2 MgO'dan oluşmaktadır; CaO oranı ise %3'ün altındadır.

Tablo 3-7. Karışımların basınç dayanımları (MPa) <sup>188</sup>

UK (%)	3-günlük	7-günlük	28-günlük	90-günlük
0	70,0	79,5	97,4	110,2
25	62,3	74,6	105,9	124,5
45	42,5	56,3	89,4	107,2

Bu karışımların - üretimden inşaat alanına sevkiyatına kadar olan aşamaları kapsayacak şekilde - küresel ısınma potansiyelleri (KIP) eşdeğer  $CO_2$  cinsinden Şekil 3-17'de gösterilmiştir <sup>14</sup>. Bu karışımların Türkiye'de üretilmesi durumunda 1 m<sup>3</sup> beton başına hiç uçucu kül içermeyen karışım için 800 kg- $CO_2$ , %25 uçucu kül ikameli karışım için 608 kg- $CO_2$ , %45 uçucu kül ikameli karışım için 461 kg- $CO_2$  açığa çıkacaktır. Karışımların KIP'lerinin çok büyük bir kısmı portland çimentosu üretiminden kaynaklanmaktadır. Kaba ve ince agrega üretimi, çimento ham maddelerinin çimento fabrikasına sevkiyatı, beton bileşenlerinin hazır beton tesisine sevkiyatı, betonun harmanlanması ve karılması, kimyasal katkı üretimi ile uçucu kül kaynaklı  $CO_2$  emisyonları ise çok daha sınırlıdır.



\* Analizlerde uçucu kül üretim sahasının beton santraline uzaklığı 20 km olarak varsayılmıştır.  
Şekil 3-17. Uçucu kül içeren beton karışımları için KIP sonuçları (kg-eşdeğer  $CO_2/m^3$ -beton) <sup>14</sup>:  
(a) %0 UK; (b) %25 UK; (c) %45 UK.

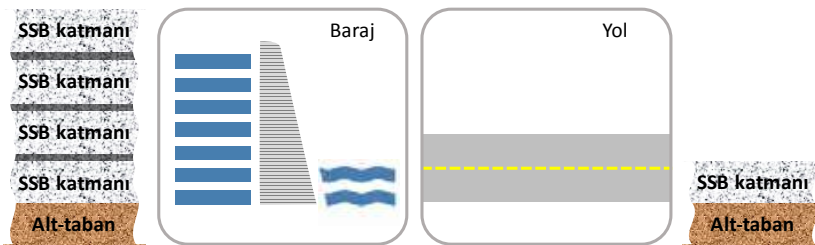
### 3.2.1.3. Diğer beton imalatları

#### 3.2.1.3.1. Beton kaplama

Sahalar ve yollarda kullanılmak üzere hazırlanan betonlar, yapısal ve yüksek dayanımlı betonlara kıyasla daha düşük çökmeyi hedefler. Bu tip uygulamalarda, kullanılacak betonlarda yüksek oranda (ağırlıkça% 50'yi aşan çimento ikamesi için) uçucu kül kullanımı hem dayanım hem de dayanıklılık gereksinimlerini karşılanmasına yardımcı olur<sup>167</sup>.

#### 3.2.1.3.2. Silindirle sıkıştırılmış beton

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), silindirle sıkıştırılmış betonu (SSB), toprak ve kaya dolgu ekipmanı kullanılarak taşınabilen, yerleştirilebilen ve sıkıştırılabilen, taze halde sıfır-çökme (slump) gösteren beton olarak tanımlamaktadır<sup>189</sup>. SSB, bileşenleri bakımından portland çimentosu ile üretilen sıradan betona benzemektedir. Ancak, nemli bir çakıl kıvamına sahip olan SSB'nin bileşen oranları önemli ölçüde farklıdır. Ana farklılık su içeriğinin çok daha düşük olmasıdır<sup>161,190-192</sup>. SSB üretimi sürekli devam eden bir süreçtir; ve üretim aşamaları, parti parti üretilen sıradan betonlardan farklıdır. SSB'nin bileşenleri harmanlanır, karıştırılır ve daha sonra sahaya kamyon veya konveyörlerle taşınır. SSB karışımı sahaya katmanlar halinde yayılır. SSB karışımı dozer kullanılarak yayılır, yayılan katmanlar silindir yardımı ile sıkıştırılır<sup>192,193</sup>. Yollar için ise yüksek sıkıştırma kirişine sahip asfalt tipi geleneksel bir finişer tercih edilir<sup>121</sup>. Taze SSB karışımı, silindirler veya sıkıştırma kirişleri ile optimal bir yoğunluğa kadar sıkıştırılırken ayrılmamalıdır. Elde edilen beton, düşük su-çimento oranı ve yüksek derecede sıkıştırılması sebebiyle düşük geçirgenliğe sahiptir. Yoğun mikroyapısı, kimyasal ve fiziksel saldırılara karşı dayanıklılığını artırır<sup>121,190,191</sup>. Barajlar ve yollar (Şekil 3-18) gibi çok az müdahale ya da kısıtlama içeren büyük alanlar içeren projeler, SSB uygulamaları için idealdir<sup>192</sup>.



Şekil 3-18. Silindirle sıkıştırılmış beton uygulamaları

SSB'un barajlarda kullanımı 1960'lara kadar uzanmaktadır<sup>193</sup>. O zamandan beri, SSB teknolojisi geliştirilmiş ve yüzlerce barajda kullanılmıştır. 2015 itibariyle, dünya çapında 650'den fazla SSB barajı (SSBB) bulunmaktadır<sup>194</sup>. Çin (189), SSBB ile dünya lideridir. Japonya (59), Brezilya (54), Amerika Birleşik Devletleri (49) ve Türkiye (46) de Çin'i takip eden diğer ülkelerdir. Özellikle son 15 yılda, SSBB teknolojisi

önemli ölçüde geliştirilmiştir; çoğu SSBB 2000 yılından sonra inşa edilmiştir. Bu artışın nedenleri çeşitlidir (Şekil 3-19). Düzgün tasarlanmış ve planlanmış bir baraj projesinde, SSB kullanımı önemli düzeyde inşaat süresi ve maliyet azaltmalarına neden olabilir <sup>161,192,193</sup>. SSB üretiminde yüksek oranda çimento ikame malzemesinin kullanılması, kütle betonlarındaki hidrasyon ısı ile ilişkili termal çatlama problemlerini ortadan kaldırırken, malzeme maliyetlerini en aza indirir. Uygun olmayan planlama, denetim veya ekipman ve malzeme seçimi nedeniyle olası zaman ve maliyet indirimlerinin kaybedildiği durumlar da rapor edilmiştir <sup>193</sup>.



Şekil 3-19. Silindirle sıkıştırılmış beton barajların avantajları

Ağır hizmet alanlarında yüzey veya alt-temel olarak SBB kullanımı da yaygındır. Bu uygulamanın ilk örnekleri Kuzey Dakota - 1910'lar, İsveç - 1930'lar ve Belçika -1935'e kadar uzanabilir <sup>195</sup>. SSB yollar, beton yolların bir alt grubu olarak düşünülebilir. Asfalt yollar ile kıyaslandığında, beton yolların ilk yatırım maliyeti daha yüksektir; ancak, çok daha düşük yaşam döngüsü bakım maliyetleri vardır. Asfalt kaplı yollar özellikle ağır yük taşıma kapasitesi ve hızlı aşınma ve yıpranma bakımından iyi performans göstermez. Fakat, beton yollar ağır yük taşıyan araçlara daha iyi direnir; yakıt ve hidrolik sıvı dökülmelerinde daha sınırlı bozulma gösterir ve yüksek sıcaklıklarda yumuşamaz. Ayrıca, asfalt yüzeylere kıyasla daha açık renkli ve daha yüksek güneş yansıtıcılığına sahip beton yüzeyler kentsel ısı adası etkilerini ve aydınlatma ihtiyaçlarını azaltır.

SSB yol uygulamaları harmanlama, karıştırma ve taşıma için benzer ekipmanların kullanıldığı çimento ile stabilize edilmiş zemin uygulamalarından ortaya çıkmıştır <sup>192</sup>. Sıradan beton kaplamalarının aksine, SSB'lar kalıp, bitirme uygulamaları ve donatı çeliği kullanılmadan inşa edilebilir <sup>191,196</sup>. SSB'lerde derz aralıkları her zaman gerekli değildir; fakat, belirtildiğinde sıradan beton kaplamalara kıyasla daha geniş aralıklarla yerleştirilir <sup>191,196</sup>. Bu nedenle, SSB yollarda işgücü maliyetleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Daha yoğun sıkıştırma nedeniyle, bir SSB benzer çimento içeriğine sahip sıradan bir betona kıyasla daha yüksek bir dayanıma sahip olacak



şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, nispeten düşük SSB hamur hacmi, beton büzülmesini ve büzülme kaynaklı gerilme çatlaklarını azaltır <sup>191</sup>. Bu avantajlar, daha yüksek inşaat hızlarıyla birleştirildiğinde, kamu ve özel SSB yol uygulamalarında süregelen bir artışa neden olmuştur <sup>191,197</sup>. A.B.D.'de SSB yolların yaklaşık %60'ı, çoğunlukla endüstriyel uygulamalar için 2004'ten sonra inşa edilmiştir <sup>197</sup>. 2011 itibarıyla, özel sektör A.B.D.'de SSB yolların yaklaşık %65'ine sahiptir. Kamu SSB yollarının payı ise yaklaşık %26'dır <sup>197</sup>.

SSB, sıradan betonda kullanılan bağlayıcı ve puzolanik malzemeler (portland çimentosu, uçucu kül, öğütülmüş granüle-fırın cürufu, doğal puzolan gibi), ince ve kaba agrega, su ve kimyasal katkı maddelerinin farklı oranda karıştırılması ile elde edilir. SSB karışım oranlarındaki ana fikir, agregaları kaplamak ve boşlukları doldurmak için yeterli miktarda hamur elde etmektir <sup>196</sup>. SSB'deki hamur, 75 µm'nin altındaki herşeyi içerir - çimento, puzolanlar, su, katkılar, ince agrega ve küçük hava kabarcıkları gibi. Sıradan betonda olduğu gibi, bir SSB karışım tasarımının ana hedefi, birim maliyetini ve karışım zamanını göz önünde bulundurarak, proje için gerekli olan dayanımı, dayanıklılığı ve işlenebilirliği sağlamaktır. SSB durumunda, sıkıştırılabilirlik de kritik bir konudur <sup>192</sup>.

SSB'nin karışım oranları, uygulamanın yapısına göre belirlenir. Baraj ve yol SSB'leri arasındaki ana fark, dayanım kazanım hızlarıdır. Bir yol betonunun bazen 1 gün içinde dayanım kazanması beklenirken, barajlardaki beton ise yerleştirilmesinden en az bir yıl sonra karşılaşacağı nispeten daha düşük gerilme seviyeleri için tasarlanmıştır. Yol için hazırlanan bir SSB'de 28 günlük (veya bazen daha erken) hem eğilme hem de basınç dayanımlarına bakılır. Barajda kullanılacak bir SSB için ise genellikle 90 günlük (veya bazen daha geç) basınç dayanımının yanı sıra kesme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranlarının belirlenmesi; sünme, ve büzülme performanslarının araştırılması gerekir. Ayrıca, SSB'larda kullanım amacına uygun dayanıklılık/durabilite gereksinimlerinin de karşılanması gerekir. Yol SSB'leri için anahtar dayanıklılık parametreleri aşınma ve donma/çözülme direncidir. Barajda kullanılan bir SSB için geçirgenlik, erozyon direnci ve termal özellikler daha önemli hale gelmektedir <sup>195</sup>.

Mekanik ve dayanıklılık gereksinimlerinin karşılanmasının yanı sıra, bağlayıcı içeriğinin seçiminde önem arz eden faktörler şu şekilde sıralanabilir: (i) temel kalitesi, (ii) şantiyedeki iklim koşulları, (iii) soğutma ve termal konular gibi tasarım parametreleri, ve (iv) uçucu kül veya doğal puzolanlar gibi mevcut malzemeler <sup>193</sup>. SSB düşük (50-90 kg/m<sup>3</sup>), orta (85-125 kg/m<sup>3</sup>) veya yüksek bağlayıcı içeriği (> 120 kg/m<sup>3</sup>) ile hazırlanabilir; kabul edilen tek bir optimum çimento aralığı yoktur <sup>193</sup>.

SSB özel bir çimento türü gerektirmez. Bununla birlikte, kütle beton uygulamaları için, termal çatlak olasılığını en aza indirmek için hidrasyon ısısının en aza indirilmesi kritik öneme sahiptir; ve hidrasyon ısısının düşük olduğu çimentolar önerilir <sup>161</sup>. SSB'larda çimento ikame malzemelerinin kullanılması her zaman daha yüksek mukavemet ile sonuçlanmaz. Fakat; daha düşük hidrasyon ısısı açığa çıkarmaları, uzun süreli dayanıklılık (yüksek sülfat ve alkali-agrega reaksiyon direnci) göstermeleri, düşük geçirgenliğe sahip olmaları ve potansiyel maliyet tasarrufu sebebi ile SSB üretiminde çoğunlukla çimento ikame malzemeleri (hem

çimento ikame malzemesi olarak hem de ince agrega olarak) kullanılır <sup>161,191</sup>. Uçucu kül, SSBB'larda en yaygın kullanılan ikame malzemesidir. İkame oranı da çoğunlukla ağırlıkça %50 civarındadır. Uçucu kül gibi atıkların bu kadar büyük miktarlarda geri kazanımı hem bertaraf masraflarını ve işlemlerini azaltır, hem doğal kaynakların korunmasına olanak tanır hem de atığa bağlı çevresel sorunların en aza indirgenmesini sağlar <sup>85,158,162,178,198</sup>. Doğal puzolanlar <sup>199</sup>, uçucu külden sonraki ikinci alternatiftir. Barajlarda kullanılacak ikame malzemesi kaynağının yakınlığı son derece önemlidir. Örneğin, enerjisinin %66'sını kömür yakımından elde etmekte olan Çin <sup>200</sup>, SSBB'lerinde en çok uçucu kül kullanır. Brezilya, enerjisinin yaklaşık %5'ini kömürden elde etmektedir <sup>200</sup>. Bu sebeple Brezilya'da uçucu kül erişilebilirliği daha düşüktür. Bununla birlikte, Brezilya doğal puzolanlar bakımından zengindir ve uçucu yerine doğal puzolanları kullanmayı tercih eder. Türkiye bu açıdan çok şanslıdır. Hem zengin doğal puzolanlara hem de yeterli uçucu kül kaynağına sahiptir. Hangi ikame malzemesi tercih edilirse edilsin, SSB'lerde hazırlanan karışımlar sahada kullanılmadan önce gerekli şekilde test edilmelidir.

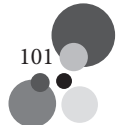
SSB yol uygulamalarında, genellikle barajlara kıyasla daha yüksek, 100-350 kg/m<sup>3</sup> aralığında bağlayıcı içerikleri tercih edilmektedir <sup>195</sup>. Bu aralık yinede sıradan beton yollarda kullanılan bağlayıcı içeriğinden (~300±30 kg/m<sup>3</sup>) daha düşüktür. SSB yollarda çimento ikame malzemelerinin kullanımı erken dayanım gereksinimleri sebebi ile SSB barajlarda olduğundan daha sınırlıdır. Uçucu kül, cüruf ve silis dumanı çeşitli ikame seviyelerinde SSB yollarda kullanılır.

### 3.2.1.3.3. Hafif beton üretimi

Hafif betonlar, doğal veya yapay hafif agregalar ile üretilen betonlardır. Sabit yükün azaltılmasının dışında donatı-beton bağının kuvvetlenmesi, durabilite performansının artması, yüksek çekme birim uzama kapasitesi ve iyi yorulma dayanımı ile bazı uygulamalarda normal ağırlıktaki betonlara tercih edilebilirler. Hafif agregaların kaynaklarındaki veya üretim yöntemlerindeki çeşitlilik hafif betonların özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu sebeple, hafif betonların özellikleri farklı agregalar kullanıldığında mutlaka tekrar araştırılmalıdır. Hafif betonlarda, uçucu kül yapay agrega üretiminin yanı sıra, belli oranda çimento ikamesi olarak da kullanılabilir. Bu konuda bir çok çalışma yapılmıştır <sup>201-207</sup>.

### 3.2.1.3.4. Prekast ve öngerilmeli betonlar

Prekast/öngerilmeli beton üreticileri, düşük erken dayanım sebebi ile beton karışımlarda uçucu kül kullanımını her zaman tercih etmez. Süperakışkanlaştırıcıların yardımı ile düşük su-çimento oranlarında hazırlanan uçucu küllü betonlarda, erken yaş dayanımının yanı sıra prekast/öngerilmeli beton ürünleri için gereken diğer şartların da karşılanabileceği görülmüştür <sup>208</sup>. Yapılan araştırmalar, yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile %30'a kadar çimento ikamesi prekast/öngerilmeli beton ürünler için uygun olan yüksek erken dayanıma ulaşabildiğini göstermiştir <sup>167</sup>. Ayrıca, uygun kül seçimi ile beton karışımının su ihtiyacı azalır, işlenebilirliği artar ve yüzey bitirme işlemleri kolaylaşır. Artan işlenebilirlik, prekast ürünlerde daha net köşeler ve kenar elde edilmesine yardımcı olur.



### 3.2.1.3.5. Beton boru imalatı

Uçucu kül kullanılarak yapılmış beton borular, uçucu kül kullanılmadan imal edilen beton borulardan çok daha üstündür <sup>167</sup>. Uçucu kül kullanılarak borular daha geçirimsizdir; ayrıca, zayıf asitlere ve sülfatlara karşı daha dayanıklıdır.

### 3.2.2. Zemin iyileştirme, stabilizasyon ve dolgu uygulamaları

Uçucu kül, çimento ve beton sektöründen sonra en yaygın olarak zemin uygulamalarında kendine yer bulur. Zemin uygulamaları geniş bir kavramdır. Genel mühendislik dolguları, yapısal dolgu/setler ve zemin iyileştirme/stabilizasyon gibi birçok farklı uygulamayı içerir <sup>175</sup>.

#### 3.2.2.1. Zemin uygulamalarında önem taşıyan özellikler

Uçucu küller, zemin uygulamalarına uygun bir dizi özelliğe sahiptir. Bunlar arasında kayma dayanımı, kompaksiyon ve hidrolik iletkenlik gibi farklı teknik özellikler bulunur <sup>209</sup>.

##### 3.2.2.1.1. Kayma dayanımı

Bir zeminin kayma dayanımı, o zeminin göçme oluşmadan karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesidir. Zemin uygulamaları için uçucu külün kayma dayanımı hem dolgu yamaçlarının dikliğini, hem de uçucu külün destekleyebileceği temel yüklerinin büyüklüğünü belirleyen önemli bir özelliktir <sup>210</sup>. Yüksek kalsiyumlu uçucu küller fiziksel ve mineralojik özelliklerine bağlı olarak geniş bir aralıkta basınç dayanımları gösterebilir; hatta yüksek incelikte elde edilen dayanımlar 10 MPa'ı geçebilir <sup>211</sup>. Düşük kalsiyumlu uçucu küller ise kendi başlarına herhangi bir dayanım gösteremezler; fakat, kireç (ağırlıkça %5) ve alçıtaşı (ağırlıkça %2,5) gibi aktivatörlerin ilavesi ile dayanımları yüksek oranda artırılabilir <sup>210</sup>. Dolgu uygulamalarında çoğunlukla kendinden bağlayıcılık özelliği olan küller tercih edilir.

Laboratuvar ortamında kayma dayanımı farklı yöntemler ile belirlenebilir. Serbest basınç deneyi <sup>212</sup> örselenmemiş zemin örneklerinin alınabildiği kohezyonlu zeminler için uygun bir seçenektir. Çoğu puzolanik uçucu külden, kayma dayanımının büyük bir kısmı içsel sürtünmeden elde edilir. Görünür kohezyonun etkisi sınırlı kalır. Üç eksenli basınç deneyi zeminin kayma dayanımı parametreleri olan kohezyon kesme noktası ve içsel sürtünme açısını belirlemek için kullanılır. Bu deney düzeneği ile kayma dayanımı arazi koşullarındakine yakın bir şekilde belirlenebilir. Deney drenaj ve konsolidasyon koşulları için üç farklı şekilde yapılabilir: konsolide edilmemiş drenajsız (UU) <sup>213</sup>, konsolide drenajlı (CD) <sup>214</sup> ve konsolide drenajsız (CU) <sup>215</sup>.

Kayma dayanımı numunedeki sıkıştırma yoğunluğundan ve su miktarından da etkilenir. Puzolanik uçucu küller, genellikle 26-42° aralığında bir içsel sürtünme açısına sahiptir <sup>209</sup>. Bu geniş açı aralığı uçucu külün hammadmesine ve üretim

yöntemine bağlı olarak farklılık gösteren yüzey morfolojilerinden kaynaklıdır. Suya doygunluk oranı da bu değeri etkiler <sup>216</sup>. Birçok farklı küllün incelendiği bir çalışmada, ortalama içsel sürtünme açısı yaklaşık 34° olarak belirlenmiştir <sup>217</sup>. İçsel sürtünme açısı uçucu kül ile iyileştirilmiş bir zeminin zemin-su karakteristik eğri modelini önemli ölçüde etkiler <sup>218</sup>.

### 3.2.2.1.2. Kompaksiyon (Sıkıştırma)

Uçucu küller üzerindeki kompaksiyon testleri genellikle ASTM D698 <sup>219</sup> ve ASTM D1557-12 <sup>220</sup>'de belirtilen Proktor veya modifiye Proktor testleri gerçekleştirilir. Aynı santralde açığa çıkan uçucu küllerin özellikleri bile zaman içerisinde farklılık gösterebilir; bu da kompaksiyon potansiyellerinde önemli farklılıklara sebep olur <sup>221</sup>. Ayrıca, uçucu küllerin kuru yoğunluğu, tane şekli ve tane boyu dağılımından etkilenir. Uçucu küllerde elde edilen kuru yoğunluğun büyüklüğü, kohezyonlu zeminlerdekine kıyasla su muhteviyatına karşı daha az duyarlıdır, bu da optimumun kuru tarafında saha sıkıştırmasının gerçekleştirilmesine olanak sağlar.

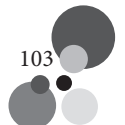
Yüksek kalsiyumlu uçucu külleri kullanarak plastik killer stabilize edilirken, sıkıştırma süreçlerindeki gecikmeleri en azda tutmak daha iyidir <sup>222</sup>. Çünkü, bu süreçte yüksek kalsiyumlu uçucu küllün hidrasyon ürünleri, zemin parçacıklarına bağlanmaya başlar ve ortaya çıkan malzemede istenen yoğunluğun sağlanması için bu bağların bozulmaması gerekir <sup>223</sup>. Zira, yoğunluktaki azalmalar, maksimum basınç dayanımı değerlerini de olumsuz etkiler <sup>222,223</sup>. Sıkıştırma süreçlerinde yaşanan gecikmelerden dolayı maksimum yoğunluktaki ve basınç dayanımındaki azalma, kullanılan uçucu küllün hidrasyon hızına ve sıkıştırma sırasındaki su muhteviyatına bağlıdır <sup>223,224</sup>. Ayrıca, farklı küller önemli ölçüde farklılık gösterebilir.

### 3.2.2.1.3. Hidrolik iletkenlik

Uçucu küllerin zemin uygulamalarında kullanımında hidrolik iletkenlikleri de önemli bir rol oynar. Bu parametre, özellikle toprak setlerden ve yollardan su kaybını ölçmede ve düzenli depolama sahalarının kaplama kalınlığının tasarımında kullanılır. Uçucu küllerin hidrolik iletkenliğinin belirlenmesi genellikle ASTM D5856'e dayanarak yapılır <sup>225</sup>. Düzgün bir şekilde sıkıştırılmış uçucu küllerin hidrolik iletkenliği siltli kum ile siltli killi zeminin arasında,  $10^{-4}$  ila  $10^{-6}$  cm/s aralığındadır <sup>209</sup>. Bu değer sıkıştırma derecesine, tanelerin şekline, tane boyu dağılımına, iç gözenek yapısına ve puzolanik aktiviteye bağlıdır <sup>226</sup>. Bir uçucu küllün küresel yapıda olması daha iyi sıkıştırılabilir olmasını sağlar. Bu tip küllerde, hidrolik iletkenlik değerleri düşer <sup>209</sup>.

### 3.2.2.1.4. Kaliforniya taşıma oranı

Yol malzemelerinin mekanik dayanımını belirlemek için çoğunlukla 1939'da geliştirilen Kaliforniya taşıma oranı (CBR) <sup>227</sup> testi bir şekilde kullanılır. CBR genellikle ASTM D1883'ya <sup>228</sup> göre belirlenir. CBR değerleri kürlenme ile artar <sup>229</sup>. CBR, yoğunluktan ve su içeriğinden oldukça etkilenir. Modifiye Proktor testi



ile sıkıştırılmış bir uçucu külün CBR değeri, standart sıkıştırmadaki değerden daha fazladır <sup>230,231</sup>. Bu durum, sıkıştırma enerjisinin elde edilen kuru yoğunluk değerlerini oldukça etkilemesinden kaynaklıdır. Su girişi CBR değerlerini önemli ölçüde düşürür çünkü oluşan çimentolu bileşikler yüzey gerilimi kuvvetlerine penetrasyon direnci sunamaz. Mevcut etkili boşluk alanı suyla doldurulur ve bu da CBR değerlerinin azalmasına neden olan yüzey gerilim kuvvetlerinde büyük bir düşüşe neden olur <sup>230,232</sup>.

### 3.2.2.1.5. Isıl iletkenlik

Zemin iyileştirmelerinde genelde göz ardı edilen önemli bir özellik de uçucu küllerin ısıl iletkenliğidir. Bu değer, nükleer atık depoları, yer altı boru hatları, enerji nakil hatları gibi çeşitli mühendislik uygulamaları için önem taşır <sup>233</sup>. Doğal zeminlere uçucu kül ilavesi ile zemin üzerindeki fırın duvarları, kızdırıcı kazan ve borular gibi ısı transfer yüzeylerinin ısı transfer oranlarını düşürülebilir <sup>234</sup>. Isıl iletkenlik uçucu kül dozajına, çimentolaşma derecesine, taneler arası sıvıların hacimsel oranına ve kürlenme süresine bağlıdır <sup>233</sup>. Dozajdaki ve kürlenme süresindeki artışlarla birlikte, stabilize edilmiş zeminlerin ısıl iletkenliği azalır <sup>233</sup>.

### 3.2.2.1.6. Stabilizasyon etkisi

Zemin stabilizasyonu bir malzeminin dayanım ve diğer fiziksel özelliklerini geliştirmek için yapılan uygulama olarak tanımlanır. Bir çok stabilizasyon tekniği arazi zeminin su içeriğinin azaltılması ile dayanım ve kararlılığın artırılması prensibine dayanır. Yeterli reaktif silis ve kalsiyum içeriğine sahip olan küller puzolanik özelliğın yanında kendiliğinden bağlayıcılık da gösterebilirler; bu sebeple, stabilizasyon uygulamalarında sıklıkla tercih edilirler. Yüksek miktarda reaktif silis içeren, fakat düşük reaktif kalsiyum oranına sahip küller ise kendinden bağlayıcılık özelliğı taşımazlar; fakat, kalsiyum hidroksit gibi bir aktivatör ile uygun bir dayanım geliştirebilirler. Kalsiyum hidroksit ilavesi, silis çözünürlüğünü arttırarak silika bakımından zengin camsı fazlardaki Si-O bağlarını kırılmasına yardımcı olur ve puzolanik reaksiyonların hızlı ilerlemesine olanak sağlar <sup>209</sup>. Hidratasyon, camsı fazın depolimerizasyonu, silika ve alüminanın serbest kalması ve C-(A-)S-H oluşumu şeklinde ilerler. Bu şekilde aktive edilmiş uçucu küllerin dayanımı ve sertliğı artar <sup>235,236</sup>. Ca(OH)<sub>2</sub>'nin yanında başka bir aktivatör olan alçının (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O), kullanımı ile C-(A-)S-H'in yanında kalsiyum-alüminat-hidratlar da oluşur. Tek başına kirecin eklendiğı küllerle karşılaştırıldığında, hem kireç hem de alçı ilavesi ile düşük kalsiyumlu küller daha yüksek dayanım ve sertlik sergiler <sup>210,237</sup>. Puzolanik olmayan uçucu küller hemen hemen hiç reaktif silikaya sahip değildir. Çimento esaslı bir aktivatör varlığında bile puzolanik reaksiyonlar tetiklenmez <sup>238,239</sup>.

Literatürdeki mevcut birçok çalışma, kireç ve uçucu külün hem siltli hem de kumlu zeminleri stabilize etmek için iyi bir kombinasyon olduğunu göstermektedir <sup>240,241</sup>. Kireç varlığında yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin performansına güvenilerek esnek üstyapılardaki temel tabakalarının yapısal tabaka katsayılarının belirlenmesi için tasarım kılavuzları hazırlanmıştır <sup>242</sup>. Kireç ve uçucu kül ilavesi ile gerekli temel

tabakası kalınlığı azalır. Ayrıca, uçucu kül ve kirecin kullanıldığı temel tabakalarda azalan dayanıma rağmen, esnek üstyapı uygulamaları için önemli olan donma-çözünme dayanıklılığı artar <sup>240</sup>. Uçucu küller, derin zemin stabilizasyonu için kullanılacaksa sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı gibi alkaliler ile aktive edilebilir <sup>243-246</sup>.

Montmorillonit gibi ıslandığında şişen ve kurduğunda büzülen mineralleri yüksek oranda içeren zeminler şişme problemlerine karşı oldukça hassastır. Bu durum kaldırımlarda, bodrum katlarında, yollarda, boru hatlarında ve temellerde çatlamalara yol açabilir. Uygun tane dağılımında, kimyasal kompozisyonda ve mineralojideki bir uçucu kül ilavesi ile zemin daha granüler hale gelir, daha az su tutar ve şişme miktarı azalır <sup>247,248</sup>. Genel kullanımlarda, düşük kalsiyumlu, puzolanik uçucu küllerin dozajı, şişme problemi gösteren zeminler için kuru birim ağırlıkça % 10-25 arasında değişebilir <sup>249</sup>. Ancak, kireç veya çimento gibi aktivatörlerin varlığında bu dozaj azaltılabilir <sup>249</sup>.

### **3.2.2.1.7. Yoğunluk**

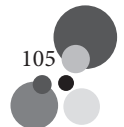
Uçucu küllerin yoğunluğu 1.900-2.800 kg/m<sup>3</sup> aralığında değişir <sup>120</sup>. Yoğunluk farkları artan senosfer oranı, tane şekili, tane boyut dağılımı ve kimyasal içerik ile açıklanır <sup>209</sup>. Uçucu küller sıkıştırıldıklarında diğer dolgu malzemelerine kıyasla daha düşük birim hacim ağırlıklarına sahiptir; bu sayede yerleşmeden kaynaklanacak deformasyonlar, oturmalar ve taşıma gücü problemleri en aza indirilebilir <sup>66,250</sup>. Bu da özellikle geri dolgu ve toprak set uygulamalarında avantaj sağlar.

### **3.2.2.2. Uçucu külün kullanıldığı farklı zemin uygulamaları**

Kendinden bağlayıcılık özelliği taşıyan veya puzolanik uçucu küllerin uygun bir şekilde zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılması sadece daha çevreci bir çözüm olmakla kalmaz, hem de zemin uygulamalarının maliyetini azaltır <sup>239</sup>. Aşağıda başlıca uygulamalar özetlenmiştir.

#### **3.2.2.2.1. Dolgu malzemesi**

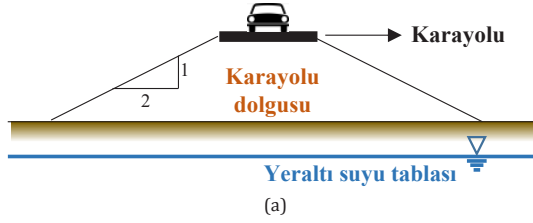
Düşük yoğunluklu ve yüksek kayma dayanımına sahip bir malzeme olan uçucu kül, hem yapısal hem de yapısal olmayan uygulamalarda dolgu malzemesi olarak yaygın şekilde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Uçucu külün inşaat dolgu ve setlerinde kullanılması sadece doğal malzemelere ekonomik bir alternatif sağlamakla kalmaz; aynı zamanda dolgu ve setlerin kayma dayanımı, neme duyarlılığı gibi teknik özelliklerini iyileştirir. Uçucu kül ilavesi zeminin su emme eğilimini azaltarak şişme miktarını düşürür. Ayrıca, diğer alternatiflere kıyasla uçucu kül içeren dolgular daha hafiftir. Uçucu kül, düz paletli veya titreşimli zemin kompaktörleri sayesinde kolayca sıkıştırılabilir. Saha uygulamalarında tozumu önlemek için yayma ve sıkıştırma işlemleri en kısa sürede yapılmalıdır.



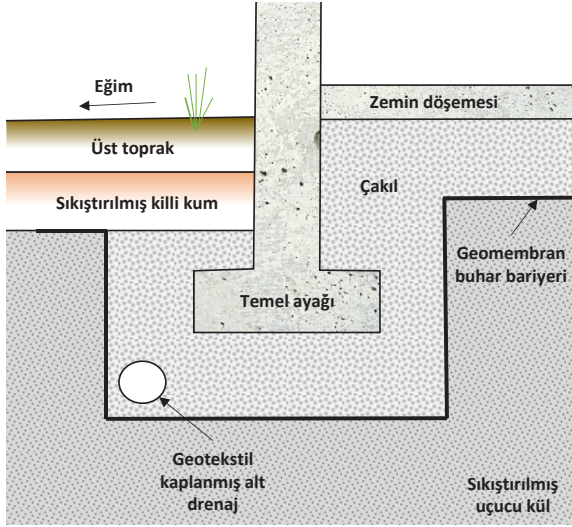


### 3.2.2.2.1.1. Yapısal dolgular ve setler

Uçucu kül içeren yapısal dolgular binaların ve diğer yapıların desteklenmesi için kullanılırken (Şekil 3-20), yapısal olmayan dolgular parklar, otoparklar, oyun alanları gibi mekanların geliştirilmesinde tercih edilir.



(a)



(b)

Şekil 3-20. Uçucu kül kullanılan yapısal dolgu örnekleri <sup>251</sup>:  
(a) karayolu dolgusu, (b) bina dolgusu

Uçucu kül içeren yapısal dolguların uygun şekilde yerleştirilebilmesi ve sıkıştırılabilmesi, yapı tasarımı için öngörülen dayanım ve stabilizasyon özelliklerini sağlayabilmek için önemlidir. Bu nedenle uçucu külün tane boyu dağılımı, nem miktarı, kayma dayanımı, geçirgenlik, plastisite, şişme indeksi ve yoğunluğu gibi özellikleri öne çıkar. Uçucu külün uygun tane boyu dağılımı, çoğunlukla ince ve küresel tanecikli yapısı nedeniyle sıkıştırılabilme özelliği dolgu ve set yapımı için uygundur. Genellikle dolgu ve setlerde kullanmadan önce zemin testleri uygulanarak külün özellikleri belirlenmelidir. Ayrıca, uçucu küllerin içerdikleri eser miktardaki iz elementlerde çevresel faktörler göz önüne alınarak test edilmelidir.

Uçucu külün dolgu malzemesi olarak kullanımında farklı yöntemler izlenebilir. Kitap kapsamında tipik bir uygulama örneği özetlenmiştir<sup>40</sup>. İlk olarak uçucu kül katmanlar halinde (gevşek halde ~225 mm) dozer yardımı ile yayılır. Silindirme esnasında külün yeterli nem oranına sahip olması önemlidir. Külün nem içeriği görsel inceleme ile kabaca kontrol edilebilir. Yaklaşık doğru nem içeriğinde elde sıkılan uçucu kül, hafif basınç uygulandığında tek bir kütle halinde bir arada kalmalı, dışarı nem taşmamalıdır. Nem içeriği için farklı yöntemler kullanılabilir. Kül çok kuru ise, yayma ve silendirleme işlemlerinden önce biraz su püskürtülmelidir. Depolanmış küller - özellikle rüzgarlı/kuru hava koşullarında - ek su ihtiyacı gösterebilir. Gevşek katmanlar 150 mm kalınlığa kadar sıkıştırılmalıdır. Sıkıştırma, saha gereksinimlerine uygun olacak şekilde farklı ekipmanlar kullanılabilir. Sıkıştırma etkinliğinin değerlendirilmesi için bir deneme yapılması önerilir. Şartlar uygun değilse daha ince katmanlar yaymak gerekebilir. Silindirlemede, silindir en az sekiz kere geçmelidir. İlk iki geçiş vibrasyonsuz, kalanlar vibrasyonlu olmalıdır. Son geçişin yönü, yüzey çatlaklarını sıkıştıracak şekilde seçilir. Bazen vibrasyonsuz son bir geçiş de yüzey çatlaklarının kapatılmasına yardımcı olabilir. Uçucu külün yerleştirilme ve sıkıştırılma performansı yoğunluk ölçümleri ile takip edilebilir. Bu ölçümler üst katmanı bozacağından, sondan bir önceki katmanda yapılmalıdır. Şiddetli yağmurlarda oluşabilecek oyulmayı önlemek için, yan eğimler doldurma işlemi tamamlandıktan sonra mümkün olan en kısa sürede korunmalıdır.

### 3.2.2.1.2. Geri dolgular

Bina inşaatı sırasında çıkarılan toprağın herhangi bir yapısal elemanı veya bina temelini güçlendirmek ve desteklemek için değiştirilmesi veya yeniden kullanılması işlemi geri dolgu olarak adlandırılır. Yeraltı maden işletmeciliğinde, maden boşluklarının sistemli bir şekilde doldurulması için de geri dolgu uygulanır. Geri dolgu sistemi genellikle yangın ve patlamaları önlemek, maden havalandırmasını iyileştirmek, kayanın/zeminin stabilitesini arttırmak ve yüzeydeki çöküntü/boşlukları azaltmak için kullanılır. Geri dolgu malzemeleri yeraltı açıklıklarında teknik ve güvenlik açısından stabiliteyi sağlamak amacıyla kullanılan malzemelerdir. Malzeme seçimlerinde ekonomik ve çevresel faktörlere dikkat edilir. Geri dolgu olarak çoğunlukla maden ve enerji gibi sektörlerde elde edilen uçucu kül, alçıtaşı ve cüruf gibi ürün, yan ürün veya atık malzemeler kullanılır. İyi tasarlanmış bir geri dolgu sistemi madenin verimi arttırabildiği gibi, kötü bir geri dolgu sistemi güvenliği tehlikeye atarak ciddi sıkıntılar oluşturabilir.

Geri dolgu, kullanılan malzemenin özelliğine göre hidrolik veya pnömatik tekniklerle yapılabilir. Görece pahalı bir malzeme olan çimentoyu mümkün olduğu kadar yüksek oranlarda ikame ederek ekonomik ve güvenli bir çözüm sağlamak amaçlanır. Geri dolgu sistemleri boşlukları tamamen ortadan kaldırmaz, yalnızca ortam gerilmelerini madencilik işlemlerine devam edilebilmesi için uygun şartlara getirir. Dolgunun etrafında bulunan kaya kütleleri için iyi bir destek sağlaması ve dolum işleminin maden işletim süresini olumsuz etkilememesine özen gösterilir.





Geri dolgularda uçucu kül ile çimento ikamesi düşük erken dayanımlara yol açmasına rağmen, uzun vadede performans ve maliyet açısından oldukça uygundur<sup>252</sup>.

Uçucu külün geri dolgu malzemesi olarak dolgu karışımında kullanıldığı durumda çimento nedeniyle yüksek olan maliyetler düşmektedir. İnce bir malzeme malzemeler olduğundan serbestçe hareket ederek boşlukları daha iyi doldurabilir ve büzülmeleri azaltabilir. Küresel taneciklerden oluşan uçucu küller karışımın akıcılığını arttırmakta ve dayanıma da olumlu etkileri olmaktadır. Yeraltı madenlerindeki geri dolgu uygulamalarında uçucu kül kullanımı çevresel ve teknik açıdan birçok yarar sağladığı için ülkemizdeki yeraltı madenlerinde de tercih edilmektedir.

Bir malzemenin geri dolgu olarak kullanılabilirliği öncelikle laboratuvarında test edilmelidir. Laboratuvarında genellikle geri dolgu malzemesi olarak seçilen malzemenin tane boyu dağılımına, maksimum tane boyutuna<sup>253</sup>, dayanımına<sup>254</sup>, bağlayıcılık özelliğine, sürekliliğine ve çevresel etkisine<sup>255</sup> bakılmaktadır. Teknik yönlerin yanı sıra maliyet hesabı ve kullanılan dolgu sisteminin maden yöntemine uygunluğu da değerlendirilmelidir. Yeraltı madencilik yöntemlerinin çoğu geri dolgu sistemi içermektedir. Seçilmiş madencilik yöntemine uygun olarak uygulanan geri dolgu sistemi hem maden işletim verimini artırır, hem de çevresel açıdan olumlu sonuçlar ortaya çıkarır.

### 3.2.2.1.3. Akışkan dolgu

Akışkan dolgu, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından kendi kendine yerleşebilen, 28-günlük basınç dayanımı 8,3 MPa'ın altında olan çimentolu, düşük dayanımlı bir malzeme olarak tanımlanır. Kontrollü düşük-dayanımlı malzeme olarak da bilinir. Genellikle sıkıştırılmış zemin yerine kullanılır.

Akışkan dolgu ince agrega veya dolgu malzemesi, su ve bağlayıcı malzeme(ler) den oluşan bulamaç halinde bir karışımdır. Bu karışımında akışkanlığı sağlamak için yüksek miktarda uçucu kül (ağırlıkça %20-90) ve düşük dozda çimento ile yüksek su/bağlayıcı oranı kullanılır. Elde edilen karışım düzensiz kazılarda ve ulaşılması zor yerlerde (örneğin temeller, köprü ayakları, istinat duvarları ve tesisat kanallarında) kendinden yerleşerek tüm boşlukları doldurabilme özelliğine sahiptir. Genellikle geleneksel hazır beton kamyonları kullanılarak taşınır ve yerleştirilir. Karışım birkaç saat içinde, sıkıştırma ihtiyacı olmaksızın sertleşir. Birçok uygulamada akışkan dolgunun sertleştikten sonraki dayanımı ileride yapılacak kazı ihtimali düşünülerek çevredeki zemin ile kıyaslanacak şekilde tasarlanır.

### 3.2.2.2.2. Yol, pist ve benzeri yapıların inşası

Uçucu kül, yol, pist ve benzeri yapıların inşasında zemin stabilizasyonundan yol temel ve alt-temel tabakalarının yapımına kadar çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Bu uygulamaların verimli olabilmesinde uçucu külün fiziksel, puzolanik ve varsa kendinden bağlayıcılık özellikleri önem kazanır<sup>40</sup>. Sönmüş kireç, sönmemiş kireç ve portland çimentosu gibi sisteme kalsiyum hidroksit katacak ilaveler

puzolanik reaksiyon için gerekli alkali kaynağını sağlar. Yoğun ve kararlı bir matris elde etmek için karışımda kullanılacak malzemelerin tane boyu dağılımları mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Hazırlanan karışımın mevcut imkanlar ile yeterli bir şekilde sıkıştırılabilmesi de gerekir. Her ne kadar kullanılacak kireç/çimento miktarı az olsa da çok etkilidir. Bu sebeple, malzeme karışımın hazırlanacağı tesisin çimento, kireç ve uçucu kül gibi kohezyonlu ve ince malzemeleri tam olarak karıştırabilmelidir. Ayrıca, yapılacak imalatın puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken sıcaklık ve zaman toleranslı olması istenir.

### **3.2.2.2.1. Alt-temel stabilizasyonu**

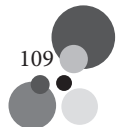
Alt-temeller yol, döşeme plakası, dolgu ve set gibi yapıların temeli olarak işlev gören yüzeylerdir. Karayolları, havaalanı pistleri, demiryolu yatakları, bina temelleri, otopark alanları gibi yapılar için inşa edilen alt-temellerin çoğunlukla stabilize edilmesine ihtiyaç duyulur. Alt-temel stabilizasyonunda uçucu kül nadiren tek başına, çoğunlukla çimento veya kireç ile birlikte kullanılır. Bu sayede zayıf zeminlerin dayanım ve işlenebilirlik artışı sağlanırken, plastisite indisi düşürülür, şişmesi azaltılır.

Alt-temel veya taban zemin stabilizasyonunda kullanılan uçucu kül, karışımın geçirgenliğini arttırarak plastik davranışın azalmasına neden olur. Sahip olduğu puzolanik özellikten dolayı uçucu küller kireç veya çimento ile etkileşime girerek bağlayıcı malzeme görevini üstlenirler. İçinde bulunduğu karışımın kullanıldığı zeminin taşıma gücünü arttırarak alt temel stabilizasyonu sağlar. Kullanım kolaylığı sağlamak açısından mobil olarak hizmet veren uçucu kül alt temel stabilizasyon sistemleri de mevcuttur. Alt temel stabilizasyonunda sıkıştırma önemli bir aşama olup, uçucu külün mukavemete en optimum seviyede etki etmesi için gecikmemesi gerekir.

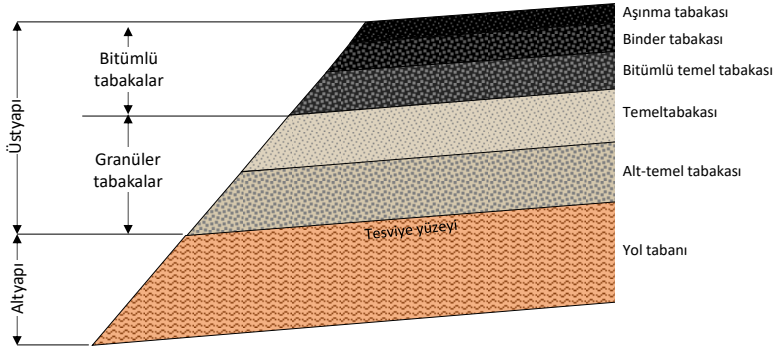
Uçucu kül temel stabilizasyonunda stabilizasyon malzemesi, bağlayıcı ve agrega olarak kullanılır. Tek başına veya bir bağlayıcı olarak kireç veya çimento ile beraber stabilizasyon malzemesi olarak görev yapar. Bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığında ise hidrasyon sırasında kireç ile reaksiyona girer ancak çimentoya göre dayanımını daha yavaş kazanır. Agrega olarak kullanımında ise daha ekonomik miktarlarda çimento ve kireç kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

### **3.2.2.2.2. Yol temel ve alt-temel tabakaları**

Karayolu üstyapıları, esnek ve rijit üst yapılar olarak iki ana gruba ayrılır. Bağlayıcı olarak asfaltın kullanıldığı esnek üst yapılar genellikle asfalt beton kaplama, temel ve alt-temel tabakalarından oluşur. Bağlayıcının çimento temelli olduğu üstyapılar ise rijit üstyapı olarak adlandırılır; temel ve beton plak kaplamadan oluşur. Uçucu kül, yol ve demiryolu inşaatlarındaki temel ve alt-temel tabakalarının (Şekil 3-21) stabilizasyonunda kullanılan malzeme karışımları içerisinde sıklıkla yer alır. Bu karışımlar, agrega (kum, çakıl gibi) veya mevcut zemin ile uçucu külün yanında



aktivatör olarak kireç veya portland çimentosu içerebilir. Tipik olarak düşük kalsiyumlu kül içeren karışımlarda %10-15 külün yanında %2-8 kireç veya %0,5-1 portland çimentosu eklenir. Yüksek kalsiyumlu küllerde aktivatöre ihtiyaç olmayabilir. Karışımlar merkezi santrallerde ya da inşaat sahasında hazırlanıp yola serilir, sıkıştırılır ve uygun şekilde kürlenir.

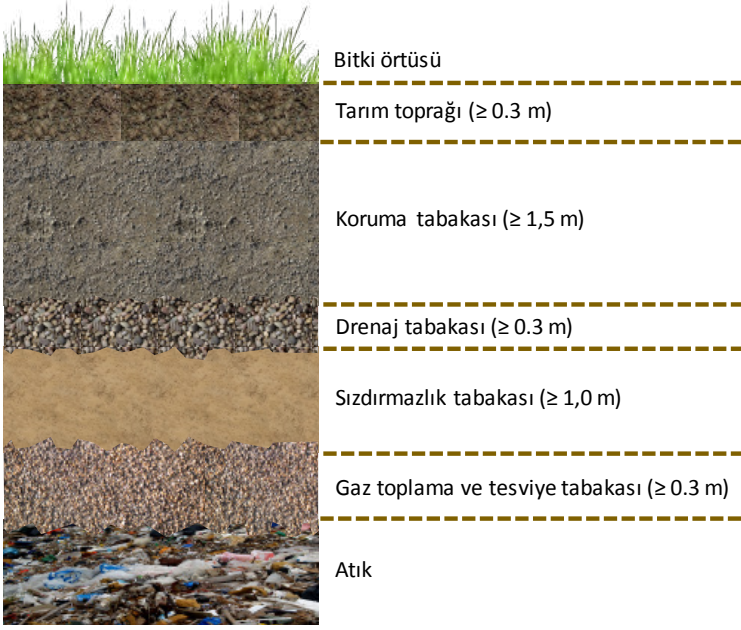


Şekil 3-21. Tipik bir esnek üstyapı kesiti <sup>256</sup>

Stabilize edilmiş uçucu kül karışımlarının davranışı stabilize edilmiş ince taneli agrega karışımlarına benzer. Fakat, uçucu kül karışımının ve dolayısı ile de yol temel ve alt-temel tabakalarının dayanımı, dayanıklılığı ve geçirimsizliği puzolanik reaksiyonlar sonucunda zamanla artar. Bu karışımların dayanım kazanım hızı yavaştır. Eğer havalar yeterince sıcak değilse, erken dayanımı arttırmak için kireç yerine portland çimentosu tercih edilebilir. Kendiliğinden bağlayıcılık özelliği taşıyan küllerin kullanımı dayanım artışlarına ek bir etki eder. Uçucu kül ilavesi sadece malzeme maliyetlerini düşürmekle kalmaz, optimal olmayan tane dağılımındaki agregaların kullanımına da olanak sağlar.

### 3.2.2.2.3. Katı atık düzenli depolama sahaları

Katı atık depolama sahası üst örtüsü, çevreyi depolama sahası kaynaklı gaz emisyonlarından koruyan ve atık içine su sızmasını engelleyen çok katmanlı bir yapıdır (Şekil 3-22). Uçucu küller, katı atık depolama sahası üst örtülerinde ve astarlarında kullanılabilir. Ülke mevzuatları ile tehlikeli olan veya olmayan atık depolama alanları için metrekaşe başına sızan su miktarı sınırlanır. Sızdırmazlık tabakası donma/çözölmeye, kurumaya, kök büyümesine ve hayvan kazmalarına karşı koruma tabakası ile, yukarıdan süzölerek gelen sulara karşı drenaj tabakası ile korunur. Sızdırmazlık tabakası altındaki tesviye tabakası ise atık kaynaklı gazların sızdırmazlık tabakasına nüfus etmesini engeller. Katı atık depolama sahalarının üst örtülerinin inşaatında büyük miktarda malzeme gerekir. Bazı uçucu küller tarım toprağı yerine kullanılabilir <sup>257</sup>. Ayrıca uçucu kül etkin bir şekilde günlük, ara ve son örtüler için kil veya şist yerine kullanılabilir <sup>258</sup>. Uçucu kül kullanımı özellikle diğer seçeneklerin az bulunduğu durumlarda ekonomik açıdan cazip olabilir.



Şekil 3-22. Katı atıkdepolama sahası örtü sistemi örneği

1980'lerde yapılan, uçucu külün hidrolik iletkenliğinin donma-çözülme ve ıslak-kuru döngülerinin bir fonksiyonu olarak inceleyen bir çalışmada uçucu külün depolama sahası astarı imalatı için uygun olduğu gösterilmiştir<sup>259</sup>. Bu çalışmada, astarın tatmin edici performansı için gerekli geçirgenlik değerleri ( $10^{-7}$  cm/s) elde edilmiştir. Zaman içerisinde bu tip uygulamalarda uçucu kül giderek daha fazla yer almaya başlamıştır. Uçucu küllerin hidrolik iletkenliği, sıkıştırma suyu miktarına karşı hassastır ve genellikle kullanılan su içeriği arttıkça azalır<sup>230</sup>. Rowe hücresinde (150 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde) değişen yanal basınçlarda yürütülen bir çalışmada, uçucu kül, test edilen koşullar altında atık depolama sahası gereksinimlerini ( $\leq 10^{-7}$  cm/s) karşılayamamıştır. 200 kPa'lık nihai gerilimde hidrolik iletkenlik, standart Proktor yoğunlukları için  $1,4 \times 10^{-7}$  ila  $3,7 \times 10^{-10}$  m/s ve modifiye Proktor yoğunlukları için  $7,3 \times 10^{-8}$  ila  $1,3 \times 10^{-9}$  m/s arasında değişmektedir<sup>230</sup>.

### 3.2.3. Asfalt için mineral filler

Asfalt beton karışımlardaki kullanılan mineral filler 75 $\mu$  elekten geçen, bitümlü malzeme ile reaksiyona girmeyen, kil, toprak, organik veya zararlı maddeler içermeyen malzemelerdir. Mineral filler hem karışımdaki boşlukları doldurur, hem de karışımın stabilitesini ve karışımdaki bağlayıcının kohezyonunu artırır<sup>250</sup>. Asfalt beton karışımlarında mineral filler malzemesi olarak çoğunlukla tercih taş tozu tercih edilir. Uçucu kül, taş tozunun yerine etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Tane

boyu dağılımı, organik kirlilik ve plastisite özellikleri sıcak bitümlü karışımlarda kullanılacak filler için mevcut şartname gereksinimlerini sağlar. Diğer filler malzemeleri ile kıyaslandığında, uçucu kül ekonomik, çevresel ve teknik açıdan caziptir. Sıcak bitümlü karışımların soyulmaya karşı dayanımını ve elastisite modülünü iyileştirir <sup>250</sup>.

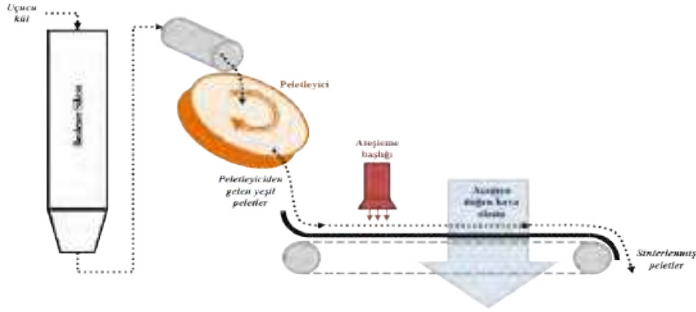
Sıcak bitümlü karışımlar otoyolların ve yoğun trafiğe maruz kalmış yolların kaplaması için yaygın olarak kullanılır. Agregalar, giller ve bitüm karışımının nispeten yüksek sıcaklıkla ısıtılması ile üretilir. Karışım sıcaklık kaybını önlemek için kısa sürede taşınır, döşenir ve sıkıştırılır. Sıcak bitümlü karışım içerisinde kullanılan küresel uçucu kül parçacıkları sıkışma özelliklerini iyileştirerek daha düşük yoğunlukta elde edilmesini sağlar. Uçucu kül geleneksel asfalttan daha çok daha yüksek bir işlenebilirlik indeksine sahip olduğu için karışımın performansını ve diğer özelliklerini bozmadan daha düşük sıcaklık derecelerinde karıştırılabilir ve sıkıştırılabilir. Uçucu kül, karışım içerisinde ikame olduğu malzemelerden daha düşük enerjili bir malzeme olduğu için asfalt için mineral filler olarak kullanılabilir olduğu yapılan çalışmalarla desteklenmiştir.

#### 3.2.4. Hafif agregalar üretimi

Betonda hafif agregalar normal ağırlıktaki agregalara kıyasla çeşitli fiziksel avantajlar sunar. Bu avantajların en başında azaltılmış sabit yük, daha yüksek yalıtım katsayıları ve üstün ses sönümleme nitelikleri gelir. Bu agregalar ile üretilen hafif betonlar binalarda ve köprü döşemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır <sup>260-262</sup>. Geleneksel hafif agregalar, doğal hafif malzemelerden üretilir; ancak, artan talep ile doğal kaynaklara erişim zorlaşmış ve maliyetli hale gelmiştir. Günümüzde modern hafif agregalar sık bulunan kil, şist veya kayrak taşının döner bir fırında 1000–1200°C'yi aşan sıcaklıklara ısıtılması ile yapay olarak üretilir. Üretilen yüksek kalitedeki yapay hafif agregalar yüksek yalıtımlıkta, çevresel olarak inert, yapısal olarak güçlü, fiziksel olarak kararlı, ve dayanıklıdır <sup>263</sup>. Bu agregalar ile üretilen hafif betonlar, normal ağırlıktaki betonla karşılaştırılabilir basınç dayanımları gösterirler.

Uçucu kül kullanarak yapay hafif agregalar üretmek üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda uçucu kül peletlerini sertleştirmek için otoklav, sinterleme <sup>264,265</sup>, soğuk bağlama <sup>266</sup> veya alkali aktivasyon <sup>267</sup> yöntemleri uygulanarak hafif agregalar üretilmiştir. Farklı üretim yöntemlerinin kendilerine göre avantaj ve dezavantajları olsa da hafif agregalar üretiminde uçucu kül kullanımı hem daha ekonomik hem de daha çevreci bir nihai ürün elde edilmesini sağlar <sup>268</sup>.

Sinterlenmiş uçucu kül agregaları uçucu kül parçacıkları bağlandıkça oluşan birikimden dolayı meydana gelirler. Uçucu külün agregaya dönüşümü uzun zamandır kanıtlanmış bir işlemdir fakat Şekil 3-23'de görülen sistem uçucu kül dönüşümü için yeni bir tekniktir.



Şekil 3-23 Üretim tesisi ve sinter zincirinin şematik gösterimi <sup>40</sup>

### 3.2.5. Blok malzeme üretimi

#### 3.2.5.1. Tuğla, kiremit, beton blok ve kaldırım taşı

Tuğlalar geleneksel olarak kil ve şistten üretilmekte, bu üretim için sürekli devam eden kil çıkarımı ve üst toprağın kaldırılması uygulamaları doğal kaynakların tükenmesine yol açmaktadır. Tuğla hammaddelerinin karıştırılması, kurutulması ve ateşlenmesini içeren geleneksel tuğla imalat yöntemi hala geçerlidir. Temel imalat aşamalarında değişiklik yapmak kolay değildir; fakat, daha sürdürülebilir tuğlalar üretmek için birçok atık malzemenin hammadde olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır.

Birikerek hem katı atık sahalarını dolduran hem de çevre kirliliğine yol açan uçucu küllerin kimyasal içerikleri tuğla yapımında kullanılan kil ve şistlere oldukça benzer; bu sebeple, uçucu küller tuğla üretiminde potansiyel bir hammadde olarak değerlendirilmektedir <sup>269-272</sup>. Uçucu kül içeren tuğla yapımında seçilen kül oranı oldukça önemli bir parametredir. Uçucu kül ile kilin uygun oranda karışımı ile kurutma ve pişirme işlemleri daha kolay hale gelir; dolayısı ile yakıt tasarrufu elde edilebilir <sup>66</sup>. Hatta bir çalışmada hiç kil kullanılmadan, sadece hazırlanan bir kül karışımından (% 72 uçucu kül, % 25 taban külü ve % 3 sodyum silikat) tuğla üretmek için bir yöntem geliştirilmiştir <sup>270</sup>.

Uçucu külün bloklarda kullanımı sadece pişirilmiş tuğlalarla sınırlı değildir. Uçucu kül ateşe dayanıklı olmayan veya buharda kürlenene blokların üretiminde de kullanılabilir. Büyük miktarda uçucu kül, düşük miktarda çimento ve kum karışımına uygun miktarda agrega ekleyerek iyi kalitede beton bloklar ve kaldırım taşları üretmek de mümkündür <sup>270</sup>.

### 3.2.5.2. Gaz beton üretimi

Gaz beton gözenekli, hafif ( $300-1.800 \text{ kg/m}^3$ ) bir yapı malzemesidir <sup>122,273,274</sup>. Tuğla gibi geleneksel bloklara kıyasla daha yüksek dayanım-ağırlık oranına sahiptir, el aletleri ile rahatça işlenebilir. İçerdiği kapalı gözenek yapısı gaz betona hafiflik, yeterli dayanım, düşük termal iletkenlik, üstün ses yalıtımı ve yangına dayanıklılık gibi temel karakteristik özelliklerini kazandırır.

Gaz beton ince silis kumu, portland çimentosu, kalker, alüminyum tozu ve su kullanılarak kimyasal ve hidrotermal reaksiyonlar sonucunda üretilir. Üretim malzemelerin su ile bulamaç haline getirilip derinliğinin üçte ikisine kadar yağlanmış kalıplara dökülmesi ile başlar. Alüminyum tozu, kalsiyum hidroksit ve su arasında meydana gelen reaksiyonlarda hidrojen gazı açığa çıkar. Bu temel kimyasal reaksiyonun yanında bazı fiziksel uygulamalar da yapılarak karışımda milyonlarca eşit boyutlu, kapalı ve dağılmış mikroskopik gözenekler oluşturulur <sup>275</sup>. Kalıplar otoklavda (yüksek sıcaklık ve basınç altında) birkaç saat kürlenip kesilerek nihai gaz beton bloklar elde edilir. Üretimde düşük kalsiyumlu uçucu küller birincil silis bileşeni olarak yüksek oranlarda (%30-100) silis kumunun yerine kullanılabilir. Hatta uçucu kül miktarı kuru karışımdaki malzemelerin ağırlıkça %80'ine kadar çıkabilir <sup>168</sup>. Uçucu kül içeren gaz beton karışımlarındaki malzeme oranları değiştirilerek çok geniş bir dayanım ve yoğunluk yelpazesinde ürünler elde edilebilir.

### 3.2.6. Jeopolimer üretimi

Son 20 yılda, sıklıkla jeopolimer olarak adlandırılan alkali aktive edilmiş alüminosilikatlarda (aynı zamanda jeopolimer olarak da bilinir) önemli gelişmeler yaşanmakta, inşaat ve yapı malzemeleri alanında yeni fırsatlar ortaya çıkmaktadır. Alüminosilikatların alkali aktivasyonu ile - belirli uygulamalar ile sınırlı olmak koşulu ile - portland çimento bazlı bağlayıcılara alternatif olabilecek yüksek performanslı bir bağlayıcı elde edilir. Bu nedenle,  $\text{CO}_2$  salımlarının büyük miktarda azaltılması ve daha sürdürülebilir bağlayıcılar elde edilmesini sağlar <sup>276</sup>. Sıradan bir betondan farklı bir kimyaya dayanan jeopolimerik betonlar yüksek asit ve yangın direnci ile boyutsal kararlılık gösterirler <sup>277</sup>. Ayrıca, sıradan betona kıyasla daha hızlı mekanik dayanım kazanırlar <sup>278</sup>.

Alkali-aktive alüminosilikatların oluşumunda alüminosilikat kaynağı bir dizi polimerizasyon reaksiyonu geçirir <sup>279-281</sup>: Katı bir alüminosilikat kaynağı yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltide alkalın hidrolizi ile çözünür ve alüminat ve silikat türleri açığa çıkar; amorf alüminosilikatların çözünmesi, yüksek pH'ta hızlıdır ve ayrıca sıcaklığın artırılması ile daha da hızlanır. Bir kez çözüldüğünde, alüminat ve silikat türleri sulu faza geçer, bazı durumlarda sulu faz zaten silikat içerebilir. Konsantre çözeltelerde, alüminat ve silikat yoğunlaşım polimerizasyonu geçirerek alüminyumsilikat bir jel oluşturur. Jelleştikten sonra, sistem üç boyutlu



bir alüminosilikat ağı oluşturacak şekilde yeniden düzenlenip organize olmaya devam eder. Bu yeniden yapılanma, malzemenin diğer özelliklerine de etki eden mikroyapıyı belirler.

Uçucu kül gibi alüminosilikat açısından zengin endüstriyel yan ürünler, alüminosilikat kaynağı olarak etkili bir şekilde kullanılabilir <sup>104,161,282,283</sup>. Farklı oranlarda kum içeren uçucu kül temelli jeopolimer harçlarda basınç dayanımı 60 MPa, elastisite modülü 2,27 GPa olarak ölçülmüş; kum oranı %50'ye varana kadar bu değerler ciddi oranda değişmemiştir <sup>284</sup>. Alkali aktif uçucu küllere dayanan jeopolimer betonun mühendislik özellikleri incelenmiş, ölçülen Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri sıradan betondan yüksek bulunmuştur <sup>285</sup>. Uçucu kül temelli jeopolimerler sıradan betona benzer sağlamlık ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu için çeşitli yapısal uygulamalarda için de potansiyel taşımaktadır. Yüksek sıcaklıkta kürlenmiş jeopolimer betonun donatıya bağ yapma kapasitesi ve kırılma davranışının, portland çimentosu betonuna göre daha iyi olduğu görülmüştür <sup>286</sup>. Uçucu kül temelli jeopolimer beton yapı elemanları portland çimento beton yapılarında kullanılan geçerli tasarım kodları ve standartları kullanılarak tasarlanabilir <sup>287</sup>. Uçucu kül temelli jeopolimer betonun sertleşmesinde ısıya duyulan ihtiyaç düşük dozda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi kalsiyum taşıyan malzemelerin eklenmesiyle azaltılabilir <sup>159</sup>. Bu durum, uçucu kül temelli jeopolimer betonların yaygın kullanımındaki en büyük engelin aşılmasına, yapısal uygulamaların prefabrik elemanların ötesine geçmesine ve oda sıcaklığında da kürlenme yapılabilmesine olanak tanır. Yeni yeni gelişmekte olan bu alanda araştırmalar devam etmektedir.

### 3.2.7. Mineral yün üretimi

Mineral yün genellikle bazalt, diyabaz ve dolomit gibi kayaların veya cüruf, kireçtaşı ve cam gibi yan ürünlerin işlenmesi ile elde edilen camsı, fiberli bir izolasyon malzemesidir. Günümüzde mineral yün üretiminin büyük bir kısmında cüruf veya cüruf-kaya karışımı kullanılmaktadır. En sık kullanılan cüruf tipi demir-çelik fabrikalarında pik demir üretiminde açığa çıkan yüksek fırın cürufudur. Kullanılan diğer cüruflar bakır, kurşun ve fosfat sanayilerinde açığa çıkanlardır. Mineral yün üretiminin üç ana aşaması vardır: (i) kupol ocağında minerallerin eriyik hale getirilmesi, (ii) fiberlerin oluşturulup toplanması, (iii) nihai ürünün üretilmesi. Elde edilen malzeme işlenerek yangına dirençli yalıtım malzemesine ya da fiberli başka bir malzemeye dönüştürülür. Yapılan çalışmalar, uçucu kül kullanılarak da mineral yün üretilebileceğini göstermiştir <sup>288,289</sup>. Bunun için uçucu külü kireç, kireçtaşı ya da dolomit ile karıştırıp uygun kimyasal kompozisyona çekmek gerekir. Bu da ek bir maliyettir. Uygun kömür karışımları kullanılarak mineral yün üretimi için istenilen 0,8-1,2 aralığındaki asit/baz oranına ( $SiO_2 + Al_2O_3 / CaO + MgO$ ) ulaşılabilir.





### 3.3. TOPRAK İYİLEŞTİRME

Uçucu küllerin ayrıştırılmadan kullanıldığı alanlardan biri tarım sektörüdür. Uçucu kül toprağın fiziksel veya kimyasal özelliklerini iyileştirmede ve tarımsal verimini artırmada kullanılır<sup>290-293</sup>. Ayrıca, sorunlu toprakların (örneğin maden sahaları yakınındaki) iyileştirilmesi için de tercih edilir<sup>294</sup>.

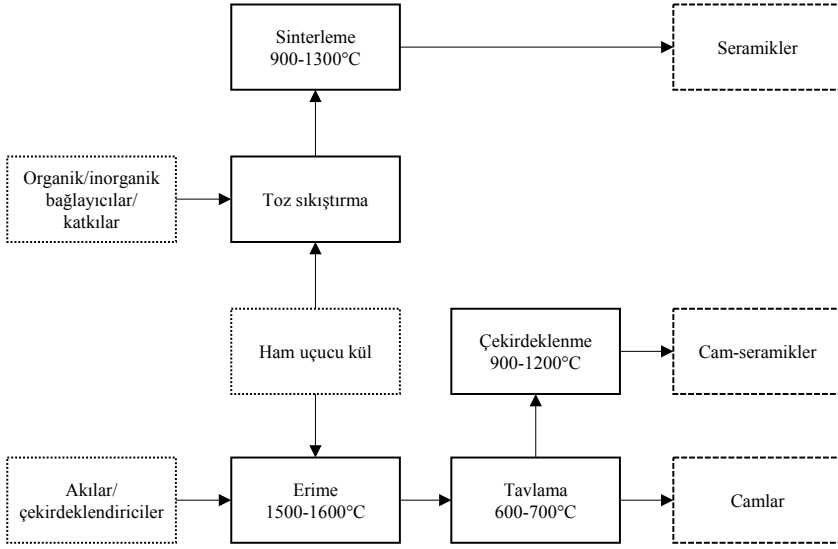
Tarımsal mahsullerin çoğu için optimal büyüme aralığı 6,5-7 pH seviyesidir. Toprağa uygun alkali veya asidik uçucu kül ilavesi ile pH'ı istenilen seviyeye çekilebilir<sup>85,295</sup>. Asidik bir toprağa  $CaO$  zengin, alkali bir uçucu külün yüksek miktarda ilavesi toprak pH'ını yükseltir<sup>296</sup>. Bu durum, bu koşullar altında uçucu külün  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Al^{3+}$  ve  $OH^-$  iyonlarını salmasıyla açıklanır<sup>297</sup>. Örneğin %2,43'lük  $CaCO_3$  eşdeğerine sahip bir linyit kömürünün yakımından elde edilen uçucu kül ile asitli bir toprağın pH'ı 2,3 derece arttırılmıştır<sup>298</sup>. Düşük  $CaO$  içeriğine sahip küllerin toprak iyileştirmedeki potansiyelleri daha sınırlıdır.

Uçucu kül kullanımının toprak dokusunun geliştirilmesi ve yoğunluğunun düşürülmesi gibi faydaları da vardır<sup>296,299</sup>. Ayrıca toprağın havalanma, süzülme ve su tutma özelliklerini de iyileştirir. Kabuk oluşumunu azaltarak gübre veya kireç gibi diğer toprak iyileştiricilerin daha az tüketilmesini sağlar. Kısmi olarak pestisit özelliği gösterir. Topraktaki metal hareketliliğini ve kullanılabilirliğini azaltabilir<sup>290</sup>. Öte yandan, alkali uçucu kül uygulamaları bazı besin maddelerinin biyoyararlılığını azaltabilir; aşırı tuzluluğa sebep olabilir; ve fitotoksik element (örneğin yüksek seviyedeki bor) içeriğini arttırabilir<sup>17,85</sup>.

### 3.4. SERAMİK VE CAM ÜRETİMİ

Temel bileşenleri  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  ve  $Fe_2O_3$  gibi oksitler olan uçucu kül seramik, cam ve cam-seramik malzemelerinin üretimi için düşük maliyetli alternatif bir hammadde olarak dikkat çekmiştir<sup>66,300</sup>. Uçucu külden herhangi bir katkı malzemesi eklenmeden seramik, cam ve cam-seramik üretilebilir<sup>300</sup>. Fiziksel ve mekanik testler uçucu külden üretilen bu üç malzemenin atık ve atık-olmayan diğer kaynaklardan üretilen malzemeler için elde edilen literatür değerleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

Üretim süreçlerinin ana hatları Şekil 3-24'te özetlenmiştir. Üretimin ana basamağı ham uçucu külün sıcaklık ile aktivasyonudur. Üretilen camların veya seramiklerin nihai halini yönlendiren ise sıcaklık ve ayraçlardaki varyasyonlardır.



Şekil 3-24. Uçucu külden seramik, cam ve cam-seramik üretimine genel bir bakış <sup>301-303</sup>

Kordiyerit seramik genellikle fırın destek parçası uygulamaları için yapısal bir seramik olarak kullanılan, iyi ısıl darbe özelliklerine sahip, uygun maliyetli bir magnezyum alüminyum silikat türüdür. Uçucu kül, kordierit seramik üretiminde kaolinit için bir alternatif olarak düşünülmüştür <sup>302</sup>. Elenmiş kül (<44 µm) endüstriyel alümina ve magnezyum karbonat tozları ile karıştırılmış ve bu karışım metil selüloz ile öğütülüp harmanlanmıştır. Bu harman, disklere preslenmiş ve daha sonra 900-1300°C arasındaki sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sonuçlar %64-68 uçucu kül, %10 alumina ve %22-26 magnezyum karbonattan oluşan bir kompozisyon ile 1200°C'nin üzerindeki sinterleşme sıcaklıklarında baskın faz olarak kordiyerit oluştuğunu göstermektedir.

Uçucu kül ağırlıkça 60:40 oranında kaolenik kil ile karıştırılarak EN 14411 - kategori BIII tipi seramik döşeme imalatında da kullanılmıştır <sup>304</sup>. Bu uygulamada yüksek CaO içeren ve ince bir uçucu kül kullanarak klasik uçucu külden elde edilen yüksek sıcaklık seramiklerinde görülen fırınlama büzülmesinin azaltılması hedeflenmiştir. Neticede, Ca-zengin ince uçucu kül kullanımı ile fırınlama büzülmesinin azaldığı; ancak, gözenekliliğin arttığı, eğilme dayanımının düştüğü ve baca gazlarından çıkan SO<sub>2</sub> miktarının yükseldiği gözlenmiştir.

Uçucu külün kimyasal bileşimi yapısal cam-seramiğinin imalatı için de çok uygundur <sup>303</sup>. Bir çalışmada, iki farklı akı (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve CaCO<sub>3</sub>) kullanarak, metaborik asit (HBO<sub>2</sub>) ilaveli veya ilavesiz olarak nanokristal cam-seramikler üretilmiş; üretilen cam-seramiklerin ana kristal fazları volastonit (CaSiO<sub>3</sub>) ve anortit (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) olarak belirlenmiştir. Çalışmada üretilen tüm cam-seramikler iyi mekanik özellikler

sergilemesine rağmen,  $HBO_2$  içeren akıllar ile üretilen cam-seramiklerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin içermeyen akıllarla üretilenlere kıyasla daha üstün olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada cam-seramik üretiminde erime sürecinin sıcaklığını düşürmek için uçucu kül çekirdekleştirici olarak  $CaO$  ve  $TiO_2$  ile birlikte eritilmiş, eriyikler cam geçiş sıcaklığından  $10^\circ C$  yüksekte tavlansmıştır <sup>305</sup>. Optimal koşullar kullanarak üretilen, iyi aşınma direnci ve kırılma tokluğu gösteren bu cam-seramikler yapı malzemesi olarak kullanım potansiyeline sahiptir. Ayrı bir çalışma, cam-seramik üretiminde çekirdekleştirici olarak  $Cr_2O_3$  kullanımını önermektedir <sup>306</sup>.

Uçucu külden tekstil boyama proseslerinde açığa çıkan atık suyun filtrelenmesi amacıyla kullanılan seramik mikro-filtrasyon tübular membranlar da üretilmiştir <sup>307-308</sup>. Bu membranlar, hem makro-destek hem de aktif mikro-filtrasyon katmanları içerir. Makro gözenekli destek katmanı iki aşamada üretilmiştir: (i) uçucu kül kalsine edilmiş ve hamur oluşturmak üzere bağlayıcı maddeler ile karıştırılmıştır; (ii) hamur uzunluğu 100 mm, dış çapı 10 mm, iç çapı 5,5 mm olan tüpler oluşturacak şekilde ekstrüde edilip sinterlenmiştir. Mikro-filtrasyon katmanları ise kalıp-döküm yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Bunun için öğütülmüş uçucu kül (0,5 ve 2  $\mu m$ ) ve polivinil alkol ihtiva eden bağlayıcı bir çözeltiye makro-destek daldırılmış ve makro-destek üzerine depozit sağlanmıştır. Hazırlanan seramik membran, tekstil boyama proseslerinde açığa çıkan atık sular için çapraz akışlı membran uygulamalarında kullanıldığında kimyasal oksijen talebini %75 oranında azaltmış ve boya renginin %90 oranında kaldırılması sağlamıştır. Bu uygulama sonucu stabilize süzüntü akı yaklaşık 100 L/h·m<sup>2</sup> olmuştur. Bu değer tipik bir alüminyum seramik membranı ile aynı olması, uçucu külün bu alandaki potansiyelini göstermektedir. Benzer bir çalışmada <sup>309</sup> çift kaplamalı bir membranın, tek kaplamalı membrandan daha küçük bir gözenek boyutuna ve daha dar boyut dağılımına sahip olduğu bildirilmiştir.

### 3.5. KATALİZÖRLER

Kataliz, eski Yunanca'daki birimlerine ayrışmak fiilinden türetilmiştir. Katalizörler, kimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisini düşürerek reaksiyonların daha hızlı gerçekleşmesini sağlayan maddelerdir. Reaksiyon sonrasında katalizör fiziksel olarak değişse bile, kimyasal yapısında değişiklik meydana gelmez. Katalizörün bir reaksiyonu hızlandırma ölçüsüne katalizör aktifliği, katalizörün olası reaksiyonlardan yalnızca birini katalizlemesine ise katalizör seçiciliği denir. Katalizörlerin aktifliği ve seçiciliği deneysel yöntemler ile belirlenir. Kataliz uygulamaları iki ana gruba ayrılır. Katalizör ve reaktantlar aynı fazda ise (gaz-gaz, sıvı-sıvı, katı-katı) homojen kataliz, farklı fazda ise (gaz-sıvı, gaz-katı, sıvı-katı) heterojen kataliz denir.

Uçucu külün katalitik uygulamalarda kullanımı, sınırlı rezerve sahip olan veya imalatı pahalı olan malzemelerin tüketimini azaltabilir. Heterojen kataliz uygulamalarında uçucu kül kullanılması üzerinde oldukça çalışılan bir alandır (Tablo 3-8). Heterojen katalizörlerin en büyük avantajı homojen katalizörlere kıyasla reaksiyon tamamlandıktan sonra geri kazanılmalarının daha kolay olmasıdır. Heterojen katalizörler aktif bileşen (kimyasal reaksiyonu katalizleyen), destek

bileşen (yüksek yüzey alanı sağlayan) ve güçlendiriciler (istenilen aktiviteye kolay ulaşmayı, zamanda seçiciliği ve kararlılığı arttıran) olmak üzere üç kısımdan oluşur. Destek bileşenleri genellikle  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  ve  $MgO$  gibi bir dizi metal oksit içerir<sup>263</sup>. Öncelikli olarak  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$ 'den oluşan ve yüksek termal kararlılık gösteren uçucu küller destek bileşenlerinde istenilen temel özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, uçucu küller kısıtlı miktarda aktif bileşen olarak da kullanılmıştır.

Tablo 3-8. Heterojen katalizde uçucu kül kullanım alanları<sup>15</sup>

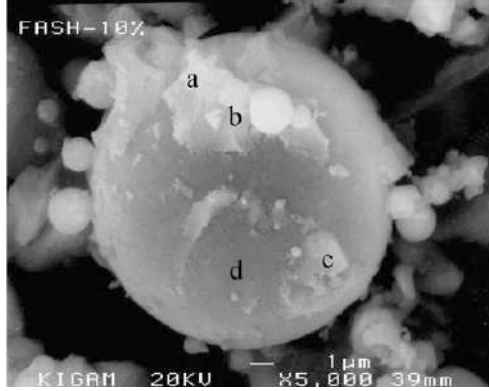
<u>Destek bileşeni olarak uçucu kül</u>	<u>Aktif bileşen olarak uçucu kül</u>
- Hidrojen üretimi	- Buhar metan reformasyonu ve su-gaz dönüşüm reaksiyonu
- Atık gaz ( $SO_x$ ve $NO_x$ ) temizleme	- Gaz-fazı oksidasyonu
- Metan oksidasyonu	- Sıvı-fazlı hidrokarbon kralingi ve alkilasyonu
- Su arıtma	- Sulu oksidasyon
- Petrol parçalama (Hidro-kraling)	- Katı atık pirolizi
	- Diğer reaksiyonlar

### 3.5.1. Katalizörlerde destek bileşen

Fosil yakıtların sınırlı olması, hidrojenin yeni ve temiz bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesinin önünü açmıştır. Hidrojen üretiminde, metan reformasyonu ve amonyak dekompozisyonu gibi çeşitli yöntemler de vardır. Bu yöntemlerde, aktif bileşeni geçiş ve soy metalleri olan katalizörler kullanılır<sup>311,312</sup>. Hidrojen üretimi için metanın  $CO_2$  ile reformasyonunda aktif bileşen olan nikel destek olarak uçucu kül kullanıldığı farklı çalışmalar vardır<sup>310</sup>.  $Ni$  yüklenmeden önce uçucu külün  $CaO$  ile işlenmesi ile aktivitesi  $Ni/Al_2O_3$  ve  $Ni/SiO_2$  sistemlerine yakın, yüksek dönüşüm ve kararlılığa sahip katalizörler elde edilmiştir<sup>310</sup>. Uçucu kül ile desteklenmiş  $Fe$ ,  $Cu$ ,  $Ni$  ve  $V$  katalizörleri ile  $NO$ 'nun amonyak ile seçici katalitik indirgeme potansiyeli de araştırılmıştır. Bu grupta,  $Cu$  yüklü uçucu kül en yüksek aktiviteyi göstermiştir<sup>313</sup>.

Organik ve inorganik bileşiklerin fotokatalitik detoksifikasyonu, kirli havanın ve endüstriyel atıksuların arıtılması için kullanılan bir yöntemdir. Kararlı yapısı, toksik olmayışı ve düşük maliyeti sebebi ile en çok araştırılan fotokatalist  $TiO_2$ 'dir. Bu yarı iletken, elektromanyetik spektrumunun sınırlı (mor ötesi) bir bölgesini (anataz için  $<387$  nm) soğurabilir; görünür ışık altında fotokatalitik aktivitesi düşüktür. Fotokatalistler, genellikle kirleticilerin bozulması için atık su içinde süspanse edilir; ve bu nedenle, katalizörü arıtılmış sudan çıkarmak için ilave bir ayırma basamağı gerekir. Fakat, oldukça küçük tane boyutlarına sahip fotokatalistlerin büyük hacimlerde sudan arındırılması çok zordur. Bu durum, atık suların arıtılması için fotokatalitik sürecin uygulanmasına yönelik en büyük engeldir. Bu sıkıntı,  $TiO_2$ 'un aktif karbon, silika veya zeolit gözenekli substratlar üzerine sabitlenmesi ile azaltılmaktadır. Bu yaklaşım her ne kadar katı-sıvı ayırma problemine çözüm sağlasa da, yapay olarak sentezlenen gözenekli malzemeler ucuz değildir. Fotokatalist kullanarak büyük miktarda endüstriyel atık suyun arıtılması için daha ucuz bir fotokatalizörler geliştirilmelidir. Uçucu kül bu alanda yüksek potansiyele sahiptir.

$TiO_2$  kaplı uçucu külün gaz akımından  $NO$ 'yu çıkarma potansiyeli değerlendirilmiş, ısı işlem sonrası  $NO$  giderme oranı % 95'e kadar çıkmıştır <sup>314</sup>.



Şekil 3-25.  $TiO_2$  kaplı bir uçucu kül tanesinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsü <sup>314,315</sup> (a-d noktalarından alınan EDX ölçümleri  $TiO_2$ 'nin varlığını doğrulamaktadır)

Atık su arıtımında daha uygun maliyetleri sebebi ile biyolojik prosesler tercih edilir. Fakat, esas olarak tekstil, matbaacılık ve deri sanayilerinden deşarj edilen atık sudaki organik boyalar, biyolojik olarak bozulmayan önemli kirleticiler içerir <sup>15,316</sup>. Ciddi sorun teşkil eden bu kirleticilerin atık sudan uzaklaştırılmasında fizikokimyasal yöntemler (koagülasyon-flokülasyon, filtrasyon, aktif karbon adsorpsiyonu, hava ile sıyırma) oldukça etkilidir. Fakat, bu yöntemler kirleticilerin bir ortamdan başka bir ortama transferi söz konusu olduğundan tercih edilmemektedir <sup>317</sup>. İleri oksidasyon prosesleri, UV ışığı altında, alkali veya asit varlığında  $H_2O_2$ 'nin geçiş metali iyonları ile reaksiyona girmesi ve sonucunda hidroksil radikallerinin ( $OH^\cdot$ ) oluşumuna dayanır <sup>316</sup>. Seçici olmayan bu radikaller, yüksek elektrokimyasal oksidasyon potansiyeline sahiptirler. Basit organik bileşikler ve klorlu türevleri (asetik asit, maleik asit, oksalik asit, aseton, kloroform, tetrakloretan) haricinde bütün organikleri oksitleyebilirler. Bu sebepten, daha pahalı olmasına rağmen ileri oksidasyon prosesleri - özellikle biyolojik arıtmadan önce organik yük ve toksisiteyi azaltmak için - kullanılabilir. Uçucu külün, bu kirleticilerin atık sudan ayrıştırılmasında düşük maliyetli adsorban olarak kullanımı üzerine birçok araştırma mevcuttur <sup>318</sup>. Bununla birlikte, sınırlı sayıda da olsa, ileri oksidasyon proseslerinde uçucu kül destekli katalizörlerin kullanımı üzerine araştırmalar vardır. Bir araştırma,  $Fe^{3+}$  yüklü, uçucu kül destekli bir katalizörün reaktif boya siyah 5 (RB5)'in ayrıştırılmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Bunun için, asidik koşullar altında yüksek demir içerikli bir uçucu külden demir iyonları süzölmüş, gözenekli ve amorf  $FeOOH$ 'yi yine uçucu kül yüzeyine çöktürerek bir fotokatalizör hazırlanmış ve bu katalizörün metil oranjın fotokatalitik bozunumundaki etkinliği test edilmiştir. Katalizörün, pH 9,0'a kadar etkili olduğu ve bu nedenle bu tür sistemlerin geleneksel pH aralığını genişlettiği tespit edilmiştir <sup>319</sup>.

Bazı zeolitlerin, petrolün hidrokrakingi (hidrojen ile kırma) için uygun katalizörler olduğu bilinmektedir. Yüksek alümina ve silika içeriği ile uçucu kül zeolit sentezi için potansiyel bir *Al* ve *Si* kaynağıdır. Uçucu külden sentezlenen fojasit tipi zeolitler *Ni* yüklenerek, ağır petrol distilatın hidrokrakinginde katalizör olarak kullanılmışlardır<sup>320</sup>. Fojasit tipi zeolit oluşumu *HCl* ile geri yıkama (reflaks) ve *NaOH* ile füzyon kombinasyonu ile sağlanmış; oluşan fojasite iyon değişimi ile *Ni* yüklemesi yapılarak katalizör hazırlanmıştır. Ağır petrol distilatın hidrokrakinginde, sentezlenen *Ni*-fojasit, referans bir *Ni*-zeolit *Y*'den daha iyi bir dönüşüm sergilemiş; ancak, benzin ve kerosen (gaz yağı) seçiciliği daha düşük olmuştur. Uçucu külden zeolit elde edilmesi Kısım 3.7'de detaylandırılmıştır.

Uçucu kül destekli katalizör uygulamaları Tablo 3-9'da özetlenmiştir.

Tablo 3-9. Çeşitli katalitik reaksiyonlarda uçucu kül destekli katalizörler<sup>15</sup>

	Katalizör	Sıcaklık (°C)	Dönüşüm (%)	Kaynak
Metan reformasyonu	Ni/UK	700	29,1	310
	Ni/UK - HNO <sub>3</sub>	700	2,3	310
	Ni/UK - NH <sub>3</sub>	700	50,7	310
	Ni/UK - Ca(OH) <sub>2</sub>	700	54,7	310
	Ni/UK - CaO	700	74,6	310
NO indirgeme	Fe/UK	450	90	313
	Cu/UK	300	90	313
	Ni/UK	350	70	313
	V/UK	350	90	313
NO indirgeme	TiO <sub>2</sub> - UK	Oda sıcaklığı	90	315
	TiO <sub>2</sub> - UK	400-700		314
Sulu boya oksidasyonu	Fe/UK	Oda sıcaklığı	100 <sup>(*)</sup>	316
Hidrokraking	UK - ZY	320	30	320
	Ni/UK - ZY	320	60	320

(\*) Süre:2 saat  
(UK: Uçucu kül; ZY: Fojasit (Zeolit Y))

Sol-jel tekniği ile uçucu kül üzerine sülfatlı zirkonya yükleyerek, yüksek aktiviteye sahip nano-kristal yapılı, ısıl olarak kararlı, katı asit katalizör de sentezlenmiştir. Bu katalizörün, benzen ve toluenin benzen klorür ile sıvı benzilasyonundaki performansı için değerlendirilmiştir. Yüksek benzen (% 87) ve toluen (% 93) dönüşümleri bildirilmiştir<sup>321</sup>.



Uçucu külün asit önifleme ve ardından ısıll işleme aktivitesinin arttırılması, amonyağı bozmak için kullanılan uçucu kül ile desteklenmiş rutenyumun (Ru) da katalitik aktivitesini arttırmıştır. Bu katalizörler aktivite değerleri % 10-15 arasında bildirilmiştir. Fakat, bu değerler literatürdeki silis dumanı ile desteklenmiş Ru katalizörleri için bildirilen değerlere yakın değildir <sup>322</sup>.

### 3.5.2. Katalizörlerde aktif bileşen

Çeşitli endüstriyel uygulamalarda, metal ve metal oksitler katalizörler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Atık malzemelerden katalizörlerin geliştirilmesi, atıkların değerini arttırmak için etkili bir yöntemdir.

Buhar metan reformasyonu ve su-gaz dönüşüm reaksiyonu, sentez gazı üretiminde önemli gaz fazı reaksiyonlarıdır. Demir bazlı katalizörlerin bu reaksiyonlar için etkili olduğu bilinmektedir. Uçucu küllerin muhteviyatında  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  haricince, yüksek oranda  $Fe$  oksit içeren metal oksitler de vardır. Başta pirit olmak üzere özellikle demir içeren kömür mineralleri, kömürün çözücü ile rafine edilmesi sürecinde ucuz katalizörler olarak kullanılabilir <sup>323</sup>.

Uçucu organik bileşikler, birçok endüstriyel işlemde yayılan önemli hava kirleticileridir. Havadaki uçucu organik bileşenler (i) ısıll süreçlerde açığa çıkan bu bileşiklerin katalitik oksidasyonu, (ii) ısıll olmayan plazma veya (iii) fotokataliz yöntemleri kullanılarak bozunur. ısıll süreçlerde, uçucu kül oksiklorinasyonu ve fenolün/monoklorofenollerin derin oksidasyonlarını yönlendirmek için aktif bileşen olarak kullanılmıştır <sup>324</sup>.

Metalik sülfür, kağıt fabrikaları, tabakhaneler ve sülfür boyama gibi çeşitli endüstriyel işlemlerde yayılan kirleticisi bir maddedir. Metalik sülfür, kötü kokulu hidrojenin sülfüre evrimi nedeniyle rahatsız edici olabilir. Sodyum sülfürün katalizör olarak uçucu kül kullanıldığında  $H_2O_2$  <sup>325</sup> veya hava <sup>326</sup> ile oksidasyonu araştırılmıştır. Ağırlıkça % 4 uçucu kül yüklemesi ile reaksiyon hızının 3,5 kat arttığı bildirilmiştir. Aynı yükleme ve sıcaklıkta, oksidan olarak  $H_2O_2$  kullanıldığı, uçucu kül ilavesiz durumda ise reaksiyon hızının 4,5 katına çıktığı belirtilmiştir.

Görünür ışık altında sudaki boya ların giderilmesi için uçucu külün bir fotokatalist olarak kullanımı da araştırılmıştır <sup>327</sup>. Değerlendirmelerde boya konsantrasyonu, temas süresi ve pH'ın etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Başlangıçta  $1 \times 10^{-4}$  M konsantrasyonlu çözeltide 4 saat sonunda tiyonin % 60 azaltılmıştır. Asit önifleme ile daha aktif hale gelen uçucu külden nano-kristal, katı asit katalist de üretilmiştir. Bu katalizörler, çözücüye ihtiyaç duymadan asetilsalisilik asit ve metil salisilat üretmek üzere salisilik asidin tek bir aşamada asetik anhidrit ve metanol ile esterifikasyonu için kullanılmış ve % 90'ın üzerinde verim ve saflık bildirilmiştir <sup>328</sup>.

Alkali kataliz, kimya, petrokimya, ve farmasötik endüstrilerinde kullanılan bir yöntemdir. Ticari alkali kataliz reaksiyonlarında büyük ölçüde  $NaOH$ ,  $Ca(OH)_2$



ve *KOH* gibi homojen alkali katalizörler kullanılarak gerçekleştirilir. Fakat, bunlar zararlıdır; stokiometrik miktardan fazladır; nötralizasyon, ürün ayırıştırma ve arıtma, korozyon ve atık üretimi kaynaklı yüksek işletme maliyetlerine ve ciddi çevresel sorunlara yol açarlar. Bu durum, heterojen katalizörlerin aracılık ettiği süreçlerin gelişimine yönelik çabaların artmasına yol açmıştır. *NaOH* önışleme ve ardından ısı işleme tabi tutulan uçucu külden katı alkali katalizörler sentezlenmiştir. Bu katalizörler, benzilaldehid ve sikloheksanonun dibenziliden-sikloheksanona yoğunlaşma reaksiyonunda yüksek dönüşüm (>% 70) ve seçicilik (>% 80) göstermiştir

329

## 3.6. ÇEVRESEL KORUMA

### 3.6.1. Su kirliliği kontrolü

#### 3.6.1.1. Atık sulardan ağır metallerin giderimi

Günümüzde kaynak sularında ve arıtılmış sulardaki en önemli kirleticiler arasında ağır metaller yer alır. Hızlı sanayileşme ile başlayan bu durum artık dikkat edilmesi gereken bir halk sağlığı önceliği haline gelmiştir. Organik atıkların aksine, ağır metaller biyoçözünür değildir; canlı dokularda birikerek çeşitli sorunlara yol açabilirler. Bu sebeple, mutlaka boşaltımdan önce atık sulardan giderilmelidir.

Atık sudan ağır metallerin giderilmesi yaygın olarak kimyasal çöktürme, çözücü ekstraksiyonu, iyon değişimi, membran filtrasyonu (nanofiltrasyon, ters osmoz ve elektrodializ gibi) veya adsorpsiyon işlemleri ile gerçekleştirilir. Kimyasal çöktürme yaygın olarak kullanılsa da işlem sonunda az miktarda ağır metal içeren çok miktarda atık çamur oluşur. Membran filtrasyonu metal iyonlarını uzaklaştırmak için etkin bir yöntemdir; ama yüksek maliyeti pratik kullanımını sınırlar. Uygun bir adsorban ile yapılan adsorpsiyon, atık sudan ağır metallerin uzaklaştırılması için sıralanan yöntemler arasında en basit ve etkili yöntemlerden biridir. Organik maddelerin karbonizasyonundan elde edilen aktif karbon en sık kullanılan adsorbandır. Yüksek ağır-metal adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Son zamanlarda atık sulardan ağır metallerin gideriminde düşük maliyetli adsorbanların kullanımı üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır.

Uçucu kül atık suyun arıtımında düşük maliyetli bir adsorban olarak büyük bir potansiyele sahiptir<sup>330</sup>. Çoğu uçucu külün yüzey yükü pH 6,2-7,6 aralığında sıfır olur<sup>310</sup>; yüzeyleri asidik ortamlarda pozitif, alkali ortamlarda negatif yüklenir. Dolayısıyla çöktürme veya elektrostatik adsorpsiyon yoluyla metal iyonlarının atık sudan uzaklaştırılması için uygundur<sup>17</sup>. Ham uçucu küller çoğunlukla düşük adsorpsiyon kapasitesine sahiptir; adsorpsiyon kapasitesinin artırılması için fiziksel ve kimyasal işlemler gerekebilir. Genel olarak, sulu oksitlerde metal adsorpsiyonunu arttırmak için atık suyun pH'ının kireç ve sodyum hidroksit ile düzenlenmesi gerekir; çoğu uçucu kül zaten alkalın yapıdadır. Ayrıca, her uçucu kül bir miktar yanmamış karbon içerir. Yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip bu bileşen sayesinde bazı uçucu küller, hem gaz hem de sıvı uygulamalarda doğrudan adsorban olarak kullanılabilir<sup>85</sup>.





Tablo 3-10. Başlıca metallerin uçucu küle adsorpsiyon kapasiteleri (mg/g) <sup>10,318</sup>

Metal	Adsorban	Kapasite	Sıcaklık (°C)	Kaynak	Metal	Adsorban	Kapasite	Sıcaklık (°C)	Kaynak
As <sup>3+</sup>	UK karbonu	3,7-89,2	25	337	Hg <sup>2+</sup>	UK	2,82	30	338
						UK	11	30-60	339
As <sup>5+</sup>	UK	7,7-27,8	20	340	Fe emdirilmiş UK	12,5	30-60		
	UK karbonu	0,02-34,5	25	337	Al emdirilmiş UK	13,4	30-60		
					Sülfokalsik UK	5	30		341
Cd <sup>2+</sup>	UK	198,2	25	342	Silikoalüminoz UK	3,2	30		
	UK - yıkanmış	195,2	25		UK - C	0,63-0,73	5-21		343
	UK - asit	180,4	25						
	UK	1,6-8,0	-	75	Ni <sup>2+</sup>	UK	9,0-14,0	30-60	344
	UK zeolit	95,6	20		Fe emdirilmiş UK	9,8-14,93	30-60		
	UK	0,67-0,83	20	345	Al emdirilmiş UK	10-15,75	30-60		
	UK (I)	0,08-0,29	20	346	UK (I)	0,40-0,98	20		347
	UK (II)	0,0077-0,22	20		UK (II)	0,06-1,16	20		
	UK	0,05	25	348	UK	3,9			341
	UK	18,98	25	349	UK	0,03			350
	UK (Afsin-Elbistan)	0,29		351					
	UK (Seyitömer)	0,21			Pb <sup>2+</sup>	UK	444,7	25	342
	UK	207,3		342	UK - yıkanmış	483,4	25		
	UK	1,38		331	UK - asit	437	25		
					UK	753	32		
Cr <sup>3+</sup>	UK	52,6-106,4	20-40	352	UK	18,8			341
					UK	18			353
Cr <sup>6+</sup>	UK + volastonit	2,92	-	354	Zn <sup>2+</sup>	UK	6,5-13,3	30-60	344
	UK + kaolin	0,31	-		Fe emdirilmiş UK	7,5-15,5	30-60		
	UK	23,86	-	355	Al emdirilmiş UK	7,0-15,4	30-60		
	UK	1,38	30-60	339	UK	0,25-2,8	20		345
	Fe emdirilmiş UK	1,82	30-60		UK (I)	0,25-1,19	20		347
	Al emdirilmiş UK	1,67	30-60		UK (II)	0,07-1,30	20		
	UK (I)	0,55	20	346	UK	4,64	23		356
	UK (II)	0,82	20		UK	0,27	25		348
					UK	0,068-0,75	0-55		357
Cu <sup>2+</sup>	UK	1,39	30	331	UK	3,4	-		332
	UK + volastonit	1,18	30		UK	11,11			358
	UK	1,7-8,1	-	75	UK	7,84			358
	UK (I)	0,34-1,35	20	347					
	UK (II)	0,09-1,25	20						
	UK	207,3	25	342					
	UK - yıkanmış	205,8	25						
	UK - asit	198,5	25						
	UK	0,63-0,81	25	359					
	UK	0,76	32	350					
	UK	7,5	-	341					
	UK	20,92	25	349					
	UK	7		353					
	UK	178,5-249,1	30-60	360					
	UK - 600°C	126,4-214,1	30-60						
	UK - NaOH	76,7-137,1	30-60						

(AK: Adsorpsiyon kapasitesi; UK: Uçucu küle)

1975'ten<sup>330,331</sup> günümüze yapılan çalışmalar farklı kimyasal bileşimlere sahip uçucu küllerin *Cu*<sup>332-336</sup>, *Cd*<sup>333-335</sup>, *Cr*<sup>335</sup>, *Mn*<sup>334</sup>, *Ni*<sup>335</sup>, *Pb*<sup>333-336</sup> ve *Zn*<sup>332-335</sup> gibi ağır metal iyonlarını atık sulardan uzaklaştırmada adsorban olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Etkin bir uzaklaştırma için çok miktarda kül gerekmesi ve küllerin kimyasal içeriklerindeki dalgalanmalar bu potansiyeli sınırlamaktadır<sup>330</sup>. Tablo 3-10'de metal iyonlarının uçucu küle adsorpsiyonu üzerine yapılan bazı çalışmaların sonuçları özetlenmektedir.

Kıyaslama için ağır metal adsorpsiyonunda kullanılan ticari aktif karbonların kapasite sonuçları Tablo 3-11'de özetlenmiştir<sup>361</sup>. Toz, granül, lifli ve kumaş halinde olmak üzere dört tip aktif karbon vardır. Farklı işlemlerde her bir aktif karbon tipi ham maddesi, kimyasal aktivasyonun kapsamı ve fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Tablo 3-10 ve Tablo 3-11 kıyaslandığında *Cr* ve *Hg* iyonları için uygun seçilmiş bir aktif karbonun uçucu küle kıyasla daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi sergilediği görülmektedir. Diğer iyonlarda da uçucu kül en az aktif karbon kadar iyi bir potansiyel göstermektedir. Uçucu kül *As* adsorpsiyonunda oldukça etkindir. Adsorpsiyon kapasitesine ulaşma süresi uçucu kül miktarı, pH ve sıcaklık gibi çeşitli faktörlere bağlıdır<sup>337,340</sup>. Desorpsiyon çalışmaları, uçucu küledeki arseniklerin neredeyse geri döndürülemez olduğunu göstermiştir<sup>340</sup>. Uçucu kül <sup>137</sup>Cs ve <sup>90</sup>Sr radyonüklidleri için de iyi bir adsorbandır<sup>362</sup>. İşmetkin-Cs adsorpsiyonu pH-nötr bölgede en yükseğe ulaşırken, işmetkin-Sr adsorpsiyonu pH ile birlikte (özellikle pH 8'in üstünde) artmaktadır.

Tablo 3-11. Aktif karbon adsorpsiyon kapasiteleri (mg/g)<sup>361,363</sup>

Aktif karbon tipi	As <sup>5+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Li <sup>+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>
TAK	27					40,12				
							0,45			
GAK (HD400)									30	
GAK - C										18
GAK				6,84	38					9,9
GAK (F400)		8	30	145						
				53,19						
				0,18						
GAK (LB830)				0,13						
LAK	146			40	9			2		
Okside LAK					30			10		
AKK	3,75					65				2

(TAK: Toz aktif karbon; GAK: Granüle aktif karbon; LAK: Lifli aktif karbon; AKK: Aktif karbon kumaşı)



Ayrıca, uçucu kül hidrotermal aktivasyon ile zeolitlere dönüştürülerek işnetkin-Cs<sup>364</sup>, Pb ve Cd<sup>365</sup> adsorpsiyonu için adsorban olarak kullanılabilir. İşnetkin-Cs adsorpsiyonunda denenen zeolitlerin maksimum adsorpsiyon kapasiteleri 3,34 mmol Cs/g-zeolit'tir<sup>364</sup>. Bu değer, sentetik zeolit-P ve doğal mordenitlerinkinden 2-3 kat daha yüksektir. İlk konsantrasyon seviyelerinin 100 mg/L olduğu bir Pb ve Cd adsorpsiyon çalışmasında, adsorpsiyon kapasiteleri 70,6 mg Pb/g-zeolit ve 95,6 mg Cd/g-zeolit olarak belirlenmiştir<sup>365</sup>. Araştırma sonuçları, uçucu külden elde edilen zeolitlerin atık sularda ağır metal giderimi için son derece uygun olduğunu göstermektedir.

### 3.6.1.2. Atık sulardan inorganik anyonların giderimi

Atık sularda ağır metal iyonlarının yanı sıra insan sağlığı için tehlike oluşturabilecek fosfor, florür ve boron gibi inorganik kirleticiler de bulunabilir. Örneğin gübreleme, besicilik ve sütçülük, tavuk çiftlikleri gibi yoğun hayvansal ve tarımsal faaliyetler yüzey ve yer altı sularına fosfor yüklemesi yaparak su kalitesini düşürebilir. Nehirlerde ve göllerde ötrofikasyon sorunları başlayabilir, balık ölüm hızı artabilir ve mikrobik salgınlar başgösterebilir. Alüminyum, demir, kalsiyum ve silis oksitler açısından zengin olan uçucu kül, fosfat yükünün düşürülmesi için uygun bir adaydır. Zira alüminyum, demir ve kalsiyumun birçok tarımsal, çevresel ve endüstriyel uygulamada fosfatları güçlü bir şekilde adsorbe ettiği veya çöktüğü bilinmektedir. Uçucu küllerin fosfat adsorpsiyonu konusunda birçok akademik çalışma mevcuttur<sup>366-371</sup>. Türkiye'de de Yatağan Termik Santrali uçucu külü incelenmiş ve külün yüksek kalsit içeriğine bağlı olarak %99'un üzerinde verim sağlanmıştır<sup>372</sup>.

Sudaki florür dış çürüklerine ve kemiklerin zayıflamasına karşı koruma için gereklidir; ancak yüksek düzeylerde insan sağlığı üzerinde olumsuz bir etkisi olabilir. Özellikle, içme sularının florür içeriği oldukça önemlidir. Yüksek florür içeriği dişleri ve kemikleri etkileyen bir hastalık olan fluorosis başta olmak üzere birçok farklı rahatsızlığa neden olabilir<sup>10,318</sup>. Zemin sularındaki yüksek florür oranı doğal jeolojik zenginleşmenin yanı sıra, çeşitli endüstriyel faaliyetlerden de kaynaklanıyor olabilir. Yüksek florür içeren atık sular kömür santralleri, yarıiletken imalatı, cam ve seramik üretimi, elektrokaplama, kauçuk ve gübre imalatı gibi sanayilerde açığa çıkar. Endüstriyel atık suların içindeki florür konsantrasyonu doğal sulardan onlarca ile binlerce mg/L'm arasında değişen miktarlarda daha yüksektir. Atık sulardaki florür iki ana yöntem ile uzaklaştırılır<sup>373</sup>. (i) kimyasalların suya eklenmesine dayanan çöktürme yöntemleri ve (ii) floridin, uygun substratlar üzerinde adsorpsiyon veya iyon değişim reaksiyonları ile uzaklaştırılması. Halihazırda uçucu küllerin atık sulardaki florürün uzaklaştırılması için kullanımını konu alan çalışmalar sınırlıdır<sup>374-376</sup>.

Türkiye'de bor mineralleri (tinkal, kolemanit ve üleksit halinde) yaygın olarak bulunur. Bor minerallerini içeren cevherler, konsantre bor ürünleri elde etmek

için fiziksel zenginleşmeye tabi tutulur. Konsantre bor ürünleri rafine edilerek çeşitli rafine bor ürünlerine dönüştürülür. Borik asit ve bor tuzları kapsamlı bir endüstriyel kullanıma sahiptir. Dünya genelinde tüketilen bor ürünlerinin yaklaşık %80'i cam (borosilikat cam, panel cam, yalıtım tipi cam elyafı, tekstil tipi cam elyafı), porselen, seramik, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Bor ürünleri deri, halı, kozmetik ve fotoğrafik kimyasalların üretimi; tel çekme; yangına dayanıklı kumaş ve hava koşullarına dayanıklı ahşap üretimlerinde de kullanılır. İçme ve tarımsal kullanım sularındaki yüksek bor konsantrasyonları problem teşkil edebilir. Uçucu kül ile bor adsorpsiyonu konusunda çok az araştırma vardır. Soma, Yatağan ve Yeniköy uçucu küllerinin adsorban olarak kullanıldığı bir çalışmada, kolon ve kesikli deneyler ile deniz sularından ve tuzdan arındırılmış deniz sularından bor büyük oranda uzaklaştırılmıştır<sup>377</sup>. Uzaklaştırma verimi kül tipine ve deney koşullarına son derece bağlıdır.

### 3.6.1.3. Atık sulardan organik kirleticilerin giderimi

Atık su içerisindeki en yaygın organik kirletici maddelerinden biri fenolik bileşiklerdir. Fenolik bileşiklerin adsorpsiyonu için oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Fenoller ve türevlerini atık sulardan uzaklaştırmak için kullanılan en yaygın yöntemler biyolojik arıtma, aktif karbon adsorpsiyonu ve çözücü ekstraksiyonudur<sup>318</sup>. Uçucu kül, fenolik bileşikler için iyi adsorpsiyon nitelikleri gösterir. Bu konudaki çalışmalar 1970'lerin sonunda başlamış<sup>378</sup>; zaman içerisinde fenolün giderilmesi için aktif karbonun yerine uçucu kül kullanımını araştıran birçok çalışma yapılmıştır. Farklı çalışmalarda elde edilen adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 3-12'de özetlenmiştir; değerlerdeki değişkenlik deney koşullarındaki farklılıklar ile açıklanabilir.

Tablo 3-12. Organik kirleticilerin uçucu küle adsorpsiyon kapasiteleri (mg/g)<sup>271</sup>

Organik bileşen	Adsorban	Sıcaklık (°C)	Kapasite (mg/g)	Kaynak
Fenol	UK	20	67	379
	UK-C	21	0,26	380
2-Klorofenol	UK	10-30	0,8-1,0	381
	UK-C	25	98,7	382
3-Klorofenol	UK	20	20	379
4-Klorofenol	UK-C	25	118,6	382
2,4-Diklorofenol	UK	20	22	379
	UK	10-30	1,5-1,7	381
2-Nitrofenol	UK	30-50	5,80-6,44	383
3-Nitrofenol	UK	30-50	6,52-8,06	383
4-Nitrofenol	UK	30-50	7,80-9,68	383
Krezol	UK	20-32	85,4-96,4	384
Karbofuran	UK	25-50	1,54-1,65	385
TCB	UK	25	0,35	386
HeCB	UK	25	0,15	386

(AK: Adsorpsiyon kapasitesi; UK: Uçucu kül; UK-C: Yüksek kalsiyumlu uçucu kül)

Uçucu kül, atık sularından fenoller dışındaki kalan, azoik boyalar (Chrysoidine R) <sup>387</sup> ve herbisitler (metribuzin, metolaklor ve atrazin) <sup>388</sup> gibi diğer organik kirleticilerin giderimi için de kullanılabilir.

### 3.6.2. Baca gazının temizlemesi

Uçucu kül, laboratuvar ölçeğinde baca gazlarından  $CO_2$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  ve  $Hg$ 'nin uzaklaştırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır <sup>128</sup>. Laboratuvar ölçeğinde yapılan deneylerin optimizasyon ve ölçek büyütme süreçleri zaman alacaktır.

Uçucu külün kuru-tip baca gazı desülfirizasyon ünitelerinde ucuz ve çevre dostu bir tutucu olarak kullanımı başarılı bir şekilde ticarileştirilmiştir <sup>318</sup>.  $SO_2$ 'nin uzaklaştırılması üzerine yapılan çalışmalar, kalsiyum hidroksit ile işlenen uçucu küllerin daha etkin tutucular olduğunu göstermiştir. Uçucu küller yüzey özelliklerine bağlı olarak  $NO_x$  gideriminde de etkin olarak kullanılabilir <sup>389</sup>. Yüksek yanmamış karbon içeriğine sahip bazı uçucu küller aksi takdirde atmosfere salınacak  $Hg$ 'yi adsorbe ederek yakalayabilir. Uçucu külün yanmamış karbon içeriği çeşitli işlemlerle daha aktif hale getirilebilir.  $KOH$  ve amin içeren uçucu kül temelli kompozitlerin  $CO_2$  tutma kapasiteleri de ayrı bir araştırma konusudur <sup>390</sup>. Diğer amin kompozitleri ile karşılaştırıldığında gerek malzeme maliyetinin son derece düşük olması, gerekse daha  $CO_2$ -filik olması bu kompozitlerin gelecek vadettiğini göstermektedir.

### 3.6.3. Yapay resif betonları

Yapay bir resif, yaşayan deniz organizmaları ile ilgili fiziksel, biyolojik veya sosyoekonomik süreçleri etkilemek için deniz tabanına bilinçli olarak yerleştirilen bir veya daha fazla nesne olarak tanımlanabilir <sup>391</sup>. Yapay resif uygulamalarının en temel hedefleri doğal yaşam alanlarının iyileştirilmesi, restorasyonu ve korunması; balık çiftçiliğine bağlı olarak gelişen ötrofikasyon ve kirlilik düzeyinin azaltılması; sanayi veya insan kaynaklı kirliliğin düşürülmesidir <sup>391</sup>. Yapay resiflerin kullanım alanları Tablo 3-13'de özetlenmiştir.

Tablo 3-13. Denizlerde yapay resiflerin kullanım alanları <sup>391</sup>

#### Balıkçılık

- Küçük ölçekli balık üretimini/hasatını arttırmak
- Ticari balık üretimini/hasatını arttırmak
- Su ürünleri üretim sahaları
- Balık ölümünü kontrol etmek

#### Turizm

- Rekreasyonel serbest dalış sahaları
- Denizaltı turizm sahaları
- Olta ve zıpkın ile eğlence balıkçılığını geliştirmek

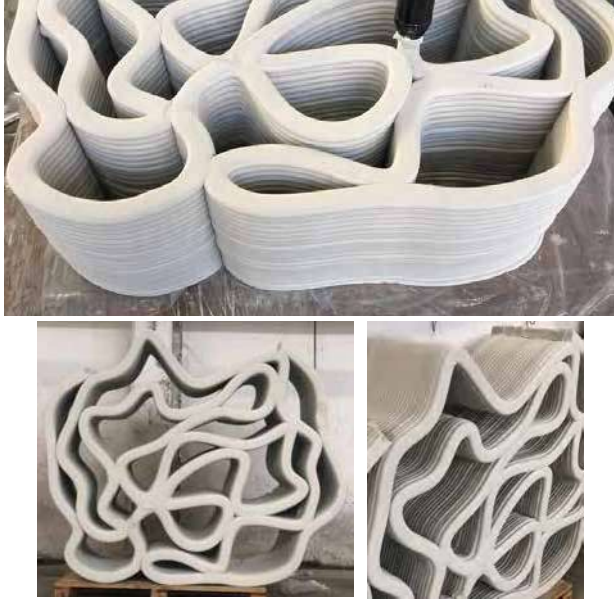
#### Doğal yaşam

- Biyoçeşitliliğin korunması
- Organizmaların yaşam döngüsünü yönlendirmek
- Doğal yaşam alanlarının korunması
- Doğal yaşam alanlarındaki hasarın ve kaybın saha dışı uygulamalar ile azaltılması
- Su ve doğal yaşam alanı kalitesinin yerinde korunması veya iyileştirilmesi

#### Araştırma

- Ekolojik araştırmalar

Yapay resiflerde çelik gemi ve mavnalar, doğal kayalar veya beton bloklar kullanılır. Son senelerde, kolay taşınmaları ve sahaya yerleştirilmeleri sebebi ile yapay resif betonlarının kullanımı son derece artmıştır. Portland çimentosu betonunun pH değeri oldukça yüksektir. Portland çimentosu kullanılarak yapılan yapay resif betonlarının yüzeylerinin uygun pH'a gelmesi için deniz altında en az altı ay kalmaları gerekir; bu durum yapay resif yakınındaki mikroalglerin azalmasına sebep olur. Uçucu kül gibi katkı malzemeleri ile hazırlanan, düşük dozajda portland çimentosu içeren betonların hem pH değeri, hem de maliyeti bir miktar daha düşüktür; yapay resif betonu olarak kullanılmaya daha elverişlidirler. Ayrıca, portland çimentosu yerine düşük dozajda uçucu kül içeren sülföalüminat çimentosu temelli betonlarda kullanılabilir. Düşük dozajda uçucu kül, sülföalüminat temelli betonların dayanımı arttırır. Ülkemizde 3B-beton yazdırma teknolojisi karmaşık geometrilere sahip yapay resifler etkin bir şekilde üretilmektedir, (Şekil 3-26.)



Şekil 3-26. İSTON A.Ş.'de 3-boyutlu beton yazıcı ile resif yazımı

#### 3.6.4. Atıkların stabilizasyonu/katılaştırılması

Uçucu kül hem endüstriyel, hem de belediye atıklarının stabilizasyonu ve katılaştırılmasında etkin şekilde kullanılmaktadır <sup>393-396</sup>. Stabilize edilecek veya katılaştırılacak atıklar inorganik, organik veya kompleks yapıda olabilir. Atıklar, ayrıca tehlikeli veya tehlikeli olmayan olarak da sınıflandırılabilir. Atıkların stabilizasyonu için uçucu kül tek başına veya kireç ve portland çimentosu gibi bağlayıcılarla birlikte karıştırılarak kullanılabilir. Hem kendinden bağlayıcılık, hem de puzolonik özellik gösteren küller farklı karışımlarda değerlendirilebilir.

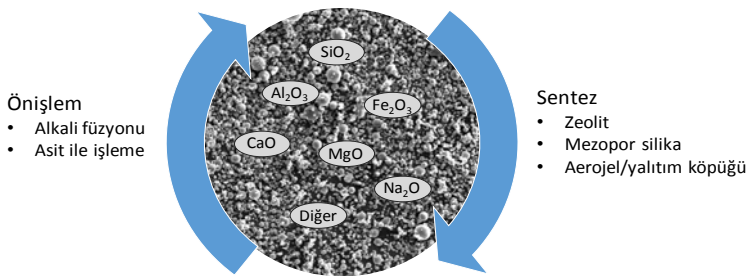
Külün sadece ince kısmı değil, iri kısmı da bu uygulamalarda kullanılabilir. Uçucu kül, karışımın sadece maliyetine değil, dayanıklılığına ve geçirimsizliğine de olumlu yönde etki eder. Ayrıca uygun morfolojiye ve tane dağılımına sahip küller kullanıldığında taze karışımların işlenebilirliği artar.

Uçucu kül özellikle tehlikeli atık yönetiminde stabilizasyon ve katılaşma uygulamalarında tercih edilir. Uçucu külün, tehlikeli atık stabilizasyonu ve katılaşma işlemlerinde çimento ikame malzemesi olarak kullanılmasına ilişkin birçok çalışma mevcuttur<sup>397</sup>. Belirli dozajda portland çimentosu içeren puzolanik uçucu kül temelli bağlayıcılar *Pb*, *Cd*, *Cr* ve *Zn* gibi ağır metaller içeren elektrik ark fırını tozunun stabilizasyonu ve katılaştırılmasında kullanılmıştır<sup>398</sup>. Üç ve altı değerlikli krom ( $Cr^{3+}$ ,  $Cr^{6+}$ ) ile *Pb* içeren kontamine toprakların stabilizasyonunda da uçucu kül-sönmemiş kireç (CaO) karışımı denenmiştir<sup>394</sup>. Uçucu kül, topraktaki *Cu* ve *Pb*'u stabilize etmek için turba gibi doğal organik malzemeler ile de karıştırılabilir. Bu konuda yapılan bir araştırmada, *Cu* için %98,2 ve *Pb* için % 99,9'luk stabilizasyon verimi ölçülmüştür<sup>399</sup>.

Atıkların bertarafında bir diğer önemli konu da katı atık depolama sahalarının üst örtüsüdür. Depolama sahalarının üst örtüsü olası sızıntıları engelleyen son derece önemli bir bariyerdir. Bu uygulama için yüksek kalsiyumlu uçucu kül, bentonit ve kauçuk karışımı gibi düşük hidrolik geçirgenliğe sahip malzeme karışımları sıklıkla tercih edilir<sup>400</sup>.

### 3.7. NANO-GÖZENEKLİ MALZEME SENTEZİ

Bir malzemenin gözenek çapı 2 nm'den küçük ise mikropor, 2-50 nm aralığında ise mezopor, 50 nm'den büyük ise makropor olarak sınıflandırılabilir. Uçucu külün yüksek alüminosilikat içeriği, onu zeolitler, mezopor silika ve silika arojelleri gibi gözenekli malzemelerin sentezi için potansiyel bir hammadde yapar. Gözenekli malzeme sentezinden önce uçucu küle çeşitli ön işlemler uygulanabilir.



Şekil 3-27. Uçucu külden nano-gözenekli malzeme sentezi



### 3.7.1. Önişlemler

Uçucu küllerde silika genellikle camsı alüminosilikatlar, kuvars ve mullit içinde bulunur. Bunlardan alüminosilikat camsı faz, hem en fazla bulunanı, hem de hidrotermal koşullar altında en kararsızdır. Bu durum, en yüksek çözünme oranına ve dolayısıyla en yoğun zeolit sentezine imkan tanır<sup>104,176,401</sup>. Kristal yapıdaki kuvars ve mullit ise aktif olmayıp zeolit sentezi sırasında çözünmezler<sup>402,403</sup>. Yüksek konsantrasyonda amorf silika içeren uçucu küllerden % 80'e varan sentez verimi elde edilirken, reaktif olmayan (yani hematit ve manyetit) ve kararlı silika (kuvars ve mullit) faz içeriği yüksek küllerde daha düşük sentez verimleri bildirilmiştir<sup>404</sup>. Bu nedenle, zeolit ve mezopor malzemelerin sentezinden önce ham uçucu külün daha uygun bir başlangıç malzemesi haline getirilmesi için işlenmesi gerekmektedir. Herhangi bir önişlem olmadan yapılan sentezler genellikle daha düşük zeolit verimi (<% 50) ile sonuçlanır<sup>405</sup>. İki temel önişlem yöntemi vardır: (i) asit ile işleme, (ii) alkali füzyonu. Asit ile işleme gerektiğinde, alkali füzyon ise tipik olarak uygulanır.

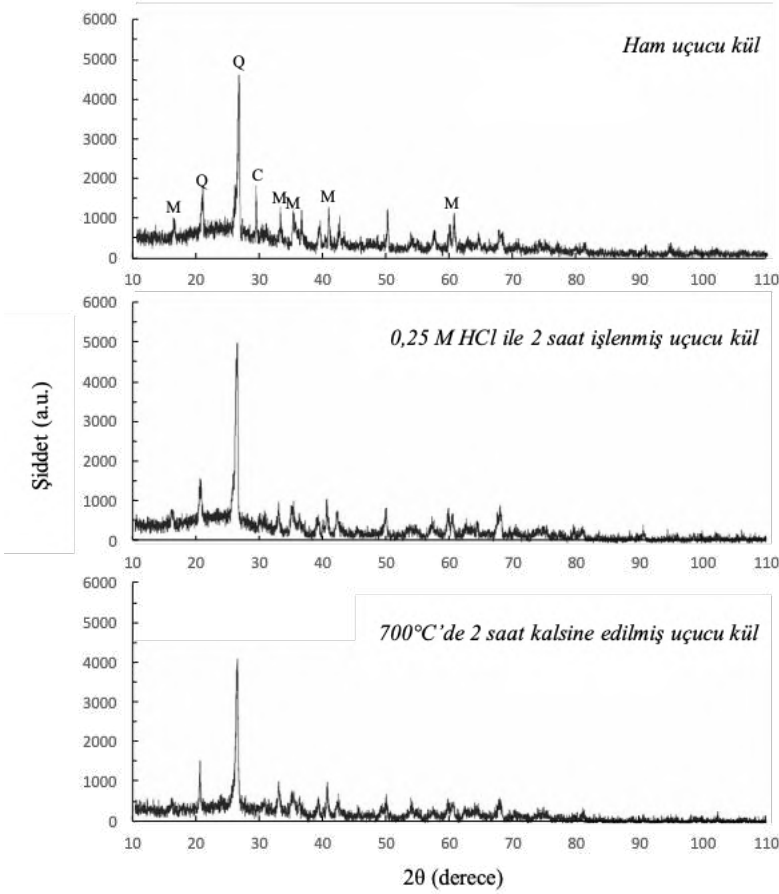
#### 3.7.1.1. Asit ile işleme

Yüksek oranda *Ca* ve *Fe* içeren uçucu küllerin asit ile işlenmesi, *CaO* ve *Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* gibi safsızlıkların giderilmesi için gerekli bir adımdır<sup>406</sup>. Zira, *Ca* ve *Fe* zeolit kafesinin oluşumu için *Al* ile yarışarak zeolit kristallerinin çekirdeklenmesini engelleyebilir<sup>407,408</sup>. Uçucu külün asit ile işlenmesi, katalitik uygulamalarda zeolitlerin aktivitesini, termal kararlılığını ve asitliğini arttırabilir<sup>409</sup>. Uçucu külde asit ile işleme yüzey erozyonuna ve çökmesine neden olabilir; kalsiyum ve asit ile çözülebilen diğer bazı tuzlar çözüldükçe yüzey pürüzlülüğü artabilir; bazı boşluklar ortaya çıkabilir.

Tipik olarak uçucu kül 60°C'de 1,5 saat 3 M *HCl* ile ağırlıkça 1:2 olacak şekilde işlenir. Daha yüksek konsantrasyonlarda safsızlıkların giderilmesi önemli ölçüde değişmez. Kalıntı asit kalmadığından emin olmak için asit ile işlenen uçucu kül pH 6-7'ye ulaşıncaya kadar distile su ile yıkanır. Sonrasında da olası organik birleşikleri ve yanmamış karbon içeriğini azaltmak için için 700°C'de 3 saat boyunca kurutularak kalsine edilir<sup>410,411</sup>. Asit ile başarı ile işlenen bir uçucu külde ham küle kıyasla kuvars ve mullit dışında kalan kristal fazlarda azalma gözlenir<sup>409,412,413</sup>. Şekil 3-28'de bir uçucu külün asit ile işlenmesi sonucu mineralojik yapısındaki değişiklikleri görülmektedir.





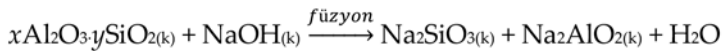


Şekil 3-28. Ham uçucu kül; 0,25 M HCl ile 2 saat işlenmiş uçucu kül; 700°C'de 2 saat kalsine edilmiş uçucu kül (Q: kuvars, M: mullit, C: kalsit) <sup>406</sup>

Asit ile işlemede *HCl* dışında  $H_2SO_4$  ve  $HNO_3$  gibi farklı asitler de kullanılabilir. Farklı asitlerin ve asit çözeltisi:kati oranlarının denendiği bir çalışmada, %20'lik (w/w) asitler asit çözeltisi:kati oranı 25 mL-asit/g-uçucu kül olacak şekilde yıkanmış ve  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  gibi safsızlıklar giderilerek saflık oranı %85'e kadar çıkarılmıştır <sup>414</sup>.

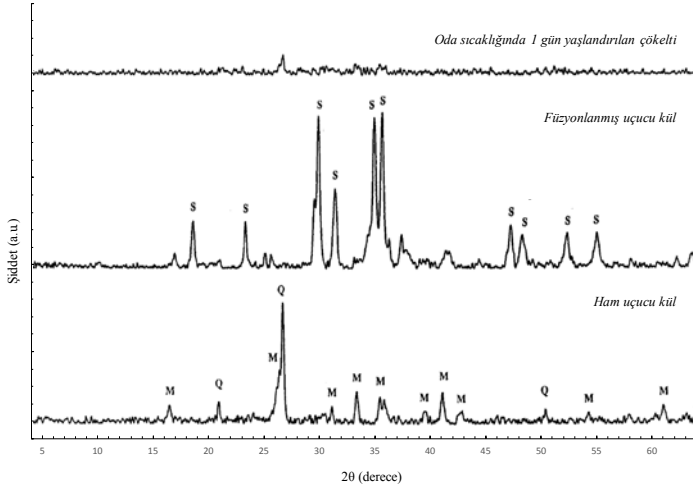
### 3.7.1.2. Alkali füzyonu

Alkali füzyonu, uçucu külden uygun alüminosilikat başlangıç malzemelerini hazırlamak için uygulanan tipik bir önışlemdir. Bu yöntemle aktif *Si* ve *Al* türleri üretilir ve sentez verimi artar <sup>415-419</sup>. Füzyon işlemi sırasında, uçucu küldeki aktif alüminosilikatlar ve inaktif  $\alpha$ -kuvars ve mullit, bir alkali aktivatör ile (genellikle  $NaOH$ ) ile aşağıdaki şekilde reaksiyona sokularak çözünebilir silikat ve alüminat tuzları oluşturur <sup>409</sup>:



Element analizi, çözünmüş uçucu külü içeren sulu çözeltinin çoğunlukla silikatlardan ve az miktarda alüminatlardan oluştuğunu göstermektedir <sup>420</sup>. Elde edilen amorf sodyum silikatlar ve sodyum alüminatlar suda kolayca çözülür ve zeolit sentezine katılır. Alkali-füzyon işlemi uygun şekilde yapılmazsa, kristal silikat fazları (özellikle de kuvars fazı) nihai üründe kalır.

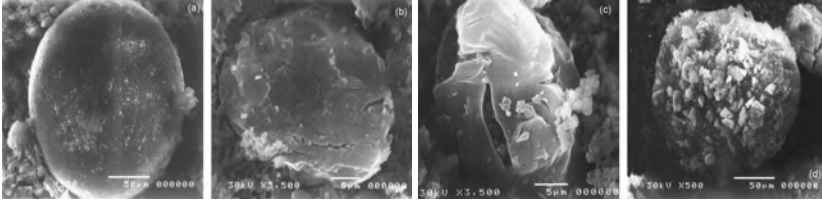
Füzyon işleminin başarısı XRD ve SEM ile incelenebilir. Başarılı bir alkali füzyon işleminden sonra kristal kuvars ve mullit fazları çözünürken ana faz olarak sodyum silikat oluşur. Şekil 3-25, alkali füzyona uğramış bir uçucu kül için ölçülen XRD desenlerini göstermektedir <sup>421</sup>. Bu işlemde, uçucu kül ile  $NaOH$  ağırlıkça 1:1,2 oranında karıştırılmış, ısıtma hızı  $1^{\circ}C/dakika$  olacak şekilde  $550^{\circ}C$ 'de 1 saat tutulmuştur. Elde edilen toz suda çözülmüş, ve oda sıcaklığında bir gün yaşlandırılmıştır. İşlem sonucunda kuvars ve mullit fazlarında azalma gözlenirken, yeni bir faz olarak sodyum silikat üretilmiştir. Füzyonun başarısını etkileyen üç temel faktör ise  $NaOH/$  uçucu kül oranı, füzyon derecesi ve füzyon süresidir.



Şekil 3-29. Ham uçucu kül; 60 dakika  $550^{\circ}C$ 'de füzyonlanmış uçucu kül; bir gün yaşlandırılan çökelti (Q: kuvars, M: mullit, S: sodyum silikat) <sup>421</sup>

Füzyon öncesi pürüzsüz bir yüzeye sahip, camsı küresel parçacık halinde olan bir uçucu kül tanesinin, alkali-füzyon işleminden sonra önce yüzey pürüzlülüğü artar. Daha uzayan işlem sürelerinde büyük çatlaklar gözlenebilir, ve en sonunda kuvars çözülerek sodyum silikat oluşturur (Şekil 3-26) <sup>422</sup>. Uçucu külün, alkali füzyon işlemi ile sodyum silikat ve sodyum alüminat haline dönüştürülmesi, uçucu külün içine eklenen  $NaOH$  miktarına bağlıdır ve bu da zeolit sentez karışımının alkalinitesini doğrudan etkiler <sup>415,417</sup>.  $NaOH/$ uçucu kül oranlarını inceleyen bir çalışmada ağırlıkça oran 0,8 olduğunda karışımlarda zeolit oluşmamış; bu oran 1,0'ın üzerine çıktığında zeolit oluşumu gözlenmiş; kristalinite, 1,2'de en yüksek değerine ulaşmıştır. <sup>415</sup>. Artan

*NaOH* konsantrasyonu kristaliniteyi azaltmıştır. Bu sebeple ağırlıkça 1,2 *NaOH*/uçucu kül, sodyum silikatın oluşumu ve sonrasında zeolit sentez karışımının pH'ı için en uygun orandır.



Şekil 3-30. (a) Ham uçucu kül; (b-d) 550°C - 1:1 *NaOH*/uçucu kül oranında 15, 30 veya 60 dakika füzyonlanmış uçucu kül <sup>422</sup>

Füzyon sıcaklığında önemli bir parametredir. Bir çalışmada, 1,2 *NaOH*/uçucu kül oranında hazırlanan karışımlar 100-800°C arasındaki farklı derecelerde (sıcaklıklarda) birer saat füzyonlanmıştır. Füzyon sonrasında elde edilen uçucu kül çözeltilerden hidrotermal sentez ile zeolit üretilmiş, füzyon derecesinin nihai zeolit kristallik derecesine etkisi incelenmiştir <sup>415</sup>. 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda alkali füzyona tabi tutulmuş örneklerde zeolit oluşmamış; bu düşük sıcaklıklarda, kuvars kristal bir faz olarak kalmıştır. *NaOH* erime noktasının (318°C) üzerindeki füzyon sıcaklıklarında daha yüksek bir zeolit verimi gözlemlenmiştir. En yüksek zeolit kristallik derecesi, füzyon sıcaklığı 550°C'ye yükseltildiğinde elde edilmiştir. 800°C'nin üzerindeki füzyon sıcaklıklarında kristallilik kademeli olarak azalmış ve kristal olmayan camsı agregatlar oluşmaya başlamıştır.

Füzyon süresinin zeolit oluşum derecesine etkisi de incelenmiştir. 550°C'de uçucu kül 0,5-2 saat arasındaki sürelerde füzyonlanmıştır. XRD analizi sonrasında 30 dakikanın yetersiz olduğu, 1 saat sonra zeolit X piklerinin oluşmaya başladığı, 2 saat sonra ise en yüksek kristallik derecesine ulaşıldığı gözlemlenmiştir <sup>423</sup>.

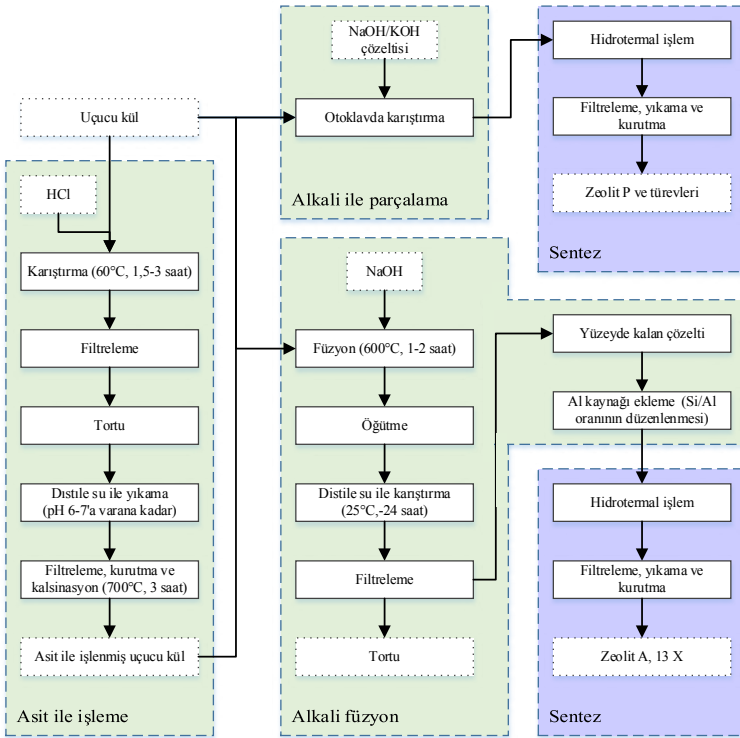
### 3.7.2. Zeolit sentezi

Zeolitler, gözenekli, kafes yapılı (tektosilikat) alüminosilikatlardır.  $(SiO_4)^4-$  ve  $(AlO_4)^5-$  tetrahedronların ortak oksijen atomları ile bağlanması ile oluşurlar. Zeolitlerin genel formülü,  $M_{2n}O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ 'dur. Bu denklemde *M* herhangi bir alkali (*Na*, *Li* ve *K* gibi) veya alkali toprak (*Ca* ve *Mg* gibi) metalidir; *n* bu metalin yüküdür; *x* 2 ile 10 arasında değişen *Si* tetrahedron sayısıdır ve *y* ise 2 ile 7 arasında değişen su moleküllerinin sayısıdır <sup>424</sup>. Laboratuvar ortamında sentezlenen zeolitler daha yüksek oranda *Si* içerebilirler.

Sadece silisyum merkezli tetrahedronların bağlanması ile oluşan kuvars, kristobalit gibi yapılar elektriksel olarak nötr haldedir. Zeolitlerde ise +4 değerli silisyum kanyonlarından bazıları +3 değerli alüminyum ile değişmiştir. Oluşan pozitif yük eksikliği yapının başka bir yerinde sodyum ( $Na^+$ ), potasyum ( $K^+$ ), kalsiyum ( $Ca^{2+}$ ) ve magnezyum ( $Mg^{2+}$ ) gibi tek ve/veya çift yüklü kanyonların varlığıyla dengelenir <sup>424</sup>.

Genellikle yüksek değişim kapasitesine sahip bu katyonlar, zeolitın dış yüzeyinde veya kafes yapısındaki boşluklarda zayıf elektrostatik bağlarla alüminosilikat yapısına bağlı olarak bulunurlar <sup>425</sup>. Kafes yapıdaki hizalandığında kanal haline de gelebilen bu gözeneklerde  $H_2O$  molekülleri de yer alır. Zeolitler, düşük sıcaklıklara ısıtıldıklarında adsorbe ettikleri suyu hızlıca kaybedebilirler. 1756'da İşveçli bir minerolojist olan Cronstedt, bu özelliğe dayanarak, zeolitleri yunanca kaynar taş anlamına gelen zeo (kaynama) ve lithos (taş) kelimelerini birleştirerek adlandırmıştır.

Çoğu uçucu külün ana bileşenleri amorf alüminosilikatlar, mullit,  $\alpha$ -kuvars, hematit ve manyetittir. Zeolit başlangıç malzemesi olarak kullanılan bazı volkanik malzemelere olan bileşimsel benzerliklerinden dolayı uçucu küller de başlangıç malzemesi olarak değerlendirilmeye başlamıştır <sup>426-428</sup>. Günümüzde yüksek miktarda amorf faz içermesi, yüksek Si/Al oranı ve yüksek özgül yüzeyde sahip olması nedeniyle uçucu küller zeolit sentezinde ilk akla gelen malzemelerdendir. Uçucu küllerden zeolit üretiminde yaygın kullanılan yöntemler Şekil 3-31'de özetlenmiştir. Bu yöntemlerin dışında, uçucu külün alkali ve tuz karışımı ile üç günden uzun olmayacak bir süre boyunca ısıl işlemi (<350°C) sonucunda da su ilave edilmeksizin de sodalit ve kankrinit gibi zeolitler sentezlenmiştir <sup>429-430</sup>. Fakat, yüksek enerji ihtiyaçı, uzun aktivasyon süreleri ve üretilen yüksek katyon değişim kapasitesine sahip zeolitlerin düşük seğiciliği bu yöntemin yaygınlaşmasını engellemiştir.

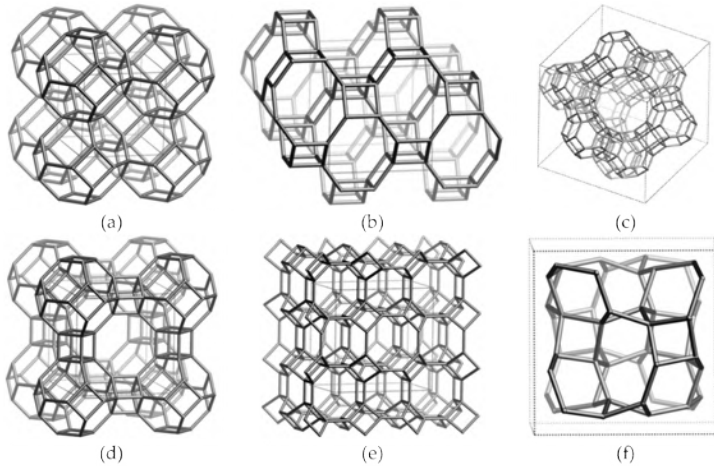


Şekil 3-31. Uçucu külün zeolit sentezinde kullanımı

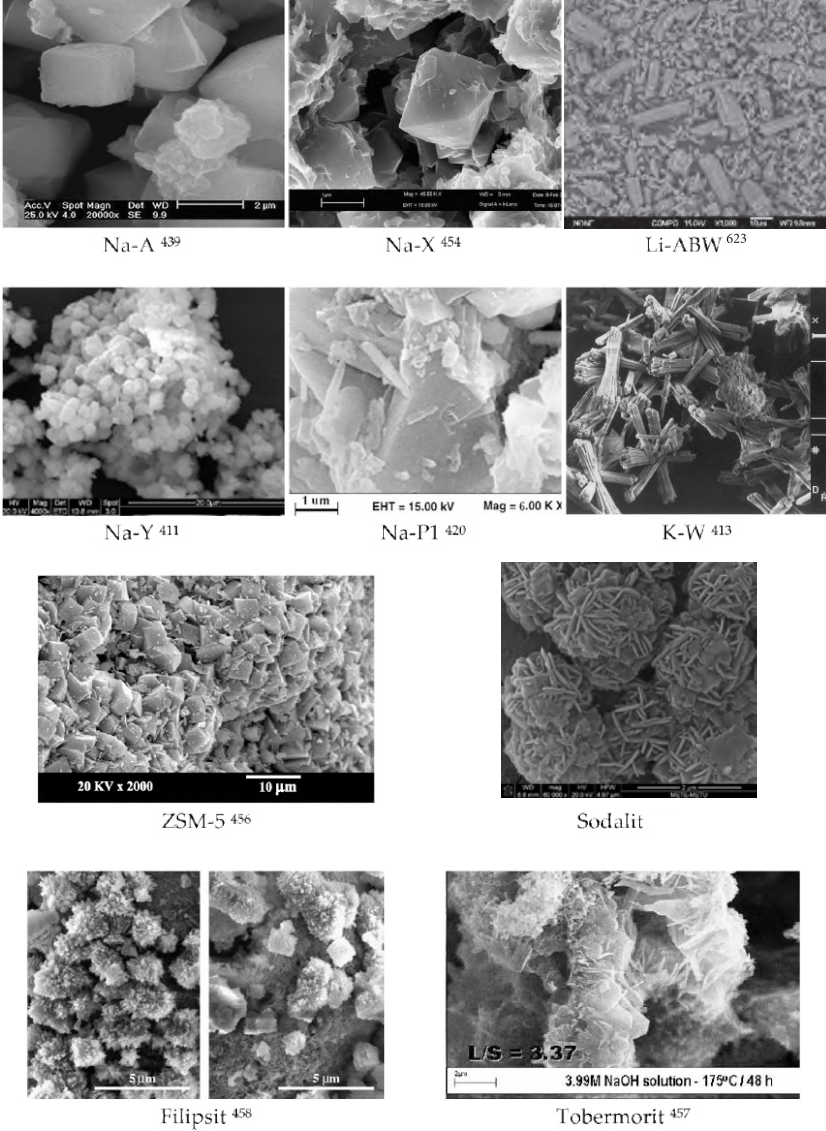
Uçucu külden zeolit X (FAU) <sup>403,408,415,416,431-440</sup>, A (LTA) <sup>403,416,431,435-442</sup>, Y (FAU) <sup>417,439</sup>, P (GIS) <sup>401,403,404,418,420,440,443-450</sup>, ZSM-5 (MFI) <sup>451</sup> ve phillipsite (PHI) <sup>452</sup> gibi birçok farklı zeolit sentezlenebilir (Tablo 3-14). Elde edilen bazı zeolit kafes yapıları<sup>453</sup> Tablo 3-11'de, SEM mikrografları Şekil 3-33 özetlenmiştir. Sentezlenen zeolitlerin yapısı külün içeriğine, önışlemlere ve hidrotermal sentez koşullarına (substrat bileşimi ve sentez sıcaklığı/süresi gibi) son derece bağlıdır.

Tablo 3-14. Uçucu küllerden sentezlenen zeolitler ve diğer neomorfik fazlar <sup>176</sup>

Zeolit Ürünleri	Kimyasal formül
NaP1 zeolit	$Na_6Al_6Si_{10}O_{32} \cdot 12H_2O$
Nap zeolit	$Na_{3,6}Al_{3,6}Si_{12,4}O_{32} \cdot 12H_2O$
Filipsit	$K_2Al_2Si_3O_{10} \cdot H_2O$
K-kabazit	$K_2Al_2Si_6O_{16} \cdot H_2O$
Zeolit F linde	$KAlSiO_4 \cdot 1.5 H_2O$
Herschelite	$Na_2Al_2Si_{1,68}O_{7,44} \cdot 1.8H_2O$
Fojasit	$Na_2Al_2Si_{3,3}O_{8,8} \cdot 6.7H_2O$
Zeolit A	$NaAlSi_{1,1}O_{4,2} \cdot 2.25H_2O$
Zeolit X	$NaAlSi_{1,23}O_{4,46} \cdot 3.07H_2O$
Zeolit Y	$NaAlSi_{2,43}O_{6,86} \cdot 4.46H_2O$
Perlialit	$K_3NaCaAl_{12}Si_{24}O_{72} \cdot 15H_2O$
Analsim	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$
Hidroksi-sodalit	$Na_{1,08}Al_2Si_{1,68}O_{7,44} \cdot 1.8H_2O$
Hidroksi-kankrinit	$Na_{14}Al_{12}Si_{13}O_{51} \cdot 6H_2O$
Kalsilit	$KAlSiO_4$
Tobermorit	$Ca_5(OH)_2Si_6O_{16} \cdot 4H_2O$



Şekil 3-32. Uçucu küllerden sentezlenen çeşitli zeolit kafes yapıları <sup>453</sup>: (a) SOD - Sodalit, (b) GIS - Gismondin, (c) FAU - Fojasit, (d) LTA - Linde A, (e) MER - Merlionit (Linde W), (f) ANA - Analsim



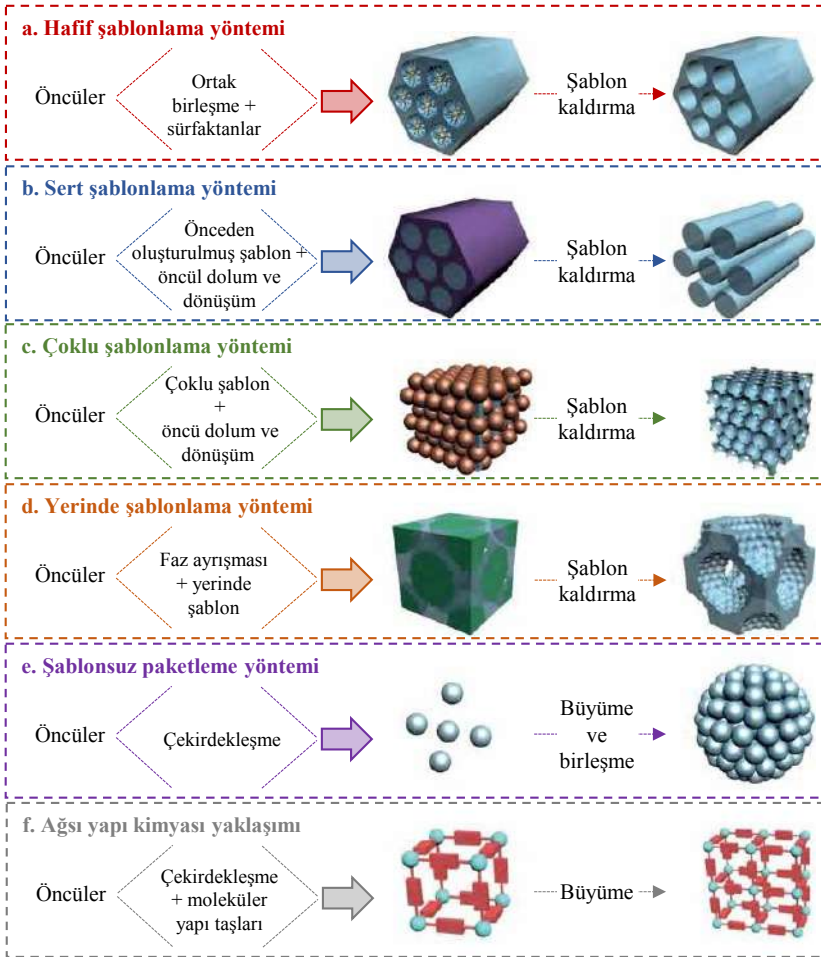
Şekil 3-33. Uçucu küllerden sentezlenen zeolitlere ait SEM mikrografları

Uçucu küller genellikle düşük kaliteli zeolitlerin üretiminde kullanılır. Sentezlenen zeolitlerin ana uygulama alanları iyonların ve zararlı moleküllerin atık su ve radyoaktif atıklardan uzaklaştırılması için emici veya iyon değiştirici, ya da atmosferik kirleticiler içeren gazlar için adsorban olarak kullanımudur <sup>405,459,460</sup>. Ayrıca, CO<sub>2</sub> tutucu <sup>461</sup>, katalizör <sup>462,463</sup>, deterjan ham maddesi <sup>464</sup>, maden drenaj suyu arıtımı <sup>465</sup>, asfalt katkı malzemesi <sup>466</sup> ve petrol sızıntısı kontrolü <sup>467</sup> gibi uygulamalar için önerilmiştir. Sentezlenen zeolitler uçucu külün kendi içeriğindeki çevresel olarak zararlı bileşenleri gidermek için bile kullanılabilir <sup>468</sup>.



### 3.7.3. Mezopor malzeme sentezi

Mezopor malzemelerin gözenek çapı 2-50 nm aralığındadır. Bu malzemeler son derece yüksek yüzey alanına ve gözenek hacmine sahiptir. Bu malzemelerde gözenek boyutu ve şekli ayarlanabilir. Mezopor malzemeler temelde hafif şablonlama, sert şablonlama (nano-döküm) veya şablonsuz yaklaşımlar olmak üzere bir çok farklı yöntem ile sentezlenebilir (Şekil 3-34). Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 3-15'de özetlenmiştir <sup>469</sup>. Uçucu külün mezopor malzeme sentezinde ucuz ve bol bulunan hammadde olarak kullanımı gittikçe daha yaygınlaşan bir uygulamadır <sup>470-477</sup>. Çoğunlukla CO<sub>2</sub> yakalama <sup>461,478,479</sup>, adsorpsiyon <sup>480,481</sup> ve kataliz <sup>471,475,482</sup> uygulamaları için kullanılırlar.

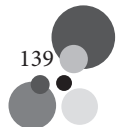


Şekil 3-34. Mezopor malzeme sentezinde kullanılan temel yöntemler (<sup>469</sup>dan uyarlanmıştır)

Tablo 3-15. Farklı mezopor malzeme sentezi yöntemlerinin kıyaslanması (<sup>469</sup>dan uyarlanmıştır)

Yöntem	Mezopor örnekler	Avantajlar	Dezavantajlar
Hafif şablonlama yöntemi	- Silika - Alüminosilikatlar - Organosilika - Karbon - Metal oksitler - Metaller - Polimerler - Fosfatlar	- Kontrol edilebilir mezoyapı ve gözenek boyutları - Ayarlanabilir morfoloji ve kolay işlenebilirlik - Yüksek kaliteli ürün - Büyük çaplı üretim	- Yüzeysel aktif madde kullanımı gerekir - Mezoyapı oluşumu reaksiyon koşullarına karşı oldukça hassastır - Nispeten düşük kristalinite
Sert şablonlama yöntemi (nano-döküm)	- Karbon - Metal oksitler - Metaller - Metal sülfürler - Metal nitritler - Metal karbürler - Zeolitler - Oksitsiz seramikler	- Reaksiyon koşullarına düşük hassasiyet - Yüksek kaliteli ürün - Yüksek kristalinite ürünü - Düzenli nano dizi yapısı	- Önceden sert şablon oluşturmak gerekir - Yüksek maliyet - Zaman alıcı
Çoklu şablonlama yöntemi	- Silika - Karbon - Metal oksitler - Zeolitler	- Hiyerarşik olarak gözenekli yapı	- Birden fazla şablon gerekir - Yüksek maliyet - Zaman alıcı
Yerinde şablonlama yolu	- Silika - Karbon - Metal oksitler - Metaller - Polimerler	- Basit yöntem - Önceden şablon oluşturmak veya yüzey aktif madde kullanmak gerekmez - Düşük maliyet	- Düşük kalite - Düzenli yapı elde etme zorluğu
Şablonsuz paketleme yöntemi	- Karbon - Metal oksitler - Metal sülfürler	- Basit yöntem - Kolay işlenebilirlik - Şablon gerektirmez - Çok kristal yapıları ürün	- Düzenli yapı elde etme zorluğu
Ağsı yapı kimyası yaklaşımı	- Metal-organik kafes yapılar - Kovalent organik kafes yapılar - Zeolitik imidazolat kafes yapılar	- Kontrol edilebilir mezoyapı ve gözenek boyutları - Şablon gerektirmez - Yüksek kristalinite ürünü	- Düşük kararlılık - Mezoyapı oluşumu reaksiyon koşullarına karşı oldukça hassastır - Zor işlenebilirlik

© Yüzeysel aktif madde sürfaktan olarak da bilinir.

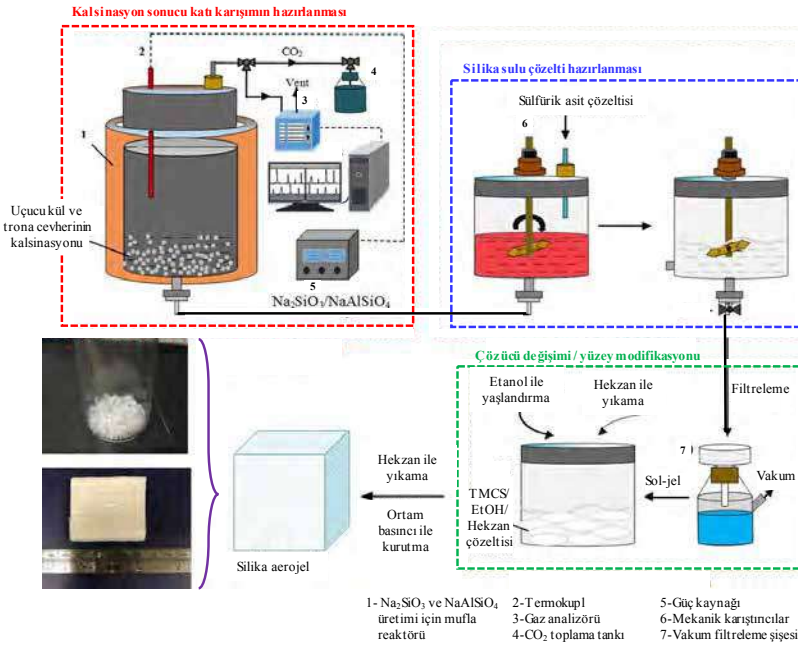




### 3.7.4. Silika aerojel sentezi

Silika aerojeller 1930'larda yalıtım amacı ile kullanılmaya başlayan, %10'u silika, %90'ı hava olan malzemelerdir. Günümüzde silika aerojeller yüksek yüzey alanı, geniş gözenek hacmi, düşük yoğunluk ve düşük termal iletkenlik gibi özellikleri ile katalizör<sup>483</sup>, adsorban<sup>484</sup>, sıvı yakıt deposu, binadan soğutuculara ısı yalıtımı<sup>485,486</sup> ve ilaç salım sistemi konak malzemeleri gibi bir çok farklı alanda kendine yer bulmaktadır<sup>487</sup>. Silika aerojeller, silika bir başlangıç malzemesinden sol-jel prosesi ile üç basamakta sentezlenirler: jel üretimi, yaşlandırma ve kurutma<sup>488-490</sup>. Sentezinde tetrametoksisilan (TMOS), tetraetil ortosilikat (TEOS), polietoksidisiloksan, endüstriyel su camı, diatomit ve bentonit gibi birçok farklı ham madde kullanılabilir.

Uçucu külün  $NaOH$  ile reaksiyonu sonucu elde edilen sodyum silikat da aerojel sentezinde etkin bir silikat kaynağı olarak kullanılabilir<sup>487</sup>. Ayrıca, sodyum silikata bir miktar asitte yıkanmış uçucu kül eklenerek yeterli basınç dayanımına sahip yalıtım köpükleri üretilebilir<sup>491,492</sup>. Uçucu külden aerojel üretimi için örnek bir akış şeması Şekil 3-35'de sunulmuştur.



Şekil 3-35. Uçucu kül ve tronadan silika aerojel üretimi (<sup>492</sup>den uyarlanmıştır)

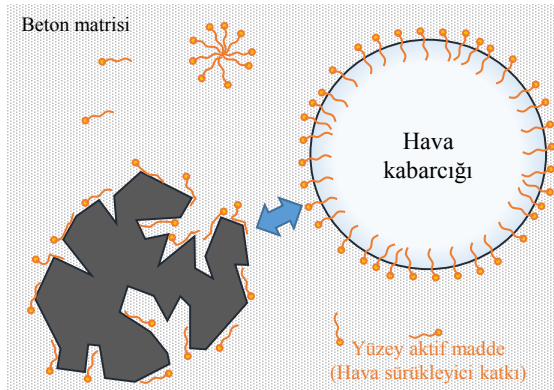
### 3.8. AYRIŞTIRILAN YAN ÜRÜNLERİN KULLANIMI

Uçucu külün karmaşık bileşimi küllerin birçok alandaki toplu kullanımını zorlaştırmaktadır. Kısım 1.4'te özetlendiği gibi farklı ayrıştırma yöntemleri ile bu karmaşık karışımdan bazı yan ürünler (senosferler, zenginleştirilmiş karbon, manyetik fazlar, ince veya iri kül taneleri gibi) elde edilebilir. Boyut ayrıştırma dışında kalan çoğu ayrıştırma yönteminin henüz yaygın kullanımı yoktur; fakat, zamanla ayrıştırma yöntemlerinin etkinliği de, bu yöntemlere olan ihtiyaç da artmaktadır.

#### 3.8.1. Karbon geri kazanımı

Kömür yakıtlı termik santrallerde açığa çıkan uçucu küllerin karbon içeriği, kömürün yakılması sırasında açığa çıkan azot oksit salımlarını kontrol etmek için sistemlerde düşük  $NO_x$  brülörlerin kullanılmaya başlamasından bu yana artmış; bu durum dikkat edilmesi gereken bir husus olmuştur <sup>493</sup>. Yüksek yanmamış karbon oranı özellikle beton ve katkı çimento üretiminde kullanılacak uçucu küller için önem arz eder. Bu şekilde kullanılacak küller için Tablo 2-12 ve Tablo 2-13'te anlatıldığı üzere bazı incelik ve kızdırma kaybı (KK) limitleri mevcuttur. Birçok kül için, KK içeriği yanmamış karbon miktarı ile ilişkilendirilebilir.

KK limitleri, yanmamış karbonun, betonun donma-çözülme direncini arttırmak için kullanılan hava sürükleyici katkıları adsorbe etme eğilimi göstermesinden kaynaklanır. Bu durum, hava kabarcıklarının etkin bir şekilde dengelemesini zorlaştırır <sup>65</sup>. Şekil 3-36'da ticari hava sürükleyici katkıların temel maddesi olan amfifilik (baş-kuyruk yapısına sahip) moleküllerin beton matrisi içerisindeki üç farklı rekabetçi adsorpsiyonu gösterilmiştir: (i) hava kabarcıklarını dengelerken sıvı-gaz arayüzünde, (ii) çözelti içerisinde kendi kendine oluşturdukları misellerde ve (iii) mikrogözenekli yanmamış karbondaki.

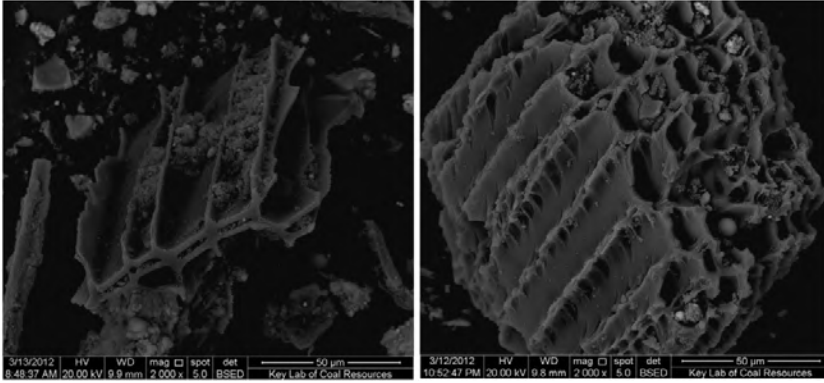


<sup>(1)</sup> Yüzey aktif maddelerin polar veya iyonik hidrofilik baş grupları daire ile, ve polar olmayan hidrofobik kısımları ise düzensiz çizgi ile gösterilmiştir.

<sup>(2)</sup> Şekil ölçeklendirilmemiştir; yüzey aktif madde molekülleri ve karbondaki mikro gözenekler, karbon parçacıklarından ve hava kabarcıklarından  $10^7$  kat daha küçüktür.

Şekil 3-36. Beton karışımlarında kullanılan uçucu küldeki yanmamış karbonun rekabetçi yüzey aktif madde adsorpsiyonu (<sup>494,495</sup>uyarlanmıştır)

Yüksek yanmamış karbon oranına sahip uçucu küller üzerinde yapılan çalışmalarda kül içerisinde üç farklı tür karbona rastlanmıştır: (i) kaynaşmamış gibi görünen inertinit grubu maseral parçacıkları; (ii) izotropik (düzensiz) karbon; ve (iii) anizotropik (düzenli) karbon <sup>65</sup>. Son ikisi oldukça reaksiyona girmiş, eriyik bir evreden geçmiş parçacıklardır <sup>65</sup>. Bu parçacık türleri, parçacık şekline, gözenek hacmine ve duvar kalınlığına göre daha da alt bölümlere ayrılabilir <sup>496</sup>. Uçucu kül karakterizasyonu üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, ayrıştırmada yaşanan zorluklardan dolayı kül içerisindeki farklı karbon türleri ile ilgili bilgi oldukça sınırlıdır. Örneğin ağırlıklı olarak inertinit (Şekil 3-37) içeren bir uçucu külün, ağırlıklı olarak izotropik karbon ihtiva eden başka bir küle kıyasla hava sürükleyici katkıyı adsorbe etme kapasitesinin ne kadar farklı olduğu net olarak bilinmemektedir <sup>65</sup>. Bu sebeple, uçucu külün beton ve katkılı çimento üretiminde kullanılabilmesi için, karbon türünden bağımsız olarak KK'nın standartlarda verilen değerlerin altına çekilmesi istenir.



Şekil 3-37. Uçucu külün yanmamış karbon içeriğinden bozulmamış inertinit görüntüleri (BSE) <sup>81</sup>

Kızdırma kaybı (KK) değerininin düşürülerek uçucu külün zenginleştirilmesi için birçok farklı seçenek mevcuttur. Uçucu kül zenginleştirilmesi, ABD'de %70'e varan oranda karbon seviyesinde geri kazanımlar ile ticarileşmiştir <sup>78</sup>. Ayrıştırma yöntemleri yaş (köpüklü yüzdürme veya yağ aglomerasyonu gibi) ve kuru (eleme veya triboelektrostatik ayırıcılar gibi) yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

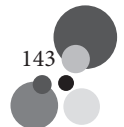
Uçucu külün akışkan yataklı reaktörler ile zenginleştirilmesi ticari olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu reaktörler, sürekli uçucu kül akışı içerisindeki yanmamış karbonu yakmak için tasarlanmıştır. İşlemden açığa çıkan baca gazı ve zenginleşmiş küldeki ısı geri kazanılarak elektrik santralindeki ön ısıtmalarda kullanılabilir; böylece, santralin termik yükü azaltılabilir. 1999'da yılda 180.000 ton kül işleme kapasitesine sahip bir zenginleştirme ünitesi, Güney Karolina Elektrik ve Gaz'a ait Wateree İstasyonu'na entegre edilmiştir. 2002 yılında Santee Cooper'ın Winyah İstasyonu'nda yılda 200.000 ton kapasiteli ikinci bir ünite kurulmuştur <sup>497</sup>. Konik akışkan yataklı bir reaktör kullanılarak hem kalıntı karbonun yakılmasını, hem de kalan külün tane boyutuna göre ayrıştırılmasını sağlayan çalışmalar da vardır <sup>170</sup>.

Zenginleştirme yöntemlerden bir diğeri de elektrostatik ayırıştırma'dır <sup>72,74,82</sup>. Bu yöntem, kuru parçacıkların parçacık-parçacık teması veya çalkantılı koşullar altında parçacık-duvar çarpışması ile bipolar yüklenmesi prensibi üzerine çalışır. Nihayetinde, elektrik alanındaki pozitif yüklü karbon parçacıklar negatif yüklü kül parçacıklarından ayırıştırılabilir. Ticari olarak da uygulanan bu yöntemde külün zenginleştirme işleminden önce yeterince kuru olması gereklidir; aksi halde ayırma verimi önemli derecede azalır <sup>498</sup>.

Yanmamış karbonu uçucu külden ayırıştırmanın en umut verici yöntemlerinden biri köpüklü yüzdürmedir (flotasyon). Bu yöntemde, ayırıştırılmak istenen parçacıkların yüzeylerinin hidrofobik (susevmez) ve hidrofilik (susever) olma özelliklerini kullanır. Sulu karışım içindeki hidrofobik parçacıklar karışım içine verilen hava kabarcıklarına yapışarak köpük katmanına taşınır ve köpüğün sıyrılması ile hidrofilik parçacıklardan ayrılır. Karbonun doğal olarak hidrofobik olması, kül içerisindeki diğeri mineral parçacıklardan köpüklü yüzdürme ile ayrılabilmesine imkan tanır. Kömür hazırlamada ince parçacıkları ayırmak için köpüklü yüzdürme 1915'in başından beri kullanılmaktadır <sup>499</sup>. Kazanılan kapsamlı deneyim, yanmamış karbonun geri kazanımında benzer teknolojilerin uygulanmasına ön ayak olmuştur <sup>500</sup>; zenginleştirme işleminde özellikle flotasyon kolonları tercih edilmektedir <sup>501</sup>. Klasik köpüklü yüzdürme hücreleri ile kıyaslandığında, hava ile seyreltilmiş hidrosiklon yüzdürme gibi benzer yöntemler yetersiz kalmıştır <sup>71</sup>. Karbon geri kazanım verimini ve kalitesini arttırmak için eleme ve köpüklü yüzdürme işlemlerinin bir arada kullanıldığı araştırmalar da mevcuttur <sup>68</sup>.

Köpüklü yüzdürmeye benzer bir diğeri zenginleştirme teknolojisi de yağ aglomerasyonudur. Yağ aglomerasyonunda köpüklü yüzdürmede olduğu gibi parçacıkların yüzey özelliklerindeki farklılıklar kullanılır. Bu yöntem, oleofilik (yağsever) ve hidrofobik parçacıkların sulu bir bulamaça ilave edilen yağ tarafından seçimli olarak ıslanmasına dayanır. Mevcut durumda, doğal olarak hidrofobik olan karbon parçacıklarının yüzeyi ince bir yağ tabakası ile kaplanır; karışımın bulunduğu kap çalkalanır; çarpışan yağ kaplı parçacıklar arasında hidrokarbon köprüleri kurularak aglomeratlar oluşur. Yağ ve karbondan oluşan bu aglomeratların yoğunluğu kül süspansiyonundan daha düşüktür; bu sebeple, ayırıştırma kabının tepesine yükselirler ve ayırıştırılabilirler <sup>502</sup>. Bu yöntemde sikloheksan çözücü olarak kullanıldığı araştırmalarda, yüksek karbon saflığı (%66-71) ve geri kazanım oranı (%55-57) elde edilmiştir <sup>79</sup>. Diğeri araştırmacılar, bitki yağı kullanarak oluşturdukları aglomeratlarında benzer karbon saflıkları belirtmişler; fakat, geri kazanım oranlarına ilişkin bilgi sunmamışlardır <sup>47</sup>. Bu yöntemin, köpüklü yüzdürmeye göre en büyük dezavantajı bağlayıcı miktarının fazla olmasından kaynaklı maliyet yüküdür.

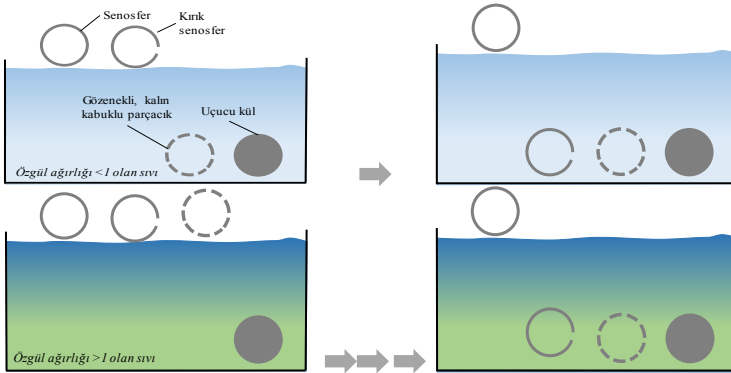
Yüksek KK (%17,7) oranına sahip bir uçucu kül ile yapılan bir karbon geri kazanım araştırmasında flotasyon kolonu, yağ aglomerasyon kolonu ve triboelektrostatik ayırıcıları verimliliği kıyaslanmıştır. Flotasyon kolonu ile en yüksek kalite (%61) ve geri kazanım oranına (%62) ulaşılmıştır; fakat, zenginleştirilmiş külün KK sadece %8'in altına düşürülebilmiştir. Araştırmacılar, kabul edilebilir derecede düşük KK'na sahip bir kül elde etmek için çok aşamalı zenginleştirme süreçlerine veya daha detaylı optimizasyonlarına gerek olduğunu belirtmişlerdir <sup>72</sup>.



### 3.8.2. Senosfer geri kazanımı

Uçucu kül içerisindeki senosferler (içi boş küresel parçacıklar) üzerine yapılan araştırmalar 1970'lere kadar uzanır <sup>503</sup>. Senosfer kelimesi yunanca iki kelimenin, kenos (içi boş) ve sphaira (küre), birleşmesi ile oluşur <sup>504</sup>. Kül eriyik halinde iken oluşan senosferler, minimum yüzey gerilimine ulaşmak için küresel bir şekil alırlar. Üretilen külün %1-2'sini oluştururlar. Tipik uçucu kül kompozisyonuna; fakat, daha iri tane boyu dağılımına (20-200 µm) sahiptirler <sup>505</sup>. Duvar kalınlıkları nispeten ince (2-10 µm), tane çapının yaklaşık %10'u kadardır.

Senosferlerin yoğunluğu genelde 1 g/cm<sup>3</sup>'ten düşüktür. Senosferlerin geri kazanımında bu düşük yoğunluktan faydalanılır. Senosferlerin ayrıştırılmasında en yaygın kullanılan yöntemi yaş ayırmadır (Şekil 3-38). Yaş ayırmada kullanılan farklı sıvılar Tablo 3-16'da özetlenmiştir; çoğunlukla ayrıştırıcı sıvı olarak su kullanılır. En temel uygulama uçucu külün havuzlarda depolanması ve su yüzeyinden senosferlerin toplanmasına dayanır; ayrıştırma verimi tekrar karıştırma-yüzdürme uygulanarak artırılabilir. Uçucu külün içerisindeki bazı malzemeler su ile temas ettikten sonra çözünmeye eğilimlidir <sup>506</sup>. Çözünebilen toksik elementlerin suda birikme potansiyeli, bu tip yaş ayrıştırma yöntemleri için bir dezavantajdır <sup>505</sup>. Öte yandan, ABD'de tipik bir uçucu kül örneğinin liç davranışına yönelik çalışmalar, doğal liç koşulları altında bu yöntemin güvenli olduğunu göstermektedir <sup>507</sup>. Senosferlerin kül havuzlarından yaş ayrıştırma yöntemi ile elde edilmesi yöntemi, çeşitli teknik zorluklar ve ayrıştırma için büyük alan ve uzun zaman gerekmesi gibi sebepler dolayısıyla sürekli çalışan bir uçucu kül işleme tesisine entegre edilememektedir.



Şekil 3-38. Yaş ayırma yöntemlerinde gözenekli/gözeneksiz ve kırılmamış/kırık senosferlerin ayrıştırılmasında zamanın etkisi (<sup>106</sup>'dan uyarlanmıştır.)

Tablo 3-16. Senosferleri ayırmak için kullanılan farklı sıvılar <sup>106</sup>

Sıvı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ayrılan ürün
Aseton	0,8	Düşük yoğunluklu senosferler
Distile su	1,0	Senosferler
Lityum Metatungstat	1,5	Ağır içi boş küreler ( $CaO$ , $Fe_2O_3$ ve $Al_2O_3$ içeren)
Karbon tetraklorür	1,6	
Dibromometan	2,5	Katı uçucu kül taneleri ve kırık senosferler
Diiyodometan	3,3	Yüksek $Ca$ içeren katı uçucu kül taneleri

Kolay ve Bhusal (2014), yoğunluğu 1,0 g/cm<sup>3</sup>'den hafif senosferleri damıtılmış su ile, 1,0-1,5 g/cm<sup>3</sup> arasında olan senosferleri ise lityum metatungstat çözeltisi ile (yoğunluğu 1,5 g/cm<sup>3</sup>) yüzdürme-çöktürme yerine santrifüj tekniği kullanarak ayırtmıştır <sup>508</sup>. Ayırıştırma verimi santrifüjün dönme derecesi ve dönme süresine bağlı olarak değişmektedir. Senosferlerin kabuk kalınlığı farklı olmakla birlikte, suya kıyasla daha hafif ve daha ağır parçacıklar için tane boyutu dağılımlarında önemli bir fark gözlenmemiştir.

Yaş ayırma yönteminin bir başka avantajı, gösterildiği gibi, işlem özelliklerini değiştirerek, bütün senosferleri kırıklardan ayırmak için kullanılabilir. Bir senosfer-sıvı süspansiyonunu kaynatıldığında parçacıkların içinde ve dışındaki buhar basıncının farkı nedeniyle kırılmamış ve gözeneksiz parçacıkların % 60'ının ayrıştırılması mümkün olmuştur. Oda sıcaklığında gözenekli/gözeneksiz ve bütün/kırık senosferler benzer şekilde davranır, ve yüzeyde yüzer. Kaynatma sırasında parçacıklar içindeki basınç artar. Gözenekli ve kırık senosferlerde gaz parçacıktan ayrılır, yerine sıvı dolar, parçacık ağırlaşır ve batar <sup>509</sup>.

Yaş ayırıştırma yöntemleri kaynaklı potansiyel çevresel problemler ve alan kısıtlamaları farklı ayırıştırma yöntemlerinin de incelenmesine zemin hazırlamıştır. Ayırıştırma kullanılan bir diğer akışkan ortam havadır. Senosfer ayırıştırma süreçlerinde havalı sınıflandırma ve yaş sınıflandırma tekniklerinin etkinliklerini karşılaştıran teorik çalışmalar mevcuttur <sup>505</sup>.

Mevcut senosfer ve uçucu küllerin tane boyu-yoğunluk dağılımı kullanılarak yapılan teorik bir çalışmada ayırıcı ortam olarak su ya da hava kullanılmış, parçacıkların yaş ve havalı ayırıştırma işlemlerindeki ayrılış hızı hesaplanmış, bu hıza eşit bir yukarı akış hızı seçilmiş, ve alt ve üst akıntılardaki parçacık miktarları belirlenmiştir <sup>505</sup>. Ayırıcı ortam olarak su kullanıldığında yoğunluğa dayalı bir ayırıştırma gözlenmiş, senosfer parçacıkları suyun kaldırma kuvveti ile yükselmiştir. Ayırıcı ortam olarak hava kullanıldığında ise hem senosferlerin, hem de uçucu kül tanelerinin havadan çok daha büyük bir yoğunluğa sahip olması sebebi ile ayırıştırma tane boyu dağılımı yönlendirmiştir. Su ile yapılan ayırıştırılarda kullanılabilir yukarı akış hızı en küçük kül parçacıklarının boyutu ile sınırlıdır. Hava ile yapılan ayırıştırılarda ise senosfer ve uçucu kül tanelerinin boyut dağılımlarındaki herhangi bir çakışma, ayırıştırma verimliliğini düşürür. Havalı sınıflandırma için hesaplanan teorik ayırıştırma verimi, yaş için hesaplanan kadar yüksektir (~%70).



Kapalı-tip pnömatik ayırıcı ve mikron ayırıcı olmak üzere iki tip havalı sınıflandırıcının senosfer ayırıştırma verimliliğini karşılaştırıldığı bir çalışmada iki tipin de teorik üst limitin altında verimlilik gösterdiği; fakat, mikron ayırıcıların bu işlem için daha uygun olduğu belirlenmiştir <sup>510</sup>. Bu tekniğin uygulanabilirliğini araştırmak için, yaş ayırmadan önce bir mikron ayırıcı yerleştirilmiştir. Böylece yüzdürme-çöktürme tankında ayrılacak kül miktarı ~%90 azalmış ve yaş ayırıştırma süreci için gerekli su miktarı oldukça düşmüştür. Senosfer geri kazanım oranı ise ~%80'e ulaşmıştır.

Literatürde senosferler için genel olarak kabul görmeyen farklı tanımlar da mevcuttur. Ghosal ve Ben <sup>63</sup>, katı bir saf silis parçacığının yoğunluğunun 2,2-2,8 g/cm<sup>3</sup> aralığında olduğunu ve gözenek içeren kül parçacıklarının bu limitin altında bir yoğunluğa sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir. Gaz kabarcıklarının özgül ağırlığı 1,0'den büyük parçacıklara da sıkışabileceğini göz önünde bulundurarak senosferleri yoğunlukları 2,2 g/cm<sup>3</sup>'ten daha düşük parçacıklar olarak tanımlamıştır. Bazı ayırıştırma yöntemlerinde, senosferler için bu tanım dikkate alınmıştır. Örneğin, triboelektrik (sürtünme ile elektriklenme) ayırma sistemleri ile <sup>511</sup> yoğunlukları 2,0 g/cm<sup>3</sup>'ten daha düşük parçacıklar ayırıştırma için kullanılmıştır.

Senosferler, uçucu külün katma değeri en yüksek bileşenlerinden biri olarak görülür. Sudan daha düşük yoğunluğa sahip ve küresel morfolojide olmaları, düşük termal ve elektrik iletkenlikleri <sup>293</sup> gibi benzersiz özellikleri sebebiyle birçok farklı uygulamada kullanılabilirler <sup>106</sup>. Senosferlerin küresel şekli, düşük yüzey alanı-hacim oranı sağlar, böylece malzemenin yüzeyini kaplamak için için daha az reçine, bağlayıcı veya su gerekir. Bu özellik, senosferleri daha dayanımlı, fakat daha hafif polimer ve polimerik kompozitlerin üretimi için uygun bir dolgu malzemesi yapar. Polimerik matriks, termoplastik veya termoset plastikten oluşabilir. Küresel senosferlerin düzensiz şekillere sahip dolgu malzemelerine göre çeşitli avantajlar sunar. Bunlardan birkaçı: daha kolay ıslanma ve dağılma, kalıba dökme esnasında düzgün stres dağılımı, soğuma esnasında daha düşük büzülme, enjeksiyonlu kalıplama bileşenlerinin daha az eğrilmesi, imalat ekipmanlarındaki aşınmanın azaltılması. Senosferlerin dolgu malzemesi olarak uygun oranda kullanımı ile pahalı plastik matriksin kullanım oranı düşer, basınç dayanımı ve elastisite modülü iyileşir, ısı iletkenlik ve ısı genleşme katsayıları ise azalır. Bununla beraber, yüksek oranda dolgu kullanımı çoğunlukla çekme dayanımı ve kırılma özelliklerini kötüleştirir. Dolayısıyla, istenilen özellikleri sağlayacak dolgu miktarının belirlenmesi önemlidir. Literatüre, bu konuda birçok çalışma mevcuttur: poliüretan kompozitler <sup>512</sup>, polyester kompozitler <sup>513</sup>, işlev gradyanı gösteren malzemeler <sup>514</sup>, polimer kabarcıklı süngerler, yüksek darbe dayanımlı naylon kompozitler <sup>515</sup>. Ayrıca, senosferleri bakır ile kaplayıp organik polimerlere katarak, polimerlerin elektrik özelliklerini izolatörden iletkene değiştirmek mümkündür <sup>516,517</sup>.

Senosferlerin kabukları, esas olarak termal olarak kararlı alüminosilikat fazlardan oluşur. Bu kabuklar, yüksek sıcaklıklara dayanıklı alüminyum kabarcıklı süngerler yapmak için kullanılabilir. Yüksek enerji emicilik gösteren bu süngerler, otomatik fren rotorlarının ve diferansiyel kapakların yapılması için uygun sönümleme özelliklerine sahiptir <sup>518</sup>. Mekanik ve termal özelliklerin yanı sıra, alüminyum kabarcıklı süngerler,

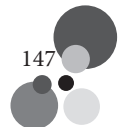
temel metal matriks alaşımlarına kıyasla daha iyi elektromanyetik kalkanlama sergiler<sup>519</sup>. Bu sebeple, hafif elektronik paketleme uygulamaları için kullanılabilirler. Benzer şekilde, nikel kaplı senosferler de elektromanyetik kalkanlama ve mikrodalga sönümlenmesi uygulamaları için bir potansiyel göstermektedir.

Mullit zengini bir malzeme olarak senosferler, mullit kaplı dizel motor bileşenleri, refrakterler, ısı eşanjörleri ve (cam eritme, çelik ıslatma ve alüminyum ıslahı gibi uygulamalarda kullanılan) endüstriyel fırınlarda kullanım potansiyeline sahiptir<sup>520,521</sup>. Bunların yanı sıra, senosferler yüksek termal kararlılık, düşük ısıl genleşme, çatlak ilerlemesine ve termal şoklara karşı yüksek direnç ve yoğun oksidatif/korozif ortamlarda yüksek sünme direnci göstermelerinden ötürü seramik köpük kaplamalar için uygundur.

Senosferlerin de ana kullanımlarından biri hafif kompozitler üretmek için çimento ve betona karıştırılmasıdır. Küresel ve içi boş morfolojiye sahip senosferler kimyasal, mekanik ve enerji sönümleyici özellikleri ile dayanıklı köprü güverteleri, kaldırımlar ve otoyolların inşasında kullanılmak üzere geleneksel çimento esaslı sistemlere ince agrega olarak eklenebilir; kapalı gözenek yapısı sayesinde hem daha işlenebilir, hem de daha hafif betonlar üretilmesini sağlar. Gözenekli yapısı sebebi ile senosferler kuma kıyasla daha çok (ağırlıkça %180'e kadar) su alabilir; fakat, daha yavaş su kaybederler<sup>522</sup>. Portland çimentosu temelli sistemlere eklendiğinde içsel kütleme sağlayarak otojen büzülme sınırlandırır<sup>523</sup>. Senosferler, ses bariyerleri ve asfalt betonlarda da kullanılır<sup>524,525</sup>. Zira, senosfer içeren betonlar daha hafiftir, montajları daha kolaydır, ve dolayısıyla işçilik maliyetleri daha azdır. Ayrıca, bu betonlar yeterli akustik zayıflatma ve donma-çözülme performansına sahiptir. Senosferler, çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılmak üzere üretilen düşük su kaybı gösteren hafif çimentoların üretiminde katkı maddesi olarak da kullanılabilir<sup>526,527</sup>.

Senosferlerin betona yüksek hacimlerde katılması beton yoğunluğunu önemli ölçüde azaltırken, viskozitesinde artışa, sertleşmiş kompozitlerin mekanik özelliklerinde ve geçirimsizliğinde düşüğe sebep olabilir<sup>524,528</sup>. Sıradan betona benzer şekilde, mekanik özelliklerde azalma, hata modlarını etkiler ve malzemenin genel performansını değiştirir. Bu nedenle, son derece dikkate edilmelidir<sup>528</sup>. Senosferler neredeyse inert bir malzeme olarak kullanıldığından, kompozitin mekanik performansının iyileştirilmesi bağlayıcının, bağlayıcı-senosfer ara yüzünün ve senosferin dayanımına bağlıdır. Bağlayıcı dayanımının artırılması iç gerilmeleri azaltarak kompozitin genel mekanik davranışını iyileştirir<sup>529</sup>. Çimento esaslı sistemlerde kullanılan senosferlerin küresel biçimi (düşük yüzey alanı-hacim oranı) sebebi ile yeterli işlenebilirlik için gereken su ihtiyacı, dolayısı ile su-çimento oranını düşer, bağlayıcı dayanımı artar<sup>508</sup>. Fakat, sonuçta senosferler ile birlikte bağlayıcı matrikse içi boş küreler eklenir; ve basınç yükü altında kalan bir kompozitte bu kürelerde sıkıştırma yüküne paralel olarak eksenel mikro çatlaklar oluşur, ve hatta küreler yarılabılır. Senosfer-çimento sistemlerinin mekanik performansına ilişkin detaylar<sup>530,531</sup> de bulunabilir.

Senosferlerin düşük yüzey pürüzlülüğü nedeniyle neredeyse hidrofobik bir yüzeye sahip olmaları ve senosferler-bağlayıcı arasındaki zayıf etkileşim, bağlayıcının senosfer yüzeyine yapışmasını zorlaştırarak mekanik zayıflıkları artırır. Çeşitli





önüşlemler ile senosferlerin yüzey reaktivitesi iyileştirilebilir. Yüzeyi reaktif silanol gruplarıyla kaplayarak, iyon değişimi reaksiyonları ile Portland çimentosu kaynaklı  $Ca^{2+}$  ve  $Mg^{2+}$  kanyonları ile kimyasal etkileşimi arttırılabilir. Senosferler, sıcak seyreltilmiş  $HCl$  ile karıştırılarak, yüzeydeki silanol oranı yükseltilebilir. İşlem görmüş senosferler ile yapılan çimento esaslı bir kompozitin basınç dayanımı, işlem görmemiş senosferler ile yapılanın 2,4 katı olmuştur <sup>532</sup>. Silis dumanı ve silan gibi uygun yüzey değiştirici eklenerek de senosferler ve bağlayıcı arasındaki ara yüzey mukavemetinin daha da iyileştirilmesi sağlanabilir. Senosfer içeren bir betona silis dumanı ekleyerek basınç dayanımını %80'e, çekme dayanımını %35'e, eğilme dayanımını %60'a, ve kırılma tokluğunu ise %41'e kadar arttırmak mümkün olmuştur <sup>528</sup>. Senosfer-çimento sistemlerine nano- $SiO_2$  ilavesi de senosfer-bağlayıcı ara yüzünü kuvvetlendirmiş, pozzolanik aktiviteyi arttırmış, toplam gözenekliliği düşürmüştür <sup>529,533</sup>. Senosferlerin, direk nano- $SiO_2$  kaplanması halinde ise süper hidrofobik yüzey elde edilebilir <sup>534</sup>.

Senosfer-çimento sistemlerinde kürlenme derecesinin etkisi de araştırılmıştır <sup>527</sup>. Oda sıcaklığına kıyasla  $75^{\circ}C$ 'de kürlenmiş karışımlarda senosferler ve portlandit arasındaki pozzolanik reaksiyonun hızlandığı, daha fazla hidrasyon ürünü oluştuğu ve daha sağlam bir arayüzey elde edildiği görülmüştür <sup>527</sup>.

Senosferler ile portland çimentosu esaslı hafif kompozitler dışında, hafif geopolimerler ve magnezyum oksiklorür çimentoları (sorel çimentosu) de üretilebilir. Bu iki malzeme grubu için de senosfer katkısı yoğunluğunu ve ısı iletkenliğini düşürerek yangın dayanıklılığını arttırır <sup>535</sup>. Bir araştırmada üretilen, senosfer/metakaolin temelli geopolimerik kompozitlerin senosfer kullanım oranına göre birim ağırlığı  $800-1.300 \text{ kg/m}^3$ , basınç dayanımı ise  $36,5-70 \text{ MPa}$  aralığında değişmektedir <sup>536</sup>.

### 3.8.3. Manyetik kısmın geri kazanımı

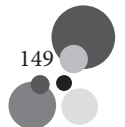
Malzemelerin manyetik olarak ayrılması 19. yüzyılın ortalarından itibaren gelişen ve olgunlaşmış bir teknoloji olmasına rağmen, uçucu küldeki manyetik maddenin geri kazanım yöntemlerine ilişkin bilgiler oldukça sınırlıdır. Manyetik ayırma, kuru veya yaş bir ortamda yürütülebilir. Yaş manyetik ayırıcıların kullanımı, kuru manyetik ayırıcılara kıyasla daha avantajlıdır. Yaş ve kuru manyetik ayırıcıların bir arada kullanılması, her iki teknolojiye de yararlanılabilecek bir başka uygun seçenektir. Manyetik ayırmanın arkasındaki temel ilke basittir; farklı manyetik duyarlılıktaki parçacıkların (diyamanetik, paramanyetik, ferromanyetik, antiferromanyetik ve ferrimanyetik), uygun bir manyetik alan içinde farklı şekilde hareket etmelerine dayanır. Ayırıcıda, manyetik kuvvet dışında yerçekimi, sürtünme ve merkezkaç kuvveti gibi farklı kuvvetler de önemlidir. Parçacıklar tüm bu kuvvetlerin bütünlük şiddetine ve doğrultusuna göre hareket ederler. Böylelikle, harici olarak uygulanan bir manyetik alan, benzer manyetik özelliklere sahip bu parçacıkları ayırabilir <sup>537</sup>. Manyetik ayırıcılar, uygulanan manyetik alanın şiddetine göre de ikiye ayrılır. Düşük alan şiddetli ayırıcılar genelde manyetitin zenginleştirilmesinde, yüksek alan şiddetli ayırıcılar ise hematit, kolombit, limonit, siderit, manganit, ilmenit, garnet, manyezit gibi minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılır.

Uçucu küldeki mevcut manyetik konsantrenin ayrıştırılması da katma değer yaratmak için önemli bir fırsattır. Her uçucu kül için, manyetik madde miktarı kömür kaynağına ve kömür kazanı çalışma koşullarına bağlı olarak (genellikle %0,5-18) değişebilir <sup>538</sup>. Ayrıştırmanın amacı, sadece *Fe* bakımından zengin ürünler elde etmek değildir <sup>539</sup>. Alümina üretiminde veya nihai ürünlerdeki demir konsantrasyonunda sınırlamalar olduğunda demirin ayrıştırılmış olması tercih edilebilir <sup>540</sup>. Günümüzde manyetik ayrıştırma, kül zenginleştirme yerine kirlilik kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek oranda (%18) demir oksit içeren bir uçucu külün %15'i bu yöntem ile ayrıştırılmıştır. <sup>537</sup>. Kül zenginleştirme üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır <sup>541-543</sup>. Bu çalışmaların temel amacı, manyetik parçacıkların ayrıştırılmasından çok karakterize edilmesidir. Bulgaristan'da üç farklı uçucu kül üzerinde yapılan bir çalışmada *Fe*-içeren mineralleri ayırmak için yaş, düşük yoğunluklu manyetik ayırma yöntemini kullanılmıştır <sup>544</sup>. Külden elde edilen manyetik konsantrelerdeki demir konsantrasyonları %37,5, %16,8 ve %26 mertebelerinde olmuştur. Kömür temizleme işlemlerinde yoğun bir ortam olarak kullanılmak üzere taban külünün manyetik kısmının geri kazanılması üzerine yapılan pilot ölçekli bir başka çalışmada, demir içeriği %75'e ulaşan manyetik konsantre üretilmiştir <sup>545</sup>. Araştırmada, kül bulamacı yoğunlaştırıcı spiraller vasıtası ile hafif ve ağır kısımlara ayrılmış; ağır kısım, yüksek alan şiddetli bir manyetik ayırıcıya beslenmiştir. Ayırıcı içinde matriks malzemesi olarak kullanılan çelik yüne yüksek bir statik manyetik alan uygulanmıştır. Matriksin düzensiz yüzeyi, zayıf manyetik parçacıkları yakalamak için yeterli kuvveti oluşturan yüksek gradyanlı manyetik alanlar üretmektedir <sup>537</sup>.

### 3.9. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozitler, biri metal olmak üzere en az iki bileşenli kompozitlerdir. Diğer bileşen farklı bir metal, seramik ya da organik bir malzeme olabilir. Metal matrisli kompozitler, düşük yoğunluk, yüksek dayanım-ağırlık oranı, yüksek ısı tutuculuk, mükemmel süne, yorulma ve aşınma direnci gibi özellikleri sebebi ile motor ve frenlerde dökme demir ve diğer malzemelerin yerini alma potansiyeline sahiptir. Metal matris alanında *Al*, *Be*, *Mg*, *Ti*, *Fe*, *Ni*, *Co* ve *Ag* dahil olmak çoğu metalik sistem araştırılmıştır. Şimdiye kadar alüminyum matriks kompozitler en çok kullanılan olmuştur. Güçlendirici olarak ise kullanılan tipik malzemeler sertlik, dayanım ve nispeten düşük yoğunluk özelliklerini taşıyan seramiklerdir; kullanılan güçlendirici malzemeler arasında *SiC*, *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, *B<sub>4</sub>C*, *TiC*, *TiB<sub>2</sub>* ve grafit sayılabilir.

Bu kompozitlerde uçucu kül kullanımı da yoğun olarak araştırılmıştır <sup>546-550</sup>. Genel olarak, uçucu kül parçacıklarının alüminyum alaşımlı matris içerisine dahil edilmesi ile yoğunlukta azalma; elastisite modülü, aşınma direnci ve sertlikte ise artış gözlenmiştir. Ayrıca, alüminyumun uçucu kül ile değiştirilmesi ciddi maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Düşük maliyetli bu kompozit pistonlar, silindir gömlekleri, rulmanlar ve akım kollektörleri gibi bir dizi otomotiv ve elektromekanik uygulama için uygun olabilir.



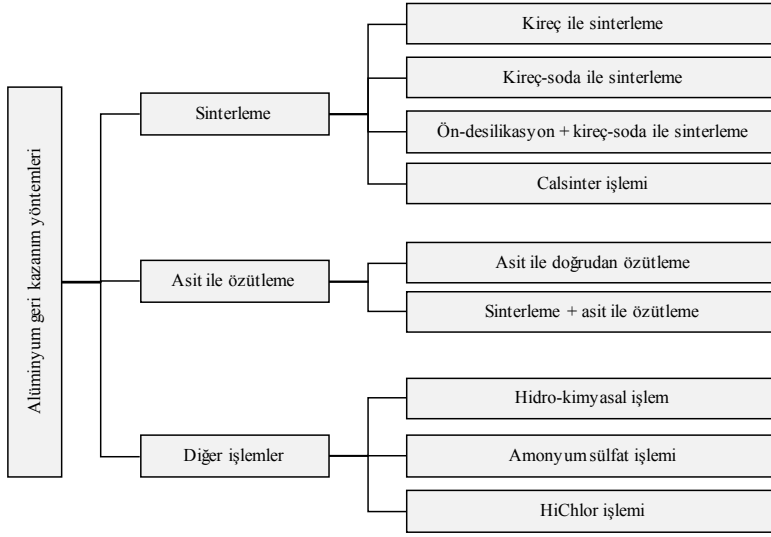
## 3.10. DEĞERLİ METAL GERİ KAZANIMI

Uçucu kül bazı ağır elementlerin yanı sıra alüminyum (Al), titanyum (Ti), germanyum (Ge), galyum (Ga) ve vanadyum (V) gibi uygun işlemler ile ekstrakte edilebilen değerli metaller de ihtiva eder. Bu metaller, metal oranı yüksek olan uçucu küllerden uygun yöntemler ile belli oranda geri kazanılabilir.

### 3.10.1. Alüminyum ve titanyum geri kazanımı

Alüminyum bakımından oldukça zengin olan uçucu kül, potansiyel bir alümina kaynağıdır. Boksit kaynaklarının azalması ve alüminyuma olan talebin artmasıyla birlikte, uçucu külden alüminyum geri kazanımı uygun bir seçenek haline almıştır<sup>551</sup>. Bu geri kazanıma Grzymek'in<sup>552</sup> 1950'lerde, Soğuk Savaş dönemindeki Polonya'da, boksit ambargosu esnasında yaptığı çalışmalar öncülük etmiştir<sup>553</sup>. O dönemde geri kazanım işlemi kalsiyum alüminat ve dikalsiyum silikat içeren sinterlerin otomatik olarak parçalanması üzerine kurulmuştu<sup>554</sup>. Sinter, sodyum karbonat ile karıştırılmış; sonrasında alümina ve portland çimentosu üretmek üzere karbonizasyon ve su ile yıkama da dahil olmak üzere bir dizi kimyasal işleme tabi tutulmuştu. 1953'te bu yöntemle dayanarak Polonya'da 10 bin ton alümina ve 100 bin ton portland çimentosu üretmek için bir pilot tesis kurulmuştur. 1970'lerin sonunda 100 bin ton alümina ve 1,2 milyon ton çimento üretme kapasitesine sahip ikinci bir tesis de açılmıştır. 1970'lerin başında boksit ihracatçıları tekelleşmesi konusunda duyulan yaygın endişeler fiyatları yükseltmişti. Bunun üzerine Amerikan Maden Bürosu boksit için potansiyel alternatifler bulunması konusunda çeşitli araştırma programları başlattı. İncelenen işlemler mevcut sinter ve özütleme işlemlerini içeriyordu. 1980'lerden beri yapılan araştırmalarda mevcut yöntemler iyileştirilmiş ve yeni geri kazanım teknolojileri gelişmiştir.

Boksitten alüminyumun ticari olarak üretilmesi Bayer tarafından 1888'de patentlenen bir işlemle gerçekleştirilir<sup>555</sup>. Boksit, alüminyum hidroksit mineralleri bakımından zengindir ve düşük oranda yabancı madde içerir. Alümina, boksitten nispeten kolay ve ucuz şekilde ekstrakte edilebilir. Bu sebeple, alümina elde etmek için kullanılacak alternatif yöntemlerin Bayer prosesi ile ekonomik olarak rekabet edebilmesi gerekir. Boksitin aksine uçucu kül, nispeten düşük alüminyum ve yüksek silika içeriğine sahiptir. Uçucu kül içerisindeki alüminyumun bir kısmı camsı fazlarda, bir kısmı da kimyasal olarak daha kararlı olan mullit içerisinde bulunur. Bu durum, boksite kıyasla daha düşük alümina geri kazanım oranına ve daha yüksek sermaye ve işletme maliyetlerine yol açar<sup>198</sup>. Günümüzde uçucu küllerden alüminyumun geri kazanılması için kullanılan yöntemler Şekil 3-39'de özetlendiği gibi üç ana kategoride toplanabilir: (i) sinterleme, (ii) asit ile özütleme ve (iii) diğer işlemler. Tüm yöntemler halen hem teorik hem de uygulama açılarından geliştirilmektedir. Alüminyum geri kazanım yöntemleri üzerine daha fazla bilgi için Yao'nun<sup>198</sup> yayını incelenebilir.



Şekil 3-36. Uçucu külden alüminyum geri kazanım yöntemleri

Grzymek'in öncülüğünden bu yana gelişen yöntemlerin avantajları yanında bazı dezavantajları vardır ve çoğu sadece laboratuvar ölçeğinde kalmıştır. Çoğu sinterleme işlemi silikanın aynı anda ekstraksiyonunu sağlamaz. Ek olarak, işlem sonunda çimento imalatı haricinde etkin bir şekilde kullanılamayan, önemli miktarda kalsiyum silikat atığı üretilir. Kireç sinter işlemi ile 1 ton alüminyum ürünün geri kazanılmasında 7-10 ton kalsiyum silikat açığa çıkar<sup>198</sup>. Kireç-soda sinter işleminde kireç sinter işlemine kıyasla daha az atık üretilirken, enerji maliyeti nispeten artar ve bu üretim süreci karmaşıklaşır. Aynı zamanda büyük ölçekli uygulamaya geçişi de sınırlamaktadır. Desilikasyon ve sonrasında kireç-soda sinter işlemleri uygulandığında hem geri kazanım artar, hem de katı atıklar bir miktar azalır. Fakat, endüstriyel uygulamalarda desilikasyon suyunun filtrelemesi ve yıkanması gibi sorunlar ile karşı karşıya kalınır. Asit ile özütleme yöntemleri alümina ve diğer metalleri çözerken, zengin silikon içerikli atık bir yan ürün oluşturur. Ayrıca, tantal-niyobyum (*Ta-Nb*) alaşımı gibi aside dayanıklı malzemelerden üretilen hava geçirmez işleme ekipmanı gerektirir. Ek olarak, alümina geri kazanım ve atık yönetimi oldukça karmaşık olabilir; zira, özütleme işleminde külde bulunan *Fe*, *Ti* ve *Mg* gibi çözünebilir safsızlıkların bir kısmı da solüsyona geçer ve alüminyumun arıtılması için tekrar işleme tabi tutulması gerekir. Asit ile özütleme işleminin diğer dezavantajları düşük ekstraksiyon hızı ve artan çevresel koruma maliyetleridir<sup>17</sup>. Mevcutta geri kazanılan her ton alüminyumun maliyeti, geleneksel Bayer prosesini kullanarak boksitten elde edilen alümininkinden çok daha yüksektir<sup>17</sup>. Yöntemlerin avantajları ve dezavantajları Tablo 3-17'de özetlenmiştir.

Tablo 3-17. Alüminyum geri kazanım yöntemlerinin kıyaslanması <sup>198</sup>

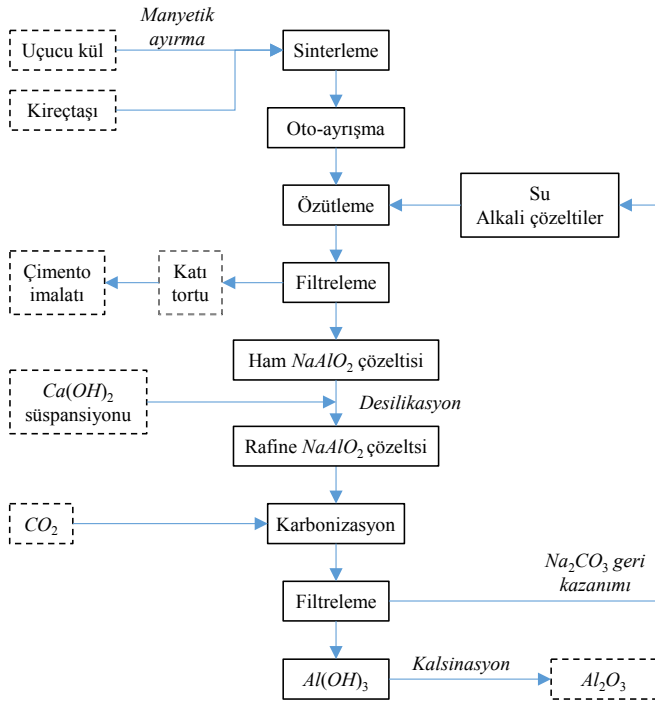
Geri kazanım yöntemleri	Avantajları	Dezavantajları
<i>Sinter işlemleri</i>		
Kireç sinter işlemi	Sinterin otomatik olarak parçalanması öğütme ihtiyacını ortadan kaldırır; kireç maliyeti daha azdır.	Önemli miktarda kalsiyum silikat atığı üretilir.
Kireç-soda sinter işlemi	Kireç sinter işlemine kıyasla daha az atık üretilir.	Enerji maliyeti nispeten yüksektir ve süreç karmaşıktır; soda maliyeti daha fazladır
Desilikasyon ve kireç-soda sinter işlemleri	Desilikasyonun ve azalan katı atık üretiminin avantajlarını birarada sunar.	Desilikasyon suyunun filtrelemesi ve yıkanması gerekir.
Calsinter işlemi	Kireç sinter işlemine kıyasla kireç maliyeti daha düşüktür; alüminyum ve diğer metalleri seyreltik asit ile çözer.	Süreç karmaşıktır; çözünebilir safsızlıkların bir kısmı çözeltiye geçer.
<i>Asit ile özütleme işlemleri</i>		
Doğrudan asit ile özütleme	Alüminyum ve diğer metalleri aynı anda çözer ve geri kazanımlarını sağlar.	Aside dayanıklı ve hava geçirmez işleme ekipmanı gerektirir; yüksek oranda asit kullanılır ve düşük ekstraksiyon hızına sahiptir.
Sinter ve asit özütleme işlemleri	Seyreltik asit ile göreceli yüksek ekstraksiyon verimliliği sağlar.	Süreç karmaşıktır ve enerji maliyeti nispeten yüksektir.
<i>Diğer yöntemler</i>		
HiChlor işlemi	Asit veya alkali kullanılmaz; alüminyum ve diğer metallerin aynı anda geri kazanımını sağlar.	Enerji maliyeti nispeten yüksektir; ekstraksiyon oranı ise düşüktür.

### 3.10.1.1. Sinterleme

Tüm sinter işlemlerinin temelinde uçucu külün toz haldeki sinterleme maddeleri ile yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek çözünür alümina bileşiklerini oluşturması vardır. Sonrasında, alüminyumun ayrıştırılması için sinter özütlenir ve elde edilen zengin çözelti yüksek saflıkta alümin hazırlamak üzere işlenir. Sinterleme ortamlarına göre sinter işlemleri kireç, kireç-soda, Calsinter ve diğer sinter işlemleri (örneğin tuz-soda sinteri, amonyum sülfat sinteri ve florür sinteri) olarak sınıflandırılabilir <sup>198</sup>.

Kireç ile sinterleme işlemi boksit, demir cevheri, kok ve kireç taşı karışımından pik demir ve kalsiyum alüminat cürufları üretmek için kullanılan Pedersen işleminin

bir modifikasyonudur <sup>556</sup>. Pedersen işleminde cüruf sodyum karbonat çözeltisi ile özütlenerek alümina elde edilir. Kireç ile sinterleme işleminde ise uçucu kül, yüksek sıcaklıkta (> 1100°C) kireç ile (kireçtaşı olarak ilave edilir) reaksiyona girerek özütleyicide çözünebilir kalsiyum alüminat ve aynı çözünmeyen dikalsiyum silikat ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) oluşturur <sup>557-559</sup>. Sıklıkla tercih edilen özütleyiciler arasında su dışında  $Na_2CO_3$  ve  $NaOH$  çözeltileri gibi seyreltik alkali çözeltileri de sayılabilir <sup>560</sup>. Sinterin özütlenmesi ile kalsiyum silikat katı atıklarda bırakılır ve çözelti zenginleştirilir. Bu zenginleşen çözeltinin  $CO_2$  ile teması sonucunda  $Al(OH)_3$  çökeltir <sup>561</sup>. Bir sonraki aşama ise çökeltinin kalsinasyonu ile nihai ürünün ( $\alpha$ - veya  $\gamma$ -alumina) elde edilmesidir.

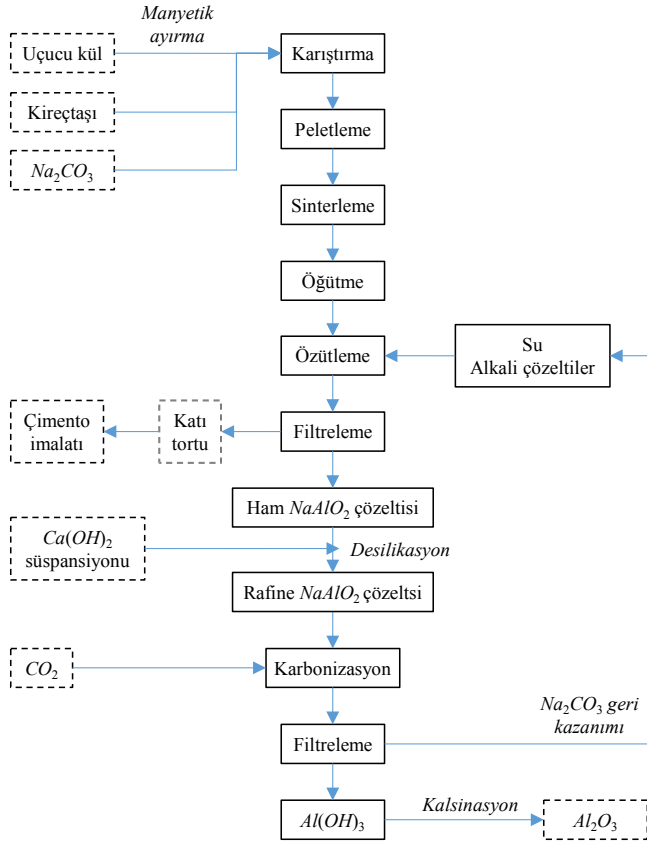


Şekil 3-40. Kireç ile sinterleme işleminin şematik gösterimi <sup>198</sup>

Özütleme aşamasında elde edilen katı atıklar sinterlenir, alçı ile karıştırılır ve çimento üretiminde öğütme işlemi esnasında kullanılır. Kireç sinterleme işleminin ana aşamaları Şekil 3-40'da şematik olarak özetlenmiştir.

Alüminyumun geri kazanımı için kireç-soda sinterleme işlemi ilk olarak 1902'de Kayser tarafından geliştirilmiştir <sup>562</sup>. Kireç-soda karışımının uçucu kül ile reaksiyonu, özütleyicide çözünebilir sodyum alüminat ve çözünmez kalsiyum silikat üretir. Yüksek sıcaklıklarda (genellikle 1100-1400°C), uçucu kül türüne ve sinterleme koşullarına bağlı olarak diğer bileşiklerin de oluşumu kaçınılmazdır. Kireç ile sinterleme işleminde olduğu gibi bu işlemde de sinter, su,  $Na_2CO_3$  çözeltisi veya  $NaOH$

çözeltisi ile özütlenir. Özütleme sırasında az miktarda silika da çözünür. Bu nedenle, kireç-soda sinter işlemi zengin çözeltinin saflaştırılması için de bir adım içerir. Özüt filtrelenir ve filtrelenmiş çözeltideki çözünmüş silika yüksek sıcaklık ve basınç altında  $Ca(OH)_2$  süspansiyonu aracılığı ile çökeltilir. Rafine edilmiş çözelti Bayer işleminde olduğu gibi karbonizasyona tabi tutulur ve hidrate alüminyumun çözeltiden ayrılarak çökmesi sağlanır. Çökelen  $Al(OH)_3$ 'ün kalsinasyonu sonucunda alümina elde edilir. Padilla ve Sohn (1985), sinter işleminin temel değişkenleri ve sinterleme sırasındaki sodyum alüminat oluşumunun kinetiği üzerinde çalışmışlardır<sup>560</sup>. Ana sinterleri sodyum alüminat ve  $\beta$ -dikalsiyum silikat olarak belirlemişlerdir. Uygun koşullarda %80'e yakın alümina geri kazanım oranlarına ulaşmışlardır. Kireç-soda ile sinterleme işlemi şematik olarak Şekil 3-41'de gösterilmektedir.



Şekil 3-41. Kireç-soda ile sinterleme işleminin şematik gösterimi<sup>563,564</sup>

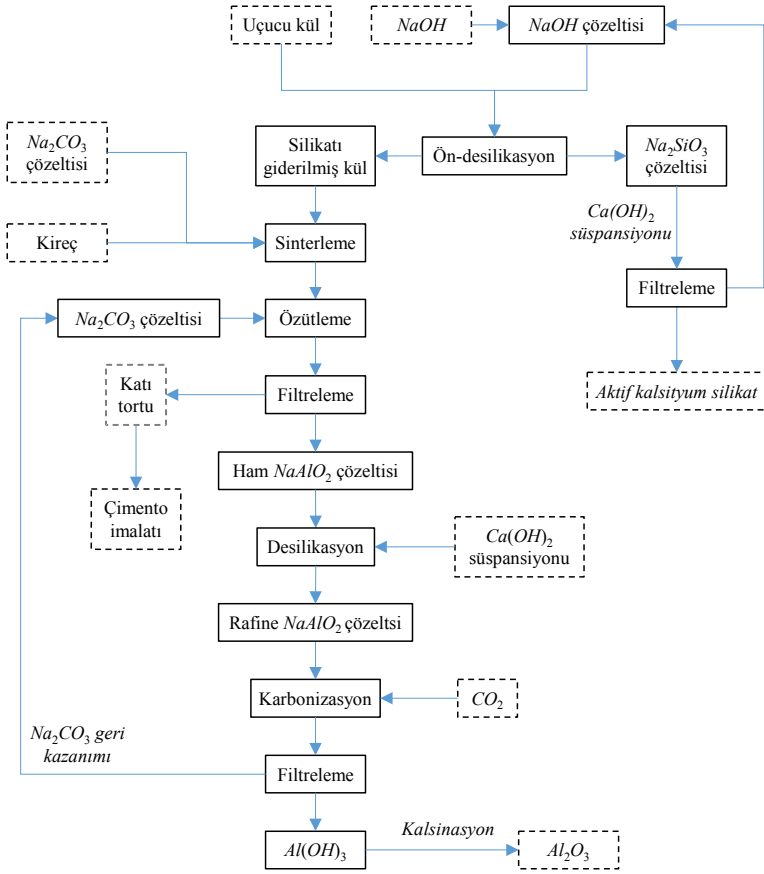
Kireç ile ve kireç-soda ile sinter işlemleri uzun zaman önce geliştirilmiş olmalarına rağmen yoğun kireç ihtiyacı ve yüksek enerji maliyetleri nedeni ile henüz tam olarak ticarileştirilememişlerdir. Temelde sorun uçucu küllerin yüksek silis içeriğinin yoğun kireç tüketimine neden olmasıdır. Ayrıca, bu işlemlerde üretilen önemli miktardaki kalsiyum silikat kalıntısının kısıtlı kullanım alanına sahip olması da problem teşkil etmektedir. 1 ton alümina kazanımı için yaklaşık 7-10 ton kalsiyum silikat kalıntısı üretilir. Sinterleme işleminde yeterli kireçtaşı kullanılmaması durumunda dikalsiyum silikat yerine gehlenit ( $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ) oluşur<sup>565</sup>. Gehlenitten su veya seyreltik alkali çözeltiler ile alümina özütlenemez. Sinterleme sonucunda üretilen dikalsiyum silikat yüksek oranda (ağırlıkça ~%4) alkali içerir; ve çimento üretimi dışında kullanım alanı mevcut değildir<sup>566</sup>. Çimento fabrikaları, oluşan yüksek su oranına sahip katı tortunun kurutma maliyetini ve çimento üretiminde olumsuz etki yaratabilecek alkali içeriğini göz önünde bulundurarak katı tortuyu potansiyel bir hammadde olarak kullanmak konusunda tereddüt etmektedirler<sup>564</sup>.

% 40-45'e varacak kadar yüksek alümina içeriğine sahip uçucu küllerde ağırlıkça  $Al_2O_3/SiO_2$  oranı 0,8-1,0 aralığındadır. Bu tip küllerde 1 ton alümina için yaklaşık 2-3 ton kalsiyum silikat açığa çıkar<sup>564</sup>. Alümina geri kazanımını daha etkin hale getirmek için ön-desilikasyon işlemleri uygulanarak molar  $Al_2O_3/SiO_2$  oranı 1,63-2,0 aralığına çekilebilir<sup>564</sup>. Silika, yüksek alümina içeriğine sahip küllerde büyük oranda amorf silika, kuvars ve mullit olmak üzere üç ana yapı içerisinde yer alır. Amorf silika seyreltik alkali ( $NaOH$  gibi) çözeltiler kullanılarak külden belli oranda ayrıştırılabilir; ve külün  $Al_2O_3/SiO_2$  oranı arttırılabilir. Yüksek alümina içeriğine sahip küller üzerine yapılan çalışmalar ön-desilikasyon işlemi ile silikanın büyük oranda (%40-60) külden uzaklaştırılabildiğini göstermiştir. Ön-desilikasyona uğramış uçucu kül, kireç ve sodyum karbonat ile karıştırılarak sinterlenir. Bu sinterden (esasen bir kireç-soda sinter alkali çözündürme işlemi) alümina çıkarma oranı %91'e kadar ulaşabilir<sup>567-573</sup>. Ek olarak, ön-desilikasyon işleminden elde edilen sodyum çözeltilisi kalsiyum oksit ile reaksiyona sokularak ultra ince aktifleştirilmiş kalsiyum silikat elde edilebilir<sup>564</sup>. Ön-desilikasyonlu kireç-soda sinterleme işlemi şematik olarak Şekil 3-42'de özetlenmiştir.

A.B.D. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilen Calsinter işleminde ise uçucu kül alçı ve kireçtaşı ile karıştırılıp yaklaşık 1000-1200°C'de sinterlenir. Sonrasında sinter seyreltik asit ile özütlenir, katı atıklar filtrelenir ve filtrattan çeşitli metaller geri kazanılır.

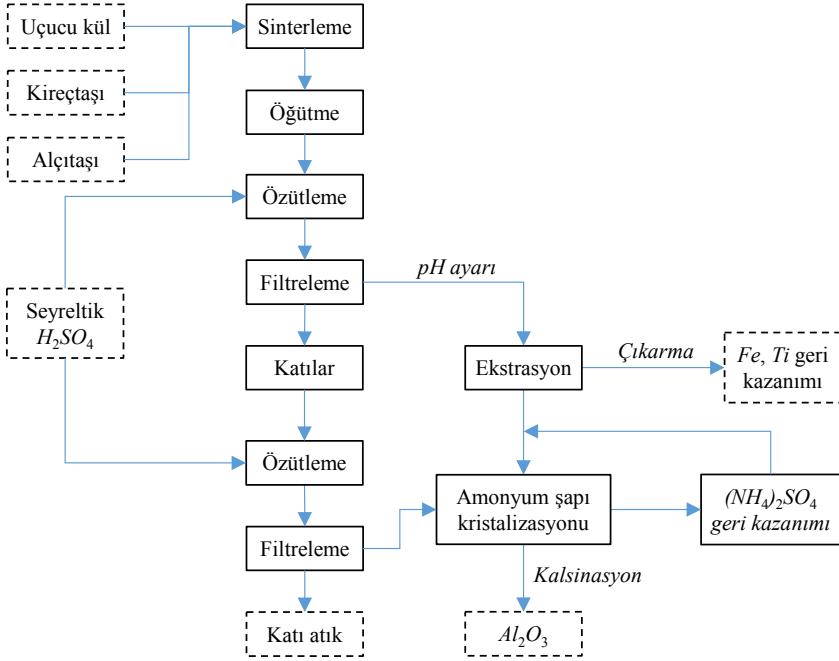






Şekil 3-42. Ön-desilikasyon ve sonrasında kireç-soda ile sinterleme işleminin şematik gösterimi

Calsinter işleminin şematik diyagramı Şekil 3-43'de gösterilmektedir. Calsinter işlemi ile uçucu külden alümina dışında *Fe* ve *Ti* gibi farklı metallerin de geri kazanımı mümkündür<sup>574</sup>.



Şekil 3-43. Calsinter işleminin şematik gösterimi <sup>572</sup>

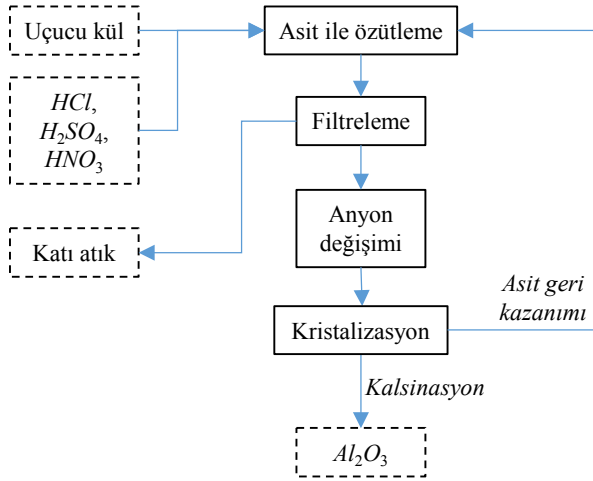
### 3.10.1.2. Asit ile özütleme işlemleri

Asit ile özütleme işlemlerinde yüksek alümina içeren uçucu küller önce hidroklorik veya sülfürik asit ile reaksiyona sokulur. Reaksiyon sonucunda sırasıyla alüminyum klorür veya alüminyum sülfat üretilir. Üretilen bu alüminyum tuzları asit ortamından ayrılır ve sonrasında ayrıştırılır. Asit ile özütleme işlemlerinde tantal-niobyum (*Ta-Nb*) alaşımı gibi aside dayanıklı malzemelerden üretilen ve hava geçirmez işleme ekipmanları kullanılmalıdır. Ekipman için gereken özel şartların yanı sıra hemen hemen tüm asit ile özütleme işlemlerinde iki problem ile karşılaşılır:

- Düşük alümina ekstraksiyon verimliliği: Düşük asit konsantrasyonunda geri kazanım oranının düşüklüğü yüksek alümina içeren küllerin birincil bileşeni olan mullitin asidik ortamlarda ayrıştırılmasının güçlüğünden kaynaklanır<sup>575,576</sup>.
- Yüksek *Ca*, *Fe* ve *Mg* gibi safsızlık içeriği <sup>577</sup>: Bu durum, ürünlerin miktarını ve kalitesini etkiler; dolayısıyla asit ile özütleme işlemi ile yüksek kalitede alümina üretmek zordur.

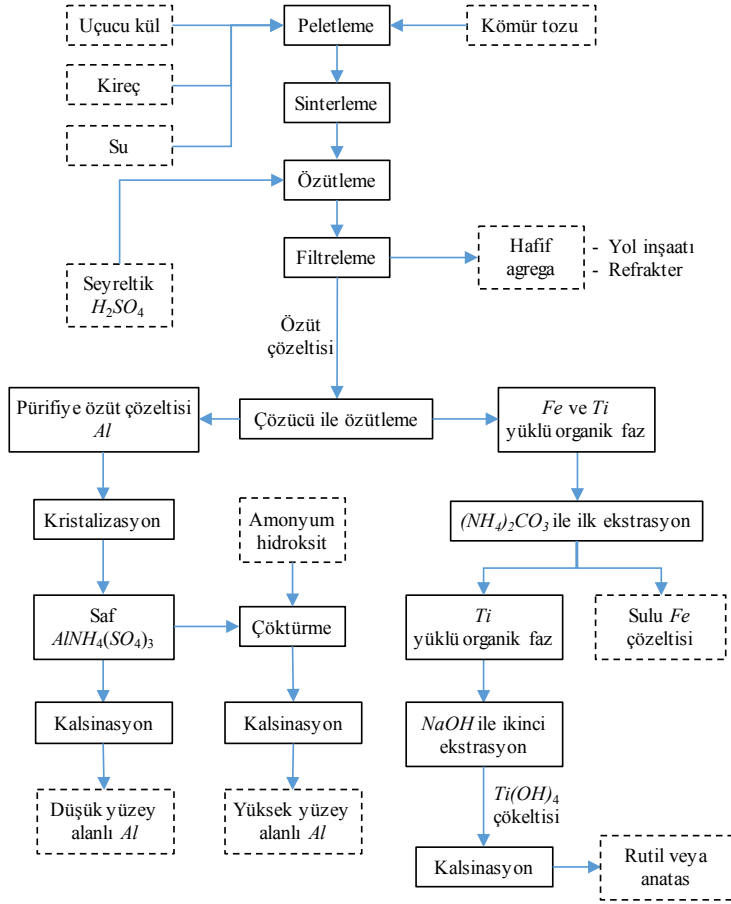
Asit ile özütleme işlemleri, işlem esnasında uygulanan basınca bağlı olarak iki kategoriye ayrılır: atmosfer basıncı altında ve orta basınç altında. Orta basınçtaki özütleme işlemleri hem pulverize kömür yakma, hem de akışkan yatak teknolojisi ile elde edilen yüksek alümina içerikli küller için uygundur. Atmosferik basınç

altındaki işlemler ise yalnızca akışkan yatak külü için uygundur. Bu durum asit ile özütleme işlemlerinin uygulanabilirliğini sınırlar. Düşük konsantrasyonlarda sülfürik asit ile ortam sıcaklığında doğrudan özütleme işlemi, yüksek alüminyum geri kazanımları sağlamaz; ayrıca, asit içine kolayca geçen ve hedef olmayan metaller saflık sorunlarına yol açar<sup>578</sup>. Doğrudan sülfürik asit ile özütlemeye ilişkin çalışmada alüminyum ekstraksiyonu en yüksek %23,5 oranında kalmıştır<sup>579,580</sup>. Yine de, nispeten daha rahat reaksiyon koşulları, daha düşük reaksiyon sıcaklıkları (~130°C) ve daha düşük üretim maliyetleri göz önüne alındığında, asit ile özütleme işlemi hala cazip bir araştırma alanıdır.



Şekil 3-44. Asit ile doğrudan özütleme işleminin şematik gösterimi

Doğrudan asit ile özütleme yerine önce sinterleme sonra özütleme yapıldığında daha yüksek ekstrasyon verimlere ulaşılabilir. Bir çalışmada ince kömür ve kireç ile peletlenmiş uçucu külün kalsinasyonu sonrasında sülfürik asit ile özütlenmesinden %85'e ulaşan verim elde edilmiştir<sup>579</sup>. Ana ekstrasyon aşamaları Şekil 3-45'de gösterilmiştir.  $Ti^{4+}$  ve  $Fe^{3+}$  iyonlarını alüminyumdan ayırıp saflaştırma sağlamak için seçici pH ile çöktürme, kristalleştirme ve çözücü ekstraksiyonu yöntemleri karşılaştırılmış, parafin içerisinde Primene JMT kullanılarak çözücü ekstraksiyonu en etkin yöntem olarak bulunmuştur. Özüt, organik çözücü ile temas ettirilip  $Ti^{4+}$  ve  $Fe^{3+}$  iyonları organik faza seçici olarak yüklenmiştir. Böylece, yüksek saflıkta alüminyum (%99,4) ile yan ürün olarak %92-97 saflıkta  $TiO_2$  üretilmiştir. Sülfürik asit özütünden kalan atık ise bir yan ürün olarak düşünülmüş ve hafif agrega olarak kullanılabileceği öngörülmüştür.

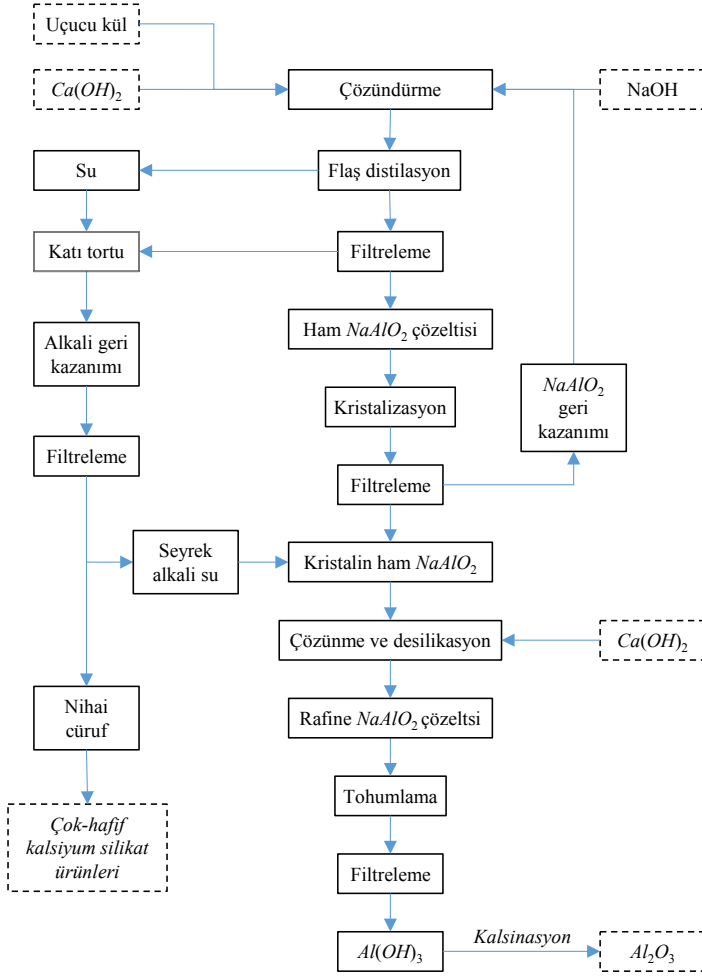


Şekil 3-45. Sinterleme - asit ile doğrudan özütleme - çözücü ekstrasyonu işleminin şematik gösterimi <sup>579</sup>

Başka bir yöntem de çözünür alüminatlar üretmek için uçucu külü soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ile yüksek sıcaklıkta ( $900^\circ\text{C}$ ) kalsine edip; sonrasında elde edilen sinteri sülfürik asit ile özütlemektir. <sup>581</sup> Bu yöntemde ekstraksiyon verimliliği %98'in üzerine çıkmıştır.

### 3.10.1.3. Diğer yöntemler

Hidro-kimyasal işlem eski Sovyetler Birliği'nde geliştirilmiştir. Bu işlem yaş alkali bir yöntem ile çözünmeyen bir bileşik olan  $\text{NaCaHSiO}_4$  üreterek alüminayı silisten tamamen ayırmak üzerine odaklanır <sup>460,564,582,583</sup>. Halihazırda düşük kalitedeki boksit ve kırmızı çamurun işlenmesinde başarıyla uygulanmaktadır <sup>584</sup>. Pulverize kömür yakan veya akışkan yataklı termik santrallerden elde edilen yüksek alümina içeriğine sahip uçucu küllerden alümina geri kazanımında kullanılan hidro-kimyasal işlemin şematik diyagramı Şekil 3-46'da özetlenmiştir.

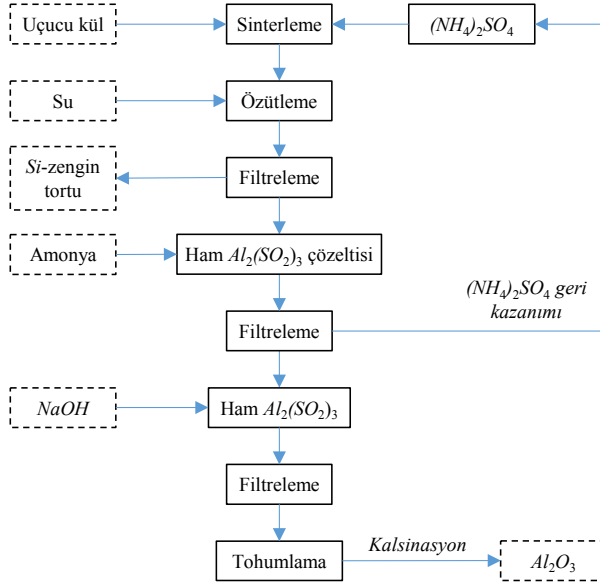


Şekil 3-46. Hidro-kimyasal işleminin şematik gösterimi <sup>564</sup>

Hidro-kimyasal işlemin temel avantajları işlemin basitliği ve işlemde yüksek alumina geri kazanım oranlarına (>%90) ulaşılabilmesidir. Buna ek olarak, elde edilen dealüminasyon cürufundan alkali geri kazanılabilir. Elde edilen nihai cüruf ise çok-hafif kalsiyum silikat temelli yalıtım malzemeleri gibi farklı inşaat malzemelerinin üretiminde hammadde olarak kullanılabilir <sup>583</sup>. Bununla birlikte, işlemin bazı limitleri de vardır. İlk olarak, nispeten yüksek alkali konsantrasyonu, karışımlarda yüksek bir viskoziteye neden olur ve bu da malzemelerin taşınmasını zorlaştırır <sup>564</sup>. Ayrıca, bu işlemin ana çözelti verimi Bayer işlemi ile kıyaslandığında hala oldukça düşüktür. Bayer işleminde her 1 m<sup>3</sup> ana çözeltiden 125-130 kg Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elde edilirken bu rakam hidro-kimyasal işlemlerde 30-35 kg aralığındadır <sup>564</sup>.

Amonyum sülfat veya amonyum hidrojen sülfat ( $(NH_4)HSO_4$ ) ile sinter kavurma, uçucu külden alüminanın geri kazanımı için kullanılan daha yeni bir yöntemdir<sup>585,586</sup>. Bu yöntemde, sinter kavurma işlemi ile uçucu külden ayrılan  $Al$  ve  $Fe$  bileşenleri deiyonize su ile özütlenir. Çözünen  $Al$  ve  $Fe$ ,  $(NH_4)HCO_3$  solüsyonu ilave edilerek çöktürülür. Çökelen  $Al(OH)_3$  ve  $Fe(OH)_3$  karışımı  $NaOH$  çözeltisi ile özütlenir. Oluşan  $NaAlO_2$  çözeltisi karbonasyon ile ayrıştırılır. Son olarak, ayrışma sonucu açığa çıkan  $Al(OH)_3$  kalsine edilerek  $Al_2O_3$  elde edilir. Amonyum sülfat ile sinterleme işlemin şematik diyagramı Şekil 3-47'de özetlenmiştir.

Başka bir çalışmada, uçucu külden amonyum sülfat kullanılarak yüksek saflıktaki alüminyum (>%99,9) elde edilmiştir<sup>587</sup>.  $400^\circ C$ 'de uçucu kül ile amonyum sülfat reaksiyona sokulmuş; reaksiyon sonucunda elde edilen ürün sülfürik asitle hidrotermal olarak özütlenmiştir. Özüt amonyum hidroksit ile karıştırılıp 24 saat yaşılandırılmıştır. Çökeltinin saflığı çözülme-çökeltme yöntemi ile artırılmıştır. Nihai çökelti geleneksel ve mikrodalga ısıtma kullanılarak kalsine edilmiştir. Geleneksel ısıtma kullanılarak kristal olmayan  $\gamma-Al_2O_3$ , mikrodalga koşullarında ise kristal  $\alpha-Al_2O_3$  oluşmuştur.



Şekil 3-47. Amonyum sülfat ile sinterleme işleminin şematik diyagramı<sup>198</sup>

Shabtai ve Mukmenev (1996)<sup>588</sup> bir biyomanyetik titanyum-alüminyum ekstraksiyon işlemi tanımlamıştır. Yazarlar, uçucu külden hem değerli, hem de toksik elementleri özütlemek için konsantre sülfürik asit kullanmıştır. Çözeltinin pH'ı titanyum çökene kadar düşürülmüş; eşzamanlı olarak biyomanyetik adsorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yetiştirilen bakteriler (Rhodococcus GIN-1 - NCIMB 40340) manyetik parçacıklar içeren bir süspansiyona eklenmiş ve bakterilerin manyetik parçacıklara adsorbe edilmesi sağlanmıştır. Bu süspansiyon çökeltmeden önce özüte

ilave edilmiştir. Titanyum çözültüden çöktüğü zaman manyetit ile birlikte bakterilere adsorbe olur. Titanyum, manyetik bir alana çökelti arasından seçilerek ayrılmıştır. Bu biyomanyetik ayırma işlemi, demir, silikat ve sülfat gibi safsızlıklar içeren titanyum dioksit bakımından zengin bir ürün elde etmek için iki kez tekrarlanmıştır. pH'ı 6,5'e yükselterek alüminyum açısından zengin bir çökelti de elde edilmiştir.

Alüminyum ve titanyum geri kazanımı için kullanılan bir diğer yöntem de külün klorlanmasıdır. İlk adım olarak uçucu külün manyetik kısmı ayrılır; bu işlem sonucu demirin yaklaşık üçte biri yine kül içinde kalır. Manyetik kısım ile beraber alüminyumun da yaklaşık %10'u kaybolur. Klorlama aşamasında, külün manyetik olmayan kısmı karbon ile karıştırılıp sabit bir yatakta klorlanır. Elde edilen alüminyum klorür elektrolitik olarak ayrıştırılabilir. Alüminyum klorürden saf alüminyum elde etmek için harcanan elektrik enerjisi boksitten elde etmede kullanılanın %70'i kadardır.

### 3.10.2. Germanyum, galyum ve vanadyum geri kazanımı

Gelişmekte olan ekonomilerin, özellikle de Çin'in yükselişi, hammaddelere olan ihtiyacı arttırmış ve bu durum gelişmiş ekonomiler için üzerinde durulması gereken bir konu haline gelmiştir. Arz açığı ve ham maddelere erişimde sıkıntı yaşama korkusu, Avrupa Komisyonu'nun ekonomik büyüme ve istihdam için kritik olan ham maddeleri analiz etmesine yol açmıştır. Üretim az sayıda ülkede yoğunlaştığı ve Avrupa Birliği'nin dış kaynaklara bağımlı olduğu Germanyum (Ge) ve galyum (Ga) kritik stratejik metaller arasında sıralanmıştır <sup>589</sup>.

Germanyum ışık yayan diyotların (LED'ler), fotovoltaik (PV) hücrelerin, infrared cihazların, fiber optiklerin üretiminde ve polietilen tereftalat (PET) polimerizasyonu için katalizör olarak kullanılan değerli bir elementtir. Çeşitli kömür havzaları nispeten yüksek konsantrasyonlarda Ge içerir; ve Ge, çoğunlukla kömürün içindeki organik kısım ile ilişkilendirilir <sup>112</sup>. Kömür yakıldıktan sonra Ge, başta uçucu kül olmak üzere yanma ve gazlaştırma yan ürünlerine yoğunlaşır; ve ham kömüre kıyasla 10 kat daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilir <sup>590,591</sup>. Bu sebeple, kömür ve uçucu kül daha erişilebilir kaynaklar tükendiğinde potansiyel Ge kaynakları olarak görülmektedir.

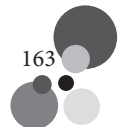
Uçucu küldeki Ge geri kazanımına odaklanan birçok çalışma mevcuttur. Bu süreçte, ilk adım uçucu külün özütlenmesidir; ardından Ge'yi diğer elementlerden ayırma süreci başlar. Ge geri kazanım yöntemlerine, İspanya'daki 335 MW'lık Puertollano Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (EGKÇ) Enerji Santrali'nde yapılan uçucu kül gazlaştırma işleminde Ge'nin suda çözünen ( $GeS_2$ ,  $GeS$  ve altıgen- $GeO_2$ ) türlerinden faydalanılması öncülük etmiştir <sup>590</sup>. Halihazırda birçok ayırma yöntemi vardır: tanin ile çökeltme,  $GeCl_4$ 'ün damıtılması, yüzdürme <sup>592</sup>, aktive karbon üzerine adsorpsiyon <sup>593</sup>, setil trimetil amonyum bromit ile çökeltme, çözücü ekstraksiyonu ve iyon değiştirici reçinelere adsorbe etme <sup>594</sup>.

200 kg-uçucu kül/saat işleme kapasiteli endüstriyel bir çözücü ekstraksiyon ünitesi için 1,3 g-Ge/saat üreten, 5 kg-uçucu kül/saat işleme kapasiteli bir pilot tesisten<sup>595</sup> elde edilen veriler kullanılarak bir tasarım yapılmış; tasarım sonuçları böyle bir tesisin ekonomik fizibilitesini değerlendirmek için kullanılmıştır.<sup>596,597</sup> Hiçbir çözücü geri kazanım ünitesi içermeyen yarı-endüstriyel bir tesis için, işletme maliyetleri ve satış analizleri göz ardı edilip yapılan hesaplamalar sonucunda 1,5 milyon Avroluk yatırım maliyeti tahmin edilmiştir.

Galyum, optoelektronik, telekomünikasyon, fotovoltaik, havacılık, alaşımlar, bilgisayarlar ve DVD'ler gibi pek çok yaygın uygulamada kullanılmaktadır<sup>598</sup>. Ga'un yer kabuğundaki bolluğu 1-17 ppm arasında değişmektedir. Fakat, bazı kömürler Ga açısından zengindirler ve yakıldıklarında uçucu külün Ga içeriği 6-10 kat zenginleşir<sup>17</sup>. Uçucu küllerde bildirilen Ga konsantrasyonları 37,5-320 ppm aralığındadır<sup>599,600</sup>. Çoğunlukla Ga direkt olarak rafine edilmez, alüminyum ve çinko rafine etme süreçlerinden kazanılır. Tipik olarak %0,003-0,008'lik Ga içeriğe sahip boksit, en büyük Ga kaynağıdır; ve Ga, atık suyun Bayer işlemine tabi tutulması ile elde edilir<sup>598</sup>.

Uçucu külden Ga ekstraksiyonu için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bir araştırmada 2M HCl asit ile iki aşamalı özütlemenin uçucu kül içerisindeki Ga'un %95'ini çıkarmak için yeterli olmuştur<sup>599</sup>. Bu süreçte uygulanan işlemler özütteki yabancı maddelerin uzaklaştırılmasını veya modifikasyonunu gerektirmiştir. Safsızlıkları ( $SiO_3^{2-}$  iyonları,  $Fe^{3+}$  ve  $Ca^{2+}$  gibi) gidermek için Ga'nın ekstraksiyondan önce özüt poliüretan köpük süngerle temas ettirilmiştir. Başka bir çalışmada, uçucu külden Ga'u özütlemek için 6M HCl asit kullanmıştır<sup>601</sup>. Elde edilen özüt çift aşamalı çözücü ekstraksiyon işleminden geçirilmiştir. İlk aşamada Ga ve kaçınılmaz olarak Fe iyonları, Amberlite LA-2'den oluşan bir organik faza ekstrakte edilmiş; sonrasında Fe ve Ga su ile fazdan ayrılmıştır. Çözeltinin pH'ı sodyum hidroksit kullanılarak  $Fe(OH)_3$  çökene kadar arttırılmıştır. Son olarak, çözeltide kalan Ga LIX 54 solüsyonu ile ayrılmıştır. Başlangıç çözeltisindeki Ga'un %83'ü geri kazanılmış ve 114 ppm'lik bir nihai Ga konsantresi elde edilmiştir. Amberlite LA-2 ve LIX 54 ticari olarak satılmaktadır.

İspanya'daki Puertollano Enerji Santrali'nden alınan uçucu kül, olası bir Ga kaynağı olarak araştırılmıştır<sup>600</sup>. Farklı koşullar altında NaOH kullanılarak, 197-275 mg-Ga/kg-uçucu kül verimi ile % 60-86 oranında geri kazanım sağlanmıştır. Konsantre Ga özütünün karbonasyonu içeriğinin %99'unun pH 7,4'te çökeldiğini göstermiştir. pH 10,5'e çıkarıldığında safsızlıklar – çoğunlukla Al (%91) – önemli oranda birlikte çökelerken, Ga'un büyük miktarı (>%98) çözeltide kalmıştır. Geri kalan çözeltinin ikinci karbonasyonu ile (pH 7,5'te) Ga'un %98,8'i geri kazanılmıştır. Çözeltinin yeniden çözünmesi (pH 0'da), Ga saflığını %7-30 oranında arttırmıştır; bu, elektroliz ile daha fazla saflaştırma için uygun bir Ga son ürünüdür. Bu yöntem ile Ga için şu anda endüstriyel ölçekte uygulananlardan daha yüksek bir geri kazanım verimliliği elde edilmiştir.





Vanadyum genellikle titanyum manyetit cevherlerinden ve  $V_2O_5$  olarak ham petrolün yan ürünlerinden geri kazanılır. Çoğunlukla, yüksek dayanımı, sertliği ve yorgunluk direnci sebebi ile demirli ve demirsiz alaşımların üretilmesi için kullanılır <sup>600,602</sup>. Demir ve çelik endüstrisindeki vanadyum tüketimi, dünya çapında üretilen  $V$  içerikli ürünlerin yaklaşık % 85'ini temsil eder <sup>602</sup>.  $V$  demir, titanyum, nikel, alüminyum, krom ve diğer metaller ile birlikte geniş bir yelpazedeki alaşımların üretiminde kullanılır. Bu alaşımlar tren rayları, takım çelikleri, katalizörler, havacılık gibi çok çeşitli uygulamalarda tercih edilir.

Kömür yakımı sonucunda uçucu kül içerisinde zenginleşen vanadyum su ile hafifçe, alkali veya asit solüsyonları ile daha etkin bir şekilde açığa çıkabilir <sup>603</sup>. Bu kontrolsüz salım, su kaynaklarını kirletebilir ve uzun süre saklanacak uçucu küllerin uygun şekilde depolanmasını gerektirir. Uçucu küllerin, beton sektöründe bir bağlayıcı olarak kullanılması bu hareketliliği azaltabilir <sup>604</sup>. Yine de,  $V$  gibi bazı metallerin hareket edebilme özelliği dikkatte alınarak kullanım öncesinde bu dikkatle muhafaza edilmesi gereklidir. Bu küllerin çevreye olan potansiyel etkisini azaltan ve aynı anda değerli metalleri geri kazanımını sağlayan bir yöntem de özütleme yoluyla temizlenmedir <sup>137</sup>. Puertollano EGKÇ Santrali'nde %50:50 kömür/petrokok karışımı gazlaştırıldığında uçucu kül  $V$  içeriği 6000 mg- $V$ /kg-uçucu kül'e kadar zenginleştirilmiştir.  $V$  çoğunlukla (>%90)  $Al-Si$  matriksinde ve üçüncü valans durumunda olmasına rağmen <sup>605</sup>,  $NaOH$  özütleme sonrasında  $V^{4+}$  ve  $V^{5+}$ 'e oksitlenebilir; ve sonrasında alkali ortamda yüksek çözünür vanadatlar olarak geri kazanılabilir <sup>600,602</sup>.

## 4. Türkiye uçucu küllerinin özellikleri

Kitap kapsamında Türkiye’de bulunan 9 termik santraldeki (Afşin-Elbistan, Çatalağzı, İçdaş-Biga, Kemerköy, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy) 17 farklı üniteden temin edilen uçucu kül numunelerinin kimyasal, fiziksel, morfolojik ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Kimyasal, fiziksel, morfolojik ve mineralojik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan analiz yöntemleri ve elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntıları ile beraber sunulmuştur.

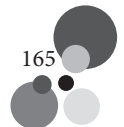
Uçucu kül numuneleri Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Kemerköy, Seyitömer, Tunçbilek-3, Tunçbilek-5, Yatağan ve Yeniköy santrallerinden 2013 yılı Temmuz ayında, İçdaş-Biga santralinden 2013 yılı Aralık ayında, Tunçbilek-4 santralinden 2015 yılı Mart ayında ve Soma santralinden 2015 yılı Haziran ayında temin edilmiştir. Termik santrallerin kullanmış oldukları kömürlerin ve işletme süreçlerinin değişkenlik gösterebilmesi nedeniyle, alınan numuneler sadece alındığı dönemi temsil etmekte olup santralde üretilen uçucu külün genelini temsil etmeyebilir. Her santral-ünite için aksi belirtilmediği takdirde beş ayrı gün için numune temin edilmiş, numunelerin elektrofiltrelerden herhangi bir separasyon işlemine tabi tutulmadan ham olarak toplanmasına özen gösterilmiştir. Tesislerin özelliklerinin incelenmesi için toplanan bu ham küllerin satışa sunulan küller olmadığı unutulmamalıdır.

### 4.1. ANALİZ YÖNTEMLERİ

Yapılan analizler kimyasal, mineralojik, fiziksel ve morfolojik olarak gruplandırılmıştır. Ek analizler olarak da hidrasyon ısı ve dayanım testleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılmak üzere günlük numuneler eşit miktarlarda karıştırılarak homojen karışımlar elde edilmiştir. Homojenler karışımlar ayrıca mevcut durumdaki uçucu küllerini temsil etmesi açısından 125 µm’lik elekten laboratuvar ortamında elenmiştir. Böylece homojen uçucu kül karışımları, ham halde (karışım ham) ya da laboratuvar da 125 mikron elekten geçirilerek oluşturulmuş olan elenmiş halde (karışım elenmiş) analizlerde kullanılmıştır. Bazı temel analizler (temel oksit analizleri ve tane boyutu dağılımı analizleri) günlük ham numuneler üzerinde yapılmıştır. Analizlerde kullanılan küllerin termik santrallerin özelliklerinin incelenmesi için toplanması nedeniyle satışa sunulan küller olmadığı unutulmamalıdır. Kullanılan analiz yöntemleri aşağıda detaylandırılmıştır.

#### 4.1.1. Kimyasal analizler

Numunelerin temel oksit analizleri için indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) cihazı kullanılmıştır. Çözünebilir fosfat (Ç.  $P_2O_5$ ) değerleri UV-spektrofotometre ile belirlenmiştir. Serbest kireç, reaktif silis, reaktif kireç, klorür, sülfat ve kızdırma kaybı değerleri ise yaş analiz metodları ile tespit edilmiştir. Ağır metal analizlerinde ise ICP-MS cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde aksi belirtilmediği sürece TS EN 196-2, TS EN 197-1, TS EN 451-1, TS EN 450-1 standartlarındaki metodlar kullanılmıştır.



#### 4.1.1.1. İndüktif eşleşmiş plazma - optik emisyon spektrometresi (ICP-OES)

İndüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES), düşük derişimdeki elementlerin ölçüldüğü, oldukça sık kullanılan analitik bir tekniktir. İndüktif eşleşmiş plazma-atomik emisyon spektroskopisi (ICP-AES) adıyla da bilinir. Cihaz ICP ve optik spektrometre olarak iki ana kısımdan oluşur. Bu teknikte örnek, elektromanyetik indüksiyonla 6.000 - 10.000 K aralığında değişen sıcaklığa ulaştırılan argon plazmaya gönderilmektedir. Plazma içinde moleküler bağlar kırılarak atom ve iyonlar oluşmakta ve plazma tarafından uyarılan bu atom ve iyonlar spesifik dalga boylarında emisyon yaymaktadır. Emisyonun şiddeti ise elementin örnek içerisindeki yoğunluğuna işaret etmektedir. Uçucu küller üzerinde yapılan temel oksit analizlerinde Spectro Ciros Vision ICP-OES cihazı kullanılmıştır.

#### 4.1.1.2 Yaş analiz yöntemleri

Yaş analiz yöntemleri kızdırma kaybı, klorür, sülfat, serbest kireç, reaktif kireç, reaktif silis, çözülebilen fosfat gibi temel özelliklerin belirlenmesi için kullanılmıştır. Uçucu küllerin kızdırma kaybı değeri, kızdırma süresi 1 saat alınarak TS EN 196-2 standardında belirtilen metoda göre belirlenmiştir. Kızdırma kaybı şartının asıl amacı uçucu kül içerisindeki yanmamış karbon kalıntısını sınırlamaktır. Bu yüzden yanmamış karbon miktarı doğrudan ölçülebilmekte ve gerekli kontroller bu değer baz alınarak yapılabilmektedir <sup>143,144</sup>.

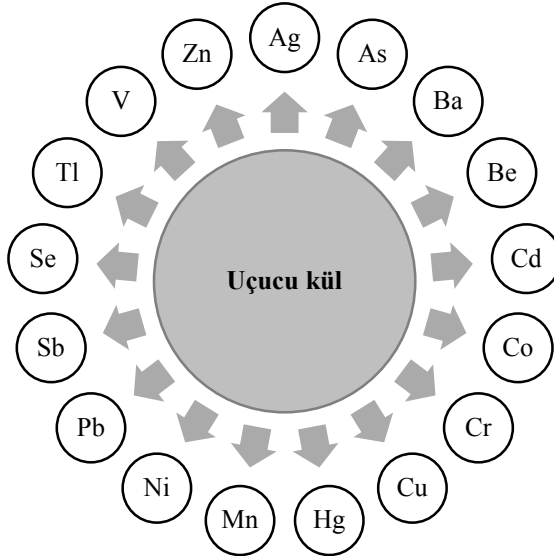
Uçucu küllerin klorür (*Cl*) ve sülfat içeriği TS EN 196-2 standardında geçen metoda göre belirlenmiştir. Çözünebilir fosfat içeriği ise TS EN 450-1 standardında belirtilen metoda göre tespit edilmiştir <sup>144</sup>.

Serbest kalsiyum oksit içeriği; TS EN 451-1 standardında belirtilen metoda göre bulunmuştur. 17 farklı üniteden temin edilen uçucu kül numunelerinde serbest kalsiyum oksit içeriği ile hacim genişmesi değeri arasındaki korelasyondan dolayı serbest kalsiyum oksit değerine bakılmaksızın tüm numunelerde hacim genişmesi deneyi gerçekleştirilmiştir.

Uçucu küllerin reaktif kireç ve reaktif silis içeriği ise TS EN 197-1 standardında belirtilen şekilde hesaplanmıştır. Reaktif kireç (reaktif *CaO*), kalsiyum oksitin normal şartleşme şartları altında kalsiyum silikat hidratları veya kalsiyum alüminat hidratları oluşturan kısmı, reaktif silis (reaktif *SiO<sub>2</sub>*) ise silisyum dioksitin hidroklorik asit (*HCl*) ile işlem görmesinden sonra, kaynar potasyum hidroksit (*KOH*) çözeltisinde çözünebilen kısmı olarak tarif edilmiştir.

#### 4.1.1.3. Ağır metal analizleri

Uçucu küllerin ağır metal konsantrasyonu İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) ile belirlenmiştir. ICP-MS katı ve sıvı örneklerde çok sayıda elementin hızlı ve hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan bir analiz tekniğidir. Analiz edilen örnekteki elementler ICP'de iyonlaştırılarak kütle spektrometresine gönderilir ve burada kütle/yük oranlarına göre ayrılıp ölçülürler. ICP-MS, çözeltide iz element derişimlerinin tayini için uygun bir tekniktir. Birçok element için gözlenebilme sınırı ppm'in altındadır. Bu cihaz ile analizi yapılabilen elementler şu şekildedir: *Se, Fe, B, Ca, Mn, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Sb, Na, Co, Mg, Y, Hg, Al, Sn, Au, Ag, As, Ba, Bi, Cs, Ga, Hf, Mo, Nb, Rb, Sc, Sr, Ta, Ti, V, W, Zr, La, P, Tl, K, Li, Be, Ge, Br, Ru, Rh, Pd, In, Te, I, Re, Os, Ir, Pt, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, U, Th*. Bu kitapta, ICP-MS sadece *Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V* ve *Zn* elementlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır (Şekil 4-1).



Şekil 4-1. Kitap kapsamında incelenen iz elementler

#### 4.1.2. Mineralojik analizler

X-ışını kırınım yöntemi (XRD) sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki numunelerin kristal yapısını belirlemeye yarayan doğru ve hızlı bir tekniktir. Bu teknikle hazırlanan numune örneğine X-ışınları gönderilir. Örnekte bulunan her bir kristal faz kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak gelen X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırar. Bir nevi parmak izi olarak düşünülebilecek bu kırınım profilleri kullanılarak kristaller tanımlanır.

Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri, X-ışını difraktometresinde toz difraksiyon yöntemiyle tespit edilmiştir. Analizlerin bir kısmında MTA bünyesindeki Rigaku MiniFlex 600, bir kısmında ise ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku Ultima IV X-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır. İki cihazda da X-ışını kaynağı Cu-K<sub>α</sub>'dır. Örnekler için tarama hızı 1°/dakika, tarama aralığı ise 3-90° 2θ olarak seçilmiştir. Uçucu küllerin mineral tanımlamaları için ise X'Pert HighScore yazılımı kullanılmıştır.

#### 4.1.3. Fiziksel ve morfolojik analizler

Fiziksel ve morfolojik analizler özgül ağırlık, incelik (45 µm elek bakiyesi), tane boyu dağılımı, priz süresi tayini ve hacim genleşmesi analizleri ile taramalı elektron mikroskop (SEM) analizlerini kapsamaktadır.

##### 4.1.3.1. Özgül ağırlık

Dijital piknometrelerde Arşimet'in akışkan taşması prensibi ve Boyle Yasası eşitlikleri kullanılarak hacim ve yoğunluk değerleri bulunur. Ölçümlerin daha doğru yapılması için taşan akışkanın numunenin mümkün olduğunca ince gözeneklerine girebilecek, tesirsiz bir gaz olması istenir. Uçucu küllerin özgül ağırlıkları, Quantochrome marka dijital piknometrede 0,25 nm çapındaki girinti ve gözeneklere girebilen Helyum gazı kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem ile içerisinde numune bulunan hücreden *He* gazı geçirilerek kütlesi belli olan numunenin hacmi hesaplanır. Deney sonucunda bulunan hacim değeri ile özgül ağırlık hesaplamaları yapılmıştır. Özgül ağırlık değerleri günlük numunelerin eşit olarak karıştırılması ile elde edilen homojen ham karışım numuneleri üzerinde ölçülmüştür.

##### 4.1.3.2. Yaş eleme yöntemi ile incelik tayini (45 µm elek bakiyesi)

Uçucu külün inceliği, göz açıklığı 45 µm olan elekten elenen külün elek üzerinde kalan kısmının toplam kül miktarına yüzde oranı ile ifade edilir. İncelikler, TS EN 451-2 standardına göre yaş eleme ile ya da TS EN 196-6 standardına göre hava jetiyle eleme ile belirlenebilir. Uçucu küller için kategori N ve Kategori S olmak üzere iki farklı incelik kategorisi bulunmaktadır. Eğer incelik değeri kütlece %40'ı aşmıyorsa bu uçucu kül incelik bakımından N kategorisinde, eğer %12'yi aşmıyorsa N veya S kategorisinde yer almaktadır. N kategorisi için belirlenen incelik değeri ile beyan edilen değer arasında ±%10 sapma sınırı kabul edilirken, S kategorisi için bu sınırlama geçerli değildir<sup>144</sup>. Kitap kapsamında incelenen uçucu kül numunelerinin incelikleri TS EN 451-2 standardında belirtilen yaş eleme metoduna göre tayin edilmiştir.

##### 4.1.3.3. Tane boyu dağılımı

Tane boyu dağılımı, uçucu küllerin reaktivitesini en çok etkileyen fiziksel özelliktir. Uçucu külün tane boyu dağılımı ıslak veya kuru olarak uygulanabilen elek ile eleme veya lazer kırınımı yöntemleri ile belirlenir. Elek analizi basit ve maliyeti düşük

bir yöntemdir. Tane boyu dağılımı belirlenirken tanelerin ağırlığı esas alınır. Önce elekler tartılıp birleştirilir, sonra numune tartılıp en üst eleğe dökülür. Titreşimli eleme süresi ve son tartımlarda eklendiğinde oldukça zaman alıcıdır. Lazer kırınımı yöntemi ise hızlı, yüksek tekrarlanabilirliğe ve geniş ölçüm aralığına sahiptir. Bu yöntemde numune haznesine yerleştirilmiş seyreltik parçacık dispersiyonundan bir lazer ışığı geçirilir. Tanelere çarpan ışınlar tane boyutları ile ters orantılı açılarda kırılır. Haznenin hemen arkasındaki Fourier merceği, tanelere çarpıp belli bir açıyla kırılan ışınların yine belli bir açıyla dedektörün üzerine odaklanmasını sağlar<sup>125,606</sup>. Mercekten belli bir açıyla gelen ışınları toplayan detektörden alınan veriler bilgisayara bağlı sistemde analiz edilerek tane büyüklüğü ve tane yüzdeleri hesaplanır. Tane boyu dağılımı belirlenirken tanelerin hacmi esas alınır. Elek analizi yöntemi de lazer kırınımı yöntemi de düzensiz şekilli tanelerin boyutlarının tanımlanmasında eksik kalır; dolayısıyla sadece tane boyut dağılımı tahminini verir. Ama, lazer kırınım yöntemi sürekli bir tane boyu dağılım eğrisi sağlar. Bu sürekli eğri ile ayrıntılı bir veri analizi yapılabilir ve farklı tane boyu dağılım sınıflandırma sistemleri kullanılabilir. Ayrıca, küresel parçacıkların çap dağılımından yüzey alanı da hesaplanabilir.

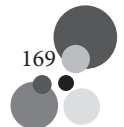
Kitap kapsamında çalışılan uçucu küllerin tane boyu dağılım analizleri lazer kırınım yöntemi ile belirlenmiştir. Analizler için Malvern Mastersizer 2000 lazer kırınım cihazı kullanılmış ve  $D_{50}$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{90}$ ,  $D[4,3]$  parametreleri elde edilmiştir.  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  ve  $D_{90}$  numunenin sırasıyla %10, %50 ve %90'ının altında kaldığı tane boyutlarıdır.  $D_{50}$  aynı zamanda kütle ortalama çapı olarak da bilinir.  $D[4,3]$  ise hacim ortalama çapıdır. Tipik olarak  $D_{50}$ ,  $D[4,3]$ 'ten küçüktür.

#### 4.1.3.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Kitap kapsamında morfolojik analizler için yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizlerinin bir kısmı TÜRKÇİMENTO bünyesinde, bir kısmı ise ODTÜ Merkezi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. TÜRKÇİMENTO'da küllerin LEO 435VP Taramalı Elektron Mikroskobu 15 kV'de  $\times 100$  ile  $\times 250$  aralığında değişen büyütme oranlarında görüntüleri alınmıştır. ODTÜ Merkezi Laboratuvarı'nda ise yüksek çözünürlüklü QUANTA 400F Field Emission SEM kullanılmış,  $\times 500$ - $\times 2500$  aralığında değişen büyütme görüntüleri alınmıştır.

#### 4.1.3.5. Priz süresi tayini

Priz başlama süresi, çimento ile suyun temas etmesiyle hamurun katılaşmaya başladığı an arasında geçen süredir. Kütlece %25 uçucu kül ve %75 referans çimento (TS EN 450-1 standardında tarif edilen özelliklere uygun CEM I 42,5 R tipi çimento) içeren hamurların priz başlangıç süreleri TS EN 196-3 standardında belirtilen metoda göre incelenmiştir. Bu standarda göre uçucu küllü hamurların priz sürelerinin %100 referans çimento ile hazırlanan hamurun priz süresinin iki katını geçmemesi gerekmektedir.



Çimento tek başına test edildiğinde TS EN 197-1'de belirtilen priz başlangıç süresiyle ilgili şartları yerine getirmelidir. Uçucu küller ile alakalı olarak ise; bu şart sadece pulverize kömürün yakılmasıyla elde edilen uçucu külleri kapsamaktadır <sup>144</sup>.

#### **4.1.3.6. Hacim genişmesi**

Hacim genişmesi testi, bağlanmamış (serbest) kalsiyum oksit ve/veya magnezyum oksit hidrasyonundan kaynaklanabilecek genişme riskini değerlendirmek amacıyla TS EN 196-3 standardında belirtilen metoda göre kütlece %30 uçucu kül ve %70 referans çimento ile hazırlanan hamurlar üzerinde yapılmıştır. Le Chatelier deneyi olarak da bilinen bu deneye göre genişleme miktarı 10 mm'den daha fazla olmamalıdır <sup>144</sup>.

#### **4.1.4. Ek analizler**

Portland çimentosu ve uçucu kül numuneleri kullanılarak hazırlanan hamurlar üzerinde hidrasyon ısısı tayini; portland çimentosu ve uçucu kül numuneleri kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde ise mekanik analizler yapılmıştır.

##### **4.1.4.1. Hidrasyon ısısı tayini**

Tüm fiziksel ve kimyasal süreçler ekzotermik veya endotermiktir – ısı üretir veya tüketirler. Çimento ile su arasındaki hidrasyon reaksiyonu ekzotermiktir; hidrasyon sonucunda dışarıya ısı enerjisi salınır <sup>161</sup>. Bu ısı çıkışı TS EN 196-8 standardına göre çözelti yöntemi ile <sup>607</sup>, TS EN 196-9 standardına göre adyabatik veya yarı-adyabatik yöntemler ile <sup>608</sup>, ya da izotermal kalorimetre yöntemi ile <sup>609-611</sup> ölçülebilir. İzotermal kalorimetre ölçümlerine ilişkin standartlar (ASTM C1679 ve TSE CEN/TR 16632 gibi) geçtiğimiz senelerde hazırlanmaya ve güncellenmeye başlanmıştır. TSE CEN/TR 16632 standardı farklı yaşlardaki hidrasyon ısısının izotermal kalorimetre ile belirlenmesine yönelik prosedür ve cihaz belirtilmekte ve çeşitli durumlar için öneriler sunulmaktadır. Prosedür TS EN 196-8 standardında belirtilen yöntem ile ilişkilendirilebilir veri elde etmek için çimento hidrasyon ısısının 7 güne kadar ölçülmesine yöneliktir.

Kitap kapsamında uçucu kül – çimento karışımlarının hidrasyon ısısı hem izotermal kalorimetre, hem de çözelti yöntemiyle ölçülmüştür. Karışımlarda çimento-uçucu kül oranı 3 olacak şekilde ayarlanmıştır. Çözelti yöntemi ile yapılan deneyler TS EN 196-8 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

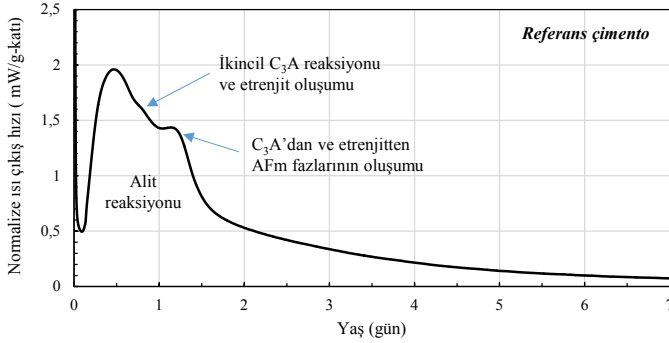
##### **4.1.4.1.1. İzotermal kalorimetre ile yapılan ölçümler**

İzotermal kalorimetre kimyasal, fiziksel ve biyolojik süreçleri gerçek zamanlı izleme ve dinamik olarak analiz etme imkanı tanıyan bir laboratuvar cihazıdır. İzotermal kalorimetre sabit sıcaklıktaki (15-150°C) haznelere yerleştirilen küçük ampüller (3-20 ml) içerisindeki numunelerde gerçek zamanlı olarak üretilen veya tüketilen ısı çıkışı



hızını ( $\mu\text{J}/\text{sn} = \mu\text{W}$ ) ve kümülatif ısı miktarını (J) ölçer. Böylece reaksiyon başlangıcı, hızı, uzunluğu ve enerjisi saatler veya günler boyunca takip edilebilir. Bu cihaz yardımı ile sadece kümülatif hidratasyon ısı değil, çimento hidratasyonunun alit hidratasyonu, ikincil  $\text{C}_3\text{A}$  reaksiyonu ve etrenjit oluşumu,  $\text{C}_3\text{A}'$ 'dan ve AFt fazlarından AFm fazlarının oluşumu gibi önemli aşamaları (Şekil 4-2) da incelenebilir.

AFt ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{tri}$ ) terimi,  $\text{C}_3(\text{A}, \text{F}) \cdot 3\text{CX} \cdot \text{yH}$  tipi fazları ifade eder. Burada X, -2 yüklü bir anyon (sülfat  $\text{SO}_3^{2-}$ , karbonat  $\text{CO}_3^{2-}$ ) ve  $30 \leq y \leq 32$ 'dir. "Tri" terimi, 3 birim CX ile ilgilidir. AFm ( $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ -mono) terimi  $\text{C}_3(\text{A}, \text{F}) \cdot \text{CX}_2 \cdot \text{yH}$  tipi fazlar için kullanılır. Burada X, -1 yüklü bir anyon ( $\text{OH}^-$ ) veya -2 yüklü yarım anyonu yemsi eder; y ise genelde  $< 20$  olmaktadır. "Mono" terimi, tek birim  $\text{CX}_2$  ile ilgilidir. Hidrate çimentodaki kalsiyum monosülfo-aluminat, kalsiyum monokarbo-aluminat, Friedel tuzları gibi AFm fazları, etrenjit gibi AFt fazlarından çok daha çeşitlidir <sup>612</sup>.



Şekil 4-2. Bir gram referans çimento için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Bu kitap kapsamında uçucu kül – çimento karışımlarının hidratasyonları için ısı çıkışı  $23^\circ\text{C}$ 'de 7 gün boyunca 8 kanallı TAM Air (Thermometric AB, İsveç) izotermal kalorimetre cihazıyla takip edilmiştir. Bu cihazın her haznesi kendi içinde biri ölçülecek numune, diğeri numune ile benzer özgül ısıya sahip bir referans numunesi için olmak üzere iki ayrı kanaldan oluşmaktadır. Hazırlanan referans numuneler referans kanalına, ölçüm yapılacak karışımlar ise diğeri kanala yerleştirilmiştir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak alınmıştır. Uçucu kül içeren çimento hamurları 3 gram çimento, 1 gram uçucu kül ve 2 gram su karıştırılarak hazırlanmıştır. Ayrıca, uçucu kül içermeyen bir çimento hamuru (4 gram çimento ve 2 gram su) da hazırlanmıştır. Referans numunesi olarak hidratasyona uğramamış çimento, ısı çıkışı ölçülecek numunelerle aynı özgül ısıya sahip olacak miktarda tartılarak kullanılmıştır. Tüm numuneler 20 ml'lik cam ampuller içerisine doldurulmuş ve ağızları kapalı şekilde uygun kanallara yerleştirilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Çimento hamurlarının zaman geçirmeden ampullere doldurulmasına özen gösterilmiştir.



#### 4.1.4.1.2. Çözelti yöntemi ile yapılan ölçümler

Her bir uçucu kül ağırlıkça %25 olacak şekilde çimentoya ikame edilmiş ve 7 günlük hidrasyon ısıları, TS EN 196-8 standardına göre tespit edilmiştir. Bu yöntem, önceden belirlenen süreyle (örneğin, 7 gün), standart şartlar altında hidrate olmuş çimentonun ve hidrate olmamış çimentonun bir asit karışımı içerisindeki çözünme ısısının ölçümüne dayanır. Hidrasyon ısı, hidrate olmamış çimentonun çözünme ısı ve hidrate olmuş çimentonun çözünme ısı arasındaki farktan elde edilir. Hidrate çimento karışımını hazırlamak için; su/çimento karışım oranı 0,40 olarak sabit tutulmuş ve su ile karıştırılmış çimento karışımları bütün hidrasyon işlemi boyunca (20,0 ± 0,2)°C sabit sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. 7 gün süre ile sabit koşullarda bekletilen hidrate olmuş çimento karışımları 600 mikronluk elekten geçirilerek, kalorimetre kabı ile ısı dengeye gelmiş asit karışımı (2 M  $HNO_3+HF$  karışımı) içerisinde çözülmüş ve belirli sürelerle kalorimetre sıcaklığı kaydedilmiştir. Aynı çalışma kuru numunelere de uygulanmış, numunelerin çözünme ısıları ve çözünme ısıları arasındaki farktan ise hidrasyon ısıları değerleri tespit edilmiştir.

#### 4.1.4.2. Mekanik analizler

Çimentonun birbirinden farklı uçucu küller ile ikamesinin eğilme ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek üzere TS EN 196-1 standardında belirtilen metoda göre 4×4×16 cm boyutlarında prizmatik harçlar hazırlanmıştır. Kontrol numunesi CEM I 42,5 R tipi çimento, standart kum ve saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Uçucu kül içeren diğer tüm harçlarda çimentonun uçucu kül ile ikame oranı kütlece %25 olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan harçlar kalıba döküldükten sonra 24 saat sabit sıcaklıkta nemli ortamda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda harç numuneleri kalıptan çıkartılmış ve test gününe kadar su içerisinde küre edilmiştir. Harçlar 28. ve 90. günlerde eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabii tutulmuştur. Kütlece %75 referans çimento ve %25 uçucu kül ile hazırlanan harçların basınç dayanımının, kütlece %100 referans çimento ile hazırlanan kontrol harcının basınç dayanımına oranı (puzolanik aktivite indeksi) 28. günde %75, 90. günde ise %85'ten az olmamalıdır<sup>144</sup>. Sonuçlar bu limit değerler baz alınarak değerlendirilmiştir.

## 4.2. AFŞİN-ELBİSTAN B TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜ

Kahramanmaraş ilinin Afşin ilçesine bağlı Çoğulhan beldesinde bulunan Afşin-Elbistan B Termik Santrali 4×360 MW gücünde bir linyit termik santralidir. Toplam kurulu gücü 1440 MW olan santralin 4 ünitesi de 2006 yılında işletmeye alınmıştır. 2006 yılında santralin geçici kabul çalışmaları, 2010 yılı itibariyle de kesin kabulü tamamlanmıştır. Kömür ihtiyacını Çöllolar Sektörü'ndeki düşük kalorili linyit kömür rezervlerinden karşılamaktadır. Çeşitli arızalar nedeniyle devre dışı kalan 2 ünite 2016 yılında istenilen seviyelerde olmasa da tekrar devreye alınmıştır. Santralde çift akış temaslı, ıslak karıştırıcılı tipte baca gazı arıtma sistemi bulunmaktadır. Desülfürizasyon için kireçtaşı kullanılmaktadır. Santralde kullanılan benson tipi

kazanların her birinde yanma sonucu yaklaşık olarak 55 t/s cüruf ve 240 t/s uçucu kül açığa çıkmaktadır. Bu santralden 2013 yılı Temmuz ayında beş ardışık günden uçucu kül numuneleri tedarik edilmiştir.

#### 4.2.1. Kimyasal analiz sonuçları

Afşin-Elbistan B Termik Santrali'nden alınan günlük ham numuneler ile günlük numunelerin karışımından hazırlanan ham ve elenmiş numuneler üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-1'de verilmiştir. Bu külün yüksek oranda  $CaO$  ve  $SO_3$  içerdiği görülmektedir.

Tablo 4-1. Afşin-Elbistan B uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
SiO <sub>2</sub>	39,16	45,21	43,46	36,63	35,98	40,09	39,79	33,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,46	17,95	17,81	15,12	14,88	16,24	16,26	13,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,81	7,98	8,08	6,63	6,57	7,21	7,11	6,82
S+A+F <sup>(1)</sup>	61,43	71,14	69,35	58,38	57,43	63,55	63,16	53,60
CaO	23,46	15,58	17,01	24,67	25,47	21,24	21,13	28,66
MgO	2,25	2,37	2,38	2,17	2,15	2,26	2,26	2,18
SO <sub>3</sub>	7,17	4,78	5,03	7,99	8,58	6,71	6,85	9,41
Na <sub>2</sub> O	0,30	0,31	0,32	0,30	0,34	0,31	0,33	0,25
K <sub>2</sub> O	1,30	1,48	1,44	1,24	1,18	1,33	1,40	0,84
TiO <sub>2</sub>	0,75	0,85	0,83	0,72	0,70	0,77	0,75	0,65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,41	0,36	0,41	0,40	0,41	0,40	0,38	0,49
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
KK <sup>(2)</sup>	2,88	2,85	2,49	3,08	2,84	2,83	2,88	3,13
Cl <sup>-</sup>	0,0050	0,0060	0,0053	0,0074	0,0067	0,0061	0,0060	0,0060
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,3	3,53	5,03	3,23	3,15	3,65	3,23	3,23
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	3,11	4,83
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	13,45	18,29
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	31,97	26,91

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünebilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(C)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan ağır metal analizlerinin sonuçları Tablo 4-2'de verilmiştir.

Tablo 4-2. Afşin-Elbistan B uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(A)</sup>

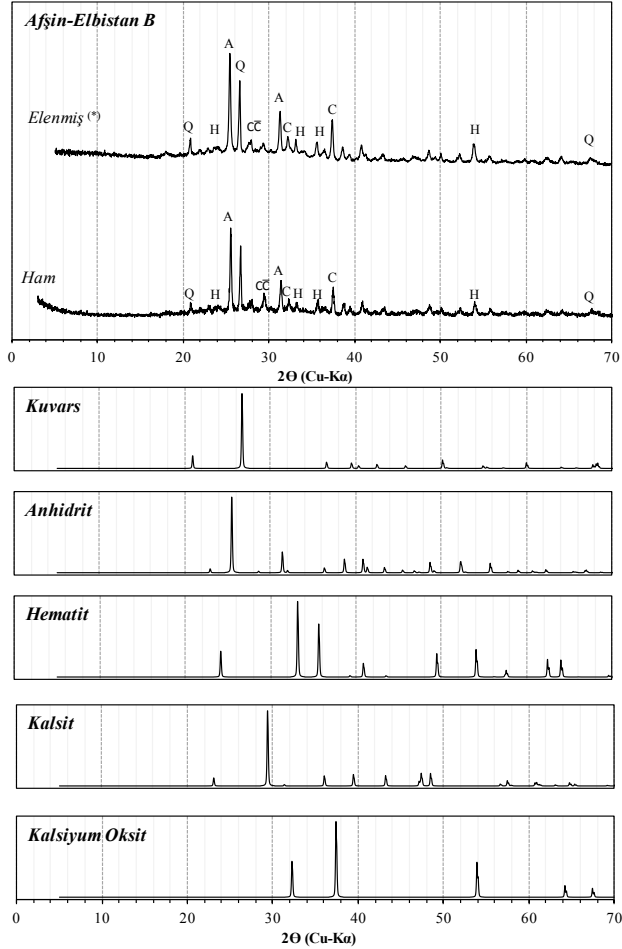
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	1,62	1,65
Vanadyum	V	346,85	324,14
Krom	Cr	308,74	284,67
Manganez	Mn	284,13	232,01
Kobalt	Co	23,70	20,63
Nikel	Ni	214,81	188,43
Bakır	Cu	55,96	41,25
Çinko	Zn	115,23	96,62
Arsenik	As	39,41	38,70
Selenyum	Se	8,33	8,39
Gümüş	Ag	<2,94	0,11
Kadmiyum	Cd	0,86	0,97
Antimon	Sb	2,06	2,05
Baryum	Ba	300,56	319,70
Civa	Hg	2,15	0,03
Talyum	Tl	1,31	1,13
Kurşun	Pb	24,26	28,60

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.2.2. Mineralojik analiz sonuçları

Afşin-Elbistan B uçucu külünün karışım numunelerine ait x-ışını difraktogramları Şekil 4-3'te verilmiştir. Buna göre hem ham, hem de elenmiş uçucu kül içerisinde kuvars ( $SiO_2$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), kalsit ( $CaCO_3$ ) ve kalsiyum oksit ( $CaO$ ) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, iki numunede de az miktarda gehlenit ve melilit de tespit edilmiştir.



<sup>(4)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-3. Afşin-Elbistan B uçucu külünün x-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, H: Hematit, C: Kalsit, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars)

#### 4.2.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan fiziksel analiz sonuçları Tablo 4-3 ve Tablo 4-4'te özetlenmiştir.

Tablo 4-3. Ham Afşin-Elbistan B uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2410
Kıvam	%	33,2
Priz başlangıcı <sup>(c)</sup>	dakika	225
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(c)</sup> Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-4. Afşin-Elbistan B uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (a)</sup>

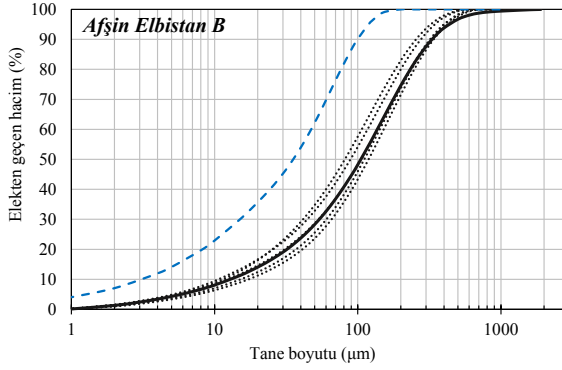
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	39,8
Aktivite indeksi		
28 gün	%	86,2
90 gün	%	89,1
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	66,3
Aktivite indeksi		
28 gün	%	51,6
90 gün	%	76,2

<sup>(c)</sup> Deneyde 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiş ham uçucu kül kullanılmıştır.

<sup>(\*)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri Şekil 4-4'te gösterilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri Tablo 4-5' te özetlenmiştir. Farklı günlerde temin edilen numunelerin tane boyu dağılımlarında günden güne bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Ham karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-4. Aşın-Elbistan B uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-5. Aşın-Elbistan B uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (2)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm bakiye	45 µm bakiye	32 µm bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	55,6	73,5	79,4	12,3	105,9	319,6	140,1
2. gün	60,4	78,4	83,7	17,3	119,0	339,1	153,4
3. gün	57,8	76,6	82,2	15,2	111,2	326,0	145,2
4. gün	49,6	69,7	76,5	10,7	89,0	275,9	119,9
5. gün	46,3	68,0	75,7	11,5	81,3	255,2	111,1
<i>Ortalama</i>	53,9	73,2	79,5	13,4	101,3	303,2	133,9
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	55,4	74,0	80,0	13,0	105,1	330,0	150,3
Elenmiş <sup>(3)</sup>	13,5	41,9	53,0	3,1	35,4	99,5	44,1

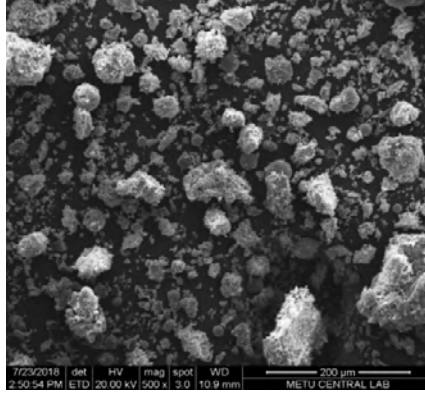
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(2)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

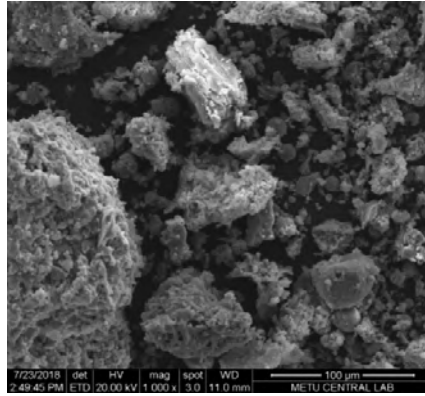
<sup>(3)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Afşin-Elbistan B uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 150 mikrona kadar ulaşan boyutlarda çoğu düzensiz ve köşeli, bir kısmı kaba küreler halinde taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Bunun yanı sıra 1-25 mikron çaplı, tam küresel yapıda küçük taneciklere de rastlanmıştır (Şekil 4-5).



(a) x500



(b) x1k

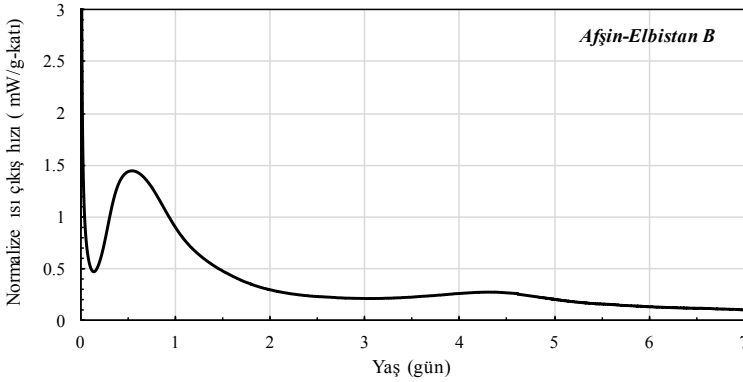
Şekil 4-5. Afşin-Elbistan B uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Afşin-Elbistan B uçucu külünün TS EN 197-1 standardına istinaden kullanılabilirliği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre sürekli üretimde gerçekleşen güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

Aktivite indeksi analizlerinde hem ham kül, hem de laboratuvar ortamında 125 µm'lik elekten elenen kül (elenmiş kül) kullanıldığı için bu sonuçlar uygunluk değerlendirilmesine alınmamalıdır. Aktivite indeksi analiz sonuçları TS EN 450-1 standardında belirtilen yöntemler (separasyon, eleme, öğütme vb.) uygulanarak proses sırasında artırılabilir.

#### 4.2.4. Ek analizler

Afşin-Elbistan B uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 307,6 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 317,7 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %85,17 ve %88,97'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-6'da verilmiştir.



Şekil 4-6. Bir gram katı (%25 Afşin-Elbistan B uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-6'da verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmektedir.

Tablo 4-6. Ağırlıkça %25 Afşin-Elbistan B uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	40,5	48,1	24,8	40,9
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	4,9	6,1	5,4	7,3

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.



### 4.3. ÇATALAĞZI TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜ

Çatalağzı Termik Santrali (ÇATES), Zonguldak ilinin Kilimli ilçesinin Çatalağzı bölgesinde bulunmaktadır. Çatalağzı Termik Santrali-A, 1948-1991 yılları arasında faaliyet göstermiştir. Bugün hala devrede olan Çatalağzı Termik Santrali-B'nin ise 1. ünitesi 1989'da, 2. ünitesi 1991'de işletmeye açılmıştır. Toplam 300 MW gücündeki (150 MW × 2) santralin ana yakıtı 3.300 kcal/kg ısıl değere sahip lavuar artığı Mikst (1.600.000 ton/yıl), yardımcı yakıtları ise fuel-oil (7.200 ton/yıl) ile motorindir (480 ton/yıl). Kömür ihtiyacını TTK Genel Müdürlüğü'nün Zonguldak ve Çatalağzı Filtrasyon Tesisleri'nden karşılamaktadır <sup>613</sup>. Çatalağzı Termik Santrali 2014 yılı itibarıyla özelleştirilmiştir. Bu santralden 2013 yılı Temmuz ayında beş ardışık günde uçucu kül numuneleri tedarik edilmiştir.

#### 4.3.1. Kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-7'de verilmiştir.

Tablo 4-7. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş ( <sup>B</sup> )
SiO <sub>2</sub>	55,78	56,72	54,74	56,70	56,71	56,13	56,44	55,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,76	25,48	24,74	24,98	25,28	25,05	25,26	25,98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,10	5,52	6,04	6,10	5,68	5,89	5,90	6,02
S+A+F <sup>(1)</sup>	86,64	87,72	85,52	87,78	87,67	87,07	87,60	87,13
CaO	2,10	1,42	1,88	1,94	1,38	1,74	1,72	2,12
MgO	2,14	2,28	2,14	2,14	2,18	2,18	2,22	2,19
SO <sub>3</sub>	0,10	0,08	0,06	0,07	0,10	0,08	0,08	0,14
Na <sub>2</sub> O	0,50	0,36	0,48	0,46	0,27	0,41	0,40	0,40
K <sub>2</sub> O	3,70	3,80	4,02	3,86	4,00	3,88	3,90	4,34
TiO <sub>2</sub>	1,12	1,10	1,14	1,14	1,12	1,12	1,12	1,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,10	0,12	0,12	0,10	0,12	0,12	0,16
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,12	0,14	0,14	0,12	0,13	0,12	0,09
KK <sup>(2)</sup>	2,45	2,76	3,55	2,16	2,28	2,64	2,65	2,32
Cl <sup>-</sup>	0,0053	0,0028	0,0043	0,0050	0,0028	0,0040	0,0044	0,0103
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	6,60	10,32	7,04	5,67	8,56	7,64	7,44	8,19
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	0,03	0,02
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	0,97	1,96
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	42,31	41,73

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(4)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(5)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Çatalağzı Termik Santrali'nden alınan günlük ham numuneler ile günlük numunelerin karışımından hazırlanan ham ve elenmiş numuneler üzerinde yapılan kimyasal analizlerin yanı sıra ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan ağır metal analizinin sonuçları ise Tablo 4-8'de verilmiştir.

Tablo 4-8. Çatalağzı uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

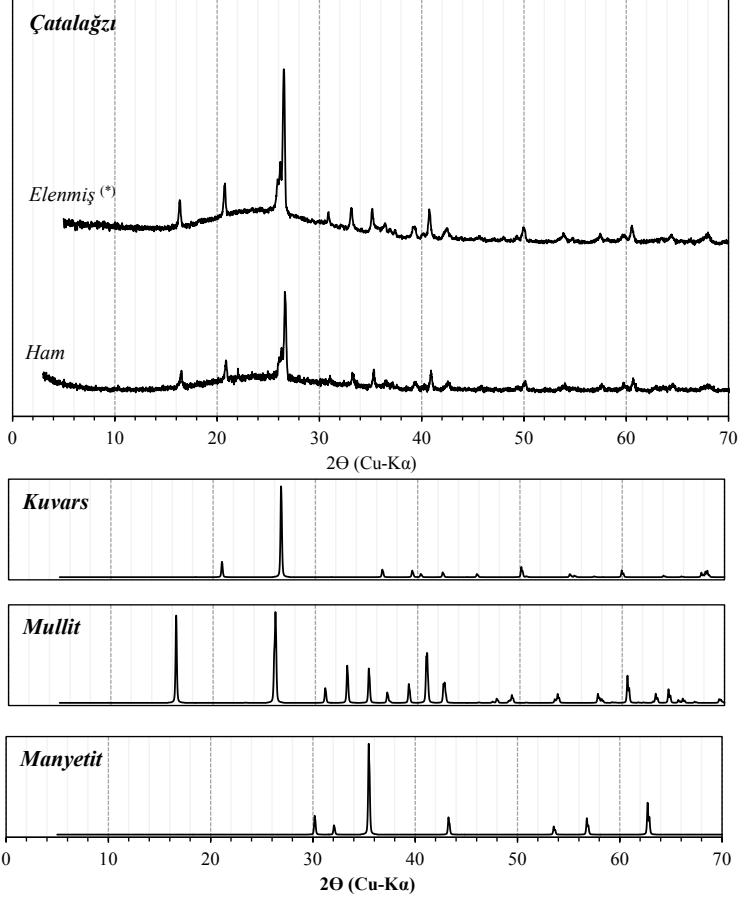
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	6,85	4,36
Vanadyum	V	225,00	184,45
Krom	Cr	150,00	115,86
Manganez	Mn	546,00	402,68
Kobalt	Co	33,60	22,91
Nikel	Ni	78,60	61,60
Bakır	Cu	114,00	66,34
Çinko	Zn	108,06	89,74
Arsenik	As	25,17	22,76
Selenyum	Se	4,38	3,71
Gümüş	Ag	< 0,88	0,34
Kadmiyum	Cd	0,35	0,29
Antimon	Sb	6,71	5,35
Baryum	Ba	1053,19	126,00
Civa	Hg	1,48	0,21
Talyum	Tl	4,87	2,20
Kurşun	Pb	113,66	79,02

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.3.2. Mineralojik analiz sonuçları

Çatalağzı uçucu külünün karışım numunelerine ait x-ışını difraktogramları Şekil 4-7' de verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak camsı yapı ve az oranda kristal fazlardan oluştuğu görülmektedir. Kristalize fazlar kuvars ( $SiO_2$ ), mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) ve manyetit ( $Fe_3O_4$ ) olarak tespit edilmiştir. Difraktogramlarda camsı fazın 22-27°2θ aralığında maksimum duruma geldiği görülmüştür. Bu şekildeki yapılanma, camsı fazın silisyumca zengin alümino silikat bileşiminde olduğunu göstermektedir.



<sup>(\*)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-7. Çatalağzı uçucu külünün x-ışını difraktogramı (Q: Kuvars, Ma: Manyetit, M: Mullit)

#### 4.3.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-9 ve Tablo 4-10'da verilmiştir.

Tablo 4-9. Ham Çatalağzı uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	1990
Kıvam	%	28,2
Priz başlangıcı <sup>(c)</sup>	dakika	210
Hacim genişmesi	mm	0,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(c)</sup> Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-10. Çatalağzı uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(+)(a)</sup>

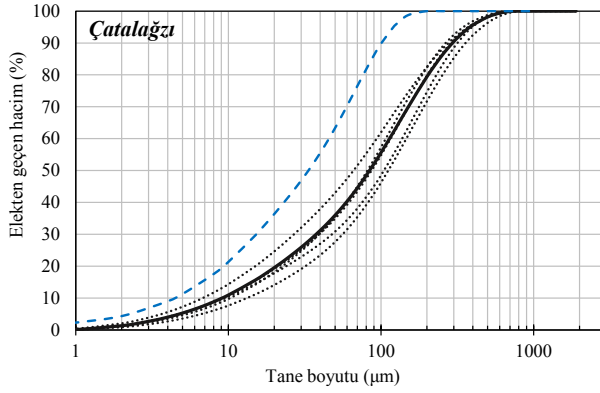
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	34,0
Aktivite indeksi		
28 gün	%	77,0
90 gün	%	89,8
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	52,1
Aktivite indeksi		
28 gün	%	74,7
90 gün	%	82,2

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(+)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri Şekil 4-8'de gösterilmiştir. Farklı günlerde temin edilen numunelerin tane boyu dağılımlarında günden güne bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Ham karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analiz sonucunda elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri Tablo 4-11'de özetlenmiştir



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-8. Çatalağzı uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-11. Çatalağzı uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (3)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	54,9	71,0	76,2	9,6	104,6	316,9	137,5
2. gün	46,6	67,0	74,1	10,3	81,6	265,6	114,7
3. gün	41,2	59,4	66,7	6,8	66,1	276,9	109,7
4. gün	48,8	67,4	73,7	9,1	86,8	287,1	123,2
5. gün	57,3	74,5	80,0	13,3	111,7	358,5	154,2
<i>Ortalama</i>	<i>49,8</i>	<i>67,9</i>	<i>74,1</i>	<i>9,8</i>	<i>90,2</i>	<i>301,0</i>	<i>127,9</i>
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	47,9	66,4	73,0	9,1	84,2	294,3	123,0
Elenmiş <sup>(*)</sup>	13,8	40,5	51,3	4,4	33,5	100,7	44,1

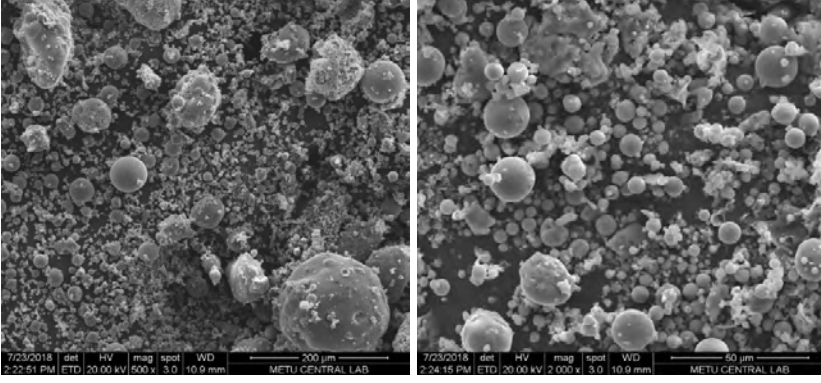
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Çatalağzı uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-120 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıya sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 5-15 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-9).



(a) ×500

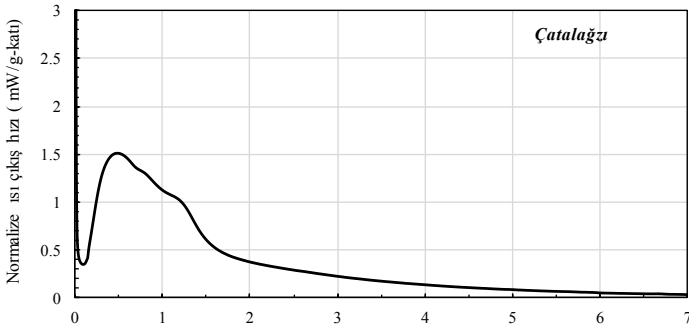
(b) ×2k

Şekil 4-9. Çatalağzı uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Çatalağzı uçucu külünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabileceği öngörülmektedir. Aktivite indeksi analizlerinde hem ham kül hem de laboratuvar ortamında 125 µm'lik elekten elenen ham kül (elenmiş kül) kullanıldığı için bu sonuçlar uygunluk değerlendirilmesine alınmamalıdır. Aktivite indeksi analiz sonuçları TS EN 450-1 standardında belirtilen yöntemler (separasyon, eleme, öğütme vb.) uygulanarak proses sırasında artırılabilir.

#### 4.3.4. Ek analizler

Çatalağzı uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısıları sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 318,8 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 311,4 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %88,27 ve %87,20'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-10'da verilmiştir.



Şekil 4-10 Bir gram katı (%25 Çatalağzı uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-12'de verilmiştir.

Tablo 4-12. Ağırlıkça %25 Çatalağzı uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	<i>Elenmiş kül</i> <sup>(c)</sup>		<i>Ham kül</i>	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	36,2	48,5	35,9	44,3
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,4	7,1	6,8	8,1

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.4. İÇDAŞ-BİGA TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜ

İÇDAŞ 2005 yılında kendi tesislerinin elektrik gereksinimlerini karşılamak üzere Çanakkale'nin Biga ilçesinde 135 MW gücünde Biga Termik Santrali'ni işletmeye açmıştır. İlerleyen dönemde 135 MW gücünde 2 yeni ünite daha açarak toplam 405 MW kurulu güce sahip olmuştur. Ana yakıt olarak ithal kömür, yardımcı yakıt olarak ise doğal gazın kullanıldığı santralde akışkan yataklı yakma teknolojisi bulunmaktadır. Bu teknoloji sayesinde yanma sırasında kazana ilave edilen kireçtaşı nedeniyle SO<sub>2</sub> emisyonu, daha düşük yanma sıcaklığı sayesinde ise NO<sub>x</sub> emisyonu kontrol altına alınmaktadır. Bu santralden 2013 yılı Aralık ayında beş ardışık günden uçucu kül numuneleri tedarik edilmiştir.

### 4.4.1. Kimyasal analiz sonuçları

İçdaş-Biga Termik Santrali'nden alınan günlük ham numuneler ile hazırlanan ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-13'te verilmiştir.

Tablo 4-13. İçdaş-Biga uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş ( <sup>c</sup> )
SiO <sub>2</sub>	47,26	46,52	46,13	46,50	44,03	46,09	45,39	45,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,25	18,47	18,44	18,48	17,00	18,13	18,25	18,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,35	10,27	10,36	10,07	9,66	10,14	10,15	9,91
S+A+F <sup>(1)</sup>	75,86	75,26	74,93	75,05	70,69	74,36	73,79	73,68
CaO	13,07	13,04	13,37	12,92	18,11	14,10	14,20	14,35
MgO	4,52	4,51	4,50	4,53	4,18	4,45	4,48	4,39
SO <sub>3</sub>	3,06	3,13	3,06	3,07	2,98	3,06	3,10	3,17
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,29	0,30	0,34	0,33	0,33	0,35	0,38
K <sub>2</sub> O	1,69	1,66	1,66	1,73	1,38	1,62	1,65	1,64
TiO <sub>2</sub>	0,58	0,56	0,59	0,58	0,52	0,57	0,57	0,56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,10	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09	0,11
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11
KK <sup>(2)</sup>	0,48	0,53	0,37	0,54	0,91	0,57	0,55	0,70
Cl <sup>-</sup>	0,0021	0,0018	0,0088	0,0039	0,0014	0,0036	0,0044	0,0044
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,75	4,05	4,58	3,6	3,15	3,83	3,23	3,23
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	1,50	1,22
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	11,97	11,57
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	36,33	36,46

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünebilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(c)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.



Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan ağır metal analizlerinin sonuçları Tablo 4-14'te verilmiştir.

Tablo 4-14. İçdaş-Biga uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

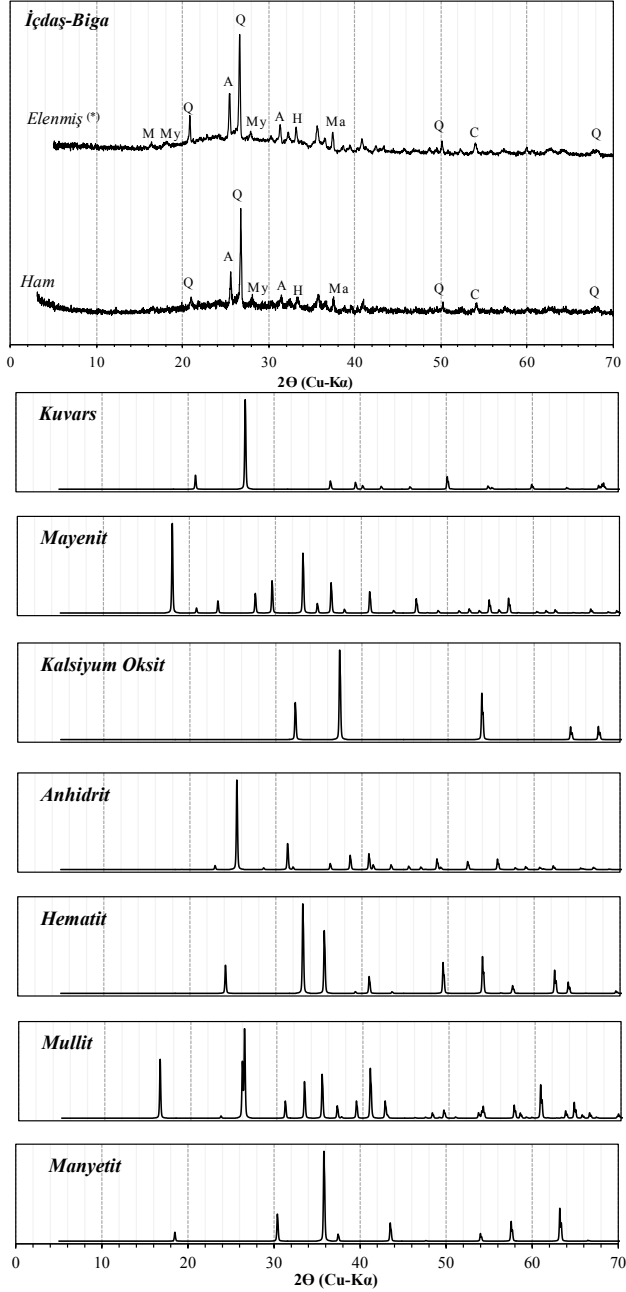
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(b)</sup>
Berilyum	Be	2,46	1,91
Vanadyum	V	111,57	126,82
Krom	Cr	352,44	384,64
Manganez	Mn	435,65	528,40
Kobalt	Co	34,41	37,51
Nikel	Ni	726,13	712,30
Bakır	Cu	71,61	47,72
Çinko	Zn	101,47	136,27
Arsenik	As	207,69	256,67
Selenyum	Se	1,95	2,60
Gümüş	Ag	10,93	1,67
Kadmiyum	Cd	0,75	0,96
Antimon	Sb	14,85	15,84
Baryum	Ba	450,86	603,78
Civa	Hg	0,73	0,11
Talyum	Tl	6,28	7,29
Kurşun	Pb	46,30	55,71

<sup>(a)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(b)</sup> Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.4.2. Mineralojik analiz sonuçları

İçdaş-Biga uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-11'de verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), mullit ( $Al_6Si_2O_{13}$ ), mayenit ( $12CaO.7Al_2O_3$ ) ve manyetit ( $Fe_3O_4$ ) olarak tespit edilmiştir.



<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-11. İcdaş Biga uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, H: Hematit, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars, Ma: Manyetit, My: Mayenit, M: Mullit)

### 4.4.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-15 ve Tablo 4-16'da verilmiştir. Aslında İçdaş-Biga uçucu külü akışkan yataklı yakma teknolojisinin bir ürünü olduğu için TS EN 450-1 standardı kapsamında yer almamaktadır.

Tablo 4-15. Ham İçdaş-Biga uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(1)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2420
Kıvam	%	29,4
Priz başlangıcı <sup>(2)</sup>	dakika	210
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(1)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(2)</sup>Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-16. İçdaş-Biga uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(1)(2)</sup>

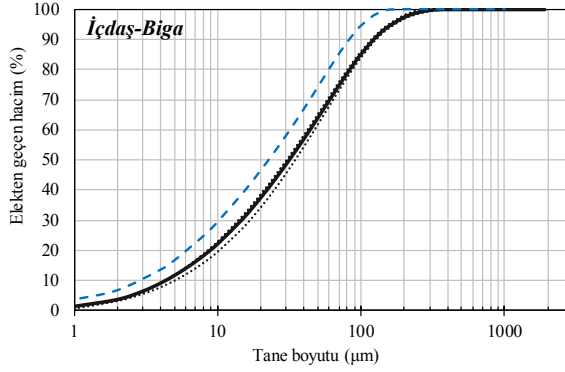
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(3)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	21,5
Aktivite indeksi		
28 gün	%	83,2
90 gün	%	93,1
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	26,3
Aktivite indeksi		
28 gün	%	89,6
90 gün	%	104,8

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-12' de gösterilmiştir. Bu santralden elde edilen küllerin tane boyu dağılımı açısından üniform özellikte olduğu söylenebilir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışımın, uzun kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım, kısa kesikli çizgiler günlük numuneleri temsil etmektedir.

Şekil 4-12. İçdaş-Biga uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri ise Tablo 4-17'de verilmiştir.

Tablo 4-17. İçdaş-Biga uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)(λ)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	$D[4,3]$
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	17,6	38,5	48,7	4,3	30,6	122,4	49,4
2. gün	17,7	39,0	49,1	4,4	31,0	122,1	49,4
3. gün	16,9	38,3	48,6	4,3	30,4	118,8	48,5
4. gün	18,1	39,2	49,3	4,4	31,2	125,2	51,5
5. gün	19,2	41,9	52,7	5,0	34,9	128,6	54,7
<i>Ortalama</i>	17,9	39,4	49,7	4,5	31,6	123,4	50,7
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	18,8	40,4	50,7	4,5	32,8	127,9	52,7
Elenmiş <sup>(*)</sup>	7,8	29,1	39,9	2,9	22,6	82,5	33,9

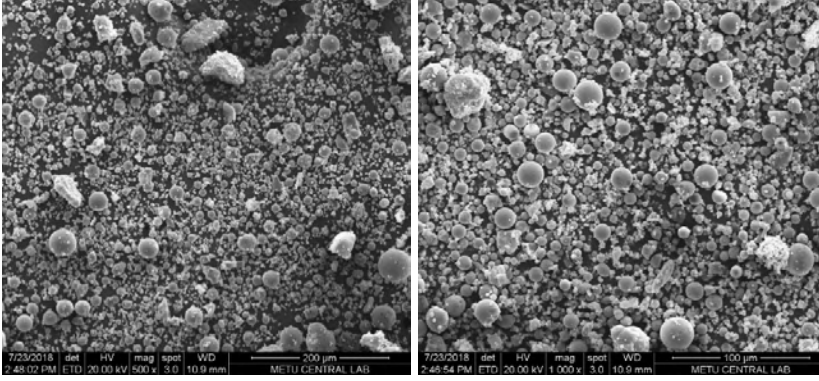
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(λ)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(+)</sup> Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

İçdaş Biga uçucu külünün 1-50 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıya sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-13).



(a) ×500

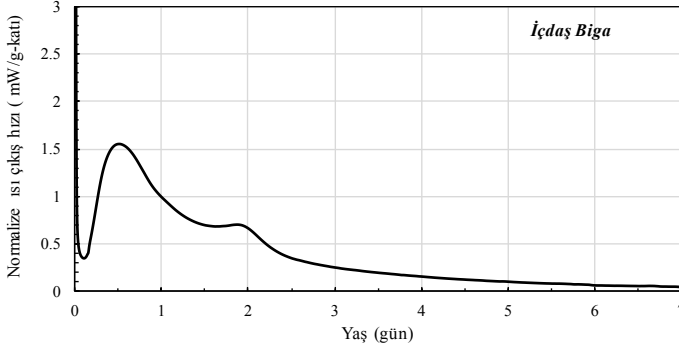
(b) ×1k

Şekil 4-13. İçdaş-Biga uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde İçdaş-Biga uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabilmesi öngörülmektedir. Akışkan yataklı yakma sistemine sahip olmasına rağmen bu kül yine de TS EN 450-1 standardına göre değerlendirilmiştir. TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal parametrelerin bir kısmı limit sınır değere yakın olduğu için güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.4.4 Ek analizler

İçdaş-Biga uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidratasyon ısıları sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 277,9 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 269,6 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %76,95 ve %75,50'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-14'te verilmiştir.



Şekil 4-14 Bir gram katı (%25 İçdaş-Biga uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-18'de verilmiştir.

Tablo 4-18. Ağırlıkça %25 İçdaş-Biga uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	39,1	50,3	43,1	56,2
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,3	7,1	7,4	9,5

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Aralık ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.5. KEMERKÖY TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİ

Kemerköy Termik Santrali, Muğla'nın Milas ilçesinde Hüsamlar ocağındaki 95 milyon tonluk linyit kömür rezervinden yararlanmak üzere EÜAŞ bünyesinde kurulmuştur. Her biri 210 MW gücünde 3 üniteden oluşmaktadır. Toplamda 630 MW gücünde olan santralin 1. ve 2. ünitesi 1994 yılında 3. ünitesi ise 1995 yılında işletmeye açılmıştır. Ana yakıt olarak yerli linyitin kullanıldığı santralde pulverize kömür yakma teknolojisi ve 2003 yılında faaliyete geçen baca gazı arıtma sistemi bulunmaktadır. Ortalama yıllık 4,5 milyon ton kömür ihtiyacını Hüsamlar ve Çakırılan Belentepe ocaklarından karşılamaktadır. Kemerköy Termik Santrali 2014 yılı itibariyle özelleştirilmiştir <sup>614</sup>. Kitapta analizleri sunulan Kemerköy Termik Santrali'nin farklı ünitelerine ait uçucu kül numuneleri, 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde beş ardışık günde tedarik edilmiştir.

## 4.5.1. Kemerköy Termik Santrali, 1. Ünitesi uçucu külü

### 4.5.1.1. Kimyasal analiz sonuçları

Kemerköy Termik Santrali'nin 1. Ünitesi'nden (Kemerköy-1) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarda elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-19'da verilmiştir. Beş ardışık günde toplanan ham uçucu küller üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçlarının ortalaması da karşılaştırma amaçlı olarak tabloda verilmiştir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-20'de verilmiştir.

Tablo 4-19. Kemerköy-1 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(2)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(1)</sup>
SiO <sub>2</sub>	38,04	36,51	41,95	41,57	33,59	38,33	38,57	37,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,16	19,77	19,57	21,07	15,71	18,86	18,76	19,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,43	7,82	7,16	7,40	7,47	7,46	7,41	7,31
S+A+F <sup>(1)</sup>	63,63	64,10	68,68	70,04	56,77	64,64	64,74	64,04
CaO	25,06	25,10	20,88	20,17	30,99	24,44	24,41	24,14
MgO	2,18	2,11	2,07	2,28	2,10	2,15	2,20	2,02
SO <sub>3</sub>	4,42	4,13	3,83	2,60	5,85	4,17	4,12	4,38
Na <sub>2</sub> O	0,63	0,59	0,64	0,75	0,52	0,63	0,63	0,90
K <sub>2</sub> O	2,03	2,17	2,10	2,35	1,68	2,07	2,01	2,17
TiO <sub>2</sub>	0,74	0,71	0,82	0,85	0,66	0,76	0,77	0,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30	0,29	0,29	0,29	0,31	0,30	0,30	0,32
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
KK <sup>(2)</sup>	0,54	0,71	0,60	0,55	0,76	0,63	0,54	0,57
Cl <sup>-</sup>	0,0124	0,0106	0,0071	0,0089	0,0106	0,0099	0,0128	0,0100
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,00	3,15	3,15	3,30	3,08	3,14	3,38	3,30
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	2,28	1,89
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	20,98	20,56
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	31,97	31,02

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünebilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(1)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(2)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-20. Kemerköy-1 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(A)</sup>

Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	3,26	2,60
Vanadyum	V	236,82	177,74
Krom	Cr	228,68	170,01
Manganez	Mn	431,10	290,21
Kobalt	Co	25,30	15,38
Nikel	Ni	158,22	96,74
Bakır	Cu	71,57	44,91
Çinko	Zn	187,33	190,93
Arsenik	As	94,72	83,81
Selenyum	Se	5,92	4,02
Gümüş	Ag	0,43	0,23
Kadmium	Cd	1,27	0,88
Antimon	Sb	13,95	13,15
Baryum	Ba	588,47	571,39
Civa	Hg	0,19	0,04
Talyum	Tl	2,09	1,86
Kurşun	Pb	55,78	48,85

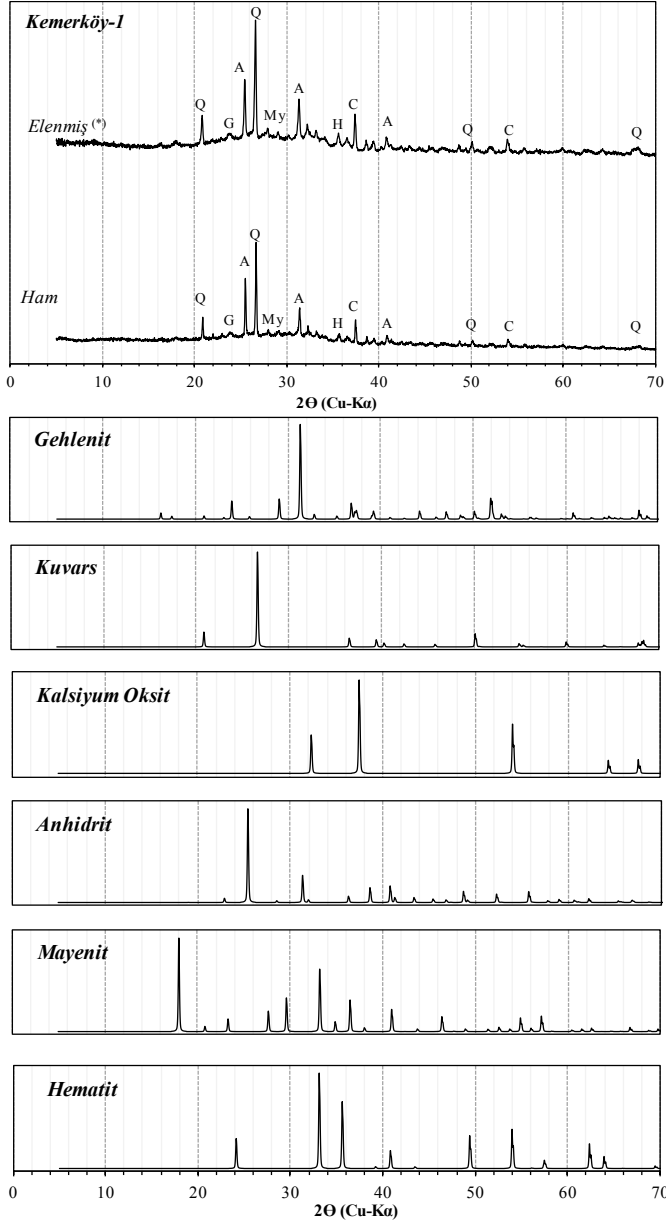
<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.5.1.2. Mineralojik analiz sonuçları

Kemerköy-1 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-15'te verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), gehlenit ( $Ca_2Al[AlSiO_7]$ ) ve mayenit ( $12CaO.7Al_2O_3$ ) olarak tespit edilmiştir.





<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-15. Kemerköy-1 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, G: Gehlenit, H: Hemaüt, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars, My: Mayenit)

#### 4.5.1.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-21 ve Tablo 4-22'de verilmiştir.

Tablo 4-21. Ham Kemerköy-1 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2520
Kıvam	%	26,2
Priz başlangıcı <sup>(c)</sup>	dakika	240
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(c)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-22. Kemerköy-1 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (a)</sup>

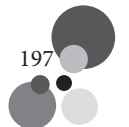
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	19,8
Aktivite indeksi		
28 gün	%	84,9
90 gün	%	95,7
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	25,9
Aktivite indeksi		
28 gün	%	85,6
90 gün	%	95,4

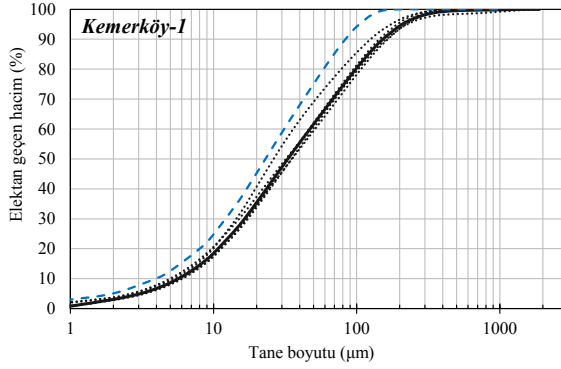
<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(\*)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-16'da gösterilmiştir. Bu üniteden elde edilen küllerin tane boyu dağılımı açısından oldukça üniform özellikte olduğu söylenebilir. Karışım numunesi ise beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile D<sub>10'</sub>, D<sub>50'</sub>, D<sub>90</sub> ve D[4,3] değerleri Tablo 4-23'te özetlenmiştir.





<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-16. Kemerköy-1 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Kemerköy-1 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-60 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çapli küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-17).

Tablo 4-23. Kemerköy-1 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(4) (5)</sup>

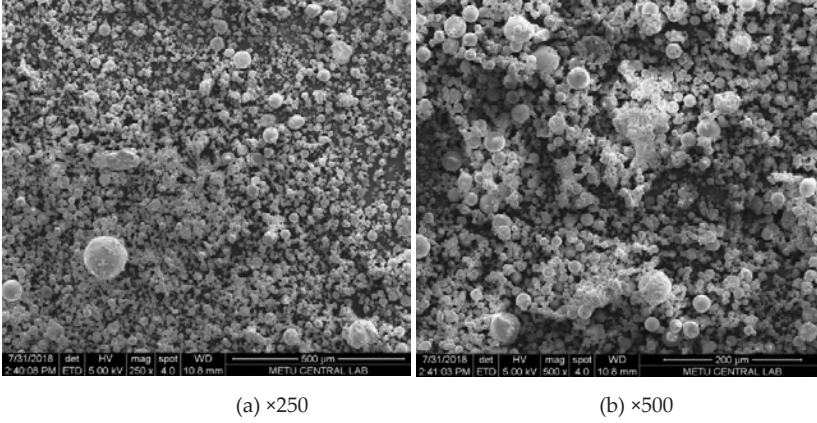
Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	22,9	42,8	52,7	6,0	35,1	152,2	61,3
2. gün	23,4	41,3	50,1	5,0	32,1	160,7	74,0
3. gün	21,5	41,0	51,2	6,1	33,3	144,3	57,7
4. gün	24,7	43,5	52,7	5,6	35,3	164,6	64,7
5. gün	16,7	33,8	43,7	5,2	26,3	125,1	49,5
<i>Ortalama</i>	<i>21,8</i>	<i>40,5</i>	<i>50,1</i>	<i>5,6</i>	<i>32,4</i>	<i>149,4</i>	<i>61,4</i>
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	22,4	41,3	50,9	5,7	33,0	152,4	63,2
Elenmiş <sup>(6)</sup>	8,1	28,3	39,1	4,0	23,1	83,4	34,5

Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarıda elenmiştir.

<sup>(4)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(5)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

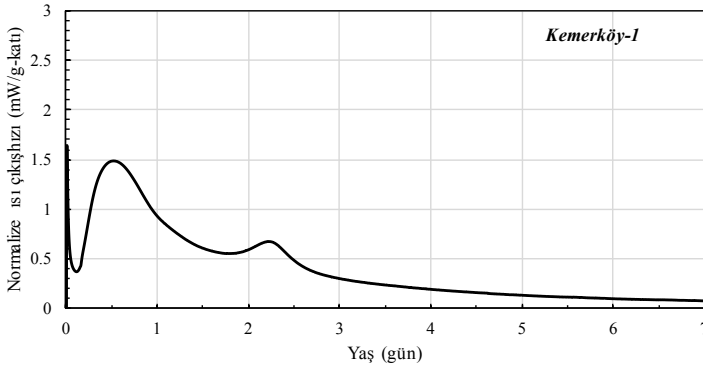


Şekil 4-17. Kemerköy-1 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Kemerköy-1 uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabilceği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.5.1.4. Ek analizler

Kemerköy-1 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısıları sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 288,3 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 290,9 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %79,82 ve %81,47'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-18'de verilmiştir.



Şekil 4-18 Bir gram katı (%25 Kemerköy-1 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-24'te verilmiştir.

Tablo 4-24. Ağırılıkça %25 Kemerköy-1 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(A)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(C)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	39,9	51,7	41,2	50,6
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,2	6,9	8,2	9,7

<sup>(C)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.5.2. Kemerköy Termik Santrali, 2. Ünite uçucu külü

### 4.5.2.1. Kimyasal analiz sonuçları

Kemerköy Termik Santrali'nin 2. Ünitesi'nden (Kemerköy-2) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-25'te verilmiştir.

Tablo 4-25. Kemerköy-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
SiO <sub>2</sub>	36,04	37,30	37,66	30,35	41,94	36,66	36,10	35,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,80	19,04	18,78	15,84	20,76	18,64	18,95	18,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,06	8,04	8,22	8,18	7,30	7,96	7,92	7,59
S+A+F <sup>(1)</sup>	62,90	64,38	64,66	54,37	70,00	63,26	62,97	61,43
CaO	26,28	25,12	24,76	34,10	20,74	26,20	26,30	27,16
MgO	2,02	2,42	2,22	2,00	2,21	2,17	2,28	2,00
SO <sub>3</sub>	4,46	3,94	3,92	6,18	2,74	4,25	4,42	4,97
Na <sub>2</sub> O	0,56	0,54	0,54	0,40	0,56	0,52	0,52	0,51
K <sub>2</sub> O	2,10	1,96	1,98	1,54	2,06	1,93	1,92	1,93
TiO <sub>2</sub>	0,76	0,78	0,76	0,62	0,86	0,76	0,78	0,68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30	0,30	0,28	0,30	0,30	0,30	0,30	0,34

Tablo 4-25. Kemerköy-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup> (devamı)

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,02	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,08	0,08	0,05
KK <sup>(B)</sup>	0,36	0,41	0,47	0,37	0,41	0,40	0,37	0,87
Cl	0,0067	0,0025	0,0007	0,0103	0,0039	0,0048	0,0043	0,0043
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(C)</sup>	2,93	3,00	4,43	3,23	3,08	3,33	3,38	3,38
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	3,46	3,67
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	23,05	22,73
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	29,29	29,29

<sup>(A)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(B)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(C)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünbilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(D)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(E)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-26'da verilmiştir.

Tablo 4-26. Kemerköy-2 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(A)</sup>

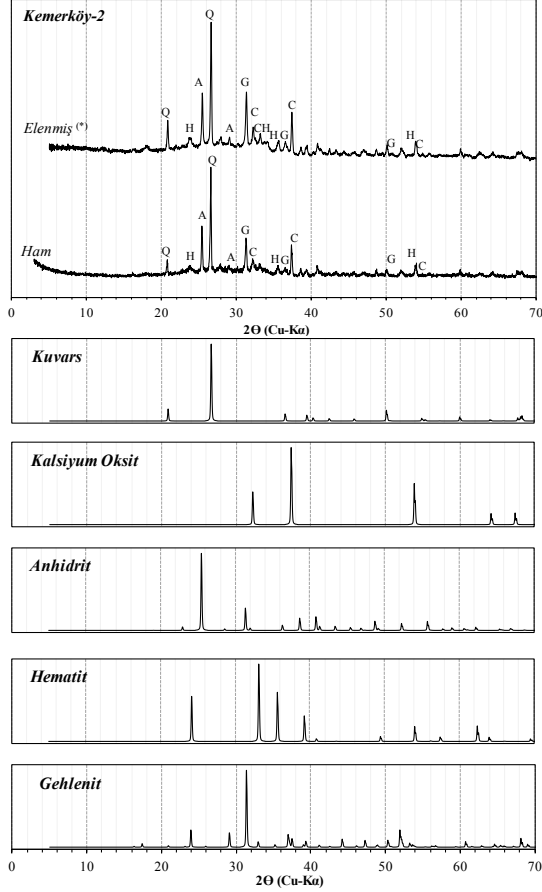
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
Berilyum	Be	3,05	1,91
Vanadyum	V	175,42	148,57
Krom	Cr	161,34	140,42
Manganez	Mn	312,89	245,07
Kobalt	Co	16,03	12,89
Nikel	Ni	101,89	111,85
Bakır	Cu	45,98	37,31
Çinko	Zn	101,77	88,33
Arsenik	As	64,93	64,20
Selenyum	Se	4,18	3,67
Gümüş	Ag	0,41	0,39
Kadmiyum	Cd	0,49	0,52
Antimon	Sb	8,53	10,85
Baryum	Ba	279,16	424,90
Civa	Hg	0,61	0,05
Talyum	Tl	1,15	0,91
Kurşun	Pb	28,84	34,65

<sup>(C)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(E)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.5.2.2. Mineralojik analiz sonuçları

Kemerköy-2 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-19'da verilmiştir.



<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-19. Kemerköy-2 uçucu külünün x-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, G: Gehlenit, H: Hematit, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars)

Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) ve gehlenit ( $Ca_2Al[AlSiO_7]$ ) olarak tespit edilmiştir.

### 4.5.2.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-27 ve Tablo 4-28'de verilmiştir.

Tablo 4-27. Ham Kemerköy-2 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2500
Kıvam	%	28,0
Priz başlangıcı <sup>(C)</sup>	dakika	190
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(C)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(A)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-28. Kemerköy-2 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(+)(A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(C)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	23,5
Aktivite indeksi		
28 gün	%	86,4
90 gün	%	93,9
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	34,8
Aktivite indeksi		
28 gün	%	89,4
90 gün	%	98,4

<sup>(C)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

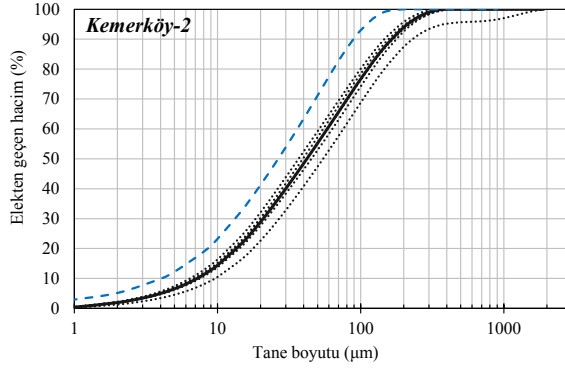
<sup>(A)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-20'de gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile D<sub>10'</sub> D<sub>50'</sub> D<sub>90</sub> ve D[4,3] değerleri Tablo 4-29'da verilmiştir.







<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-20. Kemerköy-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-29. Kemerköy-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (A)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	24,7	46,0	56,3	6,8	39,5	156,5	63,5
2. gün	26,8	48,0	57,8	6,9	42,0	168,1	68,3
3. gün	29,1	50,2	59,9	7,6	45,3	176,9	72,0
4. gün	23,0	44,0	54,2	6,4	36,8	146,5	59,3
5. gün	34,6	55,7	65,4	9,6	54,6	230,1	126,9
<i>Ortalama</i>	27,6	48,8	58,7	7,5	43,6	175,6	78,0
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	26,5	48,0	58,1	7,2	42,1	164,2	66,7
Elenmiş <sup>(*)</sup>	9,7	32,5	44,0	4,0	26,6	89,0	37,8

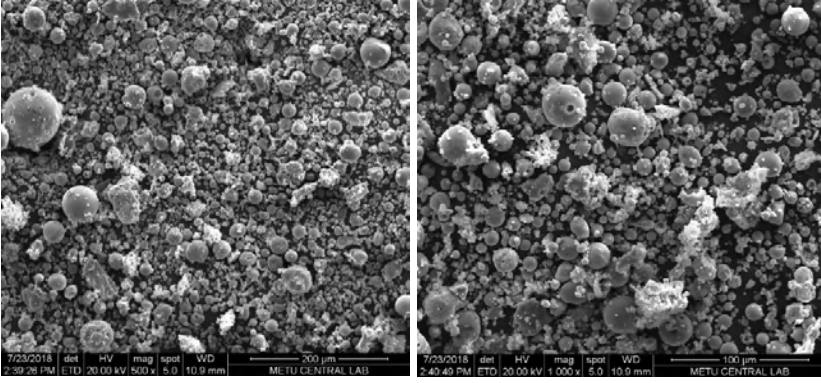
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Kemerköy-2 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-80 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-21).



(a)  $\times 500$

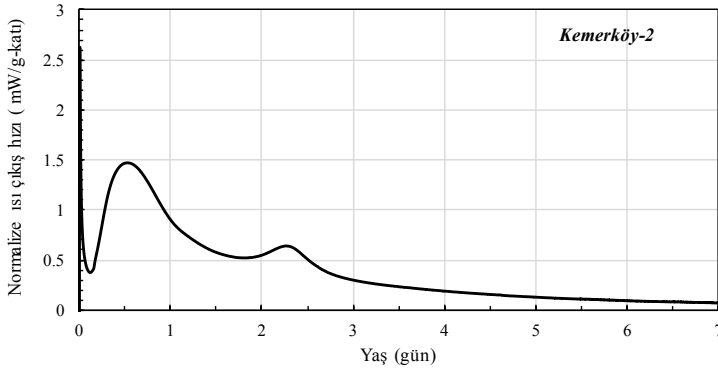
(b)  $\times 1k$

Şekil 4-21. Kemerköy-2 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Kemerköy-2 uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabileceği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.5.2.4. Ek analizler

Kemerköy-2 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 309,5 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 304,6 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %85,70 ve %85,28'ine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-22'de verilmiştir.



Şekil 4-22 Bir gram katı (%25 Kemerköy-2 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-30'da verilmiştir.

Tablo 4-30. Ağırılıkça %25 Kemerköy-2 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	40,6	50,7	43,0	53,0
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,4	7,1	7,5	9,1

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

### 4.5.3. Kemerköy Termik Santrali, 3. Ünite uçucu külü

#### 4.5.3.1. Kimyasal analiz sonuçları

Kemerköy Termik Santrali'nin 3. Ünitesi'nden (Kemerköy-3) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarda elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-31'de verilmiştir.

Tablo 4-31. Kemerköy-3 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
SiO <sub>2</sub>	33,64	29,30	30,99	29,09	32,59	31,12	31,23	30,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,68	15,17	14,59	15,18	15,98	15,52	15,57	15,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,90	6,90	7,31	6,61	6,65	7,27	7,41	6,99
S+A+F <sup>(1)</sup>	59,22	51,37	52,89	50,88	55,22	53,92	54,21	53,24
CaO	28,73	35,56	32,85	36,03	31,96	33,03	32,77	33,00
MgO	1,73	1,73	1,72	1,74	1,81	1,75	1,79	1,65
SO <sub>3</sub>	5,63	7,07	7,95	6,81	6,71	6,83	6,84	7,10
Na <sub>2</sub> O	0,52	0,43	0,41	0,54	0,46	0,47	0,44	0,55
K <sub>2</sub> O	1,63	1,47	1,43	1,37	1,53	1,49	1,59	1,84
TiO <sub>2</sub>	0,69	0,58	0,62	0,57	0,65	0,62	0,63	0,60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,29	0,32	0,26	0,32	0,26	0,29	0,27	0,36
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04

Tablo 4-31. Kemerköy-3 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup> (devamı)

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
KK <sup>(b)</sup>	0,77	0,79	0,94	0,76	0,90	0,83	0,75	0,89
Cl <sup>-</sup>	0,0121	0,0152	0,0106	0,0089	0,0287	0,0151	0,0148	0,0148
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(b)</sup>	3,15	3,30	3,38	3,15	3,08	3,21	3,00	3,00
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	4,71	4,58
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	27,03	27,27
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	26,78	26,23

<sup>(a)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(b)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(c)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünbilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(1)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-32'de verilmiştir.

Tablo 4-32. Kemerköy-3 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

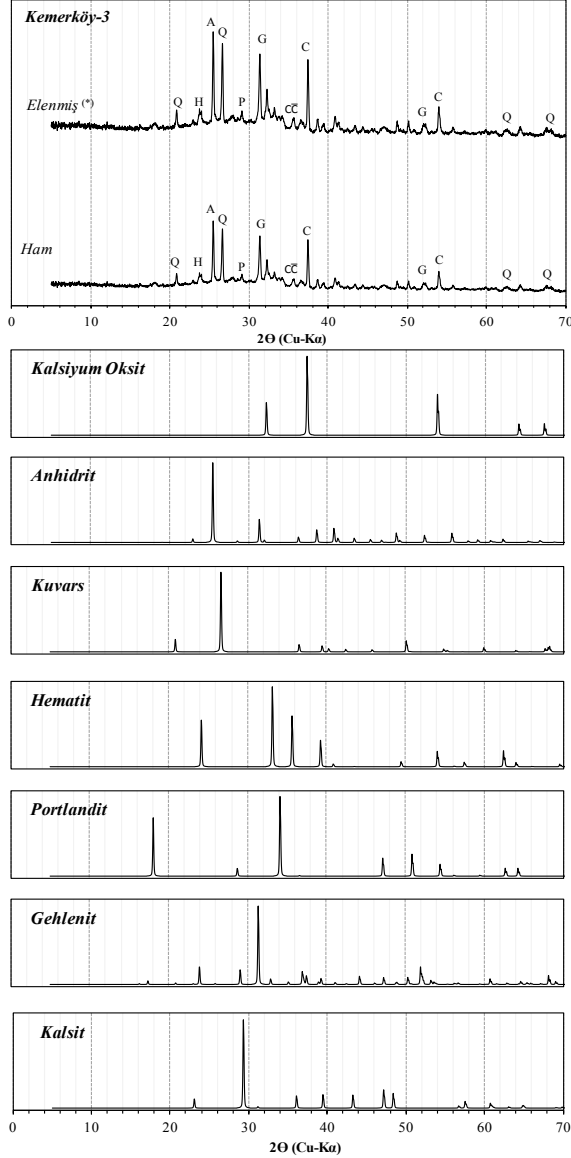
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Berilyum	Be	2,96	2,24
Vanadyum	V	199,58	142,67
Krom	Cr	209,85	151,79
Manganez	Mn	348,64	238,68
Kobalt	Co	17,70	12,98
Nikel	Ni	149,32	103,46
Bakır	Cu	73,05	34,88
Çinko	Zn	129,85	86,74
Arsenik	As	82,93	64,43
Selenyum	Se	7,55	5,59
Gümüş	Ag	0,49	0,10
Kadmiyum	Cd	0,72	0,53
Antimon	Sb	12,11	9,62
Baryum	Ba	463,81	345,27
Civa	Hg	0,13	0,04
Talyum	Tl	1,37	0,99
Kurşun	Pb	36,59	30,47

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.5.3.2. Mineralojik analiz sonuçları

Kemerköy-3 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-23'te verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), gehlenit ( $Ca_2Al[AlSiO_7]$ ), kalsit ( $CaCO_3$ ) ve portlandit ( $Ca(OH)_2$ ) olarak tespit edilmiştir.



<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-23. Kemerköy-3 uçucu külünün x-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, G: Gehlenit, H: Hematit, C: Kalsit, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars, P: Portlandit)

#### 4.5.3.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-33 ve Tablo 4-34'te verilmiştir.

Tablo 4-33. Ham Kemerköy-3 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(2)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2590
Kıvam	%	27,0
Priz başlangıcı <sup>(1)</sup>	dakika	225
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(1)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(2)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-34. Kemerköy-3 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (2)</sup>

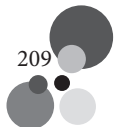
Özellik	Birim	Değer
<b>Elenmiş kül <sup>(1)</sup></b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	21,7
Aktivite indeksi		
28 gün	%	87,4
90 gün	%	98,0
<b>Ham kül</b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	29,9
Aktivite indeksi		
28 gün	%	85,5
90 gün	%	90,9

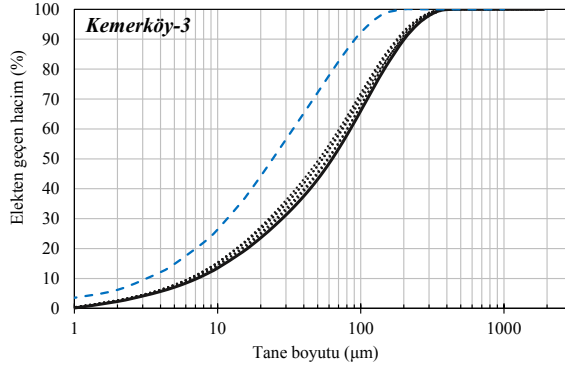
<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-24'te gösterilmiştir. Şekilde farklı günlerde alınan numunelerin ve hazırlanan ham numunenin tane boyu dağılımlarının birbirine yakın olduğu, günden güne çok değişiklik göstermediği görülmektedir. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile D<sub>10'</sub> D<sub>50'</sub> D<sub>90</sub> ve D[4,3] değerleri Tablo 4-35'te özetlenmiştir.





<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-24. Kemerköy-3 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-35. Kemerköy-3 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)(3)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	36,1	57,9	66,0	6,6	59,6	191,6	81,5
2. gün	32,9	55,2	63,8	6,3	53,9	183,4	76,7
3. gün	36,0	57,2	65,3	6,8	58,7	190,8	80,8
4. gün	31,8	53,7	62,3	6,4	51,3	178,2	74,2
5. gün	33,9	55,2	63,5	6,4	54,3	194,6	80,0
<i>Ortalama</i>	<i>34,1</i>	<i>55,8</i>	<i>64,2</i>	<i>6,5</i>	<i>55,6</i>	<i>187,7</i>	<i>78,6</i>
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	37,9	59,6	67,5	7,2	63,2	201,2	85,9
Elenmiş <sup>(*)</sup>	10,4	31,1	41,6	3,3	24,3	91,3	37,1

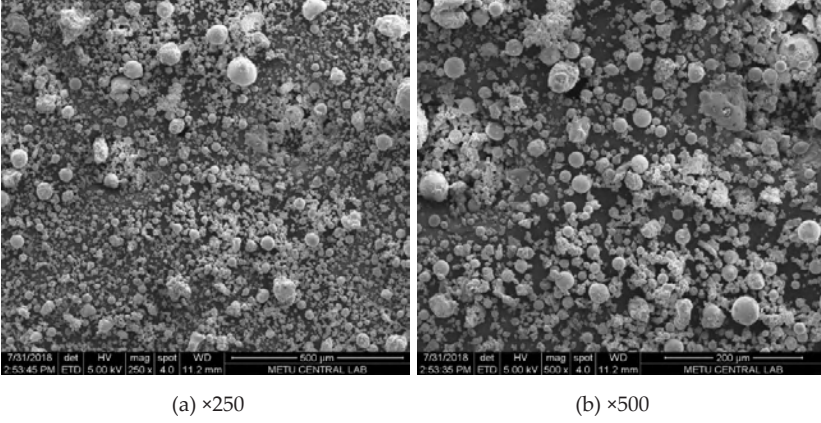
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(3)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Kemerköy-3 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-80 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-25).

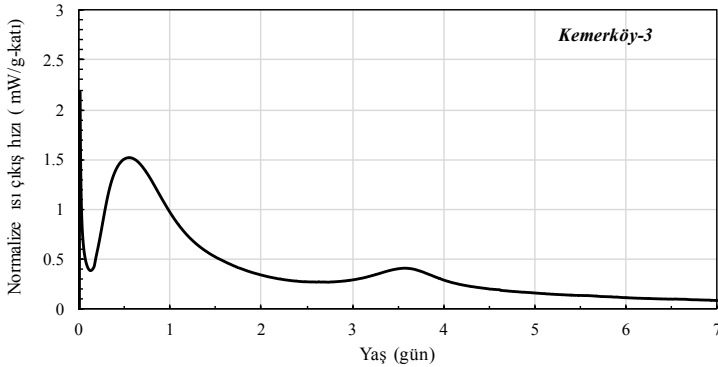


Şekil 4-25. Kemerköy-3 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Kemerköy-3 uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabilceği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.5.3.4. Ek analizler

Kemerköy-3 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 302,9 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 308,5 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %83,88 ve %86,39'una karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-26'da verilmiştir.



Şekil 4-26 Bir gram katı (%25 Kemerköy-3 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)



Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-36'da verilmiştir.

Tablo 4-36. Ağırlıkça %25 Kemerköy-3 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(A)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(C)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	41,1	52,9	41,1	48,7
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,4	7,0	8,0	9,8

<sup>(C)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.6. SEYİTÖMER TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİ

Seyitömer Termik Santrali, Kütahya'nın 28 km kuzeybatısında Seyitömer havzasındaki düşük kaliteli linyit rezervlerinin değerlendirilmesi amacıyla her biri 150 MW gücünde 4 ünite halinde tesis edilmiştir. Toplam 600 MW gücüne sahip santralin üniteleri sırasıyla 1973, 1974, 1977 ve 1989 yıllarında devreye girmiştir. Kömür ihtiyacı Türkiye Kömür İşletmeleri'ne bağlı Seyitömer Linyitleri İşletmesi'nden (SLİ) karşılanmaktadır. Seyitömer Termik Santrali 17 Haziran 2013 tarihinde EÜAŞ bünyesinden devredilerek özelleştirilmiştir <sup>615</sup>. Özelleştikten sonra da kömür ihtiyacı Türkiye Kömür İşletmeleri'ne bağlı Çelikler Seyitömer Linyitleri İşletmesi'nden (SLİ) karşılanmaktadır. Bu santralden 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde ardışık günlerde toplanan uçucu kül numuneleri tedarik edilmiştir.

### 4.6.1. Seyitömer Termik Santrali 1. Ünite uçucu külü

#### 4.6.1.1. Kimyasal analiz sonuçları

Seyitömer Termik Santrali'nin 1. Ünitesi'nden (Seyitömer-1) sadece üç gün için numune temin edilmiştir. Alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-37'de verilmiştir.

Tablo 4-37. Seyitömer-1 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler				Karışım	
	1	2	3	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
SiO <sub>2</sub>	52,25	51,69	52,36	52,10	52,08	51,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,47	17,81	18,84	18,37	18,37	18,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,45	12,55	12,01	12,00	11,99	12,80
S+A+F <sup>(1)</sup>	82,17	82,05	83,21	82,48	82,44	82,70
CaO	5,19	6,07	5,66	5,64	5,58	5,66
MgO	4,79	4,99	4,94	4,91	4,89	4,85
SO <sub>3</sub>	1,46	1,18	0,89	1,18	1,22	1,21
Na <sub>2</sub> O	0,65	0,62	0,60	0,62	0,62	0,60
K <sub>2</sub> O	2,31	2,12	2,40	2,28	2,30	2,32
TiO <sub>2</sub>	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,76
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,13	0,14	0,13	0,14	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
KK <sup>(2)</sup>	1,50	0,92	0,85	1,09	1,00	1,07
Cl <sup>-</sup>	0,0177	0,0168	0,0128	0,0158	0,0148	0,0117
C. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,38	3,15	3,08	3,20	3,15	3,52
Serbest CaO	-	-	-	-	0,02	0,06
Reaktif CaO	-	-	-	-	4,40	4,43
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	42,75	42,56

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (C.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(4)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(5)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-38'de verilmiştir.

Tablo 4-38. Seyitömer-1 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(A)</sup>

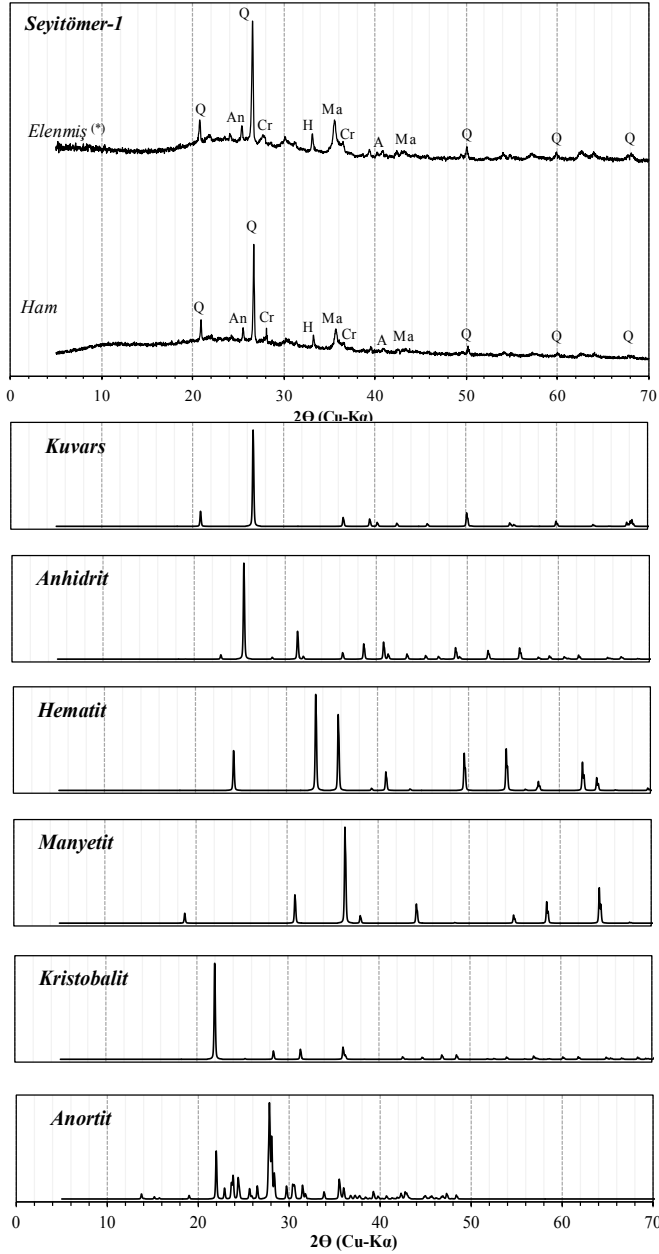
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	2,87	3,10
Vanadyum	V	268,72	151,58
Krom	Cr	721,78	416,06
Manganez	Mn	1053,92	463,25
Kobalt	Co	96,19	53,04
Nikel	Ni	2060,34	1171,65
Bakır	Cu	161,03	65,70
Çinko	Zn	189,38	111,78
Arsenik	As	115,16	67,64
Selenyum	Se	3,58	2,23
Gümüş	Ag	4,95	3,82
Kadmium	Cd	1,03	0,38
Antimon	Sb	5,07	3,31
Baryum	Ba	1016,59	797,41
Civa	Hg	0,21	0,51
Talyum	Tl	1,59	1,27
Kurşun	Pb	88,89	63,35

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.6.1.2. Mineralojik analiz sonuçları

Seyitömer-1 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-27'de verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), manyetit ( $Fe_3O_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), anortit ( $(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$ ) ve kristobalit ( $SiO_2$ ) olarak tespit edilmiştir.



<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-27. Seyitömer-1 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, An: Anortit, H: Hematit, Cr: Kristobalit, Q: Kuvars, Ma: Manyetit)

#### 4.6.1.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış; sonuçlar Tablo 4-39 ve Tablo 4-40'da verilmiştir.

Tablo 4-39. Ham Seyitömer-1 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(2)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	1900
Kıvam	%	33,4
Priz başlangıcı <sup>(1)</sup>	dakika	250
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(1)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(2)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-40. Seyitömer-1 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(+)(2)</sup>

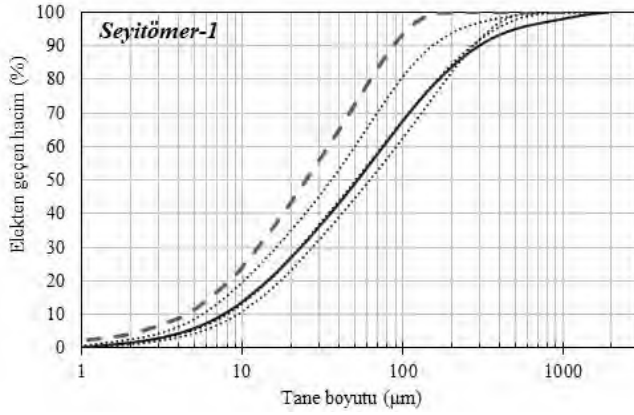
Özellik	Birim	Değer
<b>Elenmiş kül <sup>(1)</sup></b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	24,5
Aktivite indeksi		
28 gün	%	87,0
90 gün	%	92,4
<b>Ham kül</b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	36,2
Aktivite indeksi		
28 gün	%	80,7
90 gün	%	85,1

<sup>(1)</sup>125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup>İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-28'de gösterilmiştir.



<sup>(3)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-28. Seyitömer-1 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri Tablo 4-41'de sunulmuştur.

Tablo 4-41. Seyitömer-1 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (3)</sup>

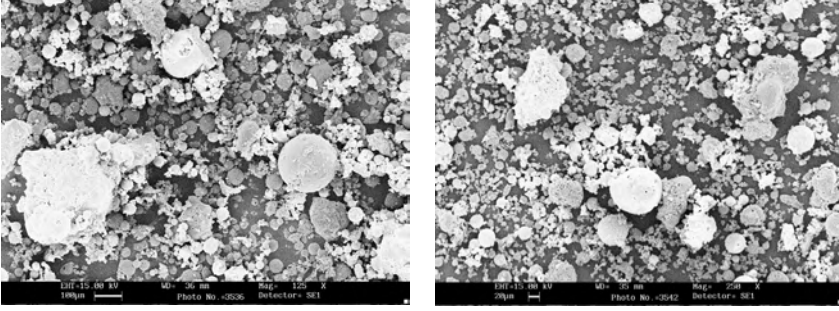
Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	$D[4,3]$
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	22,0	43,2	53,1	5,6	35,7	151,8	66,0
2. gün	34,8	53,0	61,7	8,0	50,6	269,3	102,1
3. gün	40,3	58,0	66,2	9,3	62,0	274,0	106,5
<i>Ortalama</i>	32,4	51,4	60,3	7,6	49,4	231,7	91,5
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	35,1	53,8	62,3	7,6	52,1	297,2	127,9
Elenmiş <sup>(*)</sup>	9,1	31,1	42,1	4,4	24,9	87,0	36,5

Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(3)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.



(a)  $\times 125$

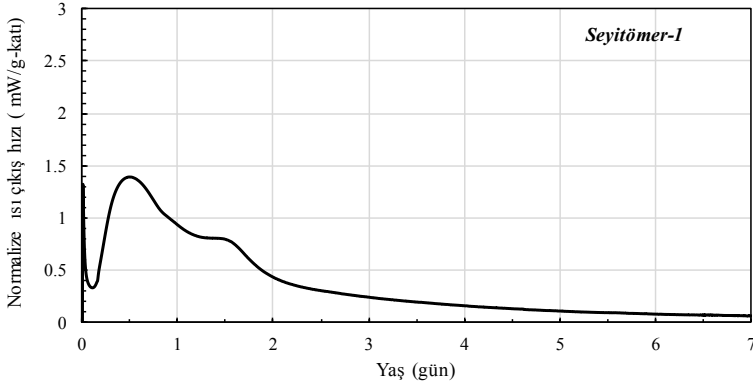
(b)  $\times 250$

Şekil 4-29. Seyitömer-1 uçucu küline ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Seyitömer-1 uçucu külünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabilceği öngörülmektedir.

#### 4.6.1.4. Ek analizler

Seyitömer-1 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 265,2 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 287,2 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %73,45 ve %80,41'ine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-30'da verilmiştir.



Şekil 4-30 Bir gram katı (%25 Seyitömer-1 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-42'de verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırabildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4-42. Ağırılıkça %25 Seyitömer-1 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	48,3	53,9	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	42,0	49,8	38,8	45,6
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,6	6,9	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	6,2	6,8	8,4	9,8

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.6.2. Seyitömer Termik Santrali 2. Ünite uçucu külü

### 4.6.2.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

Seyitömer Termik Santrali'nin 2. Ünitesi'nden (Seyitömer-2) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-43'te sunulmuştur. Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-44'te verilmiştir.

Tablo 4-43. Seyitömer-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup>

Bileşenler (ağırılıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
SiO <sub>2</sub>	55,39	51,96	52,81	53,66	52,51	53,27	53,04	52,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,50	18,88	18,76	18,73	18,75	18,72	18,99	18,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,85	11,27	11,70	11,90	11,84	11,51	11,25	11,74
S+A+F <sup>(1)</sup>	84,74	82,11	83,27	84,29	83,10	83,50	83,28	83,04
CaO	4,75	5,45	5,55	4,81	5,55	5,22	5,26	5,64
MgO	4,44	4,85	4,90	4,66	4,61	4,69	4,79	4,64
SO <sub>3</sub>	0,85	0,77	0,76	0,89	0,70	0,79	0,80	1,02
Na <sub>2</sub> O	0,85	0,61	0,60	0,53	0,60	0,64	0,59	0,54
K <sub>2</sub> O	1,49	1,94	1,75	1,73	1,94	1,77	1,90	1,97
TiO <sub>2</sub>	0,75	0,68	0,71	0,72	0,72	0,72	0,72	0,74



Tablo 4-43. Seyitömer-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup> (devamı)

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,20	0,14	0,14	0,12	0,15	0,15	0,13	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,10	0,11	0,12	0,10	0,11	0,11	0,11
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,13	0,13	0,10	0,13	0,12	0,12	0,12
KK <sup>(2)</sup>	1,71	2,38	1,68	1,74	2,35	1,97	1,97	1,28
Cl <sup>-</sup>	0,0160	0,0124	0,0142	0,0142	0,0124	0,0138	0,0139	0,0170
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	11,68	9,28	14,46	7,6	12,23	11,05	9,8	10,48
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	0,06	0,03
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	4,42	4,42
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	44,56	42,99

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P.O<sub>5</sub> = Çözünebilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(4)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(5)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-44. Seyitömer-2 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

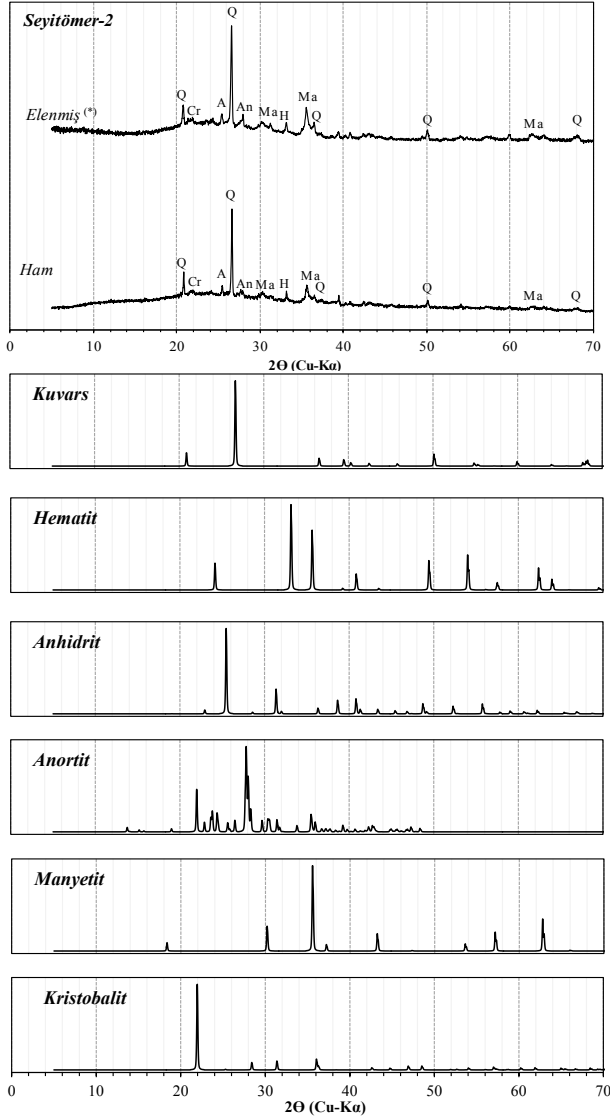
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Berilyum	Be	2,64	2,49
Vanadyum	V	240,11	190,39
Krom	Cr	700,71	522,97
Manganez	Mn	841,91	588,76
Kobalt	Co	89,84	63,22
Nikel	Ni	1967,51	1382,51
Bakır	Cu	130,89	86,12
Çinko	Zn	241,98	121,93
Arsenik	As	74,77	76,72
Selenyum	Se	3,44	2,42
Gümüş	Ag	0,61	0,34
Kadmiyum	Cd	0,70	0,63
Antimon	Sb	3,72	3,94
Baryum	Ba	834,74	785,62
Civa	Hg	0,16	0,07
Talyum	Tl	1,31	1,33
Kurşun	Pb	66,31	64,63

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.6.2.2. Mineralojik analiz sonuçları

Seyitömer-2 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-31' de verilmiştir.



<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-31. Seyitömer-2 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, An: Anortit, H: Hematit, Cr: Kristobalit, Q: Kuvars, Ma: Manyetit)

Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), manyetit ( $Fe_3O_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), anortit ( $(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$ ) ve kristobalit ( $SiO_2$ ) olarak tespit edilmiştir.

#### 4.6.2.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-45 ve Tablo 4-46'da verilmiştir.

Tablo 4-45. Ham Seyitömer-2 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	1870
Kıvam	%	32,8
Priz başlangıcı <sup>(*)</sup>	dakika	265
Hacim genişmesi	mm	0,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(\*)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-46. Seyitömer-2 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (A)</sup>

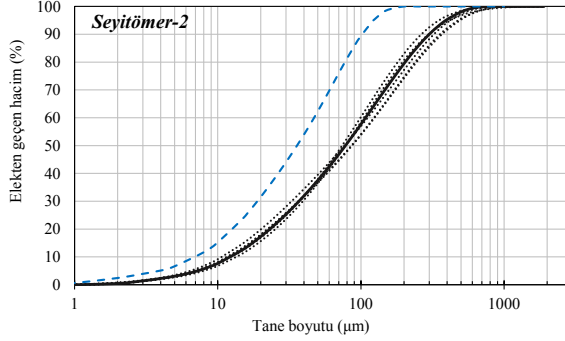
Özellik	Birim	Değer
<b>Elenmiş kül <sup>(*)</sup></b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	33,6
Aktivite indeksi		
28 gün	%	77,8
90 gün	%	90,2
<b>Ham kül</b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	49,2
Aktivite indeksi		
28 gün	%	76,5
90 gün	%	76,7

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-32'de gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-32. Seyitömer-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri Tablo 4-47'de verilmiştir.

Tablo 4-47. Seyitömer-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)(3)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	$D[4,3]$
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	45,1	66,5	75,0	13,6	77,7	297,3	128,1
2. gün	49,0	65,7	73,0	11,8	86,8	368,5	145,8
3. gün	48,8	65,5	72,9	11,8	85,9	356,9	143,7
4. gün	43,4	65,1	73,7	12,5	74,0	264,4	113,9
5. gün	45,9	62,9	70,6	10,7	76,8	323,4	129,0
<i>Ortalama</i>	<i>46,4</i>	<i>65,1</i>	<i>73,0</i>	<i>12,1</i>	<i>80,2</i>	<i>322,1</i>	<i>132,1</i>
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	45,7	65,2	73,3	12,3	78,0	300,2	122,3
Elenmiş <sup>(4)</sup>	14,2	41,7	53,8	7,0	35,8	102,0	46,2

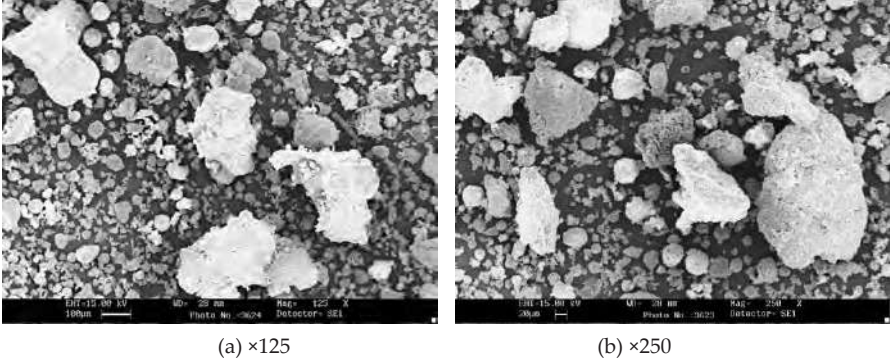
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(3)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Seyitömer-2 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-130 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıya sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-33).

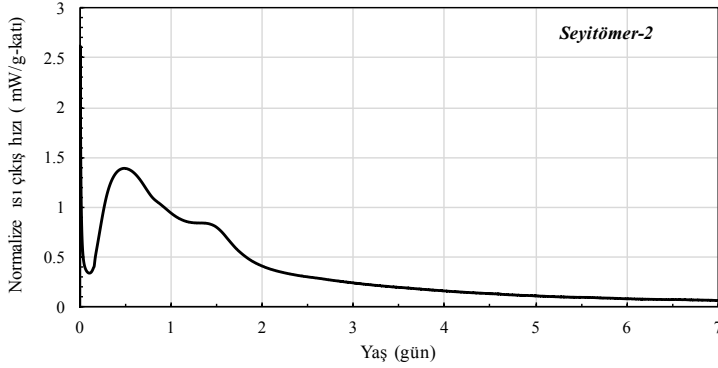


Şekil 4-33. Seyitömer-2 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Seyitömer-2 uçucu külünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabilmesi öngörülmektedir. Aktivite indeksi analizlerinde hem ham kül hem de laboratuvar ortamında 125  $\mu\text{m}$ 'lik elekten elenen ham kül (elenmiş kül) kullanıldığı için bu sonuçlar uygunluk değerlendirilmesine alınmamalıdır. Aktivite indeksi analiz sonuçları TS EN 450-1 standardında belirtilen yöntemler (separasyon, eleme, öğütme vb.) uygulanarak proses sırasında artırılabilir.

#### 4.6.2.4. Ek analizler

Seyitömer-2 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 272,5 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 276,3 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %75,45 ve %77,37'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-34'te verilmiştir.



Şekil 4-34 Bir gram katı (%25 Seyitömer-2 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-48’de verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmüştür.

Tablo 4-48. Ağırlıkça %25 Seyitömer-2 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(A)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(C)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	48,3	53,9	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	37,6	48,6	36,8	41,1
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,6	6,9	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	6,1	6,9	8,4	9,2

<sup>(C)</sup> 125 µm’lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

### 4.6.3. Seyitömer Termik Santrali 4. Ünite uçucu külü

#### 4.6.3.1. Kimyasal analiz sonuçları

Seyitömer Termik Santrali’nin 4. Ünitesi’nden (Seyitömer-4) sadece üç ardışık gün için numune temin edilmiştir. Alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-49’da sunulmuştur.

Tablo 4-49. Seyitömer-4 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler				Karışım	
	1	2	3	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
SiO <sub>2</sub>	53,63	53,61	55,63	54,29	54,21	53,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,21	15,52	16,83	16,19	16,18	16,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,51	13,58	11,04	12,38	12,76	12,63
S+A+F <sup>(1)</sup>	82,35	82,71	83,50	82,85	83,15	82,74
CaO	5,22	5,79	4,28	5,10	5,12	5,78
MgO	4,77	4,42	4,62	4,60	4,68	4,85
SO <sub>3</sub>	1,20	1,10	0,85	1,05	1,05	1,66
Na <sub>2</sub> O	0,58	0,61	0,43	0,54	0,57	0,54
K <sub>2</sub> O	1,35	1,33	1,11	1,26	1,27	1,60
TiO <sub>2</sub>	0,69	0,63	0,65	0,66	0,70	0,74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,17	0,11	0,14	0,13	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,11	0,14	0,12	0,13	0,12
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,17	0,09	0,13	0,14	0,13
KK <sup>(2)</sup>	2,80	2,19	3,55	2,85	2,70	1,69
Cl <sup>-</sup>	0,0053	0,0071	0,0106	0,0077	0,0071	0,0071
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,53	7,68	5,55	5,59	4,48	4,48
Serbest CaO	-	-	-	-	0,03	0,04
Reaktif CaO	-	-	-	-	3,60	3,77
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	45,08	43,34

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(4)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-50'de verilmiştir.

Tablo 4-50. Seyitömer-4 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(A)</sup>

Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(B)</sup>
Berilyum	Be	2,96	2,78
Vanadyum	V	236,15	159,72
Krom	Cr	816,33	508,50
Manganez	Mn	1063,09	498,67
Kobalt	Co	91,84	57,29
Nikel	Ni	2089,85	1264,41
Bakır	Cu	129,96	70,94
Çinko	Zn	137,63	99,57
Arsenik	As	78,51	71,58
Selenyum	Se	5,03	6,18
Gümüş	Ag	0,67	3,32
Kadmium	Cd	0,64	0,78
Antimon	Sb	3,51	8,28
Baryum	Ba	933,10	539,53
Civa	Hg	0,17	0,82
Talyum	Tl	1,10	0,92
Kurşun	Pb	55,68	56,29

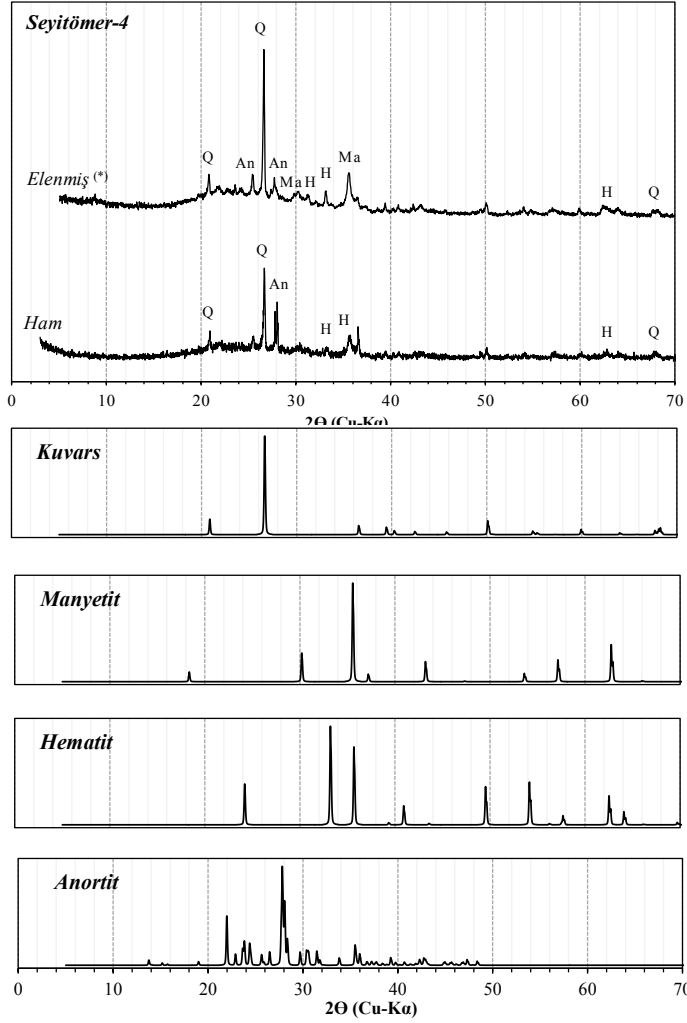
<sup>(A)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(B)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.6.3.2. Mineralojik analiz sonuçları

Seyitömer-4 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-35'te verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve çamsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), magnezyoferrit ( $MgFe_2^{3+}O_4$ ), magnetit ( $Fe_3O_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) ve anortit ( $(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$ ) olarak tespit edilmiştir. Uçucu külün x-ışını difraktogramında, çamsı fazın 22-28°2 arasında maksimum duruma geldiği görülmüştür.





<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-35. Seyitömer-4 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (An: Anortit, H: Hematit, Q: Kuvars, Ma: Manyetit)

#### 4.6.3.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-51 ve Tablo 4-52'de verilmiştir.

Tablo 4-51. Ham Seyitömer-4 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	1950
Kıvam	%	31,0
Priz başlangıcı <sup>(C)</sup>	dakika	180
Hacim genişmesi	mm	0,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(C)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-52. Seyitömer-4 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (A)</sup>

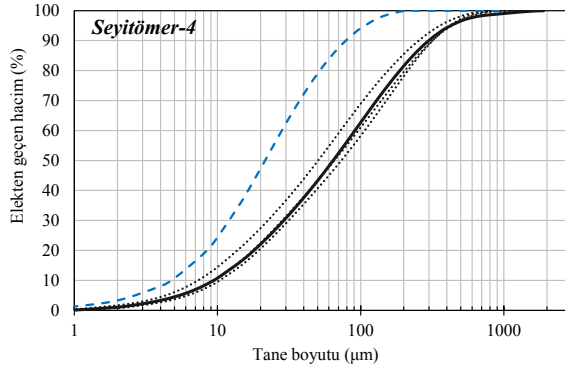
Özellik	Birim	Değer
<b>Elenmiş kül <sup>(C)</sup></b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	34,2
Aktivite indeksi		
28 gün	%	75,5
90 gün	%	86,3
<b>Ham kül</b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	48,7
Aktivite indeksi		
28 gün	%	61,0
90 gün	%	59,2

<sup>(C)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(\*)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-36'da gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri Tablo 4-53'te verilmiştir.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesik çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-36. Seyitömer-4 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-53. Seyitömer-4 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (1)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4,3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	41,8	59,3	67,3	9,9	68,3	313,1	122,9
2. gün	44,7	61,8	69,6	10,6	74,4	321,3	126,2
3. gün	33,9	53,1	61,8	8,2	56,3	237,6	97,5
<i>Ortalama</i>	<i>40,1</i>	<i>58,1</i>	<i>66,2</i>	<i>9,5</i>	<i>66,3</i>	<i>290,7</i>	<i>115,5</i>
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	40,4	59,5	67,8	9,4	62,5	281,7	110,6
Elenmiş <sup>(*)</sup>	5,9	24,1	35,4	4,7	21,5	78,8	33,3

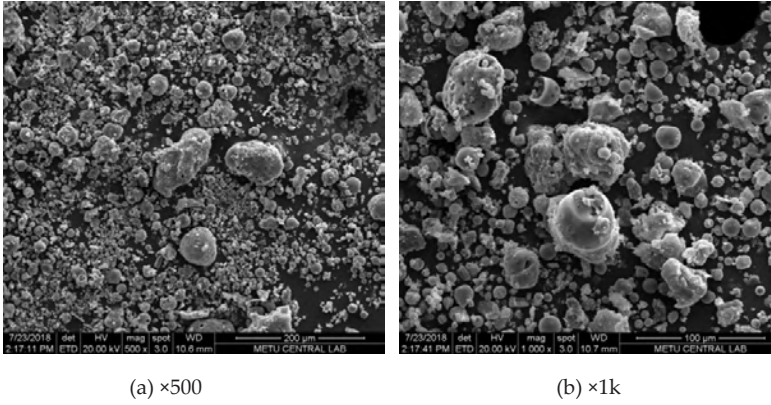
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(1)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Seyitömer-4 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-270 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıları taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Kül içerisinde oldukça büyük ve düzensiz parçacıklar göze çarpmaktadır (Şekil 4-37).

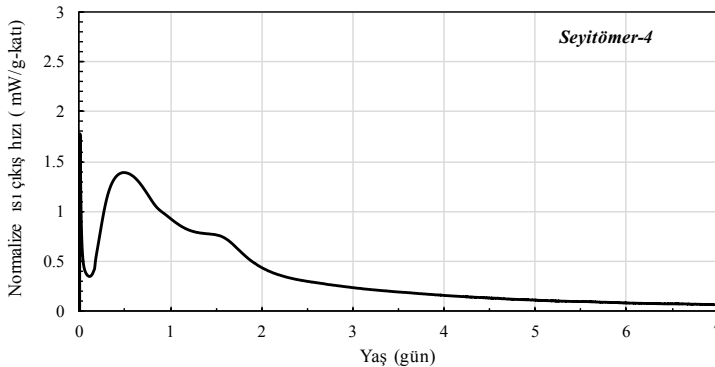


Şekil 4-37. Seyitömer-4 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Seyitömer-4 uçucu külünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabilceği öngörülmektedir. Aktivite indeksi analizlerinde hem ham kül hem de laboratuvar ortamında 125 µm'lik elekten elenen ham kül (elenmiş kül) kullanıldığı için bu sonuçlar uygunluk değerlendirilmesine alınmamalıdır. Aktivite indeksi analiz sonuçları TS EN 450-1 standardında belirtilen yöntemler (separasyon, eleme, öğütme vb.) uygulanarak proses sırasında arttırılabilmektedir.

#### 4.6.3.4. Ek analizler

Seyitömer-4 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 263,9 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 275,4 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %73,08 ve %77,13'ne karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-38'de verilmiştir.



Şekil 4-38 Bir gram katı (%25 Seyitömer-4 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-54'te verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmüştür.

Tablo 4-54. Ağırıkça %25 Seyitömer-4 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	35,5	46,6	29,3	31,8
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,3	7,0	7,5	7,9

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.7. SOMA B TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜ

Manisa ili Soma ilçesinde bulunan, toplam kurulu gücü 990 MW olan Soma B Termik Santrali her biri 165 MW gücünde 6 üniteden oluşmaktadır. 1. ünite 1981, 2. ünite 1982, 3. ve 4. ünite 1985, 5. ünite 1991, 6. üniteler ise 1992 yılında faaliyet göstermeye başlamıştır. Kömür ihtiyacı Ege Linyitleri İşletmesi (ELİ) tarafından karşılanmaktadır. 1-4 üniteleri 2.400 kcal/kg kaloriye sahip, %32 küllü ve %21 rutubetli, 5-6 üniteleri ise 1.500 kcal/kg kaloriye sahip, %52 küllü ve %18,8 rutubetli kömürlere göre dizayn edilmiştir. Santralin yıllık kömür tüketimi yaklaşık 8.000.000 ton olup, kömürün yakılması sonucu yıllık yaklaşık 3.600.000 ton kül açığa çıkmaktadır. Bu küllerin yaklaşık 270.000 tonu özel kuruluşlara satılmaktadır. Soma B Termik Santrali 22 Haziran 2015 tarihinde EÜAŞ bünyesinden ayrılarak özelleştirilmiştir <sup>616</sup>. Soma B Termik Santrali'nin 2. Ünitesi'nden (Soma B-2) 2015 yılı Haziran ayı içerisinde beş ardışık gün için uçucu kül numunesi tedarik edilmiştir.

### 4.7.1. Kimyasal analiz sonuçları

Soma B Termik Santrali'nin 2. Ünitesi'nden (Soma B-2) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-55'te verilmiştir. Beş ardışık günde toplanan ham uçucu küller üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçlarının ortalaması da karşılaştırma amaçlı olarak tabloda verilmiştir.

Tablo 4-55. Soma B-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
SiO <sub>2</sub>	36,48	49,90	48,97	39,02	41,51	43,18	43,32	42,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,61	23,57	23,46	18,78	20,17	20,72	20,71	20,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,03	4,22	4,10	4,40	4,28	4,21	4,14	4,40
S+A+F <sup>(1)</sup>	58,12	77,69	76,53	62,20	65,96	68,10	68,17	67,45
CaO	29,60	13,01	14,60	26,23	22,97	21,28	21,41	21,44
MgO	1,73	1,41	1,65	1,84	1,71	1,67	1,65	1,66
SO <sub>3</sub>	6,89	3,29	2,97	6,06	5,64	4,97	4,93	5,06
Na <sub>2</sub> O	0,37	0,24	0,23	0,40	0,38	0,32	0,28	0,26
K <sub>2</sub> O	1,72	1,96	1,80	1,76	1,69	1,79	1,71	1,70
TiO <sub>2</sub>	0,56	0,77	0,78	0,61	0,66	0,68	0,66	0,68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,21	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
KK <sup>(2)</sup>	0,71	0,80	0,79	0,59	0,70	0,72	0,71	1,07
Cl <sup>-</sup>	0,0106	0,0248	0,0106	0,0205	0,0106	0,0154	0,0161	0,0097
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,15	3,3	3,45	3,23	3,38	3,30	3,45	3,45
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	3,24	2,74
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	17,27	17,25
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	33,25	33,71

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(c)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-56'da verilmiştir.

Tablo 4-56. Soma B-2 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

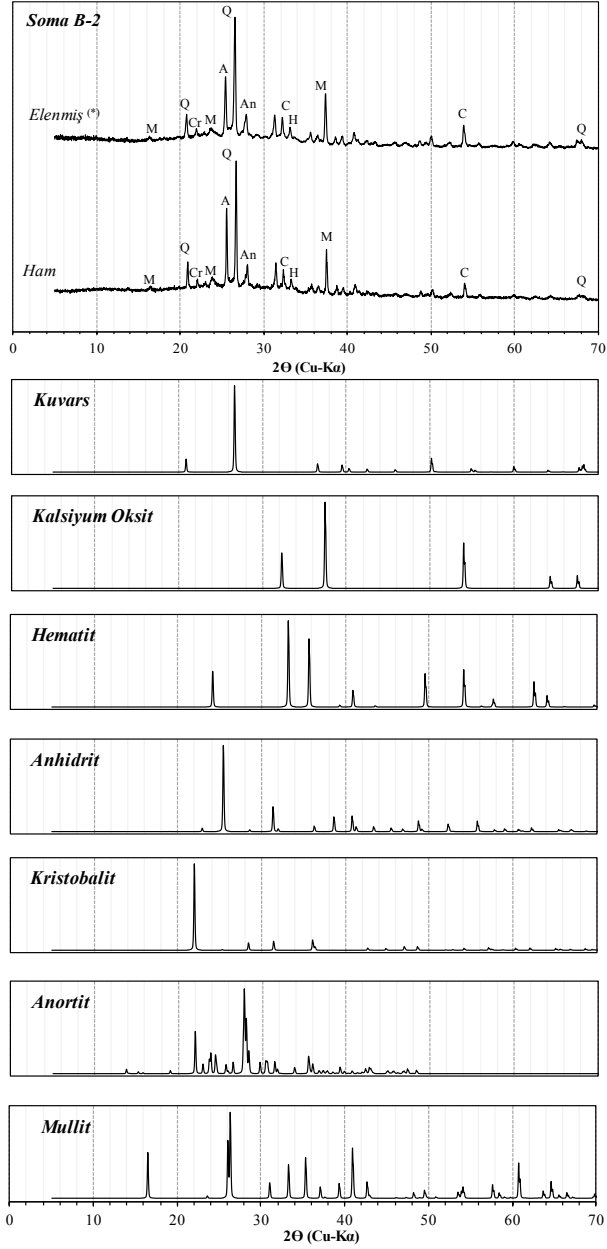
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Berilyum	Be	5,13	2,22
Vanadyum	V	154,94	159,97
Krom	Cr	578,04	79,39
Manganez	Mn	1061,41	191,99
Kobalt	Co	67,74	8,78
Nikel	Ni	1161,26	38,76
Bakır	Cu	62,42	24,77
Çinko	Zn	89,14	60,11
Arsenik	As	75,15	123,97
Selenyum	Se	2,00	6,18
Gümüş	Ag	1,87	2,15
Kadmium	Cd	0,51	2,00
Antimon	Sb	6,94	1,16
Baryum	Ba	564,32	411,13
Civa	Hg	0,26	0,76
Talyum	Tl	3,01	1,33
Kurşun	Pb	80,48	40,83

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.7.2. Mineralojik analiz sonuçları

Soma B-2 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-39'da verilmiştir.



(\*) Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-39. Soma B-2 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, An: Anortit, H: Hematit, C: Kalsiyum oksit, Cr: Kristobalit, Q: Kuvars, M: Mullit)



Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), kristobalit ( $SiO_2$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), mullit ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) ve anortit ( $(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$ ) olarak tespit edilmiştir. Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.7.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-57 ve Tablo 4-58'de verilmiştir.

Tablo 4-57. Ham Soma B-2 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2420
Kıvam	%	29,8
Priz başlangıcı <sup>(C)</sup>	dakika	265
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(C)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(A)</sup>Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-58. Soma B-2 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(+)(A)</sup>

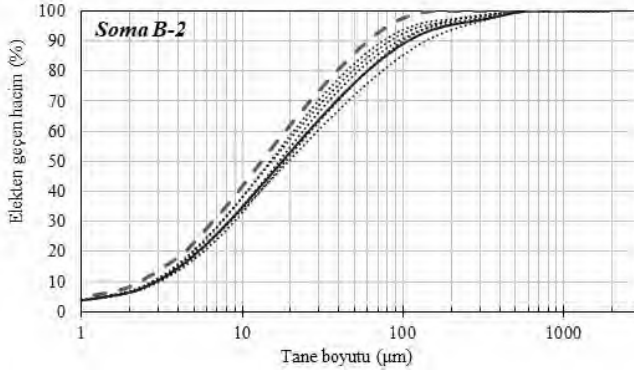
Özellik	Birim	Değer
<b>Elenmiş kül <sup>(C)</sup></b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	10,2
Aktivite indeksi		
28 gün	%	95,7
90 gün	%	105,8
<b>Ham kül</b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	13,3
Aktivite indeksi		
28 gün	%	86,4
90 gün	%	103,1

<sup>(C)</sup>125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(+)</sup>İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(A)</sup>Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-40'da gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  değerleri ise Tablo 4-59'da özetlenmiştir.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-40. Soma B-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-59. Soma B-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)</sup> <sup>(λ)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	$D[4,3]$
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	7,4	19,6	27,9	2,9	14,9	74,5	34,0
2. gün	11,7	26,6	35,2	3,0	18,5	99,4	40,7
3. gün	16,4	30,1	37,9	2,8	19,3	137,4	52,8
4. gün	8,7	21,5	29,8	2,8	15,3	82,4	37,4
5. gün	10,4	23,4	31,8	3,0	16,9	92,8	42,5
<i>Ortalama</i>	10,9	24,2	32,5	2,9	17,0	97,3	41,5
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	12,5	26,2	34,5	2,9	17,7	106,7	45,7
Elenmiş <sup>(*)</sup>	3,5	16,4	24,9	2,4	13,2	60,3	23,4

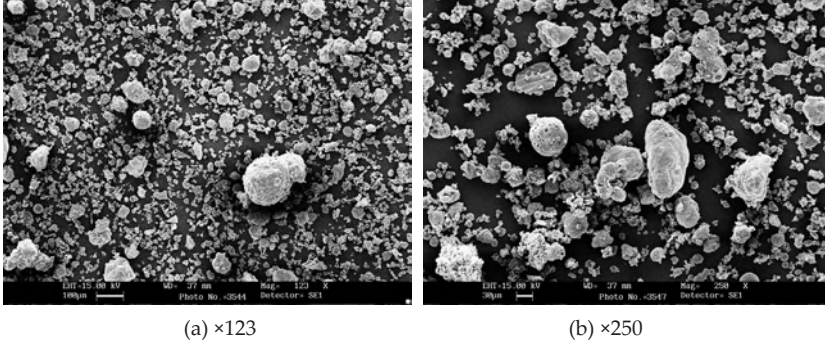
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(λ)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(+)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Soma B-2 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-50 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-20 mikron çapli küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-41).

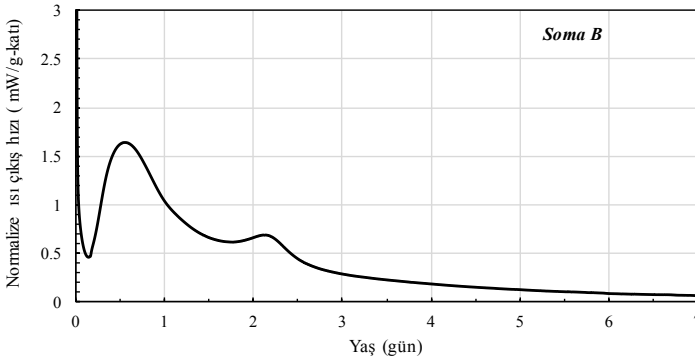


Şekil 4-41. Soma B-2 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Soma B-2 uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabilceği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar sürekli üretimde gerçekleşen güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.7.4. Ek analizler

Soma B-2 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısıları sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 298,1 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 329,0 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %82,54 ve %92,13'üne karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-42'de verilmiştir.



Şekil 4-42. Bir gram katı (%25 Soma B-2 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-60'da verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmüştür.

Tablo 4-60. Ağırılıkça %25 Soma B-2 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		<i>Ham kül</i>	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	48,3	53,9	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	46,2	57,0	41,5	55,3
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,6	6,9	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	6,4	7,5	8,9	10,2

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Haziran ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.8. TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİ

Tunçbilek Termik Santrali Kütahya ilinin Tavşanlı ilçesinin Tunçbilek köyü yakınlarında kurulmuştur. Her biri 24 MW gücünde 1. ve 2. üniteler 1956 yılında işletmeye alınmıştır; ancak, günümüzde bu iki ünite de artık çalışmamaktadır. 65 MW gücünde 3. ünite 1966 yılında, 150 MW güçlerindeki 4. ve 5. üniteler ise 1977-1978 yıllarında işletmeye açılmıştır. Toplam gücü 365 MW olan santralin kömür ihtiyacını Garp Linyit İşletmesi karşılamaktadır. Yapılan araştırmalar Tunçbilek kömürünün linyitle taş kömürü sınırında olduğunu ileri sürmüştür. Santralde linyite ek olarak fuel oil ve mazot da ikincil yakıt olarak kullanılabilir. Tunçbilek Termik Santrali 22.06.2015 tarihinde EÜAŞ bünyesinden devredilerek özelleştirilmiştir. Bu santralin 3. ve 5. ünitelerinden 2013 yılı Temmuz ayı, 4. ünitesinden ise 2015 yılı Mart ayı içerisinde beş ardışık güne ait uçucu kül numunesi tedarik edilmiştir.

### 4.8.1. Tunçbilek Termik Santrali 3. Ünite uçucu külü

#### 4.8.8.1. Kimyasal analiz sonuçları

Tunçbilek Termik Santrali'nin 3. Ünitesi'nden (Tunçbilek-3) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarda elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-61'de verilmiştir.

Tablo 4-61. Tunçbilek-3 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş ( <sup>(C)</sup> )
SiO <sub>2</sub>	52,70	53,68	53,32	53,75	53,54	53,40	52,98	54,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,36	19,20	19,02	19,18	19,38	19,23	19,38	20,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,56	13,98	13,54	13,44	13,70	13,64	13,38	13,34
S+A+F <sup>(1)</sup>	85,62	86,86	85,88	86,37	86,62	86,27	85,74	87,45
CaO	1,26	1,30	1,32	1,24	1,24	1,27	1,30	1,64
MgO	3,80	3,46	3,46	3,48	3,36	3,51	3,92	3,39
SO <sub>3</sub>	0,42	0,47	0,47	0,50	0,50	0,47	0,49	0,44
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,11
K <sub>2</sub> O	1,32	1,28	1,26	1,34	1,30	1,30	1,36	1,39
TiO <sub>2</sub>	1,08	1,10	1,08	1,12	1,12	1,10	1,08	1,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,20	0,20	0,20	0,21	0,24	0,21	0,20	0,26
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,32
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,12
KK <sup>(2)</sup>	4,95	4,81	5,49	5,37	5,19	5,16	4,93	3,76
Cl <sup>-</sup>	0,0053	0,0018	0,0035	0,0053	0,0018	0,0035	0,0035	0,0039
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	5,93	4,35	5,25	7,68	9,52	6,55	6,55	6,50
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	0,02	0,07
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	0,79	0,72
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	36,43	40,89

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(4)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(5)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Beş ardışık günde toplanan ham uçucu küller üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçlarının ortalaması da karşılaştırma amaçlı olarak tabloda verilmiştir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-62'de özetlenmiştir.

Tablo 4-62. Tunçbilek-3 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

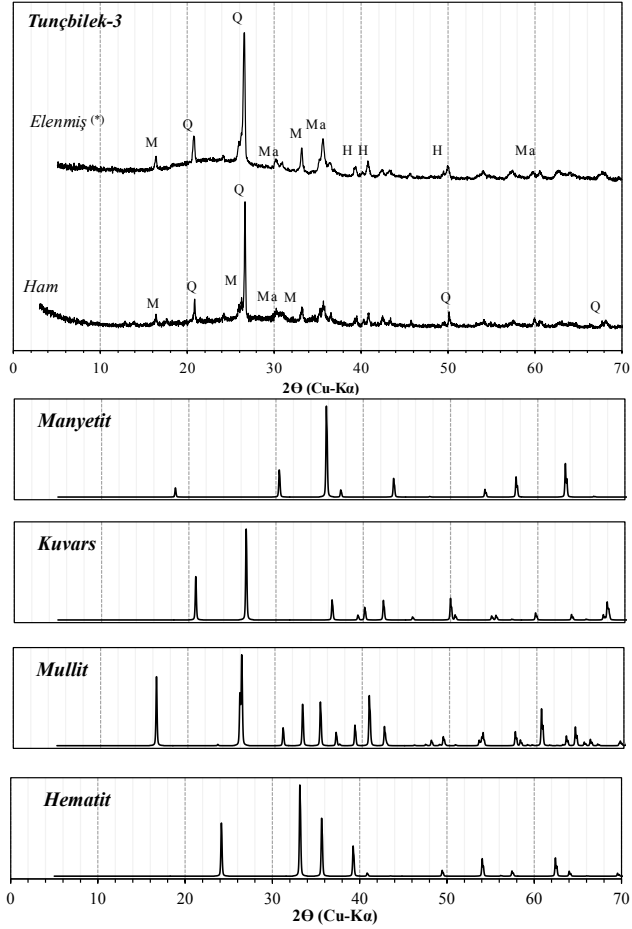
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	11,23	8,56
Vanadyum	V	380,35	325,98
Krom	Cr	1569,31	1338,16
Manganez	Mn	727,26	546,22
Kobalt	Co	152,86	123,01
Nikel	Ni	3201,18	2690,44
Bakır	Cu	147,81	114,45
Çinko	Zn	116,00	99,57
Arsenik	As	106,98	88,92
Selenyum	Se	4,01	2,71
Gümüş	Ag	1,35	0,32
Kadmium	Cd	0,43	0,38
Antimon	Sb	21,59	19,65
Baryum	Ba	249,55	285,51
Civa	Hg	0,56	0,14
Talyum	Tl	5,67	4,40
Kurşun	Pb	67,30	56,55

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 Yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.8.1.2. Mineralojik analiz sonuçları

Tunçbilek-3 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-43'te verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), manyetit ( $Fe_3O_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) ve mullit ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) olarak tespit edilmiştir. Uçucu külün x-ışını difraktogramında, camı fazın 22-28°2θ arasında maksimum duruma geldiği görülmüştür.



<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-43. Tunçbilek-3 uçucu külünün x-ışını difraktogramı (H: Hematit, Q: Kuvars, Ma: Manjetit, M: Mullit)

#### 4.8.1.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-63 ve Tablo 4-64'te verilmiştir.

Tablo 4-63. Ham Tunçbilek-3 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2150
Kıvam	%	34,6
Priz başlangıcı <sup>(c)</sup>	dakika	195
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(c)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-64. Tunçbilek-3 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(+)(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	24,4
Aktivite indeksi		
28 gün	%	79,1
90 gün	%	87,6
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	29,7
Aktivite indeksi		
28 gün	%	76,4
90 gün	%	94,2

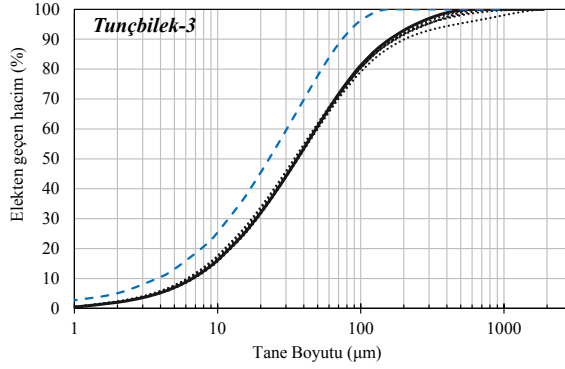
<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-44'te gösterilmiştir. Şekilden beş ardışık günde toplanan Tunçbilek-3 uçucu küllerinin tane boyu dağılımlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  çapları da Tablo 4-65'te verilmiştir.





<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-44. Tunçbilek-3 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-65. Tunçbilek-3 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (2)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	21,8	41,5	52,2	6,1	34,3	172,9	75,8
2. gün	22,2	42,5	53,2	6,2	35,5	168,8	68,5
3. gün	22,2	42,9	54,1	6,8	36,3	176,3	71,8
4. gün	22,1	42,6	53,5	6,4	35,7	171,1	72,8
5. gün	23,3	43,4	54,1	6,5	36,5	202,1	103,7
<i>Ortalama</i>	22,3	42,6	53,4	6,4	35,7	178,3	78,5
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	21,3	42,6	53,9	6,7	36,0	159,4	65,1
Elenmiş <sup>(3)</sup>	5,6	26,0	38,3	3,8	22,9	74,2	32,1

Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

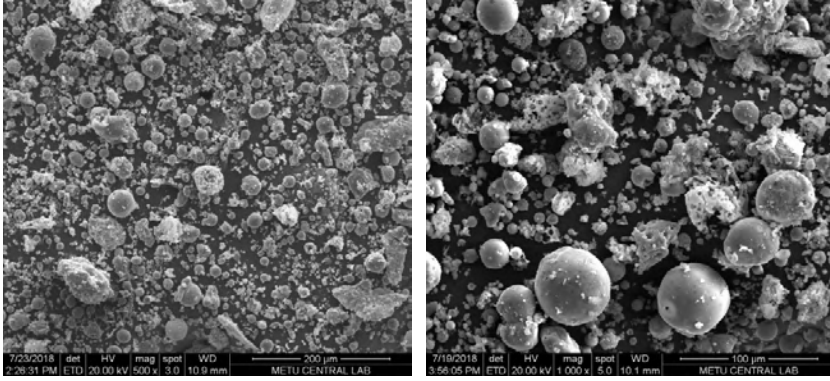
<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

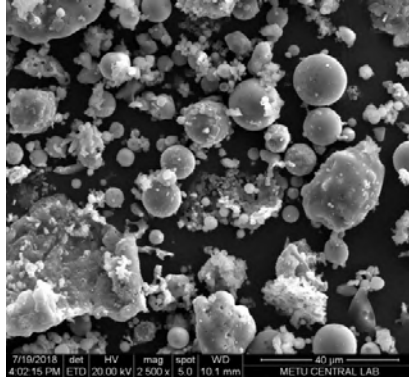
Tunçbilek-3 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-100 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapılu taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-15 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir. Küresel tanelerin bazılarının yüzeyi kristal ile kaplıdır (Şekil 4-45). Yine 25-30 mikron boyutlu düzensiz şekilli taneciklere de rastlanmıştır. Bu tanecikler, kömürü yakma sıcaklığı ve süresinin, kömürün inorganik kısmını oluşturan kil

minerallerinin ergimesi için yeterli olduğunu, ancak organik bileşen olan karbonun tamamen yanması için tam olarak yeterli gelmediğini göstermiştir. Tunçbilek-3 külünün kızdırma kaybı da diğer santralden temin edilen diğer küllere kıyasla daha yüksektir.



(a) ×500

(b) ×1k



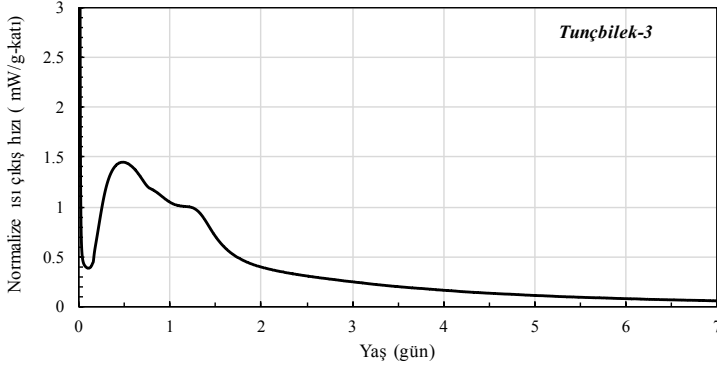
(c) ×2,5 k

Şekil 4-45. Tunçbilek-3 uçucu küllüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Tunçbilek-3 uçucu külünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabileceği öngörülmektedir.

#### 4.8.1.4. Ek analizler

Tunçbilek-3 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidratasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 296,7 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 305,2 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %82,14 ve %85,47'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-46'da verilmiştir.



Şekil 4-46 Bir gram katı (%25 Tunçbilek-3 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-66'da verilmiştir.

Tablo 4-66. Ağırlıkça % 25 Tunçbilek-3 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	37,2	47,3	36,7	50,6
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,3	7,2	7,4	9,1

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.8.2. Tunçbilek Termik Santrali 4. Ünite uçucu külü

### 4.8.2.1. Kimyasal analiz sonuçları

Tunçbilek Termik Santrali'nin 4. Ünitesi'nden (Tunçbilek-4) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarda elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-67'de verilmiştir.

Tablo 4-67. Tunçbilek-4 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(B)</sup>
SiO <sub>2</sub>	58,25	59,08	58,65	59,05	58,58	58,72	58,85	58,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,35	18,95	19,16	19,10	18,95	19,10	18,94	18,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,83	9,76	9,66	10,05	10,59	9,98	9,97	10,92
S+A+F <sup>(1)</sup>	87,43	87,79	87,47	88,20	88,12	87,80	87,76	87,48
CaO	3,18	3,01	3,05	2,88	3,14	3,05	3,12	3,20
MgO	4,68	4,45	4,45	4,44	4,50	4,50	4,41	4,70
SO <sub>3</sub>	0,48	0,52	0,48	0,35	0,34	0,43	0,45	0,47
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,12	0,11	0,09	0,09	0,11	0,11	0,17
K <sub>2</sub> O	2,05	2,02	2,01	1,97	1,85	1,98	1,96	1,77
TiO <sub>2</sub>	0,84	0,83	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,23	0,22	0,23	0,25	0,23	0,23	0,29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18
KK <sup>(2)</sup>	0,69	0,74	0,75	0,71	0,49	0,68	0,66	0,66
Cl <sup>-</sup>	0,0050	0,0043	0,0050	0,0057	0,0075	0,0055	0,0060	0,0061
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	23,6	29,2	33,65	31,92	24,2	28,51	29,67	25,54
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	0,01	0,04
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	2,77	2,74
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	43,24	43,37

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(4)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarda 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(5)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-68'de verilmiştir.

Tablo 4-68. Tunçbilek-4 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

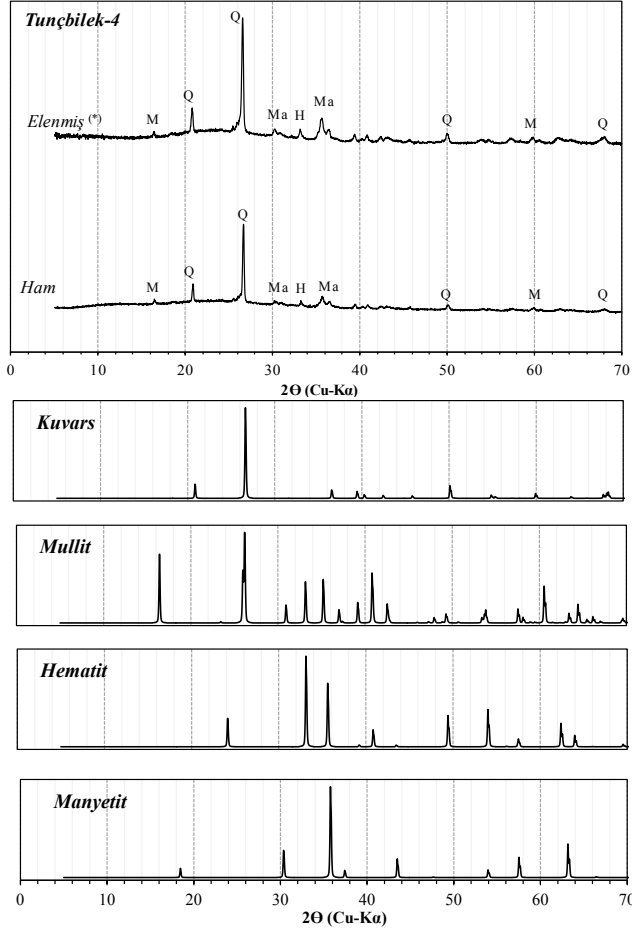
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Berilyum	Be	4,64	2,50
Vanadyum	V	165,55	117,46
Krom	Cr	599,58	455,39
Manganez	Mn	1075,95	652,55
Kobalt	Co	70,92	47,42
Nikel	Ni	1188,98	817,62
Bakır	Cu	74,28	43,50
Çinko	Zn	98,07	61,98
Arsenik	As	81,01	59,25
Selenyum	Se	2,09	6,70
Gümüş	Ag	0,43	3,86
Kadmium	Cd	0,53	0,43
Antimon	Sb	7,38	5,92
Baryum	Ba	566,47	384,03
Civa	Hg	0,31	1,38
Talyum	Tl	2,14	2,04
Kurşun	Pb	77,71	53,80

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.8.2.2. Mineralojik analiz sonuçları

Tunçbilek-4 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-47'de verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar kuvars ( $SiO_2$ ), mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) ve manyetit ( $Fe_3O_4$ ) olarak tespit edilmiştir.



<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-47. Tunçbilek-4 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (*H*: Hematit, *Q*: Kuvars, *Ma*: Magnetit / Magnezyoferrit, *M*: Mullit)

#### 4.8.2.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-69 ve Tablo 4-70'de verilmiştir.

Tablo 4-69. Ham Tunçbilek-4 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2140
Kıvam	%	28,8
Priz başlangıcı <sup>(b)</sup>	dakika	240
Hacim genleşmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(b)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-70. Tunçbilek-4 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (a)</sup>

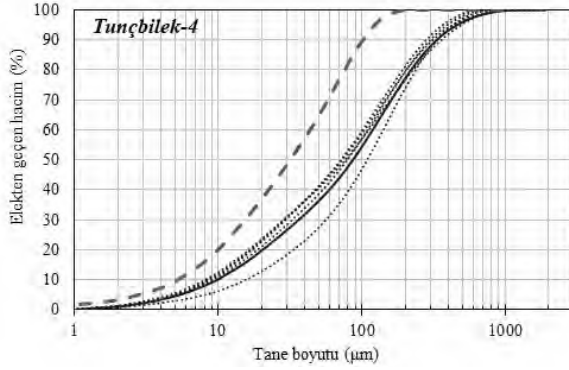
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	32,5
Aktivite indeksi		
28 gün	%	75,5
90 gün	%	86,3
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	47,7
Aktivite indeksi		
28 gün	%	75,9
90 gün	%	87,1

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(b)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-48'de gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  çapları da Tablo 4-71'de verilmiştir.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-48. Tunçbilek-4 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-71. Tunçbilek-4 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)</sup> <sup>(2)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	43,4	61,1	68,3	8,7	71,3	280,9	112,5
2. gün	44,3	61,0	67,9	8,6	72,8	311,4	124,8
3. gün	45,9	61,5	67,9	8,1	76,5	357,3	136,3
4. gün	46,2	63,7	70,4	9,2	78,9	298,8	121,4
5. gün	56,7	74,7	80,6	15,6	108,8	333,8	147,0
<i>Ortalama</i>	47,3	64,4	71,0	10,1	81,7	316,4	128,4
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	48,8	65,9	72,3	9,8	86,4	303,8	138,0
Elenmiş <sup>(*)</sup>	13,8	38,9	49,7	5,3	31,7	101,4	43,8

Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

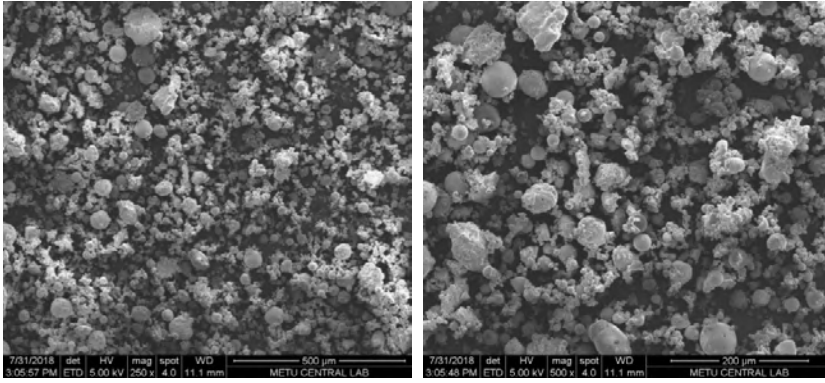
<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tunçbilek-4 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-120 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve düzensiz şekilli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-30 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-49).





(a)  $\times 250$

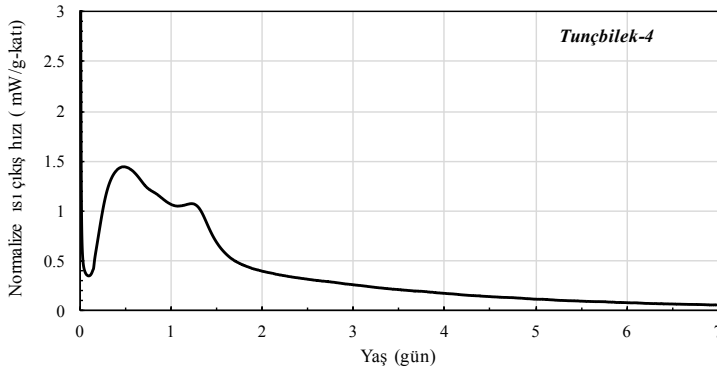
(b)  $\times 500$

Şekil 4-49. Tunçbilek-4 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Tunçbilek-4 uçucu külünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabileceği öngörülmektedir.

#### 4.8.2.4. Ek analizler

Tunçbilek-4 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile  $283,2 \text{ J/g-katı}$ , çözelti yöntemi ile  $291,8 \text{ J/g}$  olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %78,41 ve %81,71'ine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-50'de verilmiştir.



Şekil 4-50 Bir gram katı (%25 Tunçbilek-4 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı ( $\text{mW/g-katı}$ )

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-72'de verilmiştir.

Tablo 4-72. Ağırlıkça %25 Tunçbilek-4 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(A)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(C)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	35,5	46,6	36,5	46,7
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,7	7,1	8,3	9,6

<sup>(C)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2015 yılı Mart ayı içerisinde fedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

### 4.8.3. Tunçbilek Termik Santrali 5. Ünite uçucu külü

#### 4.8.3.1. Kimyasal analiz sonuçları

Tunçbilek Termik Santrali'nin 5. Ünitesi'nden (Tunçbilek-5) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-73'te verilmiştir.

Tablo 4-73. Tunçbilek-5 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(A)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(C)</sup>
SiO <sub>2</sub>	53,74	56,43	56,14	55,06	56,21	55,52	55,25	53,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,89	18,57	18,66	19,53	19,36	19,00	19,36	19,26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,46	11,73	11,70	11,69	11,38	11,39	11,61	12,72
S+A+F <sup>(1)</sup>	83,09	86,73	86,50	86,28	86,95	85,91	86,22	85,90
CaO	2,86	2,76	2,72	2,83	2,65	2,76	2,80	2,84
MgO	5,29	5,76	5,85	5,85	5,87	5,72	5,79	5,82
SO <sub>3</sub>	0,62	0,55	0,57	0,45	0,50	0,54	0,48	0,64
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,08	0,10	0,08	0,09	0,08	0,08	0,06
K <sub>2</sub> O	1,75	1,90	1,95	1,89	1,90	1,88	1,85	1,47
TiO <sub>2</sub>	0,79	0,81	0,82	0,77	0,79	0,80	0,79	0,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,27	0,22	0,21	0,20	0,22	0,22	0,23	0,26

Tablo 4-73. Tunçbilek-5 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup> (devamı)

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,17	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19
KK <sup>(b)</sup>	4,59	0,85	1,07	0,86	0,64	1,60	1,23	1,09
Cl <sup>-</sup>	0,0057	0,0028	0,0046	0,0035	0,0028	0,0039	0,0043	0,0043
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(c)</sup>	4,28	5,7	3,83	3,6	3,53	4,19	4,34	4,34
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	2,34	2,14
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	42,28	41,18

<sup>(a)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(b)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(c)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünebilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(c)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-74'te özetlenmiştir.

Tablo 4-74. Tunçbilek-5 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

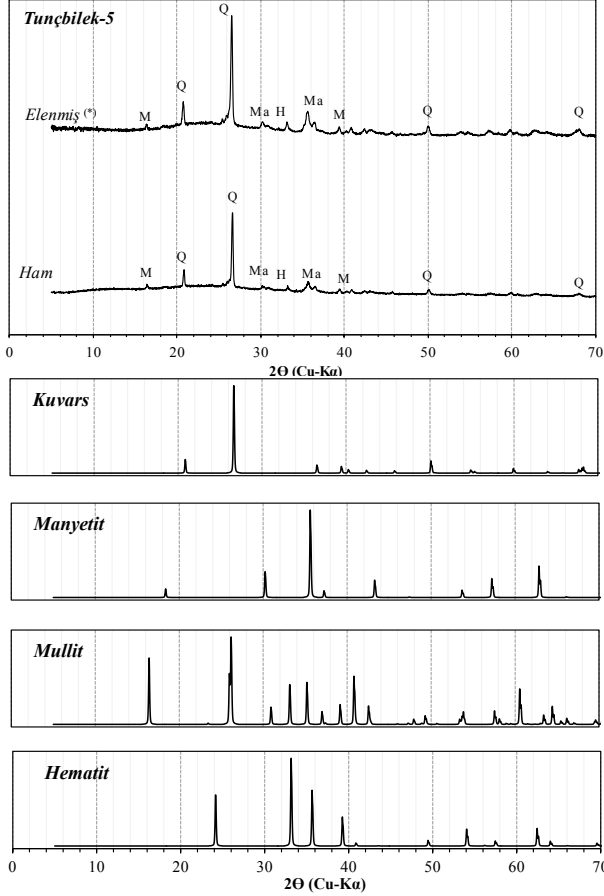
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Berilyum	Be	4,83	2,11
Vanadyum	V	161,26	116,17
Krom	Cr	982,56	682,30
Manganez	Mn	1080,33	668,97
Kobalt	Co	100,67	66,32
Nikel	Ni	1943,64	1372,23
Bakır	Cu	97,04	53,37
Çinko	Zn	103,17	69,05
Arsenik	As	53,72	46,38
Selenyum	Se	2,97	3,75
Gümüş	Ag	0,19	1,63
Kadmiyum	Cd	0,36	0,19
Antimon	Sb	6,83	5,30
Baryum	Ba	438,35	374,22
Civa	Hg	3,48	0,89
Talyum	Tl	2,98	1,67
Kurşun	Pb	58,36	40,84

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.8.3.2. Mineralojik analiz sonuçları

Tunçbilek-5 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-51' de verilmiştir.



(\*) Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-51. Tunçbilek-5 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (H: Hematit, Q: Kuvars, Ma: Manyetit, M: Mullit)

Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) ve manyetit ( $Fe_3O_4$ ) olarak tespit edilmiştir.

### 4.8.3.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-75 ve Tablo 4-76'da verilmiştir.

Tablo 4-75. Ham Tunçbilek-5 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2210
Kıvam	%	29,4
Priz başlangıcı <sup>(c)</sup>	dakika	205
Hacim genleşmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(c)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-76. Tunçbilek-5 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(+)(a)</sup>

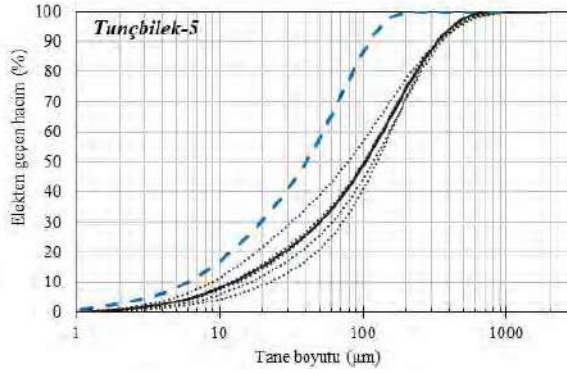
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	37,6
Aktivite indeksi		
28 gün	%	78,9
90 gün	%	85,9
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	49,3
Aktivite indeksi		
28 gün	%	78,3
90 gün	%	88,2

<sup>(c)</sup>125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup>İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-52' de gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile D<sub>10'</sub> D<sub>50'</sub> D<sub>90</sub> ve D[4,3] çapları da Tablo 4-77' de verilmiştir.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-52. Tunçbilek-5 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-77. Tunçbilek-5 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (2)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4,3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	54,1	72,3	78,6	13,3	101,6	334,6	146,0
2. gün	53,7	70,9	76,9	11,9	101,0	323,0	140,6
3. gün	46,2	63,0	69,7	8,8	78,3	334,1	133,5
4. gün	63,0	80,8	85,9	22,2	124,9	332,0	156,0
5. gün	59,2	76,3	81,8	16,2	117,5	352,0	157,1
<i>Ortalama</i>	55,2	72,7	78,6	14,5	104,7	335,2	146,6
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	54,7	72,0	77,9	12,4	103,9	329,2	141,8
Elenmiş <sup>(*)</sup>	17,5	45,9	57,1	6,0	40,0	110,6	50,1

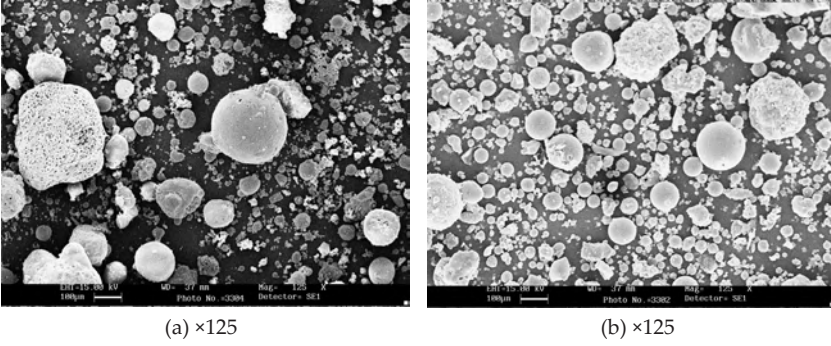
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(2)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tunçbilek-5 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-150 mikron arasında değişen boyutlarda çoğu küresel taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-30 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-53). Katı camsı taneciklerin yanı sıra yüzeyi kristal kaplı tanecikler ve az oranda da düzensiz şekilli taneciklere rastlanmıştır. Yanmamış karbon içeriğine rastlanmıştır.

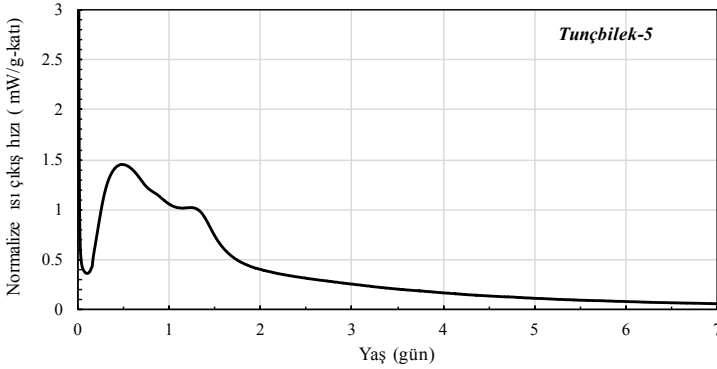


Şekil 4-53. Tunçbilek-5 uçucu küllüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Tunçbilek-5 uçucu küllünün TS EN 197-1, ASTM C618 ve TS EN 450-1 standartlarına istinaden kullanılabileceği öngörülmektedir.

#### 4.8.3.4. Ek analizler

Tunçbilek-5 uçucu küllünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 294,4 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 293,4 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %81,51 ve %82,16'sına karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-54'te verilmiştir.



Şekil 4-54 Bir gram katı (%25 Tunçbilek-5 uçucu küllü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-78'de verilmiştir.

Tablo 4-78. Ağırlıkça % 25 Tunçbilek-5 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		<i>Ham kül</i>	
	<i>28 gün</i>	<i>90 gün</i>	<i>28 gün</i>	<i>90 gün</i>
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	37,1	46,4	37,7	47,3
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,4	6,8	7,2	8,6

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.9. YATAĞAN TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİ

Muğla'nın Yatağan ilçesinde bulunan Yatağan Termik Santrali her biri 210 MW gücünde 3 üniteden oluşmaktadır. Bu ünitelerden ilki ve ikincisi 1983'te, üçüncüsü ise 1985'te işletmeye alınmıştır. Kömür ihtiyacı Güney Ege İşletmesi tarafından Muğla-Yatağan linyit havzalarında bulunan ocaklardan (Eskihisar, Tınaz ve Bağkaya) çıkarılan düşük kaliteli linyit kömürlerinden karşılanmaktadır. Santrale en yakın olan Eskihisar ocağının kömür kalitesi diğer ocaklara nazaran daha yüksektir. Pulverize kömür yakma teknolojisi ve 2001 yılında faaliyete geçen baca gazı desülfürizasyon sistemi bulunmaktadır <sup>617</sup>. EÜAŞ bünyesinde kurulan Yatağan Termik Santrali 2014 yılının sonlarında özelleştirilmiştir. Bu santralden 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde ardışık günlerde toplanan uçucu kül numuneleri tedarik edilmiştir.

### 4.9.1. Yatağan Termik Santrali 2. Ünite uçucu külü

#### 4.9.1.1. Kimyasal analiz sonuçları

Yatağan Termik Santrali'nin 2. Ünitesi'nden (Yatağan-2) yedi gün süreyle alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-79'da özetlenmiştir.



Tablo 4-79. Yatağan-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(1)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler								Karışım	
	1	2	3	4	5	6	7	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
SiO <sub>2</sub>	47,48	47,83	49,05	45,75	47,42	48,18	46,35	47,44	47,44	45,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,56	18,58	20,38	21,49	18,62	18,20	19,90	19,39	19,62	19,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,92	6,56	6,87	7,87	6,74	6,43	6,77	6,88	6,82	7,09
S+A+F <sup>(1)</sup>	72,96	72,97	76,30	75,11	72,78	72,81	73,02	73,71	73,88	71,85
CaO	17,77	16,93	13,63	13,72	16,97	17,29	17,19	16,21	15,93	16,95
MgO	2,89	3,35	2,89	2,71	3,43	3,11	3,14	3,07	3,06	2,98
SO <sub>3</sub>	2,06	1,64	1,73	3,17	1,62	1,22	2,21	1,95	1,96	2,99
Na <sub>2</sub> O	0,65	0,65	0,76	0,53	0,75	0,63	0,62	0,66	0,76	0,60
K <sub>2</sub> O	1,97	2,00	2,09	2,26	1,75	1,84	2,28	2,03	2,09	2,40
TiO <sub>2</sub>	0,76	0,72	0,75	0,80	0,72	0,70	0,73	0,74	0,72	0,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,21	0,18	0,20	0,21	0,21	0,18	0,20	0,20	0,22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,12	0,07	0,09	0,13	0,12	0,08	0,10	0,10	0,10
KK <sup>(2)</sup>	0,59	0,85	0,85	0,72	0,74	1,20	0,55	0,79	0,73	0,75
Cl <sup>-</sup>	0,0055	0,0071	0,0089	0,0071	0,0089	0,0106	0,0053	0,0076	0,0080	0,0080
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	3,53	3,3	3,08	3,38	3,45	3	3,08	3,26	3,30	3,30
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	2,34	1,93
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	13,82	14,49
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	31,28	31,08

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

<sup>(2)</sup> (KK = Kızdırma Kaybı)

<sup>(3)</sup> (Ç. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten elenmiştir.

<sup>(4)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-80'de verilmiştir.

Tablo 4-80. Yatağan-2 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	4,17	3,37
Vanadyum	V	159,21	139,79
Krom	Cr	162,22	137,29
Manganez	Mn	596,04	482,67
Kobalt	Co	30,12	19,72
Nikel	Ni	125,83	106,50
Bakır	Cu	65,71	52,41
Çinko	Zn	263,26	123,95
Arsenik	As	91,44	104,04
Selenyum	Se	6,11	4,79
Gümüş	Ag	0,52	0,44
Kadmiyum	Cd	0,98	0,92
Antimon	Sb	8,20	9,55
Baryum	Ba	531,51	509,26
Civa	Hg	0,23	0,06
Talyum	Tl	1,10	1,27
Kurşun	Pb	26,63	30,32

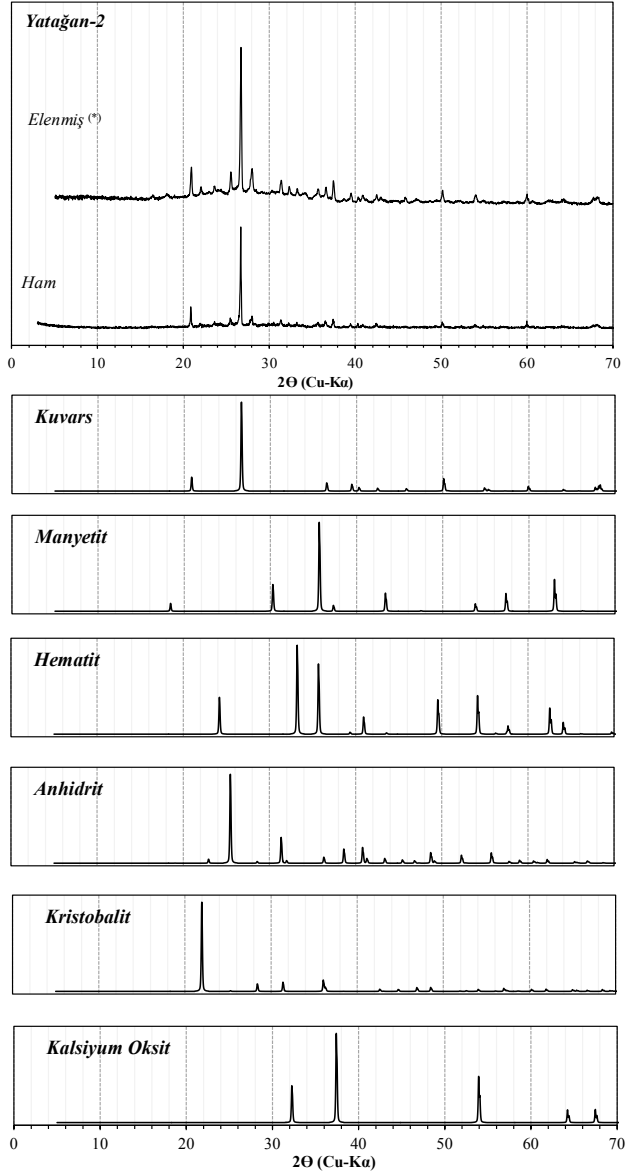
<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.9.1.2. Mineralojik analiz sonuçları

Yatağan-2 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-55'te verilmiştir.





<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-55. Yatağan-2 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (An: Anhidrit, H: Hematit, C: Kalsiyum oksit, Cr: Kristobalit, Q: Kuvars, Ma: Magnetit)

Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), manyetit ( $Fe_3O_4$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ) ve kristobalit ( $SiO_2$ ) olarak tespit edilmiştir.

#### 4.9.1.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-81 ve Tablo 4-82'de verilmiştir.

Tablo 4-81. Ham Yatağan-2 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2210
Kıvam	%	29,4
Priz başlangıcı <sup>(*)</sup>	dakika	205
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(\*)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(A)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-82. Yatağan-2 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (A)</sup>

Özellik	Birim	Değer
<b>Elenmiş kül <sup>(*)</sup></b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	35,0
Aktivite indeksi		
28 gün	%	78,3
90 gün	%	86,1
<b>Ham kül</b>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	50,1
Aktivite indeksi		
28 gün	%	70,7
90 gün	%	81,9

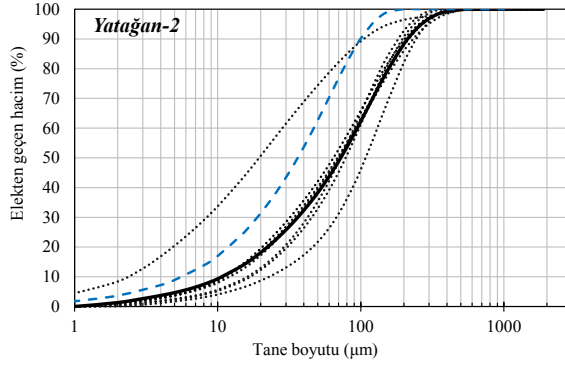
<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(A)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-56'da gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  çapları da Tablo 4-83'te verilmiştir.





<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-56. Yatağan-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-83. Yatağan-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)</sup> <sup>(2)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4,3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	40,6	62,9	71,6	11,4	68,8	216,8	94,3
2. gün	43,8	70,3	79,0	16,9	78,4	195,5	94,3
3. gün	41,3	63,6	72,6	12,2	69,9	232,4	100,5
4. gün	12,7	28,2	36,8	2,4	19,5	104,8	44,6
5. gün	39,9	68,2	77,8	16,1	72,2	181,6	87,4
<i>Ortalama</i>	58,9	80,5	86,1	22,9	108,2	243,7	123,1
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	41,9	64,6	72,9	10,7	72,4	212,5	95,5
Elenmiş <sup>(*)</sup>	13,4	41,7	54,4	5,7	36,3	99,5	45,4

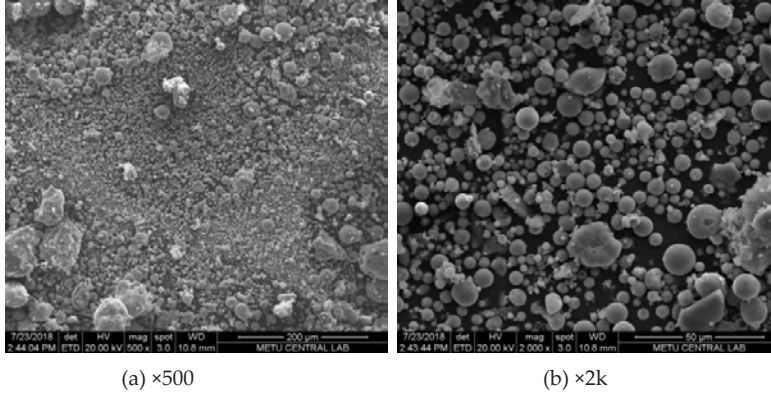
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(2)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Yatağan-2 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-100 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-57).

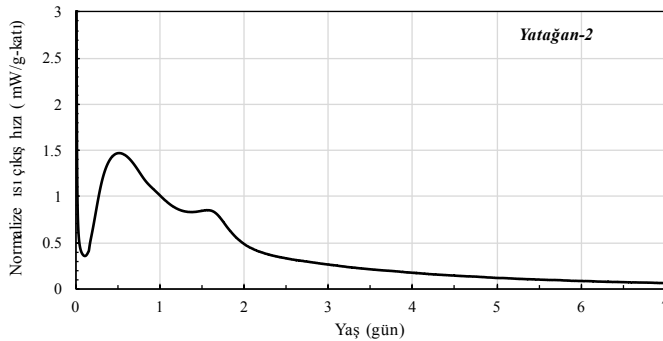


Şekil 4-57. Yatağan-2 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Yatağan-2 uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabilceği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre sürekli üretimde gerçekleşen güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir. Aktivite indeksi analizlerinde hem ham kül hem de laboratuvar ortamında 125 µm'lik elekten elenen ham kül (elenmiş kül) kullanıldığı için bu sonuçlar uygunluk değerlendirilmesine alınmamalıdır. Aktivite indeksi analiz sonuçları TS EN 450-1 standardında belirtilen yöntemler (separasyon, eleme, öğütme vb.) uygulanarak proses sırasında arttırılabilmektedir.

#### 4.9.1.4. Ek analizler

Yatağan-2 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 259,7 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 254,9 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %71,92 ve %71,39'una karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-58'de verilmiştir.



Şekil 4-58 Bir gram katı (%25 Yatağan-2 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-84'te verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmüştür.

Tablo 4-84. Ağırlıkça %25 Yatağan-2 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		<i>Ham kül</i>	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	36,8	46,5	34,0	43,9
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,4	6,9	7,7	8,9

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.9.2. Yatağan Termik Santrali 3. Ünite uçucu külü

### 4.9.2.1. Kimyasal analiz sonuçları

Yatağan Termik Santrali'nin 3. Ünitesi'nden (Yatağan-3) beş gün süreyle alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarda elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-85'te özetlenmiştir.

Tablo 4-85. Yatağan-3 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup>

<b>Bileşenler</b> (ağırlıkça %)	<b>Günlük numuneler</b>						<b>Karışım</b>	
	1	2	3	4	5	<i>Ort.</i>	<b>Ham</b>	<b>Elenmiş <sup>(c)</sup></b>
SiO <sub>2</sub>	48,82	48,03	49,29	48,27	52,16	49,31	49,24	47,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,45	19,06	19,13	18,49	18,24	18,87	18,81	19,77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,85	8,40	7,62	7,03	6,83	7,55	7,38	7,70
S+A+F <sup>(1)</sup>	76,12	75,49	76,04	73,79	77,23	75,73	75,43	74,69
CaO	13,72	13,30	14,01	16,61	14,05	14,34	14,34	15,34
MgO	2,84	2,75	2,65	2,98	2,32	2,71	2,75	2,77
SO <sub>3</sub>	2,11	2,91	2,19	1,81	1,07	2,02	1,98	2,22
Na <sub>2</sub> O	0,67	0,55	0,67	0,67	0,92	0,70	0,71	0,62
K <sub>2</sub> O	3,02	2,89	2,89	2,35	2,55	2,74	2,72	2,43
TiO <sub>2</sub>	0,79	0,81	0,79	0,75	0,77	0,78	0,78	0,77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,20	0,17	0,21	0,17	0,18	0,19	0,23

Tablo 4-85. Yatağan-3 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup> (devamı)

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,09	0,07	0,12	0,06	0,08	0,08	0,08
KK <sup>(b)</sup>	0,39	0,94	0,39	0,62	0,51	0,57	0,53	0,72
Cl	0,0082	0,0085	0,0135	0,0075	0,0114	0,0101	0,0109	0,0149
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(b)</sup>	3,3	3,23	3,3	3,75	3,15	3,35	3,23	3,23
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	1,70	1,38
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	12,52	13,00
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	33,91	32,56

<sup>(a)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(b)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(c)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(d)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(e)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

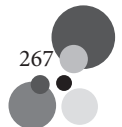
Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-86'da verilmiştir.

Tablo 4-86. Yatağan-3 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
Berilyum	Be	4,26	2,97
Vanadyum	V	156,28	135,86
Krom	Cr	166,35	134,49
Manganez	Mn	488,07	395,61
Kobalt	Co	23,39	18,50
Nikel	Ni	129,41	92,65
Bakır	Cu	64,21	49,14
Çinko	Zn	138,32	118,64
Arsenik	As	94,85	102,03
Selenyum	Se	4,09	3,70
Gümüş	Ag	0,93	1,23
Kadmium	Cd	1,25	0,95
Antimon	Sb	8,96	9,10
Baryum	Ba	569,63	492,96
Civa	Hg	0,21	0,05
Talyum	Tl	1,84	1,34
Kurşun	Pb	41,15	32,12

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

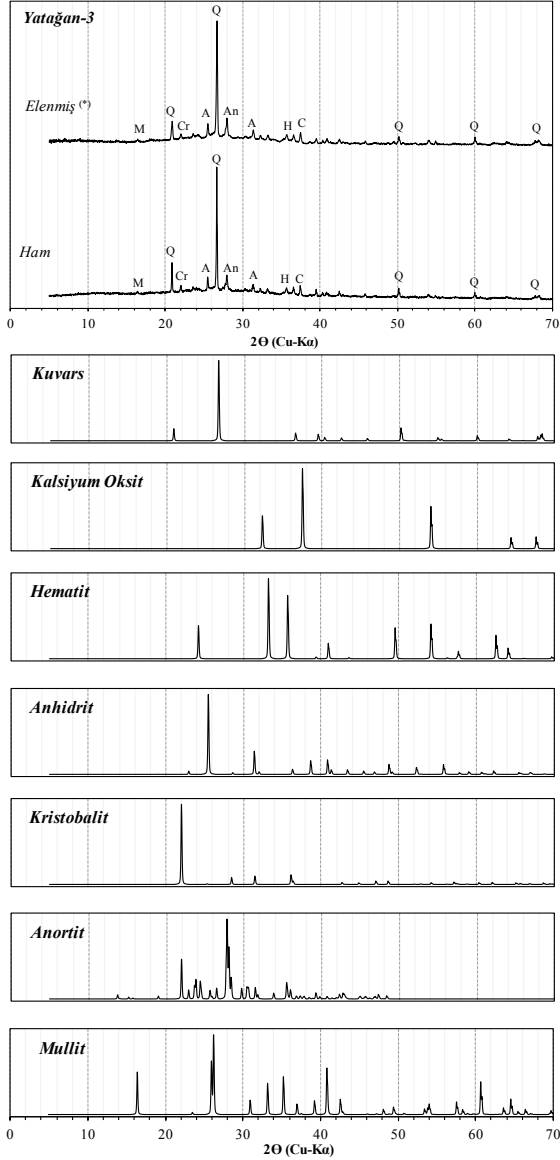
<sup>(d)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.





#### 4.9.9.2. Mineralojik analiz sonuçları

Yatağan-3 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-59'da verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), kristobalit ( $SiO_2$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), mullit ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) ve anortit ( $(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$ ) olarak tespit edilmiştir.



(\*) Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-59. Yatağan-3 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, An: Anortit, H: Hematit, C: Kalsiyum oksit, Cr: Kristobalit, Q: Kuvars, M: Mullit)

#### 4.9.2.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-87 ve Tablo 4-88'de verilmiştir.

Tablo 4-87. Ham Yatağan-3 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(1)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2360
Kıvam	%	28,6
Priz başlangıcı <sup>(2)</sup>	dakika	235
Hacim genleşmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(1)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(2)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-88. Yatağan-3 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (2)</sup>

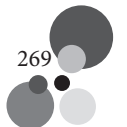
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(*)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	31,3
Aktivite indeksi		
28 gün	%	77,2
90 gün	%	86,3
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	44,9
Aktivite indeksi		
28 gün	%	80,1
90 gün	%	88,9

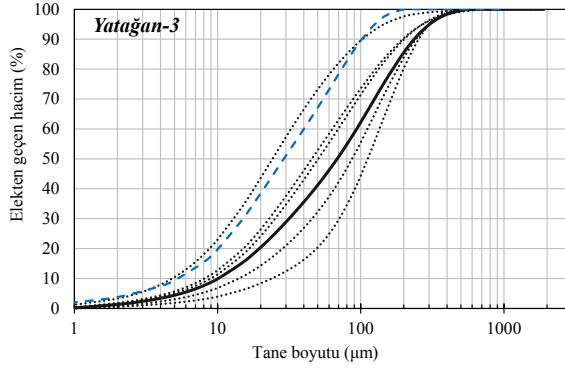
<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-60'da gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile D<sub>10'</sub> D<sub>50'</sub> D<sub>90</sub> ve D[4,3] çapları da Tablo 4-89'da verilmiştir.





<sup>(1)</sup> Noktallı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-60. Yatağan-3 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Yatağan-3 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-90 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-61).

Tablo 4-89. Yatağan-3 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(\*) (2)</sup>

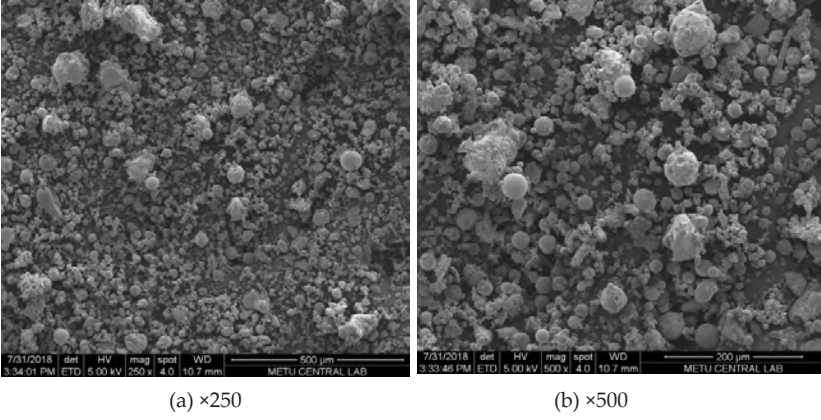
Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	29,5	50,4	60,6	8,1	45,5	195,7	80,5
2. gün	12,5	29,9	40,6	4,8	24,2	102,5	44,0
3. gün	31,9	53,5	63,5	9,0	50,5	200,9	82,2
4. gün	48,7	70,4	77,8	14,2	87,0	243,0	110,7
5. gün	60,5	81,7	86,8	23,9	111,9	253,7	127,9
<i>Ortalama</i>	36,6	57,2	65,9	12,0	63,8	199,2	89,1
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	41,3	61,5	69,7	10,1	68,4	236,0	100,0
Elenmiş <sup>(*)</sup>	13,5	36,3	47,0	5,3	29,0	101,7	42,8

Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

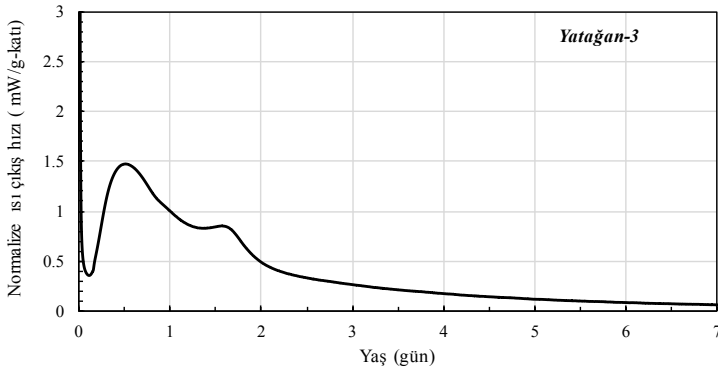


Şekil 4-61. Yatağan-3 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Yatağan-3 uçucu külünün TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına istinaden kullanılabileceği öngörülmektedir. TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.9.2.4. Ek analizler

Yatağan-3 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısıları sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 301,3 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 288,8 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %83,43 ve %80,87'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-62'de verilmiştir.



Şekil 4-62 Bir gram katı (%25 Yatağan-3 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-90'da verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmüştür.

Tablo 4-90. Ağırlıkça %25 Yatağan-3 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	<i>Elenmiş kül</i> <sup>(c)</sup>		<i>Ham kül</i>	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	36,3	46,6	38,5	47,7
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,3	7,4	8,2	9,2

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.10 YENİKÖY TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLLERİ

Yeniköy Termik Santrali, Muğla'nın Milas ilçesinde bölgede bulunan kömür rezervlerinden yararlanmak üzere EÜAŞ bünyesinde kurulmuştur. Her biri 210 MW gücünde 2 üniteden oluşan termik santralin toplam kurulu gücü 420 MW'tır. Santralin 1. ünitesi 1986 yılında, 2. ünitesi ise 1987 yılında devreye alınmıştır. Ana yakıt olarak yerli linyitin kullanıldığı santralde pulverize kömür yakma teknolojisi ve 2007 yılında faaliyete geçen baca gazı arıtma sistemi bulunmaktadır. Kömür ihtiyacı Sekköy, İzikköy, Akbelen ve Karacahisar ocaklarından karşılanan santralde ortalama yıllık olarak 3,5 milyon ton kömür yakılmaktadır. Yeniköy Termik Santrali 2014 yılı itibarıyla özelleştirilmiştir <sup>614</sup>. Bu santralden 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde beş ardışık güne ait uçucu kül numunesi tedarik edilmiştir.

### 4.10.1 Yeniköy Termik Santrali 1. Ünite uçucu külü

#### 4.10.1.1. Kimyasal analiz sonuçları

Yeniköy Termik Santrali'nin 1. Ünitesi'nden (Yeniköy-1) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarında elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-91'de sunulmuştur.

Tablo 4-91. Yeniköy-1 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(2)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
SiO <sub>2</sub>	26,47	24,76	31,73	21,68	25,87	26,10	25,93	24,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,11	11,21	13,95	9,84	10,77	11,58	11,40	11,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,26	4,87	5,11	4,47	4,57	4,86	4,85	4,79
S+A+F <sup>(1)</sup>	43,84	40,84	50,79	35,99	41,21	42,53	42,18	40,68
CaO	39,93	42,78	33,91	45,42	40,98	40,60	40,52	42,30
MgO	2,02	1,95	1,87	1,87	1,95	1,93	1,93	1,89
SO <sub>3</sub>	8,33	9,15	7,35	9,96	9,32	8,82	8,97	9,46
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,33	0,96	0,69	0,39	0,55	0,78	0,32
K <sub>2</sub> O	1,31	1,21	1,50	1,12	1,24	1,28	1,40	1,18
TiO <sub>2</sub>	0,52	0,49	0,62	0,42	0,48	0,51	0,51	0,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	0,31	0,29	0,27	0,26	0,28	0,28	0,34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08
KK <sup>(2)</sup>	2,39	2,42	2,06	3,44	3,18	2,70	2,53	3,17
Cl <sup>-</sup>	0,0251	0,0223	0,0506	0,0180	0,0520	0,0336	0,0288	0,0288
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	4,8	4,88	4,65	5,25	4,88	4,89	5,18	5,18
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	9,59	9,71
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	31,71	33,36
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	20,84	19,55

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(\*)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-92'de verilmiştir.

Tablo 4-92. Yeniköy-1 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

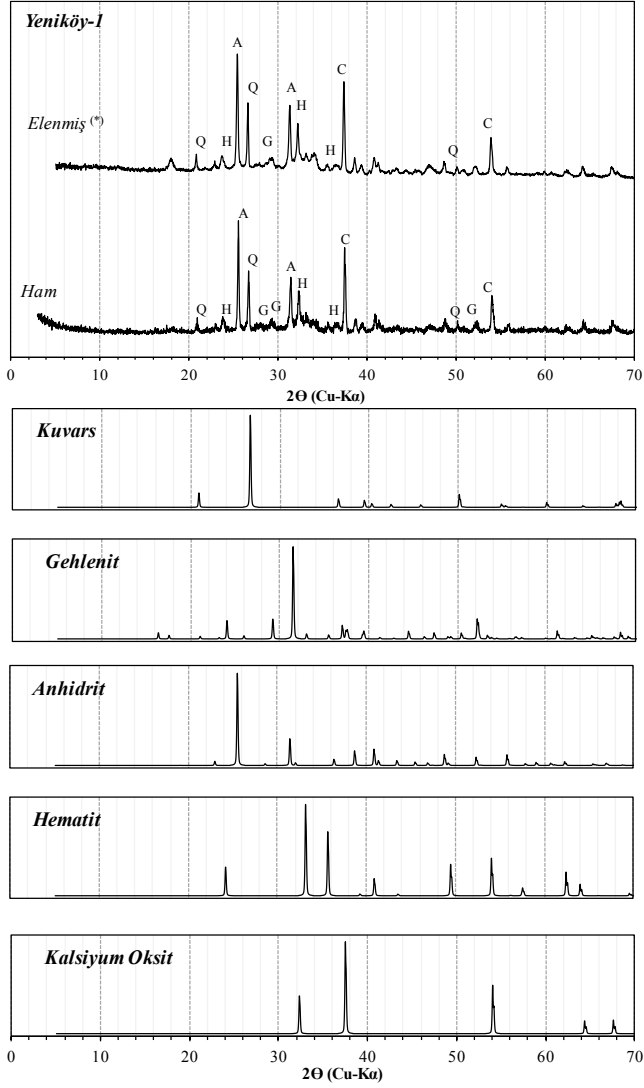
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(b)</sup>
Berilyum	Be	2,22	4,45
Vanadyum	V	193,92	143,22
Krom	Cr	188,73	145,04
Manganez	Mn	552,51	294,13
Kobalt	Co	11,96	8,52
Nikel	Ni	90,56	61,10
Bakır	Cu	32,96	19,09
Çinko	Zn	72,79	38,39
Arsenik	As	45,35	36,73
Selenyum	Se	10,70	6,70
Gümüş	Ag	13,17	1,99
Kadmium	Cd	0,97	0,61
Antimon	Sb	11,45	9,67
Baryum	Ba	284,48	178,82
Civa	Hg	0,33	0,49
Talyum	Tl	1,13	0,80
Kurşun	Pb	22,80	18,67

<sup>(a)</sup> 125 µm'tik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(b)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.10.1.2. Mineralojik analiz sonuçları

Yeniköy-1 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-63'te verilmiştir. Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), gehlenit ( $Ca_2Al[AlSiO_7]$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ) ve anhidrit ( $CaSO_4$ ) olarak tespit edilmiştir.



<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 463. Yeniköy-1 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, G: Gehlenit, H: Hematit, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars)



#### 4.10.1.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-93 ve Tablo 4-94'te verilmiştir.

Tablo 4-93. Ham Yeniköy-1 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2750
Kıvam	%	29,4
Priz başlangıcı <sup>(*)</sup>	dakika	200
Hacim genişmesi	mm	1,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(\*)</sup>Referans Cimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-94. Yeniköy-1 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(\*) (a)</sup>

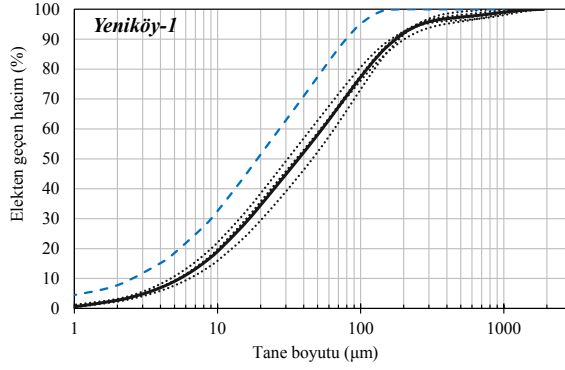
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(*)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	20,4
Aktivite indeksi		
28 gün	%	87,2
90 gün	%	96,3
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	31,0
Aktivite indeksi		
28 gün	%	92,0
90 gün	%	97,1

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-64'te gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  çapları da Tablo 4-95'te verilmiştir.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-64. Yeniköy-1 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-95. Yeniköy-1 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)</sup> <sup>(3)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D[4.3]
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	25,0	44,0	52,7	5,3	35,6	169,5	76,0
2. gün	26,5	44,2	52,6	5,3	35,6	201,6	98,6
3. gün	30,1	50,6	59,4	6,4	46,0	185,2	78,1
4. gün	21,9	40,0	49,1	4,7	30,9	162,1	90,2
5. gün	25,5	44,7	53,5	5,4	36,6	175,9	86,9
<i>Ortalama</i>	25,8	44,7	53,5	5,4	36,9	178,9	86,0
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	25,6	44,8	53,6	5,5	36,8	175,0	84,9
Elenmiş <sup>(*)</sup>	6,9	25,7	35,3	2,6	19,0	78,9	31,1

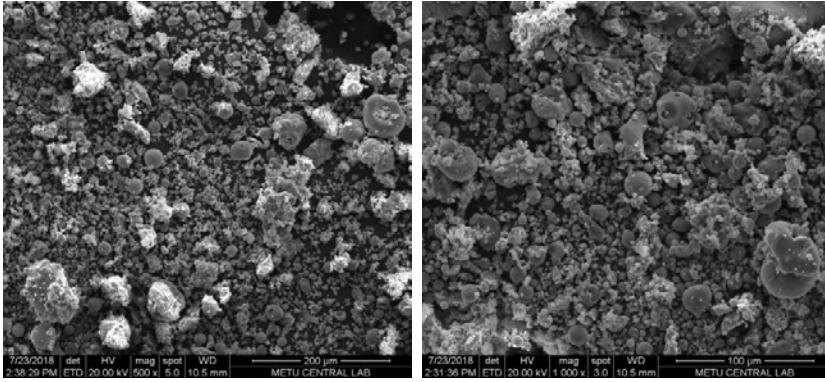
Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

<sup>(1)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(3)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Yeniköy-1 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-80 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapıli taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-65).



(a) ×500

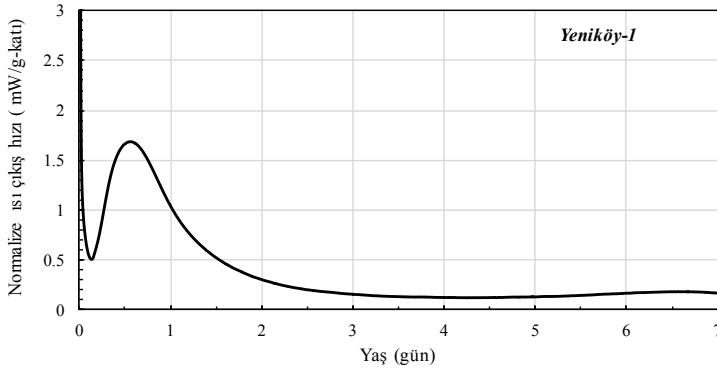
(b) ×1k

Şekil 4-65. Yeniköy-1 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Yeniköy-1 uçucu külünün TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.10.1.4. Ek analizler

Yeniköy-1 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 298,7 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 283,6 J/g olarak ölçülmüştür.



Şekil 4-66. Bir gram katı (%25 Yeniköy-1 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %82,70 ve %79,42'sine karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-66'da verilmiştir.

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-96'da verilmiştir.

Tablo 4-96. Ağırlıkça %25 Yeniköy-1 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	Elenmiş kül <sup>(c)</sup>		Ham kül	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	41,0	52,0	44,2	52,1
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,2	6,7	7,0	8,8

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.10.2. Yeniköy Termik Santrali 2. Ünite uçucu külü

### 4.10.2.1. Kimyasal analiz sonuçları

Yeniköy Termik Santrali'nin 2. Ünitesi'nden (Yeniköy-2) alınan günlük ham numuneler, hazırlanan ham karışım ve laboratuvarda elenerek hazırlanan elenmiş karışım numuneleri üzerinde yapılan kimyasal analizlerin sonuçları Tablo 4-97'de özetlenmiştir.

Tablo 4-97. Yeniköy-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup>

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(c)</sup>
SiO <sub>2</sub>	26,08	21,40	29,36	25,73	27,57	26,03	25,93	25,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,85	9,53	14,35	11,87	13,89	12,10	12,07	11,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,33	4,72	5,09	4,98	5,35	5,09	5,05	5,17
S+A+F <sup>(1)</sup>	42,26	35,65	48,80	42,58	46,81	43,22	43,05	41,64
CaO	40,58	46,52	35,86	40,71	37,83	40,30	40,61	42,36
MgO	2,05	2,09	1,89	2,02	2,05	2,02	2,02	1,98
SO <sub>3</sub>	8,76	9,18	8,11	7,71	7,04	8,16	8,18	8,73
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,22	0,26	0,30	0,56	0,32	0,29	0,27
K <sub>2</sub> O	1,14	0,84	1,23	0,93	1,31	1,09	1,04	1,08
TiO <sub>2</sub>	0,49	0,41	0,56	0,45	0,53	0,49	0,49	0,49
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,33	0,34	0,31	0,32	0,34	0,33	0,33	0,34

Tablo 4-97. Yeniköy-2 uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları <sup>(a)</sup> (devamı)

Bileşenler (ağırlıkça %)	Günlük numuneler						Karışım	
	1	2	3	4	5	Ort.	Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,09	0,09	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09
KK <sup>(2)</sup>	4,00	4,51	2,82	3,97	3,38	3,74	3,11	2,94
Cl <sup>-</sup>	0,0109	0,0071	0,0053	0,0304	0,0035	0,0114	0,0108	0,0108
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(3)</sup>	4,13	3,45	3,3	3,6	3,75	3,65	3,60	3,60
Serbest CaO	-	-	-	-	-	-	10,76	10,35
Reaktif CaO	-	-	-	-	-	-	31,59	33,28
Reaktif SiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	20,45	20,31

<sup>(1)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(2)</sup> (KK= Kızdırma Kaybı); <sup>(3)</sup> (Ç.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(\*)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde ağır metal analizi de yapılmış, sonuçlar Tablo 4-98'de verilmiştir.

Tablo 4-98. Yeniköy-2 uçucu külü ağır metal konsantrasyon değerleri <sup>(a)</sup>

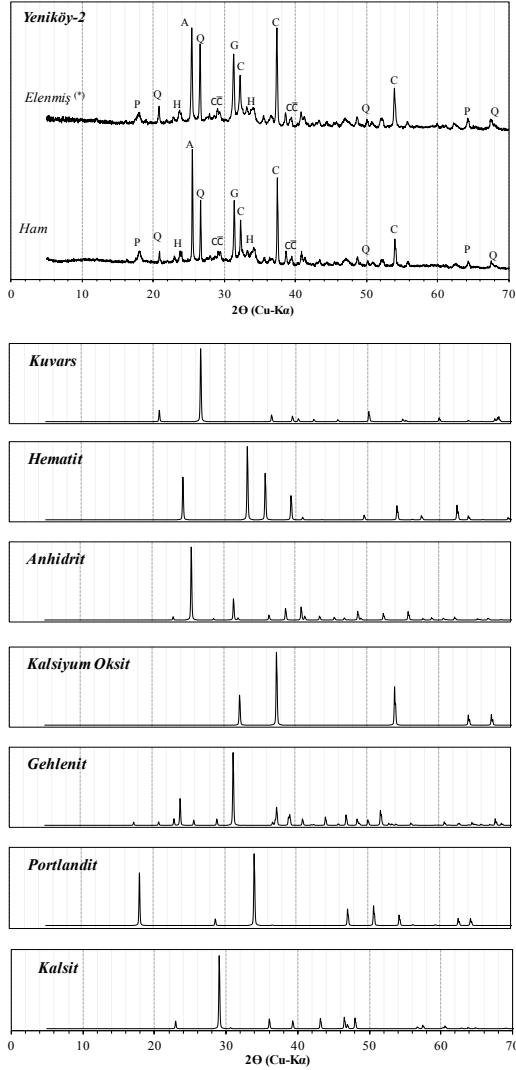
Element	Sembol	Konsantrasyon (mg/kg)	
		Ham	Elenmiş <sup>(*)</sup>
Berilyum	Be	2,34	2,35
Vanadyum	V	240,72	199,40
Krom	Cr	231,36	186,29
Manganez	Mn	633,83	426,53
Kobalt	Co	13,76	10,66
Nikel	Ni	108,63	80,06
Bakır	Cu	44,36	30,50
Çinko	Zn	83,59	76,95
Arsenik	As	52,72	46,86
Selenyum	Se	13,58	10,28
Gümüş	Ag	7,53	0,20
Kadmium	Cd	0,99	0,88
Antimon	Sb	13,29	13,09
Baryum	Ba	425,95	265,20
Civa	Hg	0,22	0,17
Talyum	Tl	1,36	1,17
Kurşun	Pb	22,04	29,26

<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

#### 4.10.2.2. Mineralojik analiz sonuçları

Yeniköy-2 uçucu külünün (karışım numunesi) mineralojik bileşimine ait X-ışını difraktogramı Şekil 4-67'de verilmiştir.



<sup>(A)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-67. Yeniköy-2 uçucu külünün X-ışını difraktogramı (A: Anhidrit, G: Gehlenit, H: Hematit, C: Kalsit, C: Kalsiyum oksit, Q: Kuvars, P: Portlandit)

Buna göre, uçucu külün genel olarak kristal fazlar ve camsı yapı içerdiği görülmektedir. Kristalize fazlar, kuvars ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit ( $CaO$ ), gehlenit ( $Ca_2Al_2Si_2O_7$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), anhidrit ( $CaSO_4$ ), portlandit ( $Ca(OH)_2$ ) ve kalsit ( $CaCO_3$ ) olarak tespit edilmiştir.

#### 4.10.2.3. Fiziksel ve morfolojik analiz sonuçları

Ham ve elenmiş karışım numuneleri üzerinde fiziksel analizler yapılmış olup sonuçlar Tablo 4-99 ve Tablo 4-100'de verilmiştir.

Tablo 4-99. Ham Yeniköy-2 uçucu külünün temel fiziksel özellikleri <sup>(a)</sup>

Özellik	Birim	Değer
Özgül ağırlık	kg/m <sup>3</sup>	2730
Kıvam	%	28,8
Priz başlangıcı <sup>(b)</sup>	dakika	255
Hacim genişmesi	mm	7,0
Su ihtiyacı	%	-

<sup>(a)</sup>Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(b)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-100. Yeniköy-2 uçucu külünün aktive indeks değerleri <sup>(a)(b)</sup>

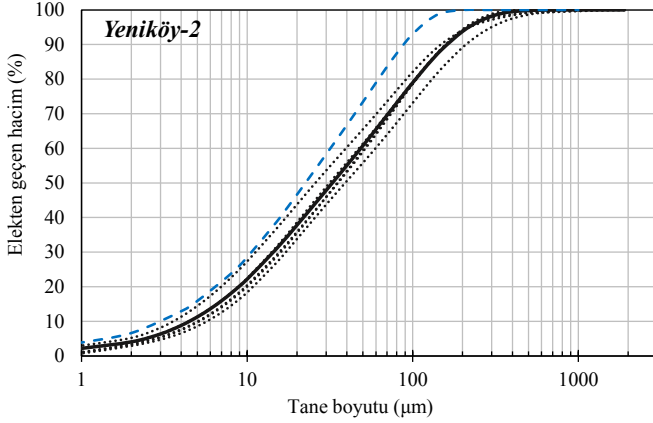
Özellik	Birim	Değer
<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	24,4
Aktivite indeksi		
28 gün	%	88,3
90 gün	%	98,0
<i>Ham kül</i>		
İncelik (45 µm bakiye)	%	32,6
Aktivite indeksi		
28 gün	%	85,1
90 gün	%	92,1

<sup>(c)</sup>125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(b)</sup>İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(a)</sup>Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tane boyu dağılımlarının günlere göre değişkenliği her numune için lazer kırınım yöntemi kullanılarak yapılan tane boyu dağılım analizleri ile değerlendirilmiştir. Ölçülen dağılımlar Şekil 4-68'de gösterilmiştir. Karışım numunesi beklendiği gibi tüm dağılımların ortasında kalmıştır. Analizlerinden elde edilen 90 µm, 45 µm ve 32 µm'ye karşılık gelen tane yüzdeleri ile  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  ve  $D[4,3]$  çapları da Tablo 4-101'de verilmiştir.



<sup>(1)</sup> Noktalı çizgiler farklı gün numunelerini, düz çizgi ham karışım numunesini ve kesikli çizgi 125µm'dan elenmiş karışım numunesini temsil etmektedir.

Şekil 4-68. Yeniköy-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılımları

Tablo 4-101. Yeniköy-2 uçucu kül numunelerinin tane boyu dağılım özeti <sup>(+)</sup> <sup>(2)</sup>

Numune	Elekte kalan hacim (%)			(µm)			
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	$D[4,3]$
<b>Günlük numuneler</b>							
1. gün	29,6	46,7	54,7	5,7	39,1	209,7	83,8
2. gün	20,4	37,0	44,9	3,6	25,8	148,0	59,1
3. gün	24,2	43,4	52,4	5,1	35,1	157,5	61,7
4. gün	23,5	41,2	49,6	4,5	31,5	159,4	67,4
5. gün	24,4	43,8	52,5	5,0	35,4	158,5	63,6
<i>Ortalama</i>	24,4	42,4	50,8	4,8	33,4	166,6	67,1
<b>Karışım numuneler</b>							
Ham	23,8	42,0	50,6	4,5	32,7	160,9	62,4
Elenmiş <sup>(*)</sup>	9,5	29,8	39,9	3,1	22,5	88,1	35,4

Not: İstatistiksel değerler günlük numuneler baz alınarak hesaplanmıştır.

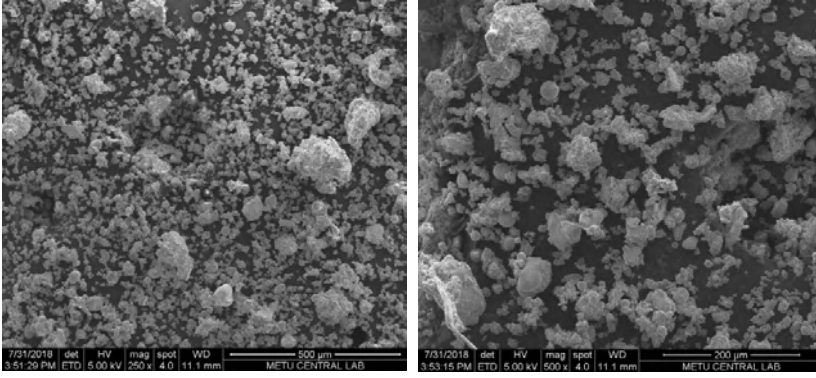
<sup>(\*)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarında elenmiştir.

<sup>(2)</sup> Tablodaki değerler lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(3)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.



Yeniköy-2 uçucu külünün, morfolojik incelemesi sonucunda 1-60 mikron arasında değişen boyutlarda küresel ve köşeli yapılı taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Özellikle 1-25 mikron çaplı küçük taneciklerin tam küresel yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4-69).



(a) ×250

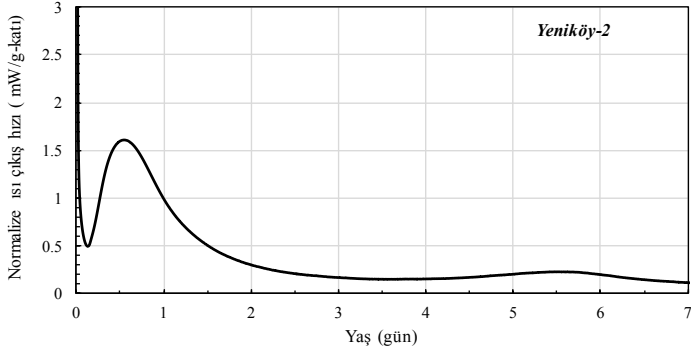
(b) ×500

Şekil 4-69. Yeniköy-2 uçucu külüne ait SEM mikrografları

Çalışılan numunelerin sonuçlarına göre kimyasal, fiziksel ve mineralojik özellikleri incelendiğinde Yeniköy-2 uçucu külünün TS EN 450-1 standardına göre aktivite indeksi analiz sonuçları uygun olmakla birlikte, kimyasal sonuçlar güncel değerler takip edilerek uygun dönemlerdeki performans uygunluğu kontrol edilerek değerlendirilebilir.

#### 4.10.2.4. Ek analizler

Yeniköy-2 uçucu külünün 7 günlük kümülatif hidrasyon ısı sonuçları izotermal kalorimetre yöntemi ile 300,6 J/g-katı, çözelti yöntemi ile 325,3 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler referans çimento ölçümlerinin sırasıyla %83,22 ve %91,09'una karşılık gelmektedir. İzotermal kalorimetre ile 7 gün için ölçülen normalize ısı çıkış hızı Şekil 4-70'de verilmiştir.



Şekil 4-70. Bir gram katı (%25 Yeniköy-2 uçucu külü + %75 referans çimentosu) için ısı çıkış hızı (mW/g-katı)

Ham ve elenmiş uçucu kül kullanılarak hazırlanan harçlar üzerinde yapılan dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4-102'de verilmiştir. Temel bir eleme işleminin bile külün aktivitesini arttırdığı görülmüştür.

Tablo 4-102. Ağırlıkça %25 Yeniköy-2 uçucu külü kullanılarak hazırlanan harçlar üzerindeki dayanım testleri <sup>(a)</sup>

	<i>Elenmiş kül <sup>(c)</sup></i>		<i>Ham kül</i>	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento harcı	47,0	54,0	48,1	53,6
%25 uçucu kül içeren harç	41,5	52,9	40,9	49,4
<b>Eğilme dayanımı (MPa)</b>				
Referans çimento	6,3	7,4	8,6	9,7
%25 uçucu kül içeren harç	5,2	6,9	8,3	9,3

<sup>(c)</sup> 125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiştir.

<sup>(a)</sup> Numuneler 2013 yılı Temmuz ayı içerisinde tedarik edilmiştir. Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Sunulan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

## 4.11. GENEL DEĞERLENDİRME

Türkiye coğrafyasının hemen her bölgesinde kömür yakarak elektrik üreten termik santraller mevcuttur (Şekil 1-17). Kitap kapsamında 9 termik santraldeki (Afşin-Elbistan, Çatalağzı, İçdaş-Biga, Kemerköy, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy) 17 farklı üniteden temin edilen uçucu kül numunelerinin kimyasal, fiziksel, morfolojik ve mineralojik özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül numuneleri; Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Kemerköy, Seyitömer, Tunçbilek-3, Tunçbilek-5, Yatağan ve Yeniköy santrallerinden 2013 yılı Temmuz ayında, İçdaş-Biga santralinden 2013 yılı aralık ayında, Tunçbilek-4 santralinden 2015 yılı mart ayında ve Soma santralinden 2015 yılı haziran ayında temin edilmiştir. İncelenen santrallerin 2014 yılı için üretim bilgileri Tablo 4-103'te özetlenmiştir.

Tablo 4-103. Kitap kapsamında incelenen termik santrallere ilişkin üretim bilgileri <sup>34</sup>

Termik santral	Şehir	Ana yakıt tipi <sup>(2)</sup>	Ana teknoloji <sup>(3)</sup>	Üretim kapasitesi (GWh/yıl)	Yakıt kapasitesi <sup>(30)</sup> (bin ton/yıl)	Kömür kül - nem oranı (%)	2014		
							Üretim (GWh)	İl tüketimine oranı	Ülke tüketimine oranı
AEB	Kahramanmaraş	L	PKY+BGD	9.360	-	15 - 48	3.037	%59,8	%1,2
Ç <sup>(1)</sup>	Zonguldak	TK	PKY	1.950	1.659	47 - 15	1.511	%44,4	%0,6
K	Muğla	L	PKY+BGD	4.095	4.564	33 - 30	3.399	%109,5	%1,3
İB	Çanakkale	İK	AYT	2.885	-	-	-	-	-
S <sup>(4)</sup>	Kütahya	L	PKY	3.900	5.385	40 - 35	3.384	%228,1	%1,4
SB	Manisa	L	PKY	6.435	8.949 <sup>(5)</sup>	41 - 21	5.535	%135,8	%2,2
T	Kütahya	L	PKY	2.372	1.908	20 - 36	2.222	%141,5	%0,9
Yt	Muğla	L	PKY+BGD	4.095	5.538	31 - 33	1.722	%55,5	%0,7
Yn	Muğla	L	PKY+BGD	2.730	3.413	-	2.528	%81,4	%1,0

<sup>(1)</sup> AEB: Afşin-Elbistan B; Ç: Çatalağzı; İB: İÇDAŞ Biga; K: Kemerköy; T: Tunçbilek; S: Seyitömer; SB: Soma B-2; Yt: Yatağan; Yn: Yeniköy Termik Santralleri için kullanılmıştır.

<sup>(2)</sup> Çatalağzı Termik Santrali (A) ilk olarak 1948 yılında faaliyete geçmiş 1991 yılında ise kapatılmıştır. Tabloda yer alan bilgiler şu an faaliyette olan B ünitesine aittir.

<sup>(3)</sup> Kullanılan yakıtlar - L: Linyit; İK: İthal kömür; TK: Taşkömürü; A: Asfaltit

<sup>(4)</sup> Kullanılan teknolojiler - PKT: Pulverize kömür yakma teknolojisi, AYT: Akışkan yatak teknolojisi, BGD: Baca gazı desülfürizasyonu, BGA: Baca gazı arıtma sistemi

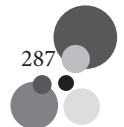
<sup>(5)</sup> Seyitömer Termik Santrali için sağlanan üretim verisi 2012 yılına aittir..

<sup>(6)</sup> Soma A (2x22 MW) ve Soma B (990 MW) ünitelerinin toplam yakıt kapasitesi değeridir.

İncelenen santrallerde çoğunlukla yerel linyit yakılmaktadır. İÇDAŞ Biga Termik Santrali ithal kömür, Çatalağzı Termik Santrali ise taşkömürü yakmaktadır. Kömür temin süreçlerinin dinamik olduğu ve değişkenlik gösterebileceği unutulmamalıdır. İncelenen santrallerin büyük çoğunluğunda pulverize kömür yakma sistemi kullanılmaktadır. Sadece İÇDAŞ Biga Termik Santrali'nde akışkan yataklı yakma sistemi kuruludur. Pulverize kömür teknolojisini kullanan santrallerin yarısında BGD ünitesi de bulunmaktadır. Bu santrallerde, yakma sonucunda çok farklı oranlarda uçucu kül açığa çıkmaktadır.

Kitap kapsamında ham ve elenmiş uçucu küller üzerinde spektrometri ve yaş analiz teknikleriyle yapılan kimyasal analizler Tablo 4-104 ve Tablo 4-105'te karşılaştırmalı olarak sunulmuş; Şekil 4-71'de özetlenmiştir. Sonuçlar, Türkiye uçucu küllerinin geniş kimyasal çeşitliliğini gözler önüne sermektedir. Bu çeşitlilik, Türkiye uçucu küllerin birçok farklı alanda hammadde, yardımcı malzeme veya ana malzeme olarak kullanım potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

İncelenen uçucu küllerde temel bileşenler  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  ve  $CaO$ ; diğer bileşenler  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $SO_3$ ,  $TiO_2$  ve  $Cl$ 'dir. Ayrıca, uçucu küller az miktarda  $Mn_2O_3$ ,  $P_2O_5$  ve  $CrO_3$  da içermektedir. Uçucu küllerdeki  $SiO_2$  içeriği kömür içerisinde bulunan kaolinit ve illit gibi kil mineralleri ve kuvarstan;  $Al_2O_3$  içeriği çoğunlukla kil minerallerinden;  $Fe_2O_3$  içeriği ise demir barındıran minerallerden kaynaklanır.  $CaO$  içeriği kalsit ve  $CaSO_4$ 'ten; sülfat içeriği ise kömürde bulunan pirit ve alçıtaşından kaynaklanır. Kömür içerisindeki dolomit ve ferromagnezyen mineraller  $MgO$  oluşumundan; sodyum ve potasyum içeren mineraller ise uçucu külün alkali içeriğinden sorumludur. Kömürün tam olarak yanmaması ve toplama işlemi sırasında kullanılan organik katkıları uçucu külün yanmamış karbon içeriğinden sorumludur. Aşağıdaki değerlendirmeler sadece deney sonuçları baz alınarak yapılmıştır. Bu deney sonuçlarının sadece temin edilen numunelerden elde edildiği ve dolayısıyla termik santrallerdeki uçucu küllerin güncel durumunu yansıtılabileceği unutulmamalıdır.



Tablo 4-104. Ham uçucu küllerin kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %) <sup>(1)</sup>

Bileşenler	AEB	Ç	İB	K1	K2	K3	S1	S2	S4	SB	I3	T4	I5	YI2	YI3	Yn1	Yn2
SiO <sub>2</sub>	39,8	56,4	45,4	38,6	36,1	31,2	52,1	53,0	54,2	43,3	53,0	58,9	55,3	47,4	49,2	25,9	25,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,3	25,3	18,3	18,8	19,0	15,6	18,4	19,0	16,2	20,7	19,4	18,9	19,4	19,6	18,8	11,4	12,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,1	5,9	10,2	7,4	7,9	7,4	12,0	11,3	12,8	4,1	13,4	10,0	11,6	6,8	7,4	4,9	5,1
Sr+Al <sup>(2)</sup>	63,2	87,6	73,8	64,7	63,0	54,2	82,4	83,3	83,2	68,2	85,7	87,8	86,2	73,9	75,4	42,2	43,1
CaO	21,1	1,7	14,2	24,4	26,3	32,8	5,6	5,3	5,1	21,4	1,3	3,1	2,8	15,9	14,3	40,5	40,6
MgO	2,3	2,2	4,5	2,2	2,3	1,8	4,9	4,8	4,7	1,7	3,9	4,4	5,8	3,1	2,8	1,9	2,0
SO <sub>3</sub>	6,85	0,08	3,1	4,12	4,42	6,84	1,22	0,8	1,05	4,93	0,49	0,45	0,48	1,96	1,98	8,97	8,18
Na <sub>2</sub> O	0,33	0,4	0,35	0,63	0,52	0,44	0,62	0,59	0,57	0,28	0,04	0,11	0,08	0,76	0,71	0,78	0,29
K <sub>2</sub> O	1,4	3,9	1,65	2,01	1,92	1,59	2,3	1,9	1,27	1,71	1,36	1,96	1,85	2,09	2,72	1,4	1,04
Na <sub>2</sub> O eş <sup>(4)</sup>	1,25	2,97	1,44	1,95	1,78	1,49	2,13	1,84	1,41	1,41	0,93	1,40	1,30	2,14	2,50	1,70	0,97
TiO <sub>2</sub>	0,75	1,12	0,57	0,77	0,78	0,63	0,74	0,72	0,7	0,66	1,08	0,83	0,79	0,72	0,78	0,51	0,49
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,12	0,12	0,3	0,3	0,27	0,14	0,13	0,13	0,23	0,2	0,23	0,23	0,2	0,19	0,28	0,33
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,02	0,09	0,04	0,04	0,03	0,1	0,11	0,13	0,02	0,26	0,11	0,17	0,03	0,03	0,03	0,04
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,12	0,12	0,05	0,08	0,05	0,13	0,12	0,14	0,05	0,18	0,18	0,19	0,1	0,08	0,08	0,09
KK <sup>(3)</sup>	2,88	2,65	0,55	0,54	0,37	0,75	1	1,97	2,7	0,71	4,93	0,66	1,23	0,73	0,53	2,53	3,11
Cl <sup>-</sup>	0,0060	0,0044	0,0044	0,0128	0,0043	0,0148	0,0148	0,0139	0,0071	0,0161	0,0035	0,0060	0,0043	0,0080	0,0109	0,0288	0,0108
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(5)</sup>	3,23	7,44	3,23	3,38	3,38	3	3,15	9,8	4,48	3,45	6,55	29,67	4,34	3,3	3,23	5,18	3,6
Serbest CaO	3,11	0,03	1,5	2,28	3,46	4,71	0,02	0,06	0,03	3,24	0,02	0,01	0,02	2,34	1,7	9,59	10,76
Reaktif CaO	13,45	0,97	11,97	20,98	23,05	27,03	4,4	4,42	3,6	17,27	0,79	2,77	2,34	13,82	12,52	31,71	31,59
Reaktif SiO <sub>2</sub>	31,97	42,31	36,33	31,97	29,29	26,78	42,75	44,56	45,08	33,25	36,43	43,24	42,28	31,28	33,91	20,84	20,45

<sup>(1)</sup> AEB: Aşın-Elbistan B; Ç: Çatalağzı; İB: İCDAŞ Bigir; K1: Kemerköy-1; K2: Kemerköy-2; K3: Kemerköy-3; T3: Tunçbilek-3; T4: Tunçbilek-4; T5: Tunçbilek-5;

S1: Seyitömer-1; S2: Seyitömer-2; S4: Seyitömer-4; SB: Soma B-2; YI2: Yatağan-2; YI3: Yatağan-3; Yn1: Yeniköy-1; Yn2: Yeniköy-2 Termik Santralleri için kullanılmıdır.

<sup>(2)</sup> (Sr+Al)F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>(3)</sup> (KK = Kızdırma Kayıt)

<sup>(4)</sup> (C<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünbilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>(5)</sup> (Na<sub>2</sub>O eş = Na<sub>2</sub>O + 0,658 K<sub>2</sub>O)

<sup>(6)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler güncel durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-105. Elenmiş uçucu küllerin kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %) <sup>(\*)</sup> <sup>(\*\*)</sup> <sup>(\*\*\*)</sup>

Bileşenler	AEB	Ç	İB	KI	K2	K3	K3	S1	S2	S4	SB	T3	T4	T5	Y12	Y13	Yn1	Yn2
SiO <sub>2</sub>	33,2	55,1	45,2	37,2	35,7	30,6	51,7	52,9	53,5	42,9	54,0	58,3	53,9	45,3	47,2	24,7	25,0	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,6	26,0	18,6	19,6	18,1	15,7	18,2	18,4	16,6	20,2	20,1	18,3	19,3	19,5	19,8	11,2	11,4	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,8	6,0	9,9	7,3	7,6	7,0	12,8	11,7	12,6	4,4	13,3	10,9	12,7	7,1	7,7	4,8	5,2	
S+A+F <sup>(*)</sup>	53,6	87,1	73,7	64,0	61,4	53,2	82,7	83,0	82,7	67,5	87,5	87,5	85,9	71,9	74,7	40,7	41,6	
CaO	28,7	2,1	14,4	24,1	27,2	33,0	5,7	5,6	5,8	21,4	1,6	3,2	2,8	17,0	15,3	42,3	42,4	
MgO	2,2	2,2	4,4	2,0	2,0	1,7	4,9	4,6	4,9	1,7	3,4	4,7	5,8	3,0	2,8	1,9	2,0	
SO <sub>3</sub>	9,41	0,14	3,17	4,38	4,97	7,1	1,21	1,02	1,66	5,06	0,44	0,47	0,64	2,99	2,22	9,46	8,73	
NazO	0,25	0,4	0,38	0,9	0,51	0,55	0,6	0,54	0,54	0,26	0,11	0,17	0,06	0,6	0,62	0,32	0,27	
K <sub>2</sub> O	0,84	4,34	1,64	2,17	1,93	1,84	2,32	1,97	1,6	1,7	1,39	1,77	1,47	2,4	2,43	1,18	1,08	
NazO eş <sup>(**)</sup>	0,80	3,26	1,46	2,33	1,78	1,76	2,13	1,84	1,59	1,38	1,02	1,33	1,03	2,18	2,22	1,10	0,98	
TiO <sub>2</sub>	0,65	1,09	0,56	0,73	0,68	0,6	0,76	0,74	0,74	0,68	1,1	0,86	0,82	0,73	0,77	0,47	0,49	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,49	0,16	0,15	0,32	0,34	0,36	0,15	0,15	0,15	0,24	0,26	0,29	0,26	0,22	0,23	0,34	0,34	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,02	0,11	0,04	0,03	0,04	0,1	0,11	0,12	0,02	0,32	0,12	0,17	0,03	0,03	0,04	0,04	
MnzO <sub>3</sub>	0,04	0,09	0,11	0,05	0,05	0,05	0,13	0,12	0,13	0,05	0,12	0,18	0,19	0,10	0,08	0,08	0,09	
KK <sup>(***)</sup>	3,13	2,32	0,7	0,57	0,87	0,89	1,07	1,28	1,69	1,07	3,76	0,66	1,09	0,75	0,72	3,17	2,94	
Cl <sup>-</sup>	0,0060	0,0103	0,0044	0,0100	0,0043	0,0148	0,0117	0,0170	0,0071	0,0097	0,0039	0,0061	0,0043	0,0080	0,0149	0,0288	0,0108	
Ç. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg) <sup>(*)</sup>	3,23	8,19	3,23	3,3	3,38	3	3,52	10,48	4,48	3,45	6,5	25,54	4,34	3,3	3,23	5,18	3,6	
Serbest CaO	4,83	0,02	1,22	1,89	3,67	4,58	0,06	0,03	0,04	2,74	0,07	0,04	0,02	1,93	1,38	9,71	10,35	
Reaktif CaO	18,29	1,96	11,57	20,56	22,73	27,27	4,43	4,42	3,77	17,25	0,72	2,74	2,14	14,49	13	33,36	33,28	
Reaktif SiO <sub>2</sub>	26,91	41,73	36,46	31,02	29,29	26,23	42,56	42,99	43,34	33,71	40,89	43,37	41,18	31,08	32,56	19,55	20,31	

<sup>(\*)</sup> AEB: Aşın-Ebistan B; Ç: Çatalgözü; İB: İÇDAŞ Bığa; KI: Kemerköy-1; K2: Kemerköy-2; K3: Kemerköy-3; T3: Tunçbilek-3; T4: Tunçbilek-4; T5: Tunçbilek-5;

SI: Seyitömer-1; S2: Seyitömer-2; S4: Seyitömer-4; SB: Soma B-2; Y2: Yatağan-2; Y3: Yatağan-3; Yn1: Yeniköy-1; Yn2: Yeniköy-2 Termik Santralleri için kullanılmıştır.

<sup>(\*\*)</sup> Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(\*\*\*)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

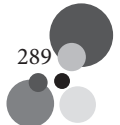
<sup>(\*)</sup> (S+A+F = SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

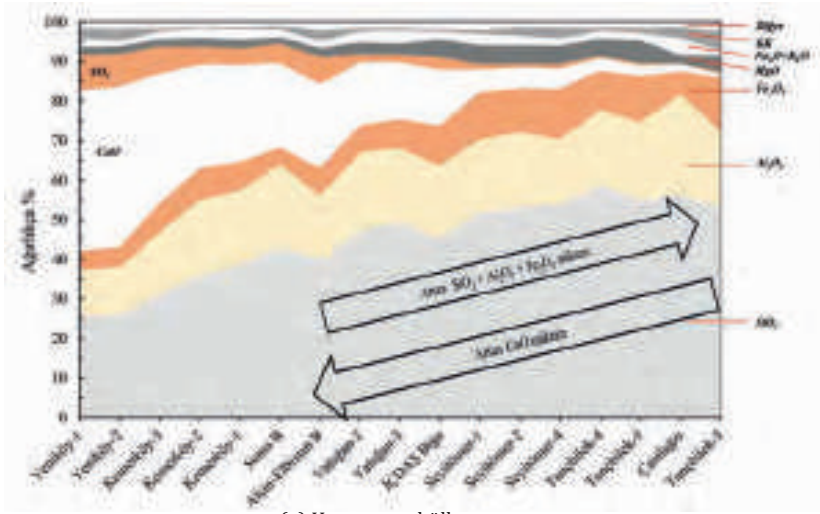
<sup>(\*\*)</sup> (KK = Kızdırma Kaybı)

<sup>(\*\*\*)</sup> (C.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Çözünabilir P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

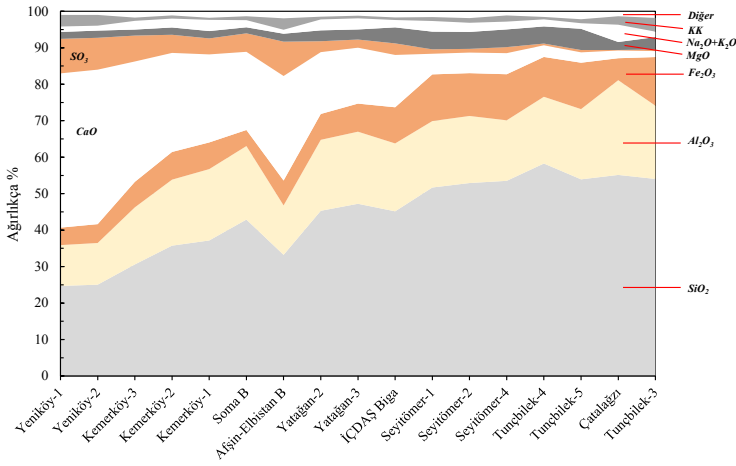
<sup>(\*)</sup> (NazO eş= NazO + 0,658 K<sub>2</sub>O)

<sup>(\*\*)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.





(a) Ham uçucu küller



(\*) Ham uçucu külün laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

(b) Elenmiş uçucu küller (\*)

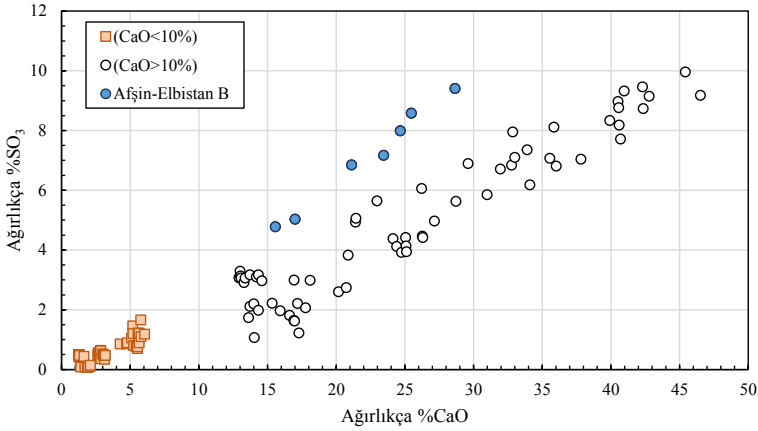
Şekil 4-71. Kitap kapsamında incelenen uçucu kül numunelerinin kimyasal bileşenleri

Çatalağzı ve Seyitömer Termik Santralinden 2013 yılı Temmuz ayında, Tunçbilek Termik Santralinin 3. ve 5. Ünitelerden 2013 yılı Temmuz ayında, 4. Ünitesinden ise 2015 yılı Mart ayında temin edilen uçucu küllerin düşük kalsiyum oranına (< % 10 CaO) sahip olduğu görülmüştür. Bu ham küller, ağırlıkça %52-59 SiO<sub>2</sub>, %16-26 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %6-14 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %82-88 (S+A+F), %1-6 CaO, %2-6 MgO, %2'nin altında SO<sub>3</sub>, %1-3 Na<sub>2</sub>O-eş ve %1-5 kızdırma kaybı içermektedir. 125 µm'den laboratuvarında elenmiş küllerde bu oranlar büyük ölçüde değişmemiş, ağırlıkça %51-59 SiO<sub>2</sub>, %16-26 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %6-14 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %82-88 (S+A+F), %1-6 CaO, %2-6 MgO, %0-2 SO<sub>3</sub>, %1-4 Na<sub>2</sub>O-eş ve %1-4



kızdırma kaybı olarak ölçülmüştür. Tunçbilek-3 uçucu külü ham halde %36, elenmiş halde %41 reaktif  $SiO_2$  içermektedir. Kalan düşük kalsiyumlu küllerde reaktif  $SiO_2$  %41-46 aralığındadır. 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan küllerde reaktif  $CaO$  %5'in altında; serbest  $CaO$  ise yok denecek kadar azdır.

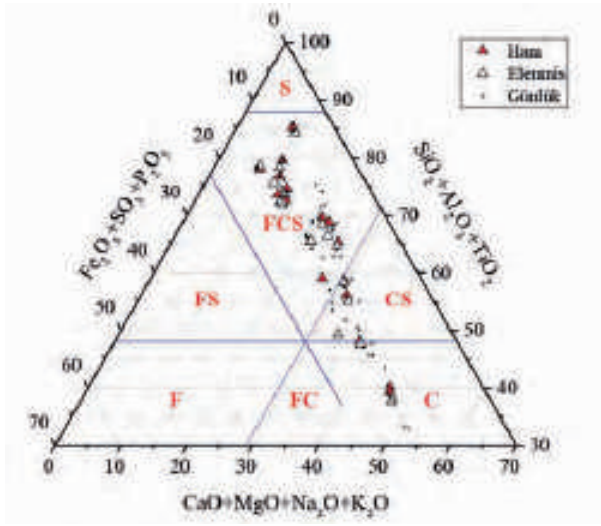
Afşin-Elbistan, Kemerköy, Yatağan ve Yeniköy Termik Santrallerindeki farklı ünitelerden 2013 yılı Temmuz ayında, İçdaş Biga Termik Santralinden 2013 yılı Aralık ayında, Soma Termik Santralinden 2015 yılı Haziran ayında temin edilen küller yüksek kalsiyum oranına (>% 10  $CaO$ ) sahiptir. Yakma sürecinin ve elementlerin tabiatı gereği,  $CaO$  miktarı yükseldikçe  $SO_3$  miktarı da artma eğilimi gösterir (Şekil 4-72). Yatağan dışında kalan tüm yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin  $SO_3$  miktarı %3'ten yüksektir. İncelenen ham küller, ağırlıkça %25-50  $SiO_2$ , %11-21  $Al_2O_3$ , %4-10  $Fe_2O_3$ , %42-76 (S+A+F), %14-41  $CaO$ , %1-5  $MgO$ , %2-9  $SO_3$ , %1-3  $Na_2O$ -eş ve %3'ün altında kızdırma kaybı içermektedir. Afşin-Elbistan B haricindeki yüksek kalsiyumlu uçucu küllerde 125  $\mu m$  elekten laboratuvarıda eleme işlemi bu oranları fazla değiştirmemiştir. Elenmiş küllerde, ağırlıkça %24-48  $SiO_2$ , %11-21  $Al_2O_3$ , %4-10  $Fe_2O_3$ , %41-75 (S+A+F), %14-43  $CaO$ , %1-5  $MgO$ , %2-10  $SO_3$ , %3'ün altında  $Na_2O$ -eş ve %3'ün altında kızdırma kaybı ölçülmüştür. Yeniköy uçucu külü yaklaşık %20, kalan yüksek kalsiyumlu küller ise %26-37 reaktif  $SiO_2$  içermektedir. Küllerin reaktif  $CaO$  içeriği %11-34, serbest  $CaO$  içeriği ise %1-11 aralığındadır.



Şekil 4-72. Kitap kapsamında incelenen uçucu küller için  $CaO - SO_3$  ilişkisi

Kitap kapsamında incelenen 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan ve sadece alındığı tarihi temsil eden uçucu kül numuneleri, Roy'un silisli ( $SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$ ), kalsik ( $CaO+MgO+Na_2O+K_2O$ ) ve ferrik ( $Fe_2O_3+SO_3+P_2O_5$ ) uç elemanları kullanılarak hazırladığı sınıflandırmaya göre de değerlendirilmiştir<sup>149</sup> (Şekil 4-73).





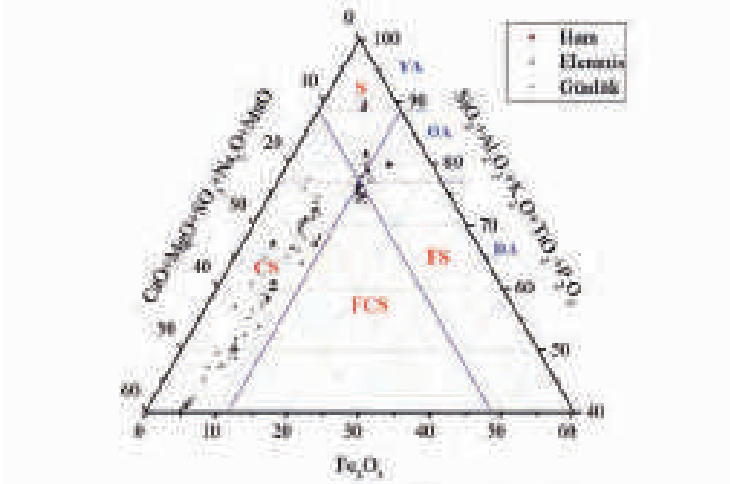
Şekil 4-73. Uçucu küllerin Roy'a göre sınıflandırması: Silisli (S), Ferrokalsilik (FCS), Kalsilik (CS), Kalsik (C); Ferrosilik (FS), Ferrik (F) ve Ferrokalsik (FA) <sup>147</sup>

Sınıflandırma sonuçları Tablo 4-106'da özetlenmiştir.

Tablo 4-106. Kitap kapsamında incelenen uçucu küllerin Roy'ya göre sınıflandırılması

Sınıfı	Termik santral
Silisli	-
Ferrokalsilik	Çatalağzı ; Tunçbilek-3,4,5; Seyitömer-1,2,4; İÇDAŞ-Biga; Soma B-2;Yatağan-2,3
Kalsilik	Afşin-Elbistan B; Kemerköy-1,2,
Kalsik	Kemerköy-3; Yeniköy-1,2
Ferrosilik	-
Ferrick	-
Ferrokalsik	-

Kitap kapsamında incelenen 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan ve sadece alındığı tarihi temsil eden uçucu kül numuneleri Vassilev ve Vassileva'nın oluşturduğu sınıflandırmaya göre de değerlendirilmiştir (Şekil 4-74)<sup>77,88</sup>. Bu sınıflandırmada, oksitler arasındaki belirgin pozitif veya negatif korelasyon katsayıları dikkate alınır. Grafiğin ( $SiO_2+Al_2O_3+K_2O+TiO_2+P_2O_5$ ) köşesi temelde alümino-silikat camlar ile mullit, kuvars-kristobalit-tridimit, kil ve mika mineralleri ve K-feldispat gibi silikat ve alümino-silikatların varlığını gösterir. ( $CaO+MgO+SO_3+Na_2O+MnO$ ) köşesi ise *Ca-Mg-Na* bakımından zengin cam, oksitler-hidroksitler (kireç, portlandit, periklaz, brusit), sülfatlar (anhidrit-gips, heksahidrit, tenardit), karbonatlar (kalsit, dolomit, ankerit), *Ca-Na* alümino-silikatlar (plajiyoklaz), *Ca*-silikatlar (volastonit, larnit, rankinit) ve *Ca-Mg* silikat ve aluminosilikatları (montiselit ve melilit) gösterir. Üçüncü köşe ise  $Fe_2O_3$ 'ün katkısını içerir. Bu köşe, *Fe* zengin camı ve hematit, manyetit, maghemit, goetit, ilmenit ve limonit gibi *Fe* oksit-hidroksitleri temsil eder. Bazı farklı mineral ve fazların da farklı köşelere katkısı olabilir. İncelenen küller için sınıflandırma sonuçları Tablo 4-107'de özetlenmiştir.



Şekil 4-74. Uçucu küllerin Vassilev ve Vassileva'ya göre sınıflandırılması: Silisli (S), silikokalsik (CS), ferrosilik (FS) ve ferrokalsilik (FCS); yüksek asit (YA), orta asit (OA) ve düşük asit (DA) <sup>77,88</sup>

Tablo 4-107. Kitap kapsamında incelenen uçucu küllerin Vassilev ve Vassileva'ya göre sınıflandırılması

Sınıf	Yüksek asit	Orta asit	Düşük asit
Silisli	Çatalağzı		
Silikokalsik		Tunçbilek-4	Afşin-Elbistan B; İÇDAŞ-Biga; Kemerköy-1,2,3; Soma B-2; Yatağan-2,3; Yeniköy-1,2
Ferrokalsilik			Seyitömer-1,2,4
Ferrosilik		Tunçbilek-3,5	

Hg gibi çok uçucu elementler dışında kömür içerisindeki kalan *As, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb* ve *Zn* gibi birçok iz element ise uçucu külde zenginleşir <sup>2,91,92</sup>.

Kitap kapsamında incelenen 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan uçucu kül numuneleri için yapılan detaylı iz element analizleri Tablo 4-108 ve Tablo 4-109'da verilmiş; ve sonuçlar Şekil 4-75'te özetlenmiştir.

Tablo 4-108. Ham uçucu küllerin ağır metal kompozisyonları (mg/kg) <sup>(3)</sup>

Termik santral	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Se	Tl	V	Zn
Afşin Elbistan B	<2,94	39	301	1,6	0,9	24	309	56	2,2	284	215	24	2,1	8,3	1,3	347	115
Çatalağzı	<0,88	25	1053	6,9	0,4	34	150	114	1,5	546	79	114	6,7	4,4	4,9	225	108
İÇDAŞ Biga	10,9	208	451	2,5	0,8	34	352	72	0,7	436	726	46	14,8	1,9	6,3	112	101
Kemerköy-1	0,4	95	588	3,3	1,3	25	229	72	0,2	431	158	56	14,0	5,9	2,1	237	187
Kemerköy-2	0,4	65	279	3,0	0,5	16	161	46	0,6	313	102	29	8,5	4,2	1,1	175	102
Kemerköy-3	0,5	83	464	3,0	0,7	18	210	73	0,1	349	149	37	12,1	7,6	1,4	200	130
Seyitömer-1	4,9	115	1017	2,9	1,0	96	722	161	0,2	1054	2060	89	5,1	3,6	1,6	269	189
Seyitömer-2	0,6	75	835	2,6	0,7	90	701	131	0,2	842	1968	66	3,7	3,4	1,3	240	242
Seyitömer-4	0,7	79	933	3,0	0,6	92	816	130	0,2	1063	2090	56	3,5	5,0	1,1	236	138
Soma B	1,9	75	564	5,1	0,5	68	578	62	0,3	1061	1161	80	6,9	2,0	3,0	155	89
Tunçbilek-3	1,4	107	250	11,2	0,4	153	1569	148	0,6	727	3201	67	21,6	4,0	5,7	380	116
Tunçbilek-4	0,4	81	566	4,6	0,5	71	600	74	0,3	1076	1189	78	7,4	2,1	2,1	166	98
Tunçbilek-5	0,2	54	438	4,8	0,4	101	983	97	3,5	1080	1944	58	6,8	3,0	3,0	161	103
Yatağan-2	0,5	91	532	4,2	1,0	30	162	66	0,2	596	126	27	8,2	6,1	1,1	159	263
Yatağan-3	0,9	95	570	4,3	1,2	23	166	64	0,2	488	129	41	9,0	4,1	1,8	156	138
Yeniköy-1	13,2	45	284	2,2	1,0	12	189	33	0,3	553	91	23	11,4	10,7	1,1	194	73
Yeniköy-2	207,8	53	426	2,3	1,0	14	231	44	0,2	634	109	22	13,3	13,6	1,4	241	84

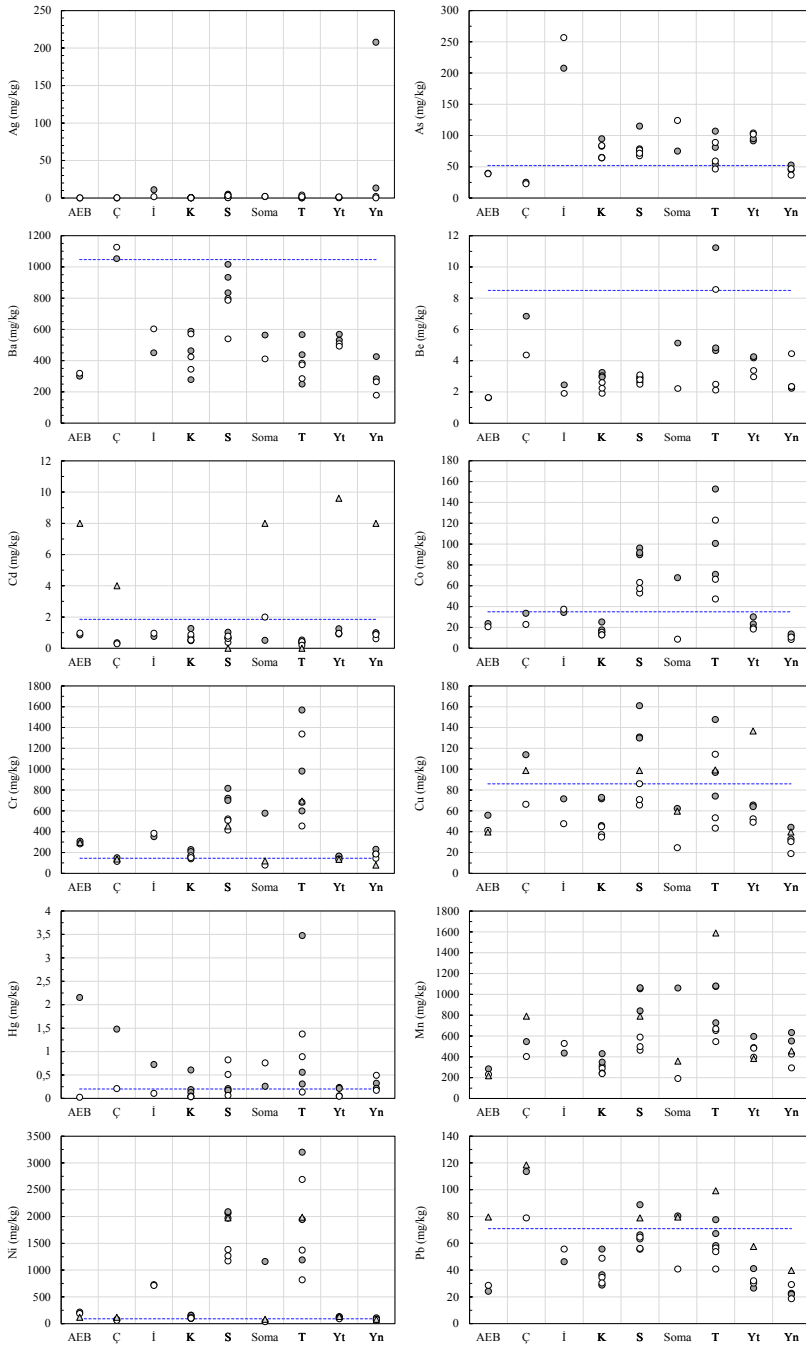
(3) Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihte temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

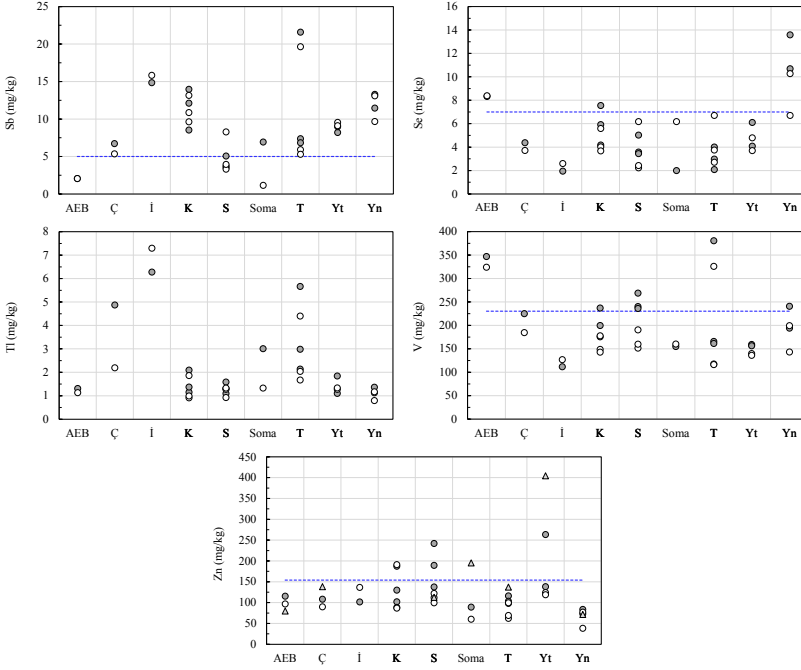
Tablo 4-109. Elenenmiş uçucu küllerin ağır metal kompozisyonları (mg/kg) (\*) (1)

Termik santral	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Se	Tl	V	Zn
Afşin Elbistan B	0,1	39	320	1,6	1,0	21	285	41	0,0	232	188	29	2,1	8,4	1,1	324	97
Çatalağzı	0,3	23	1126	4,4	0,3	23	116	66	0,2	403	62	79	5,4	3,7	2,2	184	90
İÇDAŞ Biğa	1,7	257	604	1,9	1,0	38	385	48	0,1	528	712	56	15,8	2,6	7,3	127	136
Kemerköy-1	0,2	84	571	2,6	0,9	15	170	45	0,0	290	97	49	13,1	4,0	1,9	178	191
Kemerköy-2	0,4	64	425	1,9	0,5	13	140	37	0,1	245	112	35	10,9	3,7	0,9	149	88
Kemerköy-3	0,1	64	345	2,2	0,5	13	152	35	0,0	239	103	30	9,6	5,6	1,0	143	87
Seyitömer-1	3,8	68	797	3,1	0,4	53	416	66	0,5	463	1172	63	3,3	2,2	1,3	152	112
Seyitömer-2	0,3	77	786	2,5	0,6	63	523	86	0,1	589	1383	65	3,9	2,4	1,3	190	122
Seyitömer-4	3,3	72	540	2,8	0,8	57	509	71	0,8	499	1264	56	8,3	6,2	0,9	160	100
Soma B	2,1	124	411	2,2	2,0	9	79	25	0,8	192	39	41	1,2	6,2	1,3	160	60
Tunçbilek-3	0,3	89	286	8,6	0,4	123	1338	114	0,1	546	2690	57	19,6	2,7	4,4	326	100
Tunçbilek-4	3,9	59	384	2,5	0,4	47	455	44	1,4	653	818	54	5,9	6,7	2,0	117	62
Tunçbilek-5	1,6	46	374	2,1	0,2	66	682	53	0,9	669	1372	41	5,3	3,7	1,7	116	69
Yatağan-2	0,4	104	509	3,4	0,9	20	137	52	0,1	483	107	30	9,6	4,8	1,3	140	124
Yatağan-3	1,2	102	493	3,0	1,0	18	134	49	0,0	396	93	32	9,1	3,7	1,3	136	119
Yeniköy-1	2,0	37	179	4,5	0,6	9	145	19	0,5	294	61	19	9,7	6,7	0,8	143	38
Yeniköy-2	0,2	47	265	2,3	0,9	11	186	30	0,2	427	80	29	13,1	10,3	1,2	199	77

(\*) Ham uçucu küllün laboratuvarda 125 µm'lik elekten elemesi ile elde edilmiştir.

(1) Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.





<sup>(1)</sup> AEB: Afşin-Elbistan B; Ç: Çatalağzı; İ: İÇDAŞ Biga; K: Kemerköy-1,2,3; T: Tunçbilek-3,4,5; S: Seyitömer-1,2,4; SB: Soma B; Yt: Yatağan-2,3; Yn: Yeniköy-1,2 Termik Santralleri için kullanılmıştır.

<sup>(2)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-75. Uçucu küllerin iz element kompozisyonları. ●: ham kül, ○: elenmiş kül, ▲: 1998'de ölçülen değerler <sup>76</sup>, kesikli çizgi: Avrupa'daki termik santraller için medyan değerleri <sup>93</sup>.

Ölçülen değerler Tablo 2-8'de uçucu küller için verilen değer aralıkları içerisinde. Sadece bazı küllerde gümüş değerleri bir miktar yüksektir. Şekilde verilen kesikli çizgiler, Avrupa'daki çeşitli termik santrallerden elde edilen uçucu küllerinin iz element analizlerinin medyan değeri temsil eder. Şekilde literatürde mevcut ise <sup>76</sup> bazı termik santraller için ölçülen *Cr*, *Co*, *Ni*, *Cu*, *Zn*, *Cd* ve *Pb* değerlerine de yer verilmiştir.

Camsı fazın dışında uçucu küllerde çeşitli kristal mineral ve fazlar da bulunur. Kitap kapsamında incelenen uçucu kül numunelerinde XRD analizi ile belirlenen kristal fazlar Tablo 4-110'da özetlenmiştir. Kuvars, hematit ve manyetit/magnezyoferrit en sık rastlanan mineraller olmuştur. Kuvars, uçucu küllerde en sık rastlanan silikat mineralidir. Erime sıcaklığının yüksekliği göz önünde bulundurulursa muhtemelen birincil kökenlidir. 900°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalan kil mineralleri, mika ve feldispatların faz geçişleri esnasında serbest kalan silikalardan ikincil kökenli olarak da oluşabilir. 1567-1592°C aralığında eriyen hematit ve manyetit birincil ya da ikincil kökenli olabilir. İkincil oluşum dört farklı şekilde gerçekleşmiş olabilir <sup>46</sup>: (i) pirit, markasit, siderit, ankerit, jarosit ve manyetit oksidasyonu ile; (ii) *Fe*-oksitin karbon ve hidrojen ile indirgenmesi ile; (iii) *Fe*-hidroksitlerin dehidroksilasyonu

sonucunda; veya (iv) kömürdeki *Fe* içeren mineralleri kapsayan eriyiklerden kristal büyümesi ile.

Bazı uçucu küllerde rastlanan kristobalit, birincil veya ikincil kökenlidir. İkincil kristobalit organik bağlı veya amorf silikanın kristalleşmesinin; ya da kömür içerisindeki opal, kalsedon, kil ve diğer silikat minerallerinin tekrar kristalleştirilmesinin bir sonucudur. Uçucu küllerin bir kısmında mullit görülmüştür. Mullitin erime sıcaklığı 1810°C'dir; fakat doğada az bulunur. Uçucu kül içerisindeki mullit nadir de olsa volkanik kayalarla ilişkili kömürlerden elde edilen küllerdeki bazı küçük kristallerden kalarak birincil kökenli olabilir. Büyük olasılıkla ikincil kökenlidir ve 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ağırlıklı olarak kaolinit gibi kil minerallerinin, daha az oranda mika, feldispat ve diğer alüminosilikatların ayrışması/dönüşümü ve eriyiklerin kristalleşmesi ile oluşmuştur. İncelenen uçucu küllerde rastlanan diğer bir silikat minerali de anortitdir. Anortit birincil kökenli veya silikat bir eriyikten kristalleşerek ikincil kökenli olabilir. Yüksek kalsiyum içeren bazı küllerde başta gehlenit ve mayenit olmak üzere çeşitli *Ca*-silikatlara da rastlanmıştır. Bu *Ca*-silikatlar muhtemelen ikincil kökenlidir. Serbestleşen toprak-alkali oksitler ile silikat/alüminosilikatlar arasındaki katı faz reaksiyonları esnasında veya silikat eriyiklerden kristalleşerek oluşurlar.

Uçucu küllerin muhteviyatında rastlanan *CaO*, karbonatların bozulmasından ya da organikler veya sülfatlar ile birleşmiş *Ca*'lardan ikincil ve üçüncül olarak oluşabilir. Bazı küllerde, büyük olasılıkla külün depolanması sırasında kireç hidrasyonu ile üçüncül olarak oluşan portlandite rastlanmıştır. Bazı küllerde ise kalsit görülmüştür. Kalsit çoğunlukla birincil veya üçüncül kökenli, nadiren de kömürdeki organik madde ile ilişkili olarak ikincil kökenlidir. Birincil kalsitin kökeni düşük sıcaklıklarda ( $\leq 700-950^{\circ}\text{C}$ ) iri taneli parçacıkların ayrışmasıdır. Kalan kalsitin küçük bir kısmı ikincil, büyük bir çoğunluğu ise *Ca*-oksihidroksitlerin termik santral baca gazları ile veya depolama alanlarındaki hava ve su ile karbonatlaşması sonucu üçüncül kökenlidir <sup>46</sup>.

İncelenen küllerde sülfatlar, anhidrit formundadır. Anhidrit, tamamlanmamış ayrışma ( $\leq 900-1220^{\circ}\text{C}$ ) sebebi ile birincil kökenli olabilse de çoğunlukla ikincil kökenlidir. İkincil anhidrit üç şekilde oluşabilir: (i) alçıtaşının dehidrasyonu, (ii) gözenek suyunun kristalleşmesi ve (iii) karbonatların, anhidritin ve organik maddenin ayrışması sonucu açığa çıkan kalsiyum oksit ile organik maddenin veya sülfür içeren minerallerin yakımı sırasında açığa çıkan sülfür oksit ve sülfürik asit ile reaksiyona girmesi sonucunda.

Tablo 4-110. Kitap kapsamında incelenen uçucu küllerde belirlenen kristal fazlar <sup>(a)</sup>

	Anhidrit	Anortit	Gehlenit	Hematit	Kalsit	Kalsiyum oksit	Kristobalit	Kuvars	Manyetit / Magnezyo ferrit	Mayenit	Mullit	Portlandit
Afşin- Elbistan B	•			•	•	•		•				
Çatalağzı								•	•		•	
İÇDAŞ Biga	•			•		•		•	•	•	•	
Kemerköy-1	•		•	•		•		•		•		
Kemerköy-2	•		•	•		•		•		•		
Kemerköy-3	•		•	•	•	•		•				•
Seyitömer-1	•	•		•			•	•	•			
Seyitömer-2	•	•		•			•	•	•			
Seyitömer-4	•	•		•				•	•			
Soma B-2	•	•		•		•	•	•			•	
Tunçbilek-3				•				•	•		•	
Tunçbilek-4				•				•	•		•	
Tunçbilek-5				•				•	•		•	
Yatağan-2	•			•		•	•	•				
Yatağan-3	•	•		•		•	•	•			•	
Yeniköy-1	•		•	•		•		•				
Yeniköy-2	•		•	•	•	•		•				•

<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.



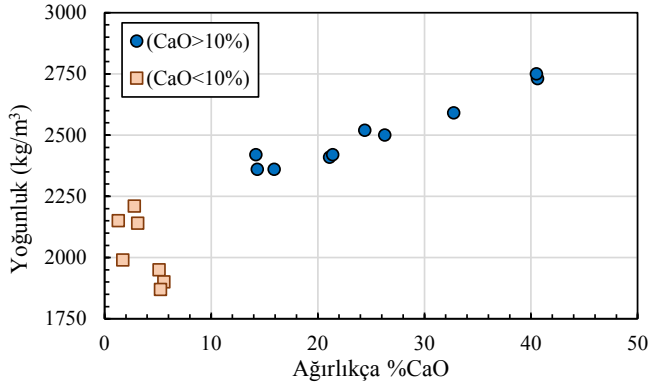
Kitap kapsamında incelenen 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan uçucu kül numunelerinin temel fiziksel özellikleri Tablo 4-111'de özetlenmiştir. İncelenen uçucu küllerin yoğunluğu 1870-2750 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Yoğunluk CaO miktarı ile ilişkilidir; CaO miktarı arttıkça, yoğunlukta da bir artış gözlenir (Şekil 4-76). %25 uçucu kül ve %75 referans çimento ile hazırlanan hamurların kıvam ve priz başlangıcı testleri uygun sınırlar içerisindedir. Yeniköy-2 hariç, %30 uçucu kül ve %70 referans çimento ile hazırlanan tüm hamurların Le Chatelier deneyine göre hacim genleşmeleri 1 mm'nin altındadır. Oldukça yüksek serbest CaO içeren Yeniköy-2 uçucu külü ile hazırlanan hamurun hacim genleşmesi 7 mm olarak bulunmuş; 10 mm sınır değerinin altında kalmıştır.

Tablo 4-111. Kitap kapsamında incelenen ham uçucu küllerin temel fiziksel özellikleri <sup>(A)</sup>

Termik santral	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Kıvam (%)	Priz başlangıcı <sup>(*)</sup> (dakika)	Hacim genleşmesi (mm)
Afşin-Elbistan B	2.410	33,2	225	1,0
Çatalağzı	1.990	28,2	210	0,0
İÇDAŞ Biga	2.420	29,4	210	1,0
Kemerköy-1	2.520	26,2	240	1,0
Kemerköy-2	2.500	28,0	190	1,0
Kemerköy-3	2.590	27,0	225	1,0
Seyitömer-1	1.900	33,4	250	1,0
Seyitömer-2	1.870	32,8	265	0,0
Seyitömer-4	1.950	31,0	180	0,0
Soma B-2	2.420	29,8	265	1,0
Tunçbilek-3	2.150	34,6	195	1,0
Tunçbilek-4	2.140	28,8	240	1,0
Tunçbilek-5	2.210	29,4	205	1,0
Yatağan-2	2.360	27,2	225	1,0
Yatağan-3	2.360	28,6	235	1,0
Yeniköy-1	2.750	29,4	200	1,0
Yeniköy-2	2.730	28,8	255	7,0

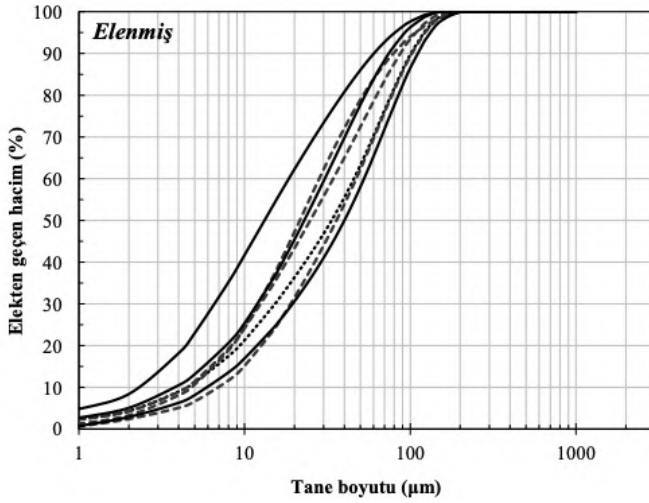
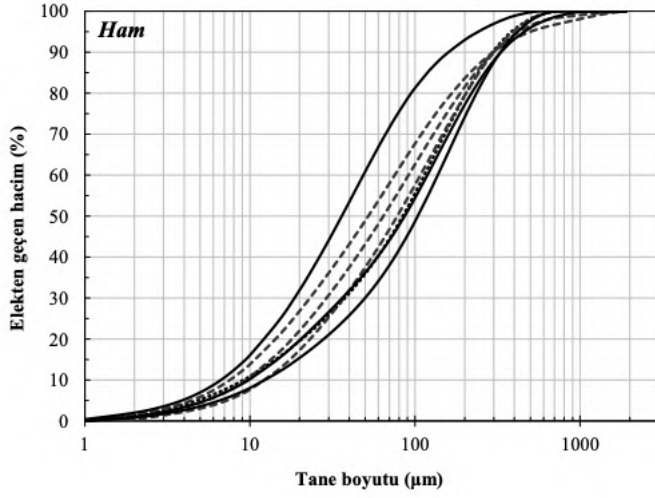
<sup>(\*)</sup> Referans Çimento Priz Başlangıcı 185 dakikadır.

<sup>(A)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.



Şekil 4-76. Kitap kapsamında incelenen uçucu küllerin CaO miktarları ve yoğunlukları arasındaki ilişki

Uçucu küllerin inceliği birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin başında kömürün pulverizasyon derecesi, termik santraldeki yakma işlemi, sonrasındaki soğutma hızı ve kullanılan elektrofiltrelerin özellikleri gelir. Uçucu küllerin tane boyutları genellikle 0,1-200  $\mu\text{m}$  aralığındadır; fakat, daha iri tanelere de - özellikle KK yüksek küllerde ve linyit küllerinde - sıklıkla rastlanır. Uçucu külün tane boyu analizi, hem yanma verimi tahmini için, hem de üretilen uçucu küle uygun bir kullanım alanının seçimi için gereklidir. Fiziksel özellikler arasında uçucu küllerin reaktivitesini en çok etkileyen parametre tane boyu dağılımıdır. Kitap kapsamında incelenen uçucu küllerin tane boyu dağılımları lazer kırınım yöntemi ile belirlenmiştir (Şekil 4-77). Bu yöntem, tanelerin seyreltik dispersiyonundan bir lazer ışığının geçirilmesi ve elde edilen kırınım açısının saptanması üzerine kuruludur. Hızlı, yüksek tekrarlanabilirliğe ve geniş ölçüm aralığına sahip bir yöntemdir. Fakat; düzensiz şekilli tanelerin boyutlarının tanımlanmasında eksik kalır; dolayısıyla sadece tane boyut dağılımı tahmini sağlar. Elde edilen sonuçlar, ayrıntılı bir veri analizinin yapılmasına ve farklı tane boyu dağılımı sınıflandırma sistemlerinin esnek bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Şekilde de görüldüğü üzere birçok termik santralde ham uçucu küller 90  $\mu\text{m}$  boyutunu aşar. Ham küllerin tane dağılımı basit bir kuru eleme işlemi ile (125  $\mu\text{m}$ 'lik elek) çok daha uygun hale getirilebilir.

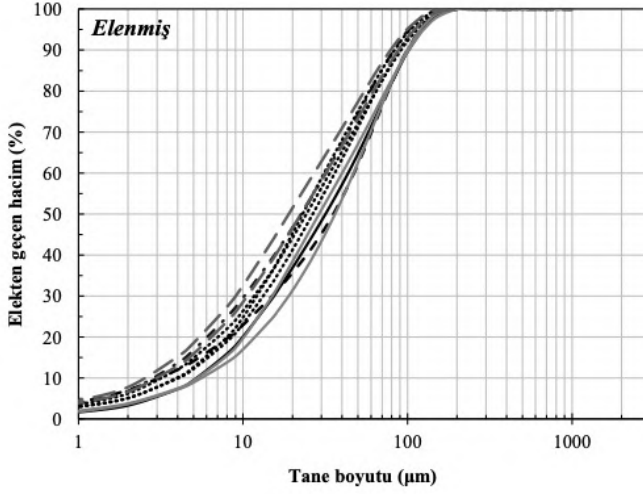
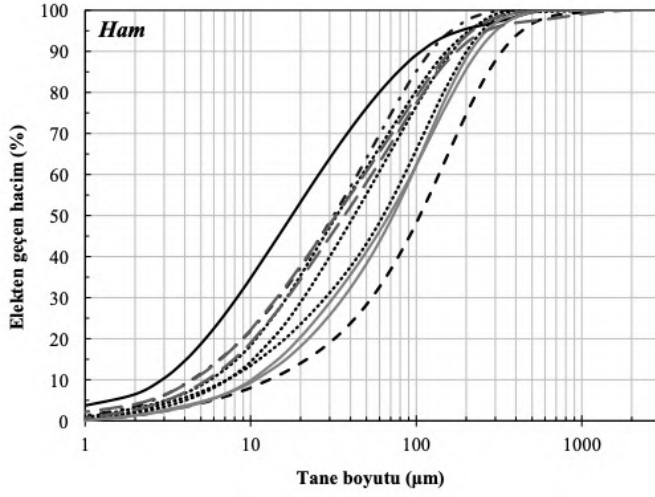


(a) Düşük kalsiyumlu küller: (····) Çatalağzı; (---) Seyitömer-1,2,4; (—) Tunçbilek-3,4,5

<sup>(\*)</sup> Elenmiş küller, ham uçucu küllerin laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(\*)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-77. Türkiye uçucu külleri için tane boyu dağılımları <sup>(\*)</sup>



(b) Yüksek kalsiyumlu küller: (---) Afşin-Elbistan B; (- - -) İÇDAŞ Biga; (····) Kemerköy-1,2,3; (====) Soma B-2; (====) Yatağan-2,3; (= = =) Yeniköy-1,2

<sup>(c)</sup> Elenmiş küller, ham uçucu küllerin laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-77. Türkiye uçucu külleri için tane boyu dağılımları <sup>(a)</sup> (devamı)

Lazer kırınım yöntemi ile belirlenen temel parametreler ile 45 µm'lik göz açıklığına sahip elekten yaş olarak elenerek elde edilen incelik değerleri Tablo 4-112 ve Tablo 4-113'te verilmiştir. Tane dağılım aralıkları Şekil 4-78'de özetlenmiştir.

Tablo 4-112. Kitap kapsamında incelenen ham uçucu küllerin tane boyu dağılımına ilişkin temel parametreler <sup>(a)</sup>

Termik Santral	Elekte kalan hacim (%) <sup>(b)</sup>			(µm) <sup>(c)</sup>				İncelik (%) <sup>(d)</sup>
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D10	D50	D90	D[4.3]	45 µm bakiye
Afşin-Elbistan B	55,4	74,0	80,0	13,0	105,1	330,0	150,3	66,3
Çatalağzı	47,9	66,4	73,0	9,1	84,2	294,3	123,0	52,1
İÇDAŞ Biga	18,8	40,4	50,7	4,5	32,8	127,9	52,7	26,3
Kemerköy-1	22,4	41,3	50,9	5,7	33,0	152,4	63,2	25,9
Kemerköy-2	26,5	48,0	58,1	7,2	42,1	164,2	66,7	34,8
Kemerköy-3	37,9	59,6	67,5	7,2	63,2	201,2	85,9	29,9
Seyitömer-1	35,1	53,8	62,3	7,6	52,1	297,2	127,9	36,2
Seyitömer-2	45,7	65,2	73,3	12,3	78,0	300,2	122,3	49,2
Seyitömer-4	40,4	59,5	67,8	9,4	62,5	281,7	110,6	48,7
Soma B-2	12,5	26,2	34,5	2,9	17,7	106,7	45,7	13,3
Tunçbilek-3	21,3	42,6	53,9	6,7	36,0	159,4	65,1	29,7
Tunçbilek-4	48,8	65,9	72,3	9,8	86,4	303,8	138,0	47,7
Tunçbilek-5	54,7	72,0	77,9	12,4	103,9	329,2	141,8	57,4
Yatağan-2	41,9	64,6	72,9	10,7	72,4	212,5	95,5	50,1
Yatağan-3	41,3	61,5	69,7	10,1	68,4	236,0	100,0	44,9
Yeniköy-1	25,6	44,8	53,6	5,5	36,8	175,0	84,9	31,0
Yeniköy-2	23,8	42,0	50,6	4,5	32,7	160,9	62,4	32,6

<sup>(a)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(b)</sup> Lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(c)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Tablo 4-113. İncelenen elenmiş uçucu küllerin tane boyu dağılımına ilişkin temel parametreler<sup>(\*) (2)</sup>

Termik Santral	Elekte kalan hacim (%) <sup>(*)</sup>			(µm) <sup>(*)</sup>				İncelik (%) <sup>(*)</sup>
	90 µm Bakiye	45 µm Bakiye	32 µm Bakiye	D10	D50	D90	D[4.3]	45 µm bakiye
Afşin-Elbistan B	13,5	41,9	53,0	3,1	35,4	99,5	44,1	39,8
Çatalağzı	13,8	40,5	51,3	4,4	33,5	100,7	44,1	34,0
İÇDAŞ Biga	7,8	29,1	39,9	2,9	22,6	82,5	33,9	21,5
Kemerköy-1	8,1	28,3	39,1	4,0	23,1	83,4	34,5	19,8
Kemerköy-2	9,7	32,5	44,0	4,0	26,6	89,0	37,8	23,5
Kemerköy-3	10,4	31,1	41,6	3,3	24,3	91,3	37,1	21,7
Seyitömer-1	9,1	31,1	42,1	4,4	24,9	87,0	36,5	24,5
Seyitömer-2	14,2	41,7	53,8	7,0	35,8	102,0	46,2	33,6
Seyitömer-4	5,9	24,1	35,4	4,7	21,5	78,8	33,3	34,2
Soma B-2	3,5	16,4	24,9	2,4	13,2	60,3	23,4	10,2
Tunçbilek-3	5,6	26,0	38,3	3,8	22,9	74,2	32,1	24,4
Tunçbilek-4	13,8	38,9	49,7	5,3	31,7	101,4	43,8	32,5
Tunçbilek-5	17,5	45,9	57,1	6,0	40,0	110,6	50,1	37,6
Yatağan-2	13,4	41,7	54,4	5,7	36,3	99,5	45,4	35,0
Yatağan-3	13,5	36,3	47,0	5,3	29,0	101,7	42,8	31,3
Yeniköy-1	6,9	25,7	35,3	2,6	19,0	78,9	31,1	20,4
Yeniköy-2	9,5	29,8	39,9	3,1	22,5	88,1	35,4	24,4

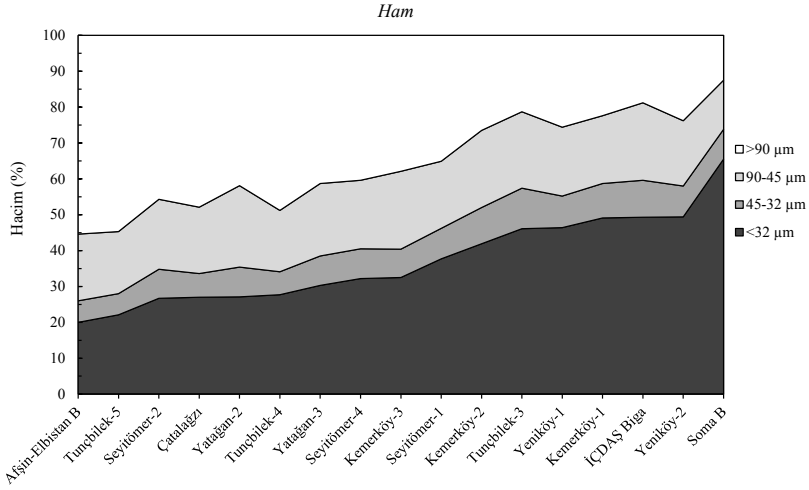
<sup>(\*)</sup> İncelik değeri ıslak eleme yöntemi ile belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Lazer kırınım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

<sup>(\*)</sup> Elenmiş küller, ham uçucu küllerin laboratuvarında 125 µm'lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

<sup>(\*)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

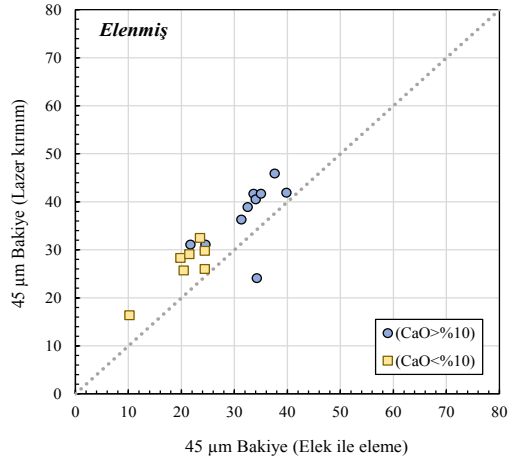
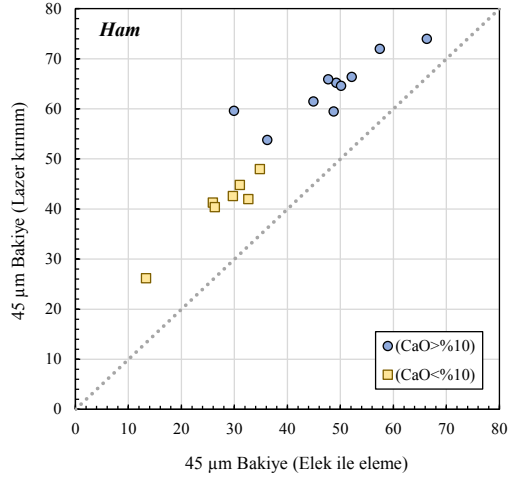
Kitap kapsamında incelenen 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan ham uçucu kül numuneleri için ölçülen  $D_{50}$  tane boyutu 15-110 µm aralığındadır. Basit bir kuru eleme işlemi ile (125 µm'lik elek) bu aralık 13-45 µm'ye çekilmiştir.



<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-78. Lazer kırınım yöntemi ile belirlenen temel tane boyu aralık dağılımları <sup>(a)</sup>

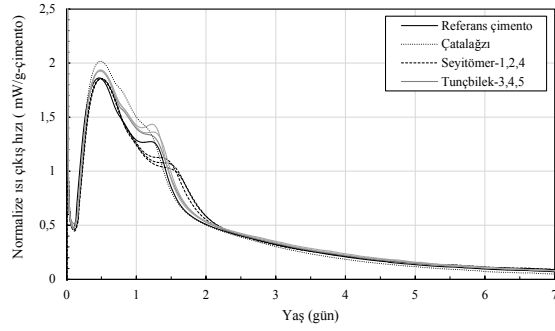
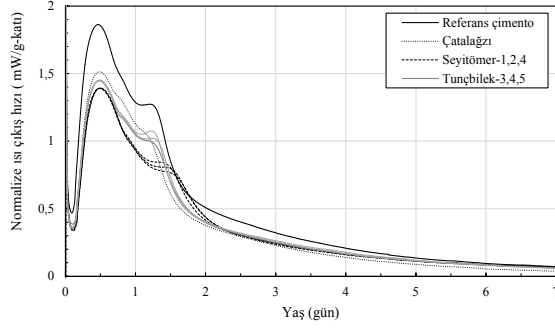
Kitap kapsamında incelenen ham uçucu kül numunelerinin lazer kırınım ve elek ile eleme yöntemleri ile belirlenen 45 µm bakiye değerleri arasındaki ilişki Şekil 4-79'da gösterilmiştir. Elek ile eleme yöntemi ile elde edilen bakiye değerler genel olarak bir miktar düşük kalmıştır. Bu yöntem, uygulayıcıdan ve uygulama koşullarından kolay etkilenebilmektedir.



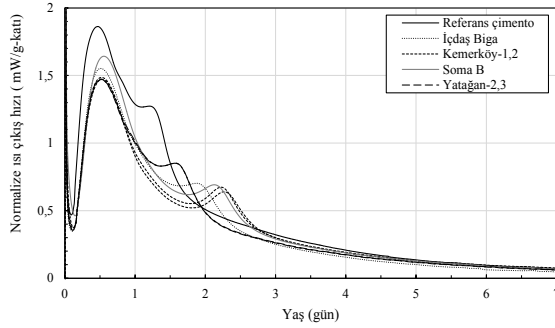
Şekil 4-79. Kitap kapsamında incelenen uçucu küllerde elek ile eleme ve lazer kırınım yöntemi ile belirlenen 45 µm bakiye değerleri arasındaki ilişki

Çimento ikame malzemesi olarak uçucu kül kullanımı nihai bağlayıcının hem hidrasyon ısı çıkış hızını, hem de kümülatif hidrasyon ısını etkiler. %25 ham uçucu kül + %75 referans çimento kullanılarak hazırlanan hamurlar için izotermal kalorimetri ile ölçülen ısı çıkış hızları Şekil 4-80’de özetlenmiştir.



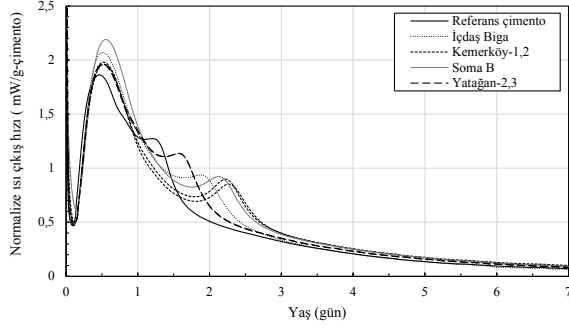


(a) ( $\text{CaO} < \%10 - \text{SO}_3 < \%2$ )

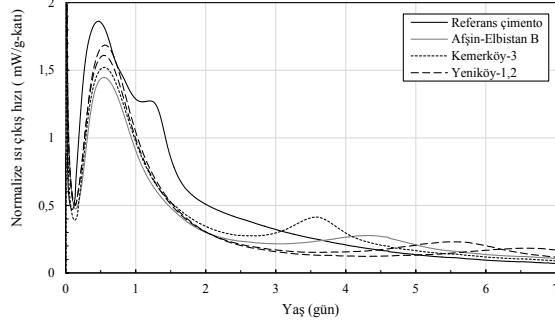


<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-80. %25 uçucu kül + %75 referans çimentosu içeren hamular için normalize ısı çıkış hızı <sup>(a)</sup>



(b) ( $\text{CaO} > \%10 - \text{SO}_3 : \%2-5$ )



(c) ( $\text{CaO} > \%10 - \text{SO}_3 : \%5-10$ )

<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-80. %25 uçucu kül + %75 referans çimentosu içeren hamular için normalize ısı çıkış hızı <sup>(a)</sup> (devamı)

Sunulan ısı çıkış hızları sol taraftaki eğrilerde bir gram katı bağlayıcıya, sağ taraftaki eğrilerde ise bir gram portland çimentosuna göre normalize edilmiştir. Yüksek kalsiyum içeren hamuların ısı çıkış hızlarının, diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca,  $\text{SO}_3$  miktarı arttıkça  $\text{C}_3\text{A}$ 'dan ve etrenjitten AFm fazlarının oluşumu gecikmiştir. Uçucu küllerin reaktivitesinin çimentodan çok daha düşük olması sebebi ile birim katı başına düşen ısı çıkış hızı (solda) düşmüştür. Birim çimento başına düşen ısı çıkış hızı (sağda) ise uçucu külün fiziksel varlığından dolayı

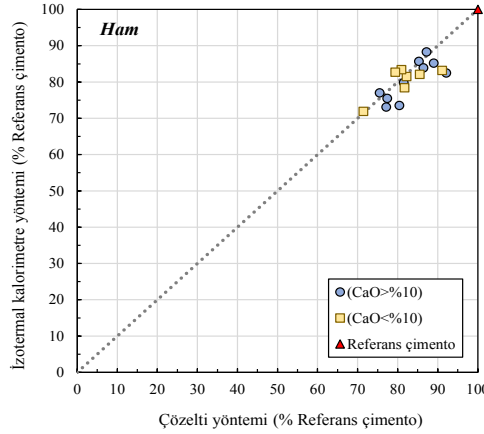
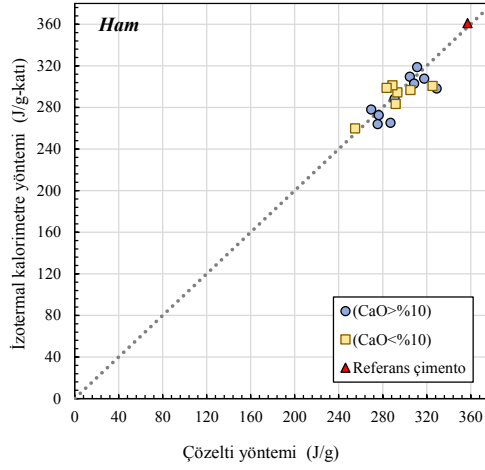
bir miktar artmıştır. Dolgu etkisi olarak adlandırılan bu durum iki temel faktöre bağlanabilir. Birincisi, uçucu kül taneleri, klinker tanelerinin yerini aldığı anda, klinker fazlarının hidratasyonu için nispeten daha fazla alan açılır. İkincisi, uçucu kül tanelerinin yüzeyi, hidratların heterojen çökeltmesi ve büyümesi için ek yüzey görevi görür.

Tablo 4-114. %25 ham uçucu kül içeren hamurlar için 7 günlük kümülatif hidratasyon ısıları

Termik santral	İzotermal kalorimetre yöntemi		Çözelti yöntemi	
	J/g-katı	%	J/g	%
Referans çimento	361,1	100	357,1	100
Afşin-Elbistan B	307,6	85,2	317,7	89,0
Çatalağzı	318,8	88,3	311,4	87,2
İÇDAŞ Biga	277,9	77	269,6	75,5
Kemerköy-1	288,3	79,8	290,9	81,5
Kemerköy-2	309,5	85,7	304,6	85,3
Kemerköy-3	302,9	83,9	308,5	86,4
Seyitömer-1	265,2	73,5	287,2	80,4
Seyitömer-2	272,5	75,5	276,3	77,4
Seyitömer-4	263,9	73,1	275,4	77,1
Soma B-2	298,1	82,5	329	92,1
Tunçbilek-3	296,7	82,1	305,2	85,5
Tunçbilek-4	283,2	78,4	291,8	81,7
Tunçbilek-5	294,4	81,5	293,4	82,2
Yatağan-2	259,7	71,9	255,0	71,4
Yatağan-3	301,3	83,4	288,8	80,9
Yeniköy-1	298,7	82,7	283,6	79,4
Yeniköy-2	300,6	83,2	325,3	91,1

<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

%75 referans portland çimentosu ile %25 uçucu kül kullanılarak hazırlanan hamurların hem izotermal kalorimetre, hem de çözelti yöntemiyle ölçülen 7-günlük kümülatif hidratasyon ısıları değerleri Tablo 4-114'te özetlenmiştir. İki yöntem de oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Uçucu kül ikamesi hidratasyon ısını düşürmüştür.



Şekil 4-81. %25 ham uçucu kül+%75 referans çimento içeren hamurların 7-günlük hidrasyon ısı ölçümlerinde çözeltili ve izotermal kalorimetre yöntemlerinin karşılaştırılması

Uçucu kül içeren çimentolu sistemlerin dayanım kazanımları, uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik kompozisyonu, inceliği, tanecik şekli, uçucu kül ikamesi düzeyi, kür koşulları gibi birçok faktörden etkilenir <sup>618</sup>. Ayrıca, kullanılan referans çimento ile uçucu külün uyumu da önemlidir. Genellikle, çimentonun belirli oranlarda uçucu kül ile ikamesi erken yaşlarda dayanım azalmasına neden olur. İleriki yaşlarda (90 gün veya daha fazla) referans numunesi ile kıyaslanabilir ölçüde veya referans numunesinden daha yüksek dayanımlar elde edilebilir <sup>105</sup>. %25 uçucu kül + %75 referans çimentosu kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin 28 ve 90 günlük aktivite indeksleri Tablo 4-115'te verilmiştir.

Tablo 4-115. Kitap kapsamında incelenen uçucu külleri içeren harç numunelerinin aktivite indeksleri <sup>(a)</sup>

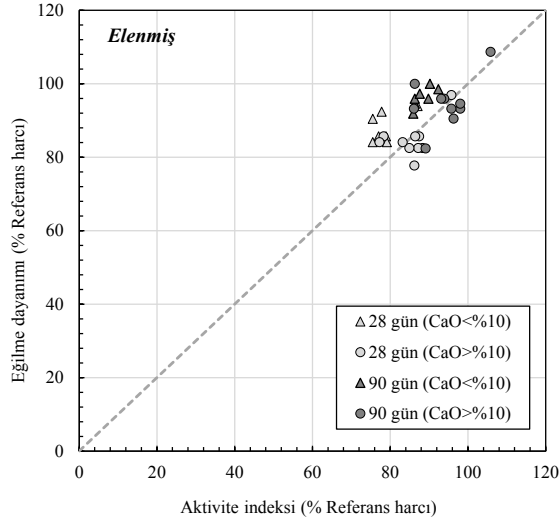
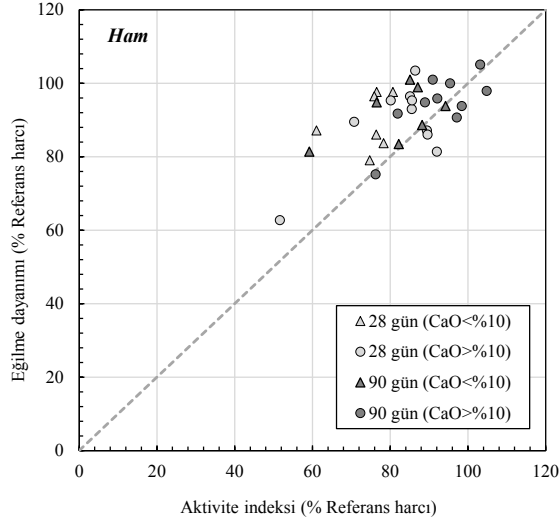
Termik santral	Aktivite İndeksi (%)			
	Ham kül		Elenmiş kül <sup>(c)</sup>	
	28-gün	90-gün	28-gün	90-gün
Afşin-Elbistan B	51,6	76,3	86,2	89,1
Çatalağzı	74,6	82,6	77,0	89,8
İçdaş Biga	89,6	104,9	83,2	93,1
Kemerköy-1	85,7	94,4	84,9	95,7
Kemerköy-2	89,4	98,9	86,4	93,9
Kemerköy-3	85,4	90,9	87,4	98,0
Seyitömer-1	80,7	85,1	87,0	92,4
Seyitömer-2	76,5	76,7	77,8	90,2
Seyitömer-4	60,9	59,3	75,5 <sup>(b)</sup>	86,3 <sup>(b)</sup>
Soma B-2	86,3	103,2	95,7	105,8
Tunçbilek-3	76,3	94,4	79,1	87,6
Tunçbilek-4	75,9	87,1	75,5 <sup>(b)</sup>	86,3 <sup>(b)</sup>
Tunçbilek-5	78,4	88,2	78,9	85,9
Yatağan-2	70,7	81,9	78,3	86,1
Yatağan-3	80,0	89,0	77,2	86,3
Yeniköy-1	91,9	97,2	87,2	96,3
Yeniköy-2	85,0	92,2	88,3	98,0

<sup>(c)</sup> Denejde125 µm'lik elekten laboratuvarda elenmiş uçucu kül kullanılmıştır.

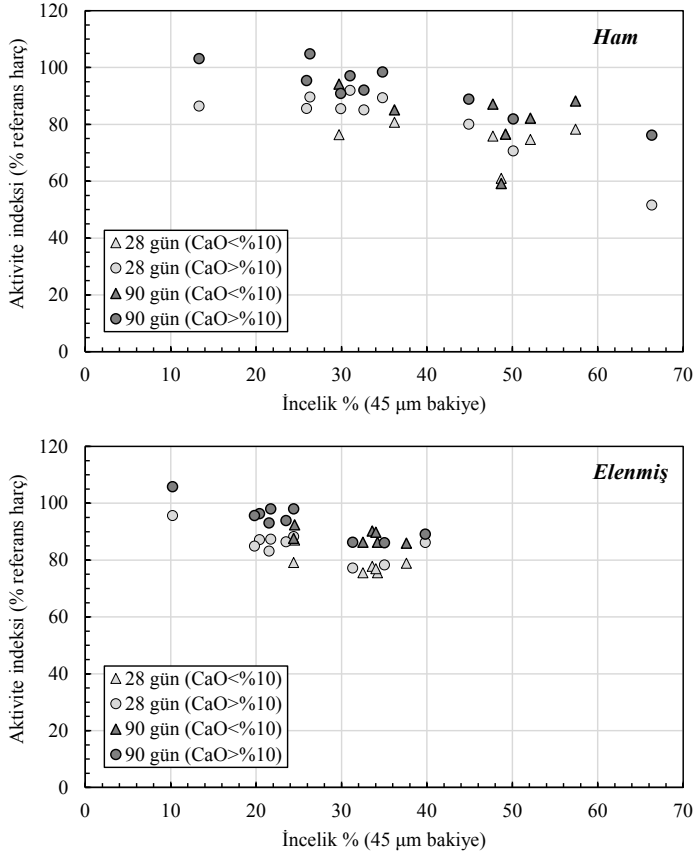
<sup>(b)</sup> Bu dökümler farklı zamanda yapılmış ve termik santralden temin edilen ek numuneler kullanılmıştır.

<sup>(a)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Bu harçlar için ölçülen eğilme dayanımları da % referans harç eğilme dayanımı cinsinden Şekil 4-82'de özetlenmiştir. Uçucu küllerin incelik değerleri ile aktivite değerleri arasındaki ilişki Şekil 4-83'te gösterilmiştir.



Şekil 4-82. %25 uçucu kül + %75 referans çimento içeren harçlar için eğilme ve basınç dayanımları (%referans harç cinsinden)



<sup>(A)</sup> Analiz sonuçları sadece numunelerin alındığı tarihi temsil etmektedir. Bulunan değerler mevcut durumu yansıtmayabilir.

Şekil 4-83. İncelenen uçucu küller için incelik ve aktive indeks değerleri <sup>(A)</sup>

Kitap kapsamında incelenen 2013 ve 2015 yılı çeşitli aylarda temin edilmiş olan ve sadece alındığı tarihi temsil eden ham uçucu kül numunelerinin derlenen sonuçları Türkiye'deki kömür yakıtlı termik sanrallerden üretilen uçucu küllerin kimyasal, mineralojik ve fiziksel çeşitliliğini gözler önüne sermektedir. Bu çeşitlilik büyük bir fırsattır. Üretilen uçucu küller başta inşaat sektörü uygulamaları olmak üzere, birçok farklı uygulamada hammadde, yan madde ya da ana ürün olarak kullanılabilir. Eleme gibi basit fiziksel ayırma yöntemleri ile uçucu küllerin tane dağılımı istenilen düzeye çekilebilir.

## Sonsöz

---

Türkiye’de enerji üretiminde dışa bağımlılığın azaltılmasına yönelik atılan adımlar son dönemde ivme kazanmış, yerli kaynakların etkin kullanımı için çeşitli teşvik politikaları benimsenmiştir. Ülkemizde kömür rezervlerin büyüklüğü ve ülke coğrafyasına dağılmış olması, birim enerji üretim maliyetinin düşüklüğü, temin güvencesi, güvenli taşınabilmesi ve stoklanabilmesi gibi sebeplerle diğer fosil yakıtların önüne geçmiştir. Ayrıca, alternatif kaynaklara kıyasla kömürün etkin kullanımında ülkemizde uzun yıllara dayanan bir araştırma ve uygulama tecrübesi mevcuttur.

Türkiye’nin hemen her bölgesinde kömür yakarak elektrik üreten termik santraller bulunur. Birçok eski santralde yerel linyit ve az da olsa yerel taş kömürü yakılır. Yeni kurulan termik santrallerde ise ithal kömür kullanımı ağırlıktadır. İstenilen özelliklere ulaşılması için farklı kömürlerin harmanlanması da yaygın bir uygulamadır. Termik santrallerin büyük çoğunluğunda pulverize kömür teknolojisi kullanılmaktadır. Akışkan yataklı yakma teknolojisini kullanan birkaç santral de vardır. Pulverize kömür yakan termik santrallerin birçoğunda baca gazı desülfürizasyon teknolojisi bulunmaktadır. Santrallerde yakma sonucunda çok farklı oranlarda (kömür ağırlığının %17-46’si aralığında) uçucu kül açığa çıkmaktadır. Önümüzdeki dönemde Türkiye uçucu kül üretiminde – linyit yakılması sonucu açığa çıkan küller de dahil olmak üzere - azalma beklenmemektedir.

Kitap kapsamında yapılan incelemeler, ülkemiz uçucu küllerinin çok geniş bir kimyasal, mineralojik ve fiziksel yelpazeye yayıldığını göstermektedir. Bu çeşitlilik birçok farklı uygulamada kullanılabilme potansiyeli anlamına gelir. Maalesef, bu çeşitlilikten yeterince faydalanılmamaktadır. Ülkemizde - özellikle linyit küllerinin - kullanım oranları oldukça düşüktür. Halihazırda uçucu küllerimizin ana kullanım alanı çimento ve beton sektörüdür. Bu alanda uzun yıllara dayanan son derece zengin bir sanayii ve akademik tecrübe birikimi mevcuttur. İleride ülkemiz uçucu küllerinin başta zemin ve madencilik uygulamaları olmak üzere hafif agrega, tuğla, gaz beton, seramik, cam ve zeolit üretimi ile çevre koruma ve tarım uygulamalarında kendine yer bulması beklenmektedir. Ayrıca kömür yakma ürünlerinin sadece uçucu külden ibaret olmadığı, taban külü, kazan cürufu, baca gazı desülfürizasyon alçısı gibi başka ürünlerinde açığı çıktığı, bu yan ürünlerinde birçok uygulamada kullanılabilmesi unutulmamalıdır.

Her uçucu kül, her uygulama için uygun değildir. Ayırma işlemleri ile uçucu kül kalitesi arttırılabilir ve çeşitli yan ürünler elde edilebilir. Henüz ayırıştırma işlemleri yeterince verimli değildir; çoğu ticarileşmemiştir. Bu konuda daha çok çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Planlanan uçucu kül iyileştirme/ayırıştırma işlemlerinin mümkün olduğunca termik santral bünyesine entegre bir şekilde düşünülmesi hem ekonomik, hem de çevresel açıdan bir artı olacaktır. Termik santrallerin yakma süreçlerinde kullandıkları kömürlerin olası değerli metal içeriklerini izlemeleri bu konuda bir başlangıç olacaktır. Planlanan iyileştirme/ayırıştırma işlemlerinin





geliştirilmesi, zenginleştirilmesi ve süreç ve maliyet optimizasyonları üzerine detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

Yıllar içerisinde gerek kömür kaynağındaki, gerekse termik santral işletme koşullarındaki olası değişiklikler üretilen uçucu külün kimyasal, mineralojik veya fiziksel özelliklerinde önemli değişikliklere neden olabilir. Bu sebeple, uçucu kül analiz sonuçları hem üretici, hem de kullanıcı tarafından sürekli olarak kontrol altında tutulmalı, her zaman güncel değerler ve performans uygunluğu izlenmelidir. Kitapta sunulan analiz sonuçları 2013-2015 yılları arasında, farklı günlerde termik santrallerden alınan anlık numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylere aittir. Bu sebeple, üretilen uçucu külün özelliklerini tam olarak temsil etmeyebilir.

Günümüzde, kömüre dayalı elektrik üretiminde küresel çapta değişiklikler meydana gelmektedir <sup>157</sup>. Bu değişiklikler, kömür yakma ürünlerinin sadece üretim süreçlerini, miktarlarını ve ilişkili çevre mevzuatlarını etkilemekle kalmaz; yakma ürünlerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerini ve dolayısı ile de kalitesini değiştirir. Yakın gelecekte ülkemizde üretilen uçucu külün özelliklerini etkilemesi kaçınılmaz bu değişiklikler şu şekilde sıralanabilir:

- Kömür madenciliği için değişen işletme koşullarının ithalat artışına yol açması;
- Yenilenebilir kaynakların artan kullanımı;
- Kömür yakımında gittikçe yaygınlaşan (özellikle biyokütle ile) ortak yakma uygulamaları;
- Salımları azaltmak için kömür yakıtlı termik santrallerde yapılan iyileştirmeler (özellikle kazanda ve yanma sonrası sistemlerinde);
- Daha yakıt-etkin ve daha işletim-esnek kazanların geliştirilmesi;
- Temel yakma süreçlerinde karbon yakalama ve depolama teknolojilerine hazırlanmak için yapılacak değişiklikler (örneğin oksijen-yakıt yakma);
- Yasal mevzuatlardaki değişiklikler (örneğin karbon vergisinin uygulanması ve yenilenebilir enerji hedeflerinin kömür kullanımına olan talebini etkilemesi).

Türkiye gibi kömüre dayalı elektrik üretiminin önemli ve sürekli olduğu ülkelerde düşük çevresel yüklerle sahip, daha sürdürülebilir bir enerji sektörü ancak kömür yakma ürünlerinin yüksek düzeyde geri dönüşümü ile mümkündür. Geniş uçucu kül yelpazemizin etkin değerlendirilmesinde öncü çimento ve beton sektörü dışında birçok başka sektöre de görev düşmektedir. Uçucu küllerin oluşum ve karakterizasyon süreçlerini anlamak ve mevcut küllerin özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek ve karşılaştırmak potansiyel uygulamaları belirlemek konusunda son derece önemlidir. Kitabımızın bu konudaki boşluğu doldurması dilekleriyle.

Saygılarımızla,

Dr. Çağla Meral Akgül  
Dr. Selin Yoncacı  
2021, Ankara

## Ek - Biyokütle külleri

Günümüzde fosil yakıtlardan kaynaklanan küresel ısınma problemleri nedeniyle fosil enerjiye alternatif olarak biyoenerji konusuna odaklanmak ciddi şekilde artmıştır. Bu nedenle son zamanlarda enerji dönüşümü için fosil yakıtlar yerine biyokütle kullanımını arttırmak amacıyla kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır.

Ülkemiz için biyokütle potansiyeli taşıyan belli başlı tarım atıklarına ait veriler malesef oldukça sınırlıdır; Tablo Ek-1'de 2003 yılı için atık miktarları sıralanmıştır. Tipik bir kömürün net kalorifik değeri (KD) 25 MJ/kg civarındadır. Bu göz önüne alındığında bölgesel olarak ülkemizde önem gösteren zeytin çekirdeği (KD=20,1 MJ/kg), fındık kabuğu, Antep fıstığı kabuğu (KD=18,6 MJ/kg) gibi tarım atıkları hem maliyetlerinin düşüklüğü, hem de kalorifik değerlerinin uygunluğu sebebi ile elektrik (ve hatta çimento) üretiminde yakıt olarak kullanılarak ekonomiye yeniden kazandırılabilir.

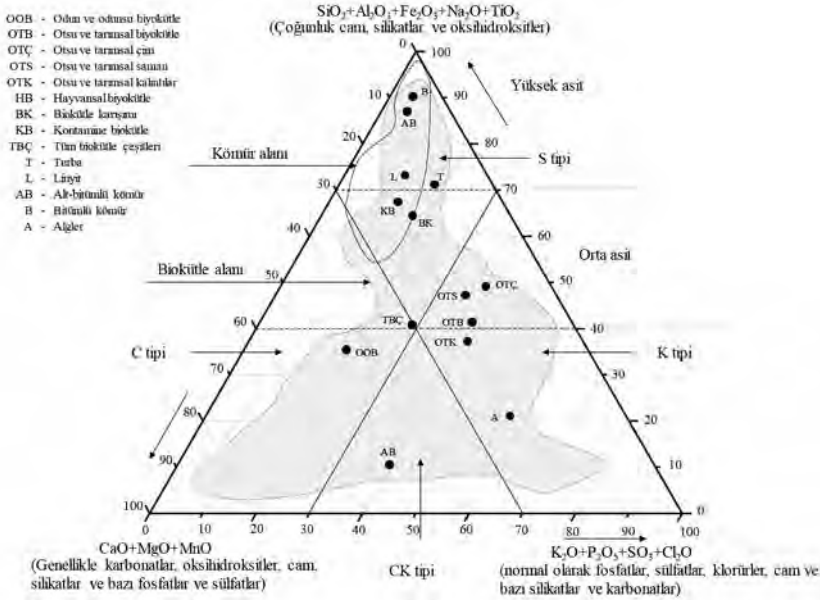
Tablo Ek-1. 2003 yılı için Türkiye'de bazı tarla ve bahçe ürünleri atık miktarları

Ürünler	Ürün miktarı (bin ton/yıl)	Atıklar	Kullanılabilir atık miktarı (bin ton/yıl)
Buğday	22.439	Saman	3.514
Arpa	8.327	Saman	1.344
Çavdar	253	Saman	54
Yulaf	323	Saman	48
Mısır	2.21	Sap	2.982
		Sömek	1.144
Pirinç	332	Saman	126
		Kabuk	62
Tütün	181	Sap	246
Pamuk	2.293	Sap	1.512
		Çırçır atığı	586
Ayçiçeği	836	Sap	1.355
Zeytin	1.497	Prina	747
		Budama	221
Fındık	653	Kabuk	453
		Budama	1.742
Antep Fıstığı	43	Kabuk	4
		Budama	168



Yenilenebilir yakıt olan biyokütlelerin yakılması ile elde edilen biyokütle küllerinin de önemi gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin, biyokütlelerin küresel büyüme tahminleri baz alınarak yapılan hesaplamalarla kuru bazda %6,8 ortalama kül verimi ile yakılan biyokütlelerin 7 milyar ton olduğu varsayılırsa, dünya çapında yılda yaklaşık 476 milyon ton biyokütle külü üretilebilmektedir <sup>619</sup>. Bu miktar ise neredeyse yılda üretilen kömür külü miktarı ile karşılaştırılabilir seviyededir <sup>128</sup>.

Biyokütle külleri kimyasal açıdan, farklı orijinlere sahip ve birbirine bağlı katı, sıvı ve gaz fazları içeren, heterojen ve çok bileşenli değişken bileşime sahip kompleks bir inorganik-organik karışım olarak tanımlanabilir. Geniş bir çeşitlilik gösteren biyokütle külleri içeriklerine, içeriklerindeki fazlara ve kökenlerine göre gruplara ayrılabilir (Şekil Ek-1) <sup>620</sup>. Biyokütle küllerinin kimyasal bileşim aralıkları Şekil Ek-2'de sunulmuştur <sup>621</sup>. Tabloda kıyaslama için temel katı fosil yakıt tiplerine ait küllerin kimyasal bileşimleri de gösterilmiştir.



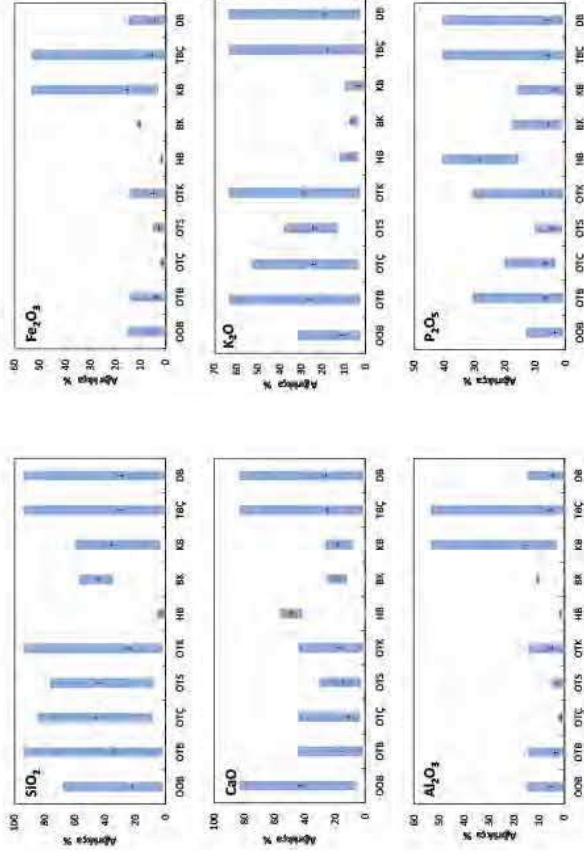
Şekil Ek-1. Biyokütle külünün kimyasal sınıflandırma sistemindeki 86 biyokütle çeşidi ve 38 fosil yakıtın yaklaşık kompozisyon alanları (Veriler <sup>149,619,621,622'</sup>dan alınarak <sup>620'</sup>e göre uyarlanmıştır.)

C, S, K ve CK 4 adet inorganik kimyasal biokütle tipini temsil etmektedir. K tipi bio kütleler genellikle düşük asitli olarak sınıflandırılırlar. K tipi biokütle çeşidinin karakteristik özelliği olarak opal, karbonat, fosfat, sülfat, klor ve nitrat içermesi gösterilirken, S tipi biokütleler ise silikat ve opal harici oksihidratları içermektedir. Düşük asitli C ve CK tipi biokütleler ise teknolojik ve çevresel açıdan en problematik biokütle kaynağı olarak nitelendirilirler.

Literatürde güncel kaynaklar bulunmasına rağmen, yenilikçi ve sürdürülebilir biyokütle küllerinin daha verimli yönetilmesi için bu konudaki araştırmaların artırılması ve daha kapsamlı olarak çalışmaların yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

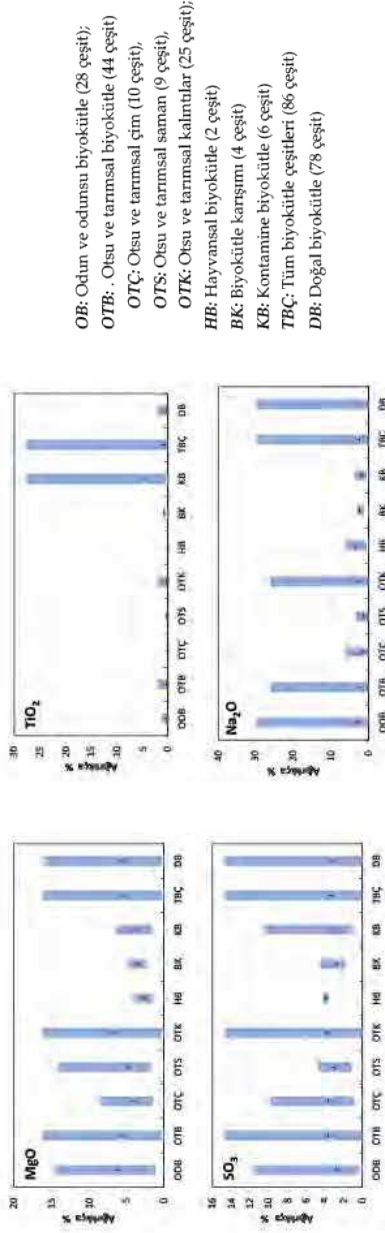


Şekil Ek-2. Biyokütle grup ve altgrup küllerinin kimyasal bileşim aralıkları (Toplam değerler %100'e normleştirilmiştir. “+” bileşenin ortalama değeri temsil etmektedir.)<sup>621</sup>



OB: Odun ve odunsu biyokütle (28 çeşit);  
 OTB: Otsu ve tarımsal biyokütle (44 çeşit)  
 OTÇ: Otsu ve tarımsal çim (10 çeşit),  
 OTS: Otsu ve tarımsal saman (9 çeşit),  
 OTK: Otsu ve tarımsal kalmıklar (25 çeşit);  
 HB: Hayvansal biyokütle (2 çeşit)  
 BK: Biyokütle karışımı (4 çeşit)  
 KB: Kontamine biyokütle (6 çeşit)  
 TBÇ: Tüm biyokütle çeşitleri (86 çeşit)  
 DB: Doğal biyokütle (78 çeşit)

Şekil Ek-2. (Devam) Biyokütle grup ve altgrup küllerinin kimyasal bileşim aralıkları (Toplam değerler %100'e normalleştirilmiştir. "+" bileşenin ortalama değeri temsil etmektedir.)<sup>621</sup>



# Kaynaklar

1. RILEM TC 67. RILEM Report 7 - Fly Ash in Concrete: Properties and Performance. (2005).
2. Swaine, D. J. & Goodarzi, F. Environmental Aspects of Trace Elements in Coal. vol. 2 (Springer Netherlands, 1995).
3. Chindaprasirt, P. & Rattanasak, U. Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer. Waste Manag. 30, 667-672 (2010).
4. Glinicki, M. A. & Zielinski, M. The influence of CFBC fly ash addition on phase composition of air-entrained concrete. Bull. Polish Acad. Sci. Sci. 56, 45-52 (2008).
5. Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. & Jaturapitakkul, C. Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials. Cem. Concr. Compos. 33, 55-60 (2011).
6. Shao, N., Liu, Z., Fan, J., Zhou, Y. & Wang, D. Phase evolution of fly ash calcium constituent at early alkali activation reaction age. Mater. Lett. 174, 175-179 (2016).
7. Jaturapitakkul, C. & Cheerarat, R. Development of bottom ash as pozzolanic material. J. Mater. Civ. Eng. 15, 48-53 (2003).
8. Fernandez-Turiel, J.-L., Georgakopoulos, A., Gimeno, D., Papastergios, G. & Kolovos, N. Ash deposition in a pulverized coal-fired power plant after high-calcium lignite combustion. Energy & Fuels 18, 1512-1518 (2004).
9. Seyedian Choubi, S., Meral, C., Akbas, Y. S. & Bayramtan, M. T. A comparative study of alkali-activated fly ashes under heat-exposure. In Sustainable Construction Materials and Technologies 4 10 (2016).
10. Ahmaruzzaman, M. A review on the utilization of fly ash. Prog. Energy Combust. Sci. 36, 327-363 (2010).
11. Tokyay, M. Cement and concrete mineral admixtures. (CRC Press Book, 2016).
12. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018) - Yerli Kaynaklara Dayalı Enerji Üretim Programı Eylem Planı. (2014).
13. International Energy Agency. Electricity information: Overview. (2018).
14. Tangüler, M., Gürsel, A. P. & Meral, Ç. Türkiye ' de Uçuş Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi. in 9. Ulusal Beton Kongresi 431-441 (2015).
15. Wang, S. Application of solid ash based catalysts in heterogeneous catalysis. Environ. Sci. Technol. 42, 7055-7063 (2008).
16. American Coal Ash Association. 2017 American coal combustion product (CCP) production & use survey report. (2017).
17. Yao, Z. T. et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. Earth-Science Rev. 141, 105-121 (2015).
18. Central Electricity Authority-New Delhi. Report on fly ash generation at coal/lignite based thermal power stations and its utilization in the country in for the year 2017-18. (2018).
19. Türkiye İstatistik Kurumu. Termik Santral Su, Atıksu ve Atık İstatistikleri. (2016).
20. University of Kentucky - Kentucky Geological Survey. Classification and Rank of Coal. [https://www.uky.edu/KGS/coal/coal\\_kinds.htm](https://www.uky.edu/KGS/coal/coal_kinds.htm) (2016).
21. World Energy Council. World Energy Resources: Coal. (2013).
22. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. (2019).
23. Tomeczek, J. & Palugniok, H. Kinetics of mineral matter transformation during coal combustion. Fuel 81, 1251-1258 (2002).
24. Miller, B. G. Clean coal engineering technology. (Butterworth-Heinemann, 2011).
25. Ward, C. R. Coal and coal geology. (1984).
26. World Energy Council. World Energy Resources: Coal 2016. World Energy Council. 24, 1028 (2016).
27. Maden Tetkik Arama Enstitüsü - Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı. Türkiye kömür sahaları ve potansiyel kullanım alanları haritası. (2016).
28. Kazaz, G. & Kara, Ö. Türkiye'nin kömür hikayeleri. (2016).
29. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. 2015 Kömür (Linyit) Sektör Raporu. (2015).
30. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. (2016).
31. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Ulusal Enerji Denge Tabloları. (2017).
32. Sheng, C. & Li, Y. Experimental study of ash formation during pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures. Fuel 87, 1297-1305 (2008).
33. Elliott, M. A. Chemistry of coal utilization. Second supplementary volume. (John Wiley and Sons, New York, NY, 1981).
34. TMMOB Makina Mühendisleri Odası. Türkiye'de Termik Santraller, Yayın no: MMO/668. (2017).
35. Alkaya, D. The investigation of fly ash use in soil improvement. Electron. J. Constr. 61-72 (2009).
36. Feuerborn, H. J. Coal ash utilisation over the world and in Europe. in Workshop on Environmental and Health Aspects of Coal Ash Utilization (2005).
37. U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration Research and Technology. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Publication Number: FHWA-RD-97-148. (2016).
38. Ramachandran, V. S. Concrete Admixtures Handbook: properties, Science, and Technology. (Noyes Publications, 1996).
39. Tangüler, M., Meral, C. & Aslam, I. Early-Age Performance of Binary Fly Ash- Portland Cement Blends. in Eurasia 2014 Waste Management Symposium, 28-30 April 1-10 (2014).
40. Sear, L. K. A. Properties and use of coal fly ash : a valuable industrial by-product. (Thomas Telford, 2001).
41. Biege, N., Pretti, H. & Pirwitz, W. Emerging and competing technologies for particulate control in cement plants. in 39th IEEE Cement Industry Technical Conference 326 (1997).
42. Balgün, Y. E. Elektrostatik filtre verimini artırıcı çözümlerin incelenmesi. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015 vol. 1 (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009).
43. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. Termik Santraller. in Enerji Yatırımları Fizibilite Raporu Hazırlanması Semineri 0-21 (2012).
44. Batu, A. Investigation of combustion characteristics of indigenous lignite in a 150kW circulating fluidized bed combustor. (Middle East Technical University, 2008).
45. Sarkar, A., Rano, R., Mishra, K. K. & Sinha, I. N. Particle size distribution profile of some Indian fly ash-a comparative study to assess their possible uses. Fuel Process. Technol. 86, 1221-1238 (2005).
46. Vassilev, S. V. & Vassileva, C. G. Mineralogy of combustion wastes from coal-fired power stations. Fuel Process. Technol. 47, 261-280 (1996).
47. Rubio, B., Izquierdo, M. T., Mayoral, M. C., Bona, M. T. & Martínez-Tarazona, R. M. Preparation and characterization of carbon-enriched coal fly ash. J. Environ. Manage. 88, 1562-1570 (2008).
48. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Elektrik enerjisi üretimi - tüketimi - kayıpları. (2017).
49. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. 2016 yılı ulusal enerji denge tablosu. <http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tabloları/Denge-Tabloları> (2016).
50. Turhan, Ş., Arıkan, I. H., Yücel, B., Varinlioğlu, A. & Köse, A. Evaluation of the radiological safety aspects of utilization of Turkish coal combustion fly ash in concrete production. Fuel 89, 2528-2535 (2010).
51. Türkiye İstatistik Kurumu. Termik Santral Su , Atıksu ve Atık İstatistikleri. (2008).
52. Türkiye İstatistik Kurumu. Termik Santral Su , Atıksu ve Atık İstatistikleri. (2010).
53. Türkiye İstatistik Kurumu. Termik Santral Su , Atıksu ve Atık İstatistikleri. (2012).
54. Türkiye İstatistik Kurumu. Termik Santral Su , Atıksu ve Atık İstatistikleri. (2014).
55. Brown, R. C. & Dykstra, J. Systematic errors in the use of loss-on-ignition to measure unburned carbon in fly ash. Fuel 74, 570-574 (1995).
56. Conzemius, R. J., Welcomer, T. D. & Svec, H. J. Elemental

- Partitioning in Ash Depositories and Material Balances for a Coal Burning Facility by Spark Source Mass Spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 18, 12–18 (1984).
57. Vassilev, S. V., Menendez, R., Alvarez, D., Diaz-Somoano, M. & Martinez-Tarazona, M. R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 1. Characterization of feed coals and fly ashes. *Fuel* 82, 1793–1811 (2003).
  58. Vassilev, S. V., Menendez, R., Diaz-Somoano, M. & Martinez-Tarazona, M. R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates. *Fuel* 83, 585–603 (2004).
  59. Vassilev, S. V. & Vassileva, C. G. Geochemistry of coals, coal ashes and combustion wastes from coal-fired power stations. *Fuel Process. Technol.* 51, 19–45 (1997).
  60. Fisher, G. L. et al. Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash. *Environ. Sci. Technol.* 12, 447–451 (1978).
  61. Fisher, G. L. et al. Size-dependence of the physical and chemical properties of coal fly ash. in *American Chemical Society Meeting* vol. 224 (1977).
  62. Fisher, G. L. & Natusch, D. F. S. Size dependence of the physical and chemical properties of coal fly ash. (1979).
  63. Ghosal, S. & Self, S. A. Particle size-density relation and cenosphere content of coal fly ash. *Fuel* 74, 522–529 (1995).
  64. Kolay, P. K. & Singh, D. N. Physical, chemical, mineralogical, and thermal properties of cenospheres from an ash lagoon. *Cem. Concr. Res.* 31, 539–542 (2001).
  65. Maroto-Valer, M. M., Taulbee, D. N. & Hower, J. C. Characterization of differing forms of unburned carbon present in fly ash separated by density gradient centrifugation. *Fuel* 80, 795–800 (2001).
  66. Özdemir, O. Tunçbilek Termik Santrali uçucu küllerin karakterizasyonu ve yan ürünlerin elde edilmesi. (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2001).
  67. Vassilev, S. V. et al. Phase-mineral and chemical composition of composite samples from feed coals, bottom ashes and fly ashes at the Soma power station, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 61, 35–63 (2005).
  68. Vassilev, S. V., Menendez, R., Borrego, A. G., Diaz-Somoano, M. & Martinez-Tarazona, M. R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 3. Characterization of magnetic and char concentrates. *Fuel* 83, 1563–1583 (2004).
  69. Vassilev, S. V. et al. Phase-mineral and chemical composition of fractions separated from composite fly ashes at the Soma power station, Turkey. *Int. J. Coal Geol.* 61, 65–85 (2005).
  70. Vassilev, S. V. & Menendez, R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 4. Characterization of heavy concentrates and improved fly ash residues. *Fuel* 84, 973–991 (2005).
  71. Niewiadomski, M., Hupka, J., Bokotko, R. & Miller, J. D. Recovery of coke fines from fly ash by air sparged hydrocyclone flotation. *Fuel* 78, 161–168 (1999).
  72. Gray, M. L. et al. Physical cleaning of high carbon fly ash. *Fuel Process. Technol.* 76, 11–21 (2002).
  73. Ilic, M., Cheeseman, C., Sollars, C. & Knight, J. Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash. *Fuel* 82, 331–336 (2003).
  74. Ban, H., Li, T. X., Hower, J. C., Schaefer, J. L. & Stencel, J. M. Dry triboelectrostatic beneficiation of fly ash. *Fuel* 76, 801–805 (1997).
  75. Ayala, J., Blanco, F., Garcia, P., Rodriguez, P. & Sancho, J. Asturian fly ash as a heavy metals removal material. *Fuel* 77, 1147–1154 (1998).
  76. Bayat, O. Characterisation of Turkish fly ashes. *Fuel* 77, 1059–1066 (1998).
  77. Vassilev, S. V. & Vassileva, C. G. Methods for Characterization of Composition of Fly Ashes from Coal-Fired Power Stations: A Critical Overview. *Energy & Fuels* 19, 1084–1098 (2005).
  78. Baltrus, J. P., Wells, A. W., Fauth, D. J., Diehl, J. R. & White, C. M. Characterization of carbon concentrates from coal-combustion fly ash. *Energy and Fuels* 15, 455–462 (2001).
  79. Gray, M. L., Champagne, K. J., Soong, Y. & Finseth, D. H. Parametric study of the column oil agglomeration of fly ash. *Fuel* 80, 867–871 (2001).
  80. McCarthy, M. J., Jones, M. R., Zheng, L., Robl, T. L. & Groppo, J. G. Characterising long-term wet-stored fly ash following carbon and particle size separation. *Fuel* 111, 430–441 (2013).
  81. Hower, J. C. et al. Coal-derived unburned carbons in fly ash: A review. *Int. J. Coal Geol.* 179, 11–27 (2017).
  82. Soong, Y. et al. Dry beneficiation of high loss-on-ignition fly ash. *Sep. Purif. Technol.* 26, 177–184 (2002).
  83. Baltrus, J. P., Diehl, J. R., Soong, Y. & Sands, W. Triboelectrostatic separation of fly ash and charge reversal. *Fuel* 81, 757–762 (2002).
  84. Noor-ul-Amin. A multi-directional utilization of different ashes. *RSC Adv.* 4, 1681–1686 (2014).
  85. Blissett, R. S. & Rowson, N. A. A review of the multicomponent utilisation of coal fly ash. *Fuel* 97, 1–23 (2012).
  86. Ailun, Y. et al. The True Cost of Coal - An Investigation into Coal Ash in China. (2010).
  87. EPA. Frequent questions about the coal ash disposal rule. (2017).
  88. Vassilev, S. V. & Vassileva, C. G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel* 86, 1490–1512 (2007).
  89. Page, L. Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts. (1979).
  90. ACI. Use of fly ash in concrete. vol. 96 (2003).
  91. Baba, A., Gurdal, G., Sengunalp, F. & Ozay, O. Effects of leachant temperature and pH on leachability of metals from fly ash. A case study: Can thermal power plant, province of Canakkale, Turkey. *Environ. Monit. Assess.* 139, 287–298 (2008).
  92. Davidson, R. M. & Clarke, L. B. IEA Coal Research - Trace elements in coal. IECPER/21, London (1996).
  93. Moreno, N. et al. Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes. *Fuel* 84, 1351–1363 (2005).
  94. Hower, J. C. et al. Characterization of fly ash from Kentucky power plants. *Fuel* 75, 403–411 (1996).
  95. Kim, B. & Prezzi, M. Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste Manag.* 28, 649–659 (2008).
  96. Diaz, E. I., Allouche, E. N. & Eklund, S. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel* 89, 992–996 (2010).
  97. Yan, L. et al. Feasibility of fly ash-based composite coagulant for coal washing wastewater treatment. *J. Hazard. Mater.* 203–204, 221–228 (2012).
  98. Qi, L. & Yuan, Y. Characteristics and the behavior in electrostatic precipitators of high-alumina coal fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China. *J. Hazard. Mater.* 192, 222–225 (2011).
  99. Mishra, D. P. & Das, S. K. A study of physico-chemical and mineralogical properties of Talcher coal fly ash for stowing in underground coal mines. *Mater. Charact.* 61, 1252–1259 (2010).
  100. Dutta, B. K., Khanra, S. & Mallick, D. Leaching of elements from coal fly ash: Assessment of its potential for use in filling abandoned coal mines. *Fuel* 88, 1314–1323 (2009).
  101. Jankowski, J., Ward, C. R., French, D. & Groves, S. Mobility of trace elements from selected Australian fly ashes and its potential impact on aquatic ecosystems. *Fuel* 85, 243–256 (2006).
  102. Celik, K. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cem. Concr. Compos.* 56, 59–72 (2015).
  103. Ward, C. R. & French, D. Determination of glass content and



- estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry. *Fuel* 85, 2268–2277 (2006).
104. Meral, C., Benmore, C. J. & Monteiro, P. J. M. The study of disorder and nanocrystallinity in C–S–H, supplementary cementitious materials and geopolymers using pair distribution function analysis. *Cem. Concr. Res.* 41, 696–710 (2011).
  105. Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Constr. Build. Mater.* 67, 14–19 (2014).
  106. Ranjbar, N. & Kuenzel, C. Cenospheres: A review. *Fuel* 207, 1–12 (2017).
  107. Valentim, B. et al. Characteristics of ferrospheres in fly ashes derived from Bokaro and Jharia (Jharkand, India) coals. *Int. J. Coal Geol.* 153, 52–74 (2016).
  108. Blissett, R. & Rowson, N. The processing of pulverised fuel ash. in 15th Conference on environment and mineral processing - Vol. 2, 341–348 (2011).
  109. Ferrarini, S. F., Cardoso, A. M., Paprocki, A. & Pires, M. Integrated synthesis of zeolites using coal fly ash: Element distribution in the products, washing waters and effluent. *J. Braz. Chem. Soc.* 27, 2034–2045 (2016).
  110. Shi, X. S., Collins, F. G., Zhao, X. L. & Wang, Q. Y. Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *J. Hazard. Mater.* 237–238, 20–29 (2012).
  111. Wenk, H.-R. & Bulakh, A. Minerals: their constitution and origin. (press syndicate of the university of cambridge, 2005).
  112. Spears, D. A. & Zheng, Y. Geochemistry and origin of elements in some UK coals. *Int. J. Coal Geol.* 38, 161–179 (1999).
  113. Dai, S. et al. Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China. *Int. J. Coal Geol.* 81, 320–332 (2010).
  114. Dudas, M. J. & Warren, C. J. Submicroscopic model of fly ash particles. *Geoderma* 40, 101–114 (1987).
  115. Freitas, A. A., Santos, R. L., Colaço, R., Bayão Horta, R. & Canongia Lopes, J. N. From lime to silica and alumina: Systematic modeling of cement clinkers using a general force-field. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17, 18477–18494 (2015).
  116. Snellings, R., Mertens, G. & Elsen, J. Supplementary cementitious materials. *Rev. Mineral. Geochemistry* 74, 211–278 (2012).
  117. Morey, G. W. Phase-equilibrium Relations of the Common Rock-forming Oxides Except Water - George W. Morey - Google Books. (1964).
  118. Bartoňová, L., Klika, Z. & Spears, D. A. Characterization of unburned carbon from ash after bituminous coal and lignite combustion in CFBs. *Fuel* 86, 455–463 (2007).
  119. Pedersen, K. H., Jensen, A. D., Skjøth-Rasmussen, M. S. & Dam-Johansen, K. A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete. *Prog. Energy Combust. Sci.* 34, 135–154 (2008).
  120. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. & Panarese, W. C. Design and Control of Concrete Mixtures. (Portland Cement Association, 2002).
  121. Benschmidt, N. et al. Handbook on fly ash in concrete. (Verlag Bau+Technik, 2010).
  122. Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S. & Demir, İ. Uçucu Kül Bölüm II : Kimyasal , Mineralojik ve Morfolojik Özellikler. *Electron. J. Constr.* 5, 33–42 (2009).
  123. Tokyay, M. Betonda UK, GYFC ve SD'nin Rolü: Mevcut Bilgi Birikimi. in Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 21-23 Şubat 201–238 (2013).
  124. Sarkar, A., Rano, R., Udaybhanu, G. & Basu, A. K. A comprehensive characterisation of fly ash from a thermal power plant in Eastern India. *Fuel Process. Technol.* 87, 259–277 (2006).
  125. Hackley, V. a, Lum, L. S., Gintautas, V. & Ferraris, C. F. NISTIR 7097: Particle Size Analysis by Laser Diffraction Spectrometry: Application to Cementitious Powders. (2004).
  126. Brunauer, S., Emmett, P. H. & Teller, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60, 309–319 (1938).
  127. Mandelbrot, B. B. Fractals and the geometry of nature. (1967).
  128. Izquierdo, M. & Querol, X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *Int. J. Coal Geol.* 94, 54–66 (2012).
  129. Scheetz, B. E. Proceedings of state regulation of coal combustion by-product placement at mine sites: a technical interactive forum. in Proceedings of state regulation of coal combustion by-product placement at mine sites: a technical interactive forum (eds. Kimery C. Vories & Harrington, A.) 35–42 (U.S. Department of the Interior, Office of Surface Mining Coal Research Center, Southern Illinois University Carbondale, 2004).
  130. Polic, P. S., Ilic, M. R. & Popovic, A. R. Environmental impact assessment of lignite fly ash and its utilization products as recycled hazardous wastes on surface and ground water quality. *Water Pollut.* 5, 61–110 (2005).
  131. Hulett, L. D., Weinberger, A. J., Northcutt, K. J. & Ferguson, M. Chemical species in fly ash from coal-burning power plants. *Science* (80-. ). 210, 1356 (1980).
  132. Kukier, U., Ishak, C. F., Sumner, M. E. & Miller, W. P. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. *Environ. Pollut.* 123, 255–266 (2003).
  133. Kaakinen, J. W., Jorden, R. M., Lawasani, M. H. & West, R. E. Trace element behavior in coal-fired power plant. *Environ. Sci. Technol.* 9, 862–869 (1975).
  134. Natusch, D. F., Wallace, J. R. & Evans, C. a. Toxic trace elements: preferential concentration in respirable particles. *Science* 183, 202–4 (1974).
  135. Martinez-Tarazona, M. R. & Spears, D. A. The fate of trace elements and bulk minerals in pulverized coal combustion in a power station. *Fuel Process. Technol.* 47, 79–92 (1996).
  136. Finkelman, R. Modes of Occurrences of Potential Hazardous Elements in Coal, Level of Confidence. *Fuel Process Technol.* 39, 21–34 (1994).
  137. Querol, X. et al. Extraction of soluble major and trace elements from fly ash in open and closed leaching systems. *Fuel* 80, 801–813 (2001).
  138. Ward, C. R. et al. Element mobility from fresh and long-stored acidic fly ashes associated with an Australian power station. *Int. J. Coal Geol.* 80, 224–236 (2009).
  139. Jones, D. R. The Leaching of Major and Trace Elements from Coal Ash. in Environmental Aspects of Trace Elements in Coal. *Energy & Environment*, vol 2. (eds. D.J., S. & F., G.) 221–262 (Springer, Dordrecht, 1995). doi:10.1007/978-94-015-8496-8\_12.
  140. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. (2019) doi:10.1520/C0618-15.2.
  141. Manz, O. E. Coal fly ash: a retrospective and future look. *Fuel* 78, 133–136 (1999).
  142. TS EN 197-1. Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. (2012).
  143. EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. (2012).
  144. EN 450-1. Fly ash for concrete - Part 1: Definition , specifications and conformity criteria. (2012).
  145. Tokyay, M. & Erdoğan, K. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. (TÇMB / AR-GE / Y 98.3, 1998).
  146. Thomas, M. D. A., Shehata, M. H. & Shashiprakash, S. G. The use of fly ash in concrete: Classification by composition. *Cem. Concr. Aggregates* 21, 105 (1999).
  147. William, R. R., Thiery, R. G., Schuller, R. M. & Suloway, J. J. Coal fly ash: a review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts. (Illinois Institute of Natural Resources, State Geological Survey Division, 1981).
  148. Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., Baxter, D. & Andersen, L. K. A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 2. Potential applications of the classification systems. *Fuel* 88, 246–254 (2009).
  149. Vassilev, S. V. & Vassileva, C. G. A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 1. Chemical and mineral classification systems. *Fuel* 88, 235–245 (2009).
  150. Pedersen, K., Andersen, S., Jensen, A. & Damjohansen, K.

- Replacement of the foam index test with surface tension measurements. *Cem. Concr. Res.* 37, 996–1004 (2007).
151. American Coal Ash Association. American Coal Combustion Products Production & Use Statistics. (2015).
  152. Central Electricity Authority-New Delhi. Report on fly ash generation at coal/lignite based thermal power stations and its utilization in the country for the year 2014-2015. (2015).
  153. Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P. B. S. & Mahapatra, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Prog. Nat. Sci.* 19, 1173–1186 (2009).
  154. Ma, S.-H., Xu, M.-D., Qiqige, Wang, X.-H. & Zhou, X. Challenges and developments in the utilization of fly ash in China. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 8, 781–785 (2017).
  155. American Coal Ash Association. 2015 Coal combustion product (CCP) production use survey report. <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A009> (2015).
  156. European Coal Combustion Products Association. Production and Utilisation of CCPs in 2009 in Europe (EU 15). [http://www.ecoba.com/evjm/media/ccps/ecoba\\_statistics\\_2009.pdf](http://www.ecoba.com/evjm/media/ccps/ecoba_statistics_2009.pdf) (2009).
  157. Heidrich, C., Feuerborn, H. & Weir, A. Coal Combustion Products: a global perspective. in *World of Coal Ash Conference 17* (2013).
  158. Gürsel, A. P. & Meral, C. Türkiye’de Çimento Üretimini Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi. in *2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü 1–13* (2012).
  159. Kikuchi, R. Application of coal ash to environmental improvement: Transformation into zeolite, potassium fertilizer, and FGD absorbent. *Resour. Conserv. Recycl.* 27, 333–346 (1999).
  160. TEİAŞ. Türkiye elektrik istatistikleri. <https://www.teias.gov.tr/tr/elektrik-istatistikleri> (2017).
  161. Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. (McGraw Hill Professional, 2013).
  162. Meral Akgül, Ç., Yener, A. P. & Bayramtan, M. Türkiye’de uçucu küllü betonlar için yaşam döngüsü analizi. *İMO İnşaat Bülten* 148, 4–12 (2018).
  163. T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Çimento üretimi sektörel uygulama kılavuzu - Sanayiden kaynaklanan hava kirliliğinin belirlenmesi ve azaltılmasına yönelik uygulamanın kolaylaştırılmasının sağlanması projesi. (2020).
  164. Bhatti, J. I., Gajda, J., Botha, F. & Bryant, M. M. Utilization of discarded fly ash as a raw material in the production of Portland cement. *J. ASTM Int.* 3, (2006).
  165. Bhatti, J. I. et al. Use of high carbon fly ash as a component of raw mix for cement manufacture. (1998).
  166. Bhatti, J. I., Gajda, J. & Miller, F. M. Commercial demonstration of high-carbon fly ash technology in cement manufacturing. in *International Ash Utilization Symposium* (2003).
  167. Naik, T. R. & Singh, S. S. Fly ash generation and utilization - An overview. in *Recent Trend in Fly Ash Utilization 1–25* (Ministry of Environment and Forests Management, Government of India, 1993).
  168. Dilmore, R. M. & Neufeld, R. D. Autoclaved aerated concrete produced with low NOx burner/selective catalytic reduction fly ash. *J. Energy Eng.* 127, 37–50 (2001).
  169. Siddique, R. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cem. Concr. Res.* 33, 539–547 (2003).
  170. Cammarota, A., Chirone, R., Solimene, R. & Urciuolo, M. Beneficiation of pulverized coal combustion fly ash in fluidised bed reactors. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 32, 1324–1333 (2008).
  171. Freeman, E., Gao, Y.-M., Hurt, R. & Suuberg, E. Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air-entraining admixtures for concrete. *Fuel* 76, 761–765 (1997).
  172. McCarthy, M. J. & Dhir, R. K. Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel* 84, 1423–1432 (2005).
  173. Tokyay, M. Effect of a high-calcium and a low-calcium fly ash on the properties of portland cement fly ash pastes and mortars. (1987).
  174. Şahmaran, M., Yaman, Ö. & Tokyay, M. Development of high-volume low-lime and high-lime fly-ash-incorporated self-consolidating concrete. *Mag. Concr. Res.* 59, 97–106 (2007).
  175. González, A., Navia, R. & Moreno, N. Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: current and innovative potential applications. *Waste Manag. Res.* 27, 976–987 (2009).
  176. Querol, X., Moreno, N., Umana, J. C. & Alastuey, A. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. *J. Coal Geol.* 50, 413–423 (2002).
  177. Bae, S. et al. Characterization of morphology and hydration products of high-volume fly ash paste by monochromatic scanning x-ray micro-diffraction ( $\mu$ -SXRD). *Cem. Concr. Res.* 59, 155–164 (2014).
  178. Lothenbach, B., Scrivener, K. & Hooton, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 41, 217–229 (2011).
  179. Şahmaran, M., Yaman, Ö. & Tokyay, M. Transport and mechanical properties of self-consolidating concrete with high volume fly ash. *Cem. Concr. Compos.* 31, 99–106 (2009).
  180. Tokyay, M. Effects of three Turkish fly ashes on the heat of hydration of PC-FA pastes. *Cem. Concr. Res.* 18, 957–960 (1988).
  181. Malhotra, V. M. & Ramezani-pour, A. A. *Fly Ash in Concrete*. (CANMET, 1994).
  182. Taylor, H. F. W. *Cement chemistry*. (Academic Press, 1997).
  183. Tokyay, M. Strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing. *Cem. Concr. Res.* 29, 1737–1741 (1999).
  184. Matschei, T., Lothenbach, B. & Glasser, F. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cem. Concr. Res.* 37, 551–558 (2007).
  185. Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E. & Scrivener, K. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cem. Concr. Res.* 38, 848–860 (2008).
  186. Mehta, P. K. Reducing the environmental impact of concrete. *Concr. Int.* 61–66 (2001).
  187. Lloyd, R. R., Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J. Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: remnant fly ash particles. *Microsc. Microanal.* 44, 608–619 (2009).
  188. Poon, C. S., Lam, L. & Wong, Y. L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cem. Concr. Res.* 30, 447–44555 (2000).
  189. American Concrete Institute. Report on Roller-Compacted Mass Concrete. (2011).
  190. Rashed, M. U. Roller Compacted Concrete (RCC). (2000).
  191. Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W. & Hazaree, C. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements. (2010).
  192. Adaska, W. S. Section 51: Roller-Compacted Concrete (RCC). in *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making: STP 169D* (eds. Lamond, J. F. & Pielert, J. H.) 1–647 (ASTM International, 2006).
  193. Schrader, E. K. Roller-Compacted Concrete. in *Concrete Construction Engineering Handbook 20(1-71)* (2008).
  194. Malcolm Dunstan & Associates. Roller-Compacted Concrete (RCC) Dam Database. <http://www.rcccdams.co.uk/welcome.htm> (2014).
  195. Hazaree, C., Ponnosamy, R. & Pittman, D. W. Roller-compacted concrete. in *Green Building with Concrete: Sustainable Design and Construction* (ed. Sabnis, G. M.) 129–178 (2011).
  196. Garber, S., Rasmussen, R. O. & Harrington, D. Guide to Cement-Based Integrated Pavement Solutions. (2011).
  197. Pittman, D. W. & Anderton, G. The Use of Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements in the United States: Past, Present, and Future. in (2012).
  198. Yao, Z. T., Xia, M. S., Sarker, P. K. & Chen, T. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China. *Fuel* 120, 74–85 (2013).
  199. Celik, K. et al. High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cem. Concr. Compos.* 45, 136–147 (2014).
  200. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. (2015).
  201. Gesoğlu, M., Özturan, T. & Güneyisi, E. Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates. *Cem. Concr. Res.* 34, 1121–1130 (2004).
  202. Kayali, O., Haque, M. N. & Zhu, B. Drying shrinkage of fibre-

- reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cem. Concr. Res.* 29, 1835–1840 (1999).
203. Yasar, E., Atis, C. D., Kilic, A. & Gulsen, H. Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Mater. Lett.* 57, 2267–2270 (2003).
  204. Demirboğa, R. & Gül, R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cem. Concr. Res.* 33, 723–727 (2003).
  205. Tanyildizi, H. & Coskun, A. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Constr. Build. Mater.* 22, 2269–2275 (2008).
  206. Lo, T. Y., Cui, H. Z. & Li, Z. G. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete. *Waste Manag.* 24, 333–338 (2004).
  207. Kayali, O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Constr. Build. Mater.* 22, 2393–2399 (2008).
  208. Zachar, J. Sustainable and economical precast and prestressed concrete using fly ash as a cement replacement. *J. Mater. Civ. Eng.* 23, 789–792 (2011).
  209. Moghal, A. A. B. State-of-the-Art Review on the Role of Fly Ashes in Geotechnical and Geoenvironmental Applications. *J. Mater. Civ. Eng.* 29, 04017072 (2017).
  210. Sivapullaiah, P. V. & Moghal, A. A. B. Role of Gypsum in the Strength Development of Fly Ashes with Lime. *J. Mater. Civ. Eng.* 23, 197–206 (2011).
  211. Giergiczy, Z. The hydraulic activity of high calcium fly ash. *J. Therm. Anal. Calorim.* 83, 227–232 (2006).
  212. ASTM International. ASTM Standard D2166/D2166M-16, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. [www.astm.org](http://www.astm.org), (2016) doi:10.1520/D2166\_D2166M-16.
  213. ASTM International. ASTM Standard D2850-15, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. <http://compass.astm.org/download/D2850.10761.pdf> (2015) doi:10.1520/D2850-15.2.
  214. ASTM International. ASTM D7181-20, Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils. [www.astm.org](http://www.astm.org). (2020) doi:10.1520/D7181-20.of.
  215. ASTM International. ASTM Standard D4767-11, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. (2011) doi:10.1520/D4767-11R20.2.
  216. Indraratna, B., Nuthalaya, P., Koo, K. S. & Kuganenthira, N. Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill. *Can. Geotech. J.* 28, 542–555 (1991).
  217. McLaren, R. J. & DiGioia, A. M. J. The Typical Engineering Properties of Fly Ash. in *Geotechnical Practice for Waste Disposal* 683–697 (1987).
  218. Puppala, A. J., Punthutaecha, K. & Vanapalli, S. K. Soil-Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 132, 736–751 (2006).
  219. ASTM International. ASTM Standard D698-12, Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). [www.astm.org](http://www.astm.org). (2012) doi:10.1520/D0698-12E01.
  220. ASTM International. ASTM Standard D1557-12, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). <http://www.epa.gov/mercury/faq.htm> (2012) doi:10.1520/D1557-12.
  221. Winter, M. G. & Clarke, B. G. Improved use of pulverised fuel ash as general fill. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Geotech. Eng.* 155, 133–141 (2002).
  222. Misra, A. Stabilization characteristics of clays using class C fly ash. *Transp. Res. Rec.* 46–54 (1998) doi:10.3141/1611-06.
  223. Mackiewicz, S. M. & Ferguson, E. G. Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. in *World of Coal Ash (WOCA) Conference - Apr 11-15 (2005)*.
  224. Senol, A., Edil, T. B., Bin-Shafique, M. S., Acosta, H. A. & Benson, C. H. Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resour. Conserv. Recycl.* 46, 365–376 (2006).
  225. ASTM International. ASTM Standard D5856-15, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. [www.astm.org](http://www.astm.org). (2015) doi:10.1520/D5856-15.
  226. Pandian, N. S., Rajasekhar, C. & Sridharan, A. Studies of the Specific Gravity of Some Indian Coal Ashes. *J. Test. Eval.* 26, 177–186 (1998).
  227. Porter, O. J. The preparation of subgrades. *Highw. Res. Board Proc.* 18, (1939).
  228. ASTM International. ASTM Standard D1883-16, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. [www.astm.org](http://www.astm.org). (2016) doi:10.1520/D1883-16.
  229. Raymond, S. Pulverized fuel ash as embankment material. in *Proceedings of the institution of civil engineers vol. 19* 515–536 (1961).
  230. Zabielska-Adamska, K. Fly Ash As a Barrier Material. in *Geo-Frontiers 2011 947–956* (American Society of Civil Engineers, 2011). doi:10.1061/41165(397)97.
  231. Kuttah, D. Strong correlation between the laboratory dynamic CBR and the compaction characteristics of sandy soil. *Int. J. Geo-Engineering* 10, 1–13 (2019).
  232. Sivapullaiah, P. V. & Moghal, A. A. B. CBR and strength behavior of class F fly ashes stabilized with lime and gypsum. *Int. J. Geotech. Eng.* 5, 121–130 (2011).
  233. Kang, X., Ge, L., Kang, G. C. & Mathews, C. Laboratory investigation of the strength, stiffness, and thermal conductivity of fly ash and lime kiln dust stabilised clay subgrade materials. *Road Mater. Pavement Des.* 16, 928–945 (2015).
  234. Kang, X. & Ge, L. Enhanced series-parallel model for estimating the time-dependent thermal conductivity of fly ash soil mixtures. *Granul. Matter* 17, 579–592 (2015).
  235. Xu, A. & Sarkar, S. L. Microstructural development in high volume fly-ash cement system. *J. Mater. Civ. Eng.* 6, 117–136 (1994).
  236. Moghal, A. A. B. & Sivapullaiah, P. V. Role of lime leachability on the geotechnical behavior of fly ashes. *Int. J. Geotech. Eng.* 6, 43–51 (2012).
  237. Ghosh, A. & Subbarao, C. Hydraulic Conductivity and Leachate Characteristics of Stabilized Fly Ash. *J. Environ. Eng.* 124, 812–820 (1998).
  238. Papadakis, V. G. & Tsimas, S. Supplementary cementing materials in concrete: Part I. Efficiency and design. *Cem. Concr. Res.* 32, 1525–1532 (2002).
  239. Pourakbar, S. & Huat, B. K. A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils. *Int. J. Geotech. Eng.* 11, 206–216 (2017).
  240. Arora, S. & Aydiel, A. H. Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *J. Mater. Civ. Eng.* 17, 640–649 (2005).
  241. Puppala, A. J. Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. *Transp. Geotech.* 9, 123–138 (2016).
  242. Bergeson, K. L. & Barnes, A. G. Iowa Thickness Design Guide for Low Volume Roads Using Reclaimed Hydrated Class C Fly Ash Bases. in *Transportation Conference Proceedings* (1998).
  243. Cristelo, N., Glendinning, S. & Pinto, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proc. Inst. Civ. Eng. Gr. Improv.* 164, 73–82 (2011).
  244. Cristelo, N. et al. Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO<sub>2</sub> (eq) emissions. *J. Clean. Prod.* 102, 447–460 (2015).
  245. Zhang, M., Guo, H., El-Korchy, T., Zhang, G. & Tao, M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Constr. Build. Mater.* 47, 1468–1478 (2013).
  246. Sargent, P., Hughes, P. N., Rouainia, M. & White, M. L. The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Eng. Geol.* 152, 96–108 (2013).
  247. Nalbantoğlu, Z. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Constr. Build. Mater.* 18, 377–381 (2004).
  248. Zha, F., Liu, S., Du, Y. & Cui, K. Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. *Nat. Hazards* 47, 509–523 (2008).
  249. Sivapullaiah, P. V., Prashanth, J. P., Sridharan, A. & Narayana, B. V. Reactive silica and strength of fly ashes. *Geotech. Geol. Eng.* 16, 239–250 (1998).
  250. Çağlar, G. A. Endüstriyel atık malzemelerin karayollarında

- kullanımı. (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007).
251. Martin, J. P., Collins, R. A., Browning, J. S. & Biehl, F. J. Properties and Use of Fly Ashes for Embankments. *J. Energy Eng.* 116, 71–86 (1990).
  252. Manoon Masniyom. Systematic selection and application of backfill in underground mines. (Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2009).
  253. Kesimal, A., Yilmaz, E. & Erckidi, B. Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents. *Cem. Concr. Res.* 34, 1817–1822 (2004).
  254. Fall, M. & Benzaazoua, M. Modeling the effect of sulphate on strength development of paste backfill and binder mixture optimization. *Cem. Concr. Res.* 35, 301–314 (2005).
  255. Benzaazoua, M., Fall, M. & Belem, T. A contribution to understanding the hardening process of cemented paste fill. *Miner. Eng.* 17, 141–152 (2004).
  256. Kök, B. V. Karayolu mühendisliği ve tasarımı. (Nobel Akademik Yayıncılık, 2019).
  257. Brännvall, E. & Kumpiene, J. Fly ash in landfill top covers – a review. *Environ. Sci. Process. Impacts* 18, 11–21 (2016).
  258. Travar, I., Lidellöw, S., Andreas, L., Tham, G. & Lagerkvist, A. Assessing the environmental impact of ashes used in a landfill cover construction. *Waste Manag.* 29, 1336–1346 (2009).
  259. Edil, T. B., Berthouex, P. M. & Vesperman, K. D. Fly Ash as a Potential Waste Liner. in *Geotechnical Practice for Waste Disposal* (1987).
  260. Swamy, R. & Jiang, E. Pore Structure and Carbonation of Lightweight Concrete After 10 Years' Exposure. *Special Publication* 136 (1993).
  261. Swamy, R. N. & Lambert, G. H. Mix design and properties of concrete made from PFA coarse aggregates and sand. *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.* 5, 263–275 (1983).
  262. Swamy, R. N. & Lambert, G. H. The microstructure of Lytag aggregate. *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.* 3, 273–282 (1981).
  263. Swamy, R. N. & Lixian, W. The ingredients for high performance in structural lightweight aggregate concrete. in *Proceedings of 1st international symposium on structural high strength lightweight aggregate concrete*, June 20–24 (1995).
  264. Koçkal, N. U. & Özturan, T. Sinterleme sıcaklığının uçucu kül hafif agregaların özelliklerine etkisi. in 7. Ulusal Beton Kongresi 133–143 (2007).
  265. Baykal, G. & Döven, A. G. Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results. *Resour. Conserv. Recycl.* 30, 59–77 (2000).
  266. Kockal, N. U. & Özturan, T. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. *J. Hazard. Mater.* 179, 954–965 (2010).
  267. Jo, B. w., Park, S. kook & Park, J. b. Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). *Cem. Concr. Compos.* 29, 128–135 (2007).
  268. Kockal, N. U. & Özturan, T. Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments. *Cem. Concr. Compos.* 33, 61–67 (2011).
  269. Lingling, X., Wei, G., Tao, W. & Nanru, Y. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Constr. Build. Mater.* 19, 243–247 (2005).
  270. Naik, T. R., Wei, L. & Singh, S. S. Low-cost ash-derived construction materials state-of-the-art Assessment., (1992).
  271. Wei, L., Naik, T. & Golden, D. Construction materials made with coal combustion by-products. *Cem. Concr. Aggregates* 16, 36 (1994).
  272. Frigione, G., Lanzillota, B., Ferrari, F. & Cirillo, G. Fly Ash as Basic Raw Material in Manufacture of Bricks. in *Proceedings of the Tenth International Ash Use Symposium, ACAA, EPRI Report TR-10174*, vol. 2 80 (1993).
  273. Walczak, P., Szymański, P. & Różycka, A. Autoclaved aerated concrete based on fly ash in density 350 kg/m<sup>3</sup> as an environmentally friendly material for energy - efficient constructions. *Procedia Eng.* 122, 39–46 (2015).
  274. Serhat Baspinar, M., Demir, I., Kahraman, E. & Gorhan, G. Utilization potential of fly ash together with silica fume in autoclaved aerated concrete production. *KSCE J. Civ. Eng.* 18, 47–52 (2014).
  275. Pytlík, E. C. & Saxena, J. Fly ash based autoclaved cellular concrete: The building material of the 21st century. in *Proceedings of the Ninth International Ash Use Symposium, ACAA, EPRI Report No. GS-7162 25* (1991).
  276. Gartner, E. Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. *Cem. Concr. Res.* 34, 1489–1498 (2004).
  277. Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. & López-hombrados, C. Engineering Properties of Alkali-Activated Fly Ash Concrete. *ACI Mater. J.* 106–112 (2006).
  278. Fernández-Jiménez, A. & Palomo, A. Factors affecting early compressive strength of alkali activated fly ash (OPC-free) concrete. *Mater. Construcción* 57, 7–22 (2007).
  279. Duxson, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42, 2917–2933 (2007).
  280. Duxson, P. & Provis, J. L. Designing precursors for geopolymer cements. *J. Am. Ceram. Soc.* 91, 3864–3869 (2008).
  281. Seyedian Choubi, S. & Meral Akgül, Ç. Characterization of Microstructural Variations in Alkali-Activated Coal Fly Ashes Depending on Their Intrinsic Properties. *J. Mater. Civ. Eng.* 33, (2021).
  282. Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., Gordillo, M. & Provis, J. L. Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *J. Mater. Sci.* 46, 5477–5486 (2011).
  283. Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J. *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications.* (2009). doi:10.1533/9781845696382.
  284. Temujin, J., Van Riessen, A. & MacKenzie, K. J. D. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Constr. Build. Mater.* 24, 1906–1910 (2010).
  285. Joseph, B. & Mathew, G. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Sci. Iran.* 19, 1188–1194 (2012).
  286. Sarker, P. K. Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Mater. Struct.* 44, 1021–1030 (2011).
  287. Sarker, P. K. Analysis of geopolymer concrete columns. *Mater. Struct.* 42, 715–724 (2009).
  288. Ishikawa, Y. A study on a technology to produce inorganic fibers by melting coal ash. in *World of coal ash (WOCA)*, April 11–15 (2005).
  289. Manz, O. E. Utilization of by-products from western coal combustion in the manufacture of mineral wool and other ceramic materials. *Cem. Concr. Res.* 14, 513–520 (1984).
  290. Pandey, V. C. & Singh, N. Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 136, 16–27 (2010).
  291. Jala, S. & Goyal, D. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production - A review. *Bioresour. Technology* vol. 97 (2006).
  292. Ram, L. C. & Mastro, R. E. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. *Earth-Science Rev.* 128, 52–74 (2014).
  293. Şengül, Ü. Uçucu Kül ve Çevresel Etkileri. *Afyonkocatepe Üni. Fen Bilim. Derg.* 7, 89–104 (2007).
  294. Ram, L. C. & Mastro, R. E. An appraisal of the potential use of fly ash for reclaiming coal mine spoil. *J. Environ. Manage.* 91, 603–617 (2010).
  295. Adriano, D. C. & Weber, J. T. Influence of Fly Ash on Soil Physical Properties and Turfgrass Establishment. *J. Environ. Qual.* 30, 596 (2001).
  296. Jacobs, L. W., Erickson, A. E., Berti, W. R. & MacKellar, B. M. Improving crop yield potentials of coarse textured soils with coal fly ash amendments. in *Proceedings of the Ninth International Ash Use Symposium, ACAA, EPRI Report No. GS-7162*, vol. 3 59 (1991).
  297. Wong, J. W. C. & Wong, M. H. Effects of fly ash on yields and elemental composition of two vegetables, Brassica parachinensis and B. chinensis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 30, 251–264 (1990).
  298. Manoharan, V. et al. Assessments of Class F fly ashes for amelioration of soil acidity and their influence on growth and uptake of Mo and Se by canola. *Fuel* 89, 3498–3504 (2010).
  299. Ghodrati, M., Sims, J. T. & Vasilas, B. L. Evaluation of fly ash as a soil amendment for the Atlantic Coastal Plain: I. Soil



- hydraulic properties and elemental leaching. *Water, Air, Soil Pollut.* 81, 349–361 (1995).
300. Erol, M., Küçükbayrak, S. & Ersoy-Meriçboyu, A. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. *J. Hazard. Mater.* 153, 418–425 (2008).
  301. Zhang, Z. & Wang, H. Analysing the relation between pore structure and permeability of alkali-activated concrete binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (Woodhead Publishing Limited, 2014). doi:10.1533/9781782422884.2.235.
  302. He, Y., Cheng, W. & Cai, H. Characterization of  $\alpha$ -cordierite glass-ceramics from fly ash. *J. Hazard. Mater.* 120, 265–269 (2005).
  303. Peng, F., Liang, K. M. & Hu, A. M. Nano-crystal glass-ceramics obtained from high alumina coal fly ash. *Fuel* 84, 341–346 (2005).
  304. Sokolar, R. & Vodova, L. The effect of fluidized fly ash on the properties of dry pressed ceramic tiles based on fly ash-clay body. *Ceram. Int.* 37, 2879–2885 (2011).
  305. Kim, J. M. & Kim, H. S. Processing and properties of a glass-ceramic from coal fly ash from a thermal power plant through an economic process. *J. Eur. Ceram. Soc.* 24, 2825–2833 (2004).
  306. Vasilopoulos, K. C. et al. Bulk nucleated fine grained mono-mineral glass-ceramics from low-silica fly ash. *Ceram. Int.* 35, 555–558 (2009).
  307. Jedidi, I. et al. Preparation of a new ceramic microfiltration membrane from mineral coal fly ash: Application to the treatment of the textile dyeing effluents. *Powder Technol.* 208, 427–432 (2011).
  308. Jedidi, I. et al. Elaboration of new ceramic microfiltration membranes from mineral coal fly ash applied to waste water treatment. *J. Hazard. Mater.* 172, 152–158 (2009).
  309. Fang, J., Qin, G., Wei, W. & Zhao, X. Preparation and characterization of tubular supported ceramic microfiltration membranes from fly ash. *Sep. Purif. Technol.* 80, 585–591 (2011).
  310. Wang, S. & Lu, G. Q. Effect of chemical treatment on Ni/fly-ash catalysts in methane reforming with carbon dioxide. *Stud. Surf. Sci. Catal.* 167, 275–280 (2007).
  311. and, S. W., Lu\*, G. Q. (Max) & Millar, G. J. Carbon Dioxide Reforming of Methane To Produce Synthesis Gas over Metal-Supported Catalysts: State of the Art. (1996) doi:10.1021/EF950227T.
  312. Yin, S. F., Xu, B. Q., Zhou, X. P. & Au, C. T. A mini-review on ammonia decomposition catalysts for on-site generation of hydrogen for fuel cell applications. *Appl. Catal. A Gen.* 277, 1–9 (2004).
  313. Xuan, X., Yue, C., Li, S. & Yao, Q. Selective catalytic reduction of NO by ammonia with fly ash catalyst. *Fuel* 82, 575–579 (2003).
  314. Yu, Y. Preparation of nanocrystalline TiO<sub>2</sub>-coated coal fly ash and effect of iron oxides in coal fly ash on photocatalytic activity. *Powder Technol.* 146, 154–159 (2004).
  315. Yu, Y.-T. Synthesis of nanocrystalline TiO<sub>2</sub>-coated coal fly ash for photocatalyst. *Korean J. Chem. Eng.* 20, 850–854 (2003).
  316. Flores, Y., Flores, R. & Gallegos, A. A. Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system reactive black 5/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *J. Mol. Catal. A Chem.* 281, 184–191 (2008).
  317. Engin Gürtekin & Nusret Şekerdağ. Bir ileri oksidasyon süreci: Fenton proses. Pamukkale Ünalversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilim. Derg. 14, 229–236 (2008).
  318. Wang, S. & Wu, H. Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. *J. Hazard. Mater.* 136, 482–501 (2006).
  319. Li, Y. & Zhang, F. S. Catalytic oxidation of Methyl Orange by an amorphous FeOOH catalyst developed from a high iron-containing fly ash. *Chem. Eng. J.* 158, 148–153 (2010).
  320. Sutarno, S. & Arryanto, Y. Synthesis of faujasite from fly ash and its applications for hydrocracking of petroleum distillates. *Bull. Chem. React. ... 2*, 45–51 (2007).
  321. Khatri, C., Mishra, M. K. & Rani, A. Synthesis and characterization of fly ash supported sulfated zirconia catalyst for benzoylation reactions. *Fuel Process. Technol.* 91, 1288–1295 (2010).
  322. Li, L., Wang, S., Zhu, Z., Yao, X. & Yan, Z. Catalytic decomposition of ammonia over fly ash supported Ru catalysts. *Fuel Process. Technol.* 89, 1106–1112 (2008).
  323. Chen, W. J., Sheu, F. R. & Savage, R. L. Catalytic activity of coal ash on steam methane reforming and water-gas shift reactions. *Fuel Process. Technol.* 16, 279–288 (1987).
  324. Born, J. G., Mulder, P. & Louw, R. Fly ash mediated reactions of phenol and monochlorophenols: oxychlorination, deep oxidation, and condensation. *Environ. Sci. Technol.* 27, 1849–1863 (1993).
  325. Mallick, D., Khanra, S. & Chaudhuri, S. K. Studies on the potential of coal fly ash as a heterogeneous catalyst in oxidation of aqueous sodium sulfide solutions with hydrogen peroxide. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 70, 231–240 (1997).
  326. Mallik, D. & Chaudhuri, S. K. Air oxidation of aqueous sodium sulfide solutions with coal fly ash. *Water Res.* 33, 585–590 (1999).
  327. Chatterjee, D., Ruj, B. & Mahata, A. Adsorption and photocatalysis of colour removal from waste water using flyash and sunlight. *Catal. Commun.* 2, 113–117 (2001).
  328. Khatri, C. & Rani, A. Synthesis of a nano-crystalline solid acid catalyst from fly ash and its catalytic performance. *Fuel* 87, 2886–2892 (2008).
  329. Jain, D., Khatri, C. & Rani, A. Synthesis and characterization of novel solid base catalyst from fly ash. *Fuel* 90, 2083–2088 (2011).
  330. Ahmaruzzaman, M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Adv. Colloid Interface Sci.* 166, 36–59 (2011).
  331. Panday, K. K., Prasad, G. & Singh, V. N. Copper(II) removal from aqueous solutions by fly ash. *Water Res.* 19, 869–873 (1985).
  332. Héquet, V., Ricou, P., Lecuyer, I. & Cloirec, P. Le. Removal of Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> in aqueous solutions by sorption onto fly ash and fly ash mixtures. in *International Ash Utilization Symposium 2-7* (1999).
  333. Cho, H., Oh, D. & Kim, K. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash. *J. Hazard. Mater.* 127, 187–195 (2005).
  334. Mohan, S. & Gandhimathi, R. Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. *J. Hazard. Mater.* 169, 351–359 (2009).
  335. Itskos, G., Koukouzas, N., Vasilatos, C., Megremi, I. & Moutsatsou, A. Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particle-size-fractions of fly ash. *J. Hazard. Mater.* 183, 787–792 (2010).
  336. Alinnor, I. J. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by fly ash. *Fuel* 86, 853–857 (2007).
  337. Pattanayak, J., Mondal, K., Mathew, S. & Lalvani, S. . A parametric evaluation of the removal of As(V) and As(III) by carbon-based adsorbents. *Carbon N. Y.* 38, 589–596 (2000).
  338. Sen, A. K. & De, A. K. Adsorption of mercury(II) by coal fly ash. *Water Res.* 21, 885–888 (1987).
  339. Banerjee, S. S., Joshi, M. V. & Jayaram, R. V. Removal of Cr(VI) and Hg(II) from Aqueous Solutions Using Fly Ash and Impregnated Fly Ash. *Sep. Sci. Technol.* 39, 1611–1629 (2005).
  340. Diamadopoulos, E., Ioannidis, S. & Sakellariopoulos, G. P. As(V) removal from aqueous solutions by fly ash. *Water Res.* 27, 1773–1777 (1993).
  341. Ricou, P., Lecuyer, I. & Le Cloirec, P. Removal of Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> by adsorption onto fly ash and fly ash/lime mixing. *Water Sci. Technol.* 39, 239–247 (1999).
  342. Apak, R., Tütem, E., Hügül, M. & Hizal, J. Heavy metal cation retention by unconventional sorbents (red muds and fly ashes). *Water Res.* 32, 430–440 (1998).
  343. Kapoor, A. & Viraraghavan, T. Adsorption of mercury from wastewater by fly ash. *Adsorpt. Sci. Technol.* 9, 130–147 (1992).
  344. Banerjee, S. S., Jayaram, R. V. & Joshi, M. V. Removal of Nickel(II) and Zinc(II) from Wastewater Using Fly Ash and Impregnated Fly Ash. *Sep. Sci. Technol.* 38, 1015–1032 (2003).
  345. Bayat, B. Combined removal of zinc (II) and cadmium (II) from aqueous solutions by adsorption onto high-calcium Turkish fly ash. *Water. Air. Soil Pollut.* 136, 69–92 (2002).
  346. Srivastava, V. C., Mall, I. D. & Mishra, I. M. Modelling individual and competitive adsorption of cadmium(II) and zinc(II) metal ions from aqueous solution onto bagasse fly ash. *Sep. Sci. Technol.* 41, 2685–2710 (2006).
  347. Bayat, B. Comparative study of adsorption properties of

- Turkish fly ashes. I. The case of nickel(II), copper(II) and zinc(II). *J. Hazard. Mater.* 95, 251–273 (2002).
348. Weng, C. H. & Huang, C. P. Treatment of Metal Industrial Wastewater. *J. Environ. Eng.* 120, 1470–1487 (1994).
349. Papandreu, A., Stourmaras, C. J. & Panias, D. Copper and cadmium adsorption on pellets made from fired coal fly ash. *J. Hazard. Mater.* 148, 538–547 (2007).
350. Rao, M., Parwate, A. V. & Bhole, A. G. Removal of Cr<sup>6+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution using bagasse and fly ash. *Waste Manag.* 22, 821–830 (2002).
351. Bayat, B. Comparative study of adsorption properties of Turkish fly ashes II. The case of chromium (VI) and cadmium (II). *J. Hazard. Mater.* 95, 275–290 (2002).
352. Kelleher, B. P., O'Callaghan, M. N., Leahy, M. J., O'Dwyer, T. F. & Leahy, J. J. The use of fly ash from the combustion of poultry litter for the adsorption of chromium(III) from aqueous solution. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 77, 1212–1218 (2002).
353. Wang, S., Terdkiatburana, T. & Tade, M. O. Single and co-adsorption of heavy metals and humic acid on fly ash. *Sep. Purif. Technol.* 58, 353–358 (2008).
354. Panday, K. K., Prasad, G. & Singh, V. N. Removal of Cr(VI) from aqueous solutions by adsorption on fly ash-wollastonite. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 34, 367–374 (1984).
355. Bhattacharya, A. K., Naiya, T. K., Mandal, S. N. & Das, S. K. Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr(VI) from aqueous solutions using different low-cost adsorbents. *Chem. Eng. J.* 137, 529–541 (2008).
356. Weng, C.-H. & Huang, C.-P. Removal of trace heavy metals by adsorption onto fly ash. *Natl. Conf. Environ. Eng.* (1990).
357. Weng, C.-H. & Huang, C. P. Adsorption characteristics of Zn(II) from dilute aqueous solution by fly ash. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 247, 137–143 (2004).
358. Pehlivan, E., Cetin, S. & Yanik, B. H. Equilibrium studies for the sorption of zinc and copper from aqueous solutions using sugar beet pulp and fly ash. *J. Hazard. Mater.* 135, 193–199 (2006).
359. Lin, C. J. & Chang, J. E. Effect of fly ash characteristics on the removal of Cu(II) from aqueous solution. *Chemosphere* 44, 1185–1192 (2001).
360. Hsu, T. C., Yu, C. C. & Yeh, C. M. Adsorption of Cu<sup>2+</sup> from water using raw and modified coal fly ashes. *Fuel* 87, 1355–1359 (2008).
361. Babel, S. & Kurniawan, T. A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *J. Hazard. Mater.* 97, 219–243 (2003).
362. Apak, R., Atun, G., Güçlü, K. & Tütem, E. Sorptive removal of Cesium-137 and strontium-90 from water by unconventional sorbents. *J. Nucl. Sci. Technol.* 33, 396–402 (1996).
363. Hassan, A. F., Abdel-Mohsen, A. M. & Elhadidy, H. Adsorption of arsenic by activated carbon, calcium alginate and their composite beads. *Int. J. Biol. Macromol.* 68, 125–130 (2014).
364. Mimura, H., Yokota, K., Akiba, K. & Onodera, Y. Alkali Hydrothermal Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash and Their Uptake Properties of Cesium Ion. *J. Nucl. Sci. Technol.* 38, 766–772 (2001).
365. Shawabkeh, K., Al-Harashsheh, A., Hami, M. & Khlaifat, A. Conversion of oil shale ash into zeolite for cadmium and lead removal from wastewater. *Fuel* 83, 981–985 (2004).
366. Ageyi, N. M., Strydom, C. A. & Potgieter, J. H. The removal of phosphate ions from aqueous solution by fly ash, slag, ordinary Portland cement and related blends. *Cem. Concr. Res.* 33, 937 (2003).
367. Grubb, D. G., Guimaraes, M. S. & Valencia, R. Phosphate immobilization using an acidic type F fly ash. *J. Hazard. Mater.* 76, 217–236 (2000).
368. Ageyi, N. M., Strydom, C. A. & Potgieter, J. H. An investigation of phosphate ion adsorption from aqueous solution by fly ash and slag. *Cem. Concr. Res.* 30, 823–826 (2000).
369. Mann, R. A. & Bavor, H. J. Phosphorus Removal in Constructed Wetlands Using Gravel and Industrial Waste Substrata. *Water Sci. Technol.* 27, (1993).
370. Vordonis, L., Koutsoukos, P. G., Tzannini, A. & Lycourghiotis, A. Uptake of inorganic orthophosphate by greek fly ashes characterized using various techniques. *Colloids and Surfaces* 34, 55–68 (1988).
371. Kuziemska, I. Application of water extract of brown coal fly ash to phosphate precipitation from polluted waters. *Water Res.* 14, 1289–1293 (1980).
372. Ugurlu, A. & Salman, B. Phosphorus removal by fly ash. *Environ. Int.* 24, 911–918 (1998).
373. Reardon, E. J. & Wang, Y. A limestone reactor for flouride removal from wastewaters. *Environ. Sci. Technol.* 34, 3247–3253 (2000).
374. Chaturvedi, A. K., Yadava, K. P., Pathak, K. C. & Singh, V. N. Defluoridation of water by adsorption on fly ash. *Water. Air. Soil Pollut.* 49, 51–61 (1990).
375. Pieskos, R. & Paslawska, S. Fluoride uptake characteristics of fly ash. *Fluoride* 32, 14–19 (1999).
376. Nemade, P. D., Vasudeva Rao, A. & Alappat, B. J. Removal of fluorides from water using low cost adsorbents. *Water Sci. Technol. Water Supply* 2, (2002).
377. Polat, H., Vengosh, A., Pankratov, I. & Polat, M. A new methodology for removal of boron from water by coal and fly ash. *Desalination* 164, 173–188 (2004).
378. Khanna, P. & Malhotra, S. K. Kinetics and mechanism of phenol adsorption on fly ash. *Indian J. Environ. Heal.* 19, 224–237 (1977).
379. Akgerman, A. & Zardkoohi, M. Adsorption of Phenolic Compounds on Fly Ash. *J. Chem. Eng. Data* 41, 185–187 (1996).
380. Viraraghavan, T. & de Maria Alfaro, F. Adsorption of phenol from wastewater by peat, fly ash and bentonite. *J. Hazard. Mater.* 57, 59–70 (1998).
381. Kao, P.-C. Removal of chlorophenols from aqueous solution by fly ash. *J. Hazard. Mater.* 76, 237–249 (2000).
382. Aksu, Z. & Yener, J. A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents. *Waste Manag.* 21, 695–702 (2001).
383. Singh, B. K. & Nayak, P. S. Sorption Equilibrium Studies of Toxic Nitro-Substituted Phenols on Fly Ash. *Adsorpt. Sci. Technol.* 22, 295–309 (2004).
384. Dutta, B., Basu, J. K. & DasGupta, S. Removal of Cresol from Aqueous Solution Using Fly Ash as Adsorbent: Experiments and Modeling. *Sep. Sci. Technol.* 38, 1345–1360 (2003).
385. Kumari, K., Singh, R. P. & Saxena, S. K. Adsorption thermodynamics of carbofuran on fly ash. *Colloids and Surfaces* 33, 55–61 (1988).
386. Nollet, H., Roels, M., Lutgen, P., Van der Meeren, P. & Verstraete, W. Removal of PCBs from wastewater using fly ash. *Chemosphere* 53, 655–663 (2003).
387. Matheswaran, M. & Karunanithi, T. Adsorption of Chrysoidine R by using fly ash in batch process. *J. Hazard. Mater.* 145, 154–161 (2007).
388. Singh, N. Adsorption of herbicides on coal fly ash from aqueous solutions. *J. Hazard. Mater.* 168, 233–237 (2009).
389. Lu, G. Q. & Do, D. D. Adsorption properties of fly ash particles for NOx removal from flue gases. *Fuel Process. Technol.* 27, 95–107 (1991).
390. Sarmah, M., Baruah, B. P. & Khare, P. A comparison between CO<sub>2</sub> capturing capacities of fly ash based composites of MEA/DMA and DEA/DMA. *Fuel Process. Technol.* 106, 490–497 (2013).
391. Seaman, W. Artificial Reef Evaluation. vol. 20005275 (CRC Press, 2000).
392. Fabi, G. et al. Overview on Artificial Reefs in Europe. *Brazilian J. Oceanogr.* 59, 155–166 (2011).
393. Singh, T. S. & Pant, K. K. Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using portland cement, fly ash and polymeric materials. *J. Hazard. Mater.* 131, 29–36 (2006).
394. Dermatas, D. & Meng, X. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Eng. Geol.* 70, 377–394 (2003).
395. Luna Galiano, Y., Fernández Pereira, C. & Vale, J. Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers. *J. Hazard. Mater.* 185, 373–381 (2011).
396. Belviso, C. et al. Multi-technique application for waste material detection and soil remediation strategies: The red mud dust and fly ash case studies. *Soil Contamination* (2011). doi:10.5772/927.
397. Conner, J. R. & Hoeffner, S. L. A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 28, 397–462 (1998).

398. Pereira, C. F., Rodríguez-Piñero, M. & Vale, J. Solidification/stabilization of electric arc furnace dust using coal fly ash: Analysis of the stabilization process. *J. Hazard. Mater.* 82, 183–195 (2001).
399. Kumpiene, J., Lagerkvist, A. & Maurice, C. Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat. *Environ. Pollut.* 145, 365–373 (2007).
400. Cokca, E. & Yilmaz, Z. Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material. *Waste Manag.* 24, 153–164 (2004).
401. Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. & López-Soler, A. Synthesis of Na-zeolites from fly ash. *Fuel* 76, 793–799 (1997).
402. Mondragon, F. et al. New perspectives for coal ash utilization: synthesis of zeolitic materials. *Fuel* 69, 263–266 (1990).
403. Berggaut, V. & Singer, A. High capacity cation exchanger by hydrothermal zeolitization of coal fly ash. *Appl. Clay Sci.* 10, 369–378 (1996).
404. Querol, X. et al. Synthesis of zeolites from fly ash at pilot plant scale. Examples of potential applications. *Fuel* 80, 857–865 (2001).
405. Singer, A. & Berggaut, V. Cation Exchange Properties of Hydrothermally Treated Coal Fly Ash. *Environ. Sci. Technol.* 29, 1748–1753 (1995).
406. Li, Y. et al. Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash. *J. Hazard. Mater.* 137, 374–383 (2006).
407. Kuwahara, Y., Ohmichi, T., Mori, K., Katayama, I. & Yamashita, H. Synthesis of zeolite from steel slag and its application as a support of nano-sized TiO<sub>2</sub> photocatalyst. *J. Mater. Sci.* 43, 2407–2410 (2008).
408. Molina, A. & Poole, C. A comparative study using two methods to produce zeolites from fly ash. *Miner. Eng.* 17, 167–173 (2004).
409. Ojha, K., Pradhan, N. C. & Samanta, A. N. Zeolite from fly ash: Synthesis and characterization. *Bull. Mater. Sci.* 27, 555–564 (2004).
410. Anuwattana, R. & Khummongkol, P. Conventional hydrothermal synthesis of Na-A zeolite from cupola slag and aluminum sludge. *J. Hazard. Mater.* 166, 227–232 (2009).
411. Kondru, A. K., Kumar, P., Teng, T. T., Chand, S. & Wasewar, K. L. Synthesis and characterization of Na-Y zeolite from coal fly ash and its effectiveness in removal of dye from aqueous solution by wet peroxide oxidation. *Arch. Environ. Sci.* 5, 46–54 (2011).
412. B.-h., Z. et al. Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from coal fly ash as influenced by acid treatment. *J. Environ. Sci.* 19, 540–545 (2007).
413. Belardi, G., Massimilla, S. & Piga, L. Crystallization of K-L and K-W zeolites from fly-ash. *Resour. Conserv. Recycl.* 24, 167–181 (1998).
414. Panitchakarn, P., Laosiripojana, N., Viriyu-umpikul, N. & Pavasant, P. Synthesis of high-purity Na-A and Na-X zeolite from coal fly ash. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 64, 586–596 (2014).
415. Shigemoto, N., Hayashi, H. & Miyaura, K. Selective formation of Na-X zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. *J. Mater. Sci.* 28, 4781–4786 (1993).
416. Izidoro, J. de C., Fungaro, D. A., Abbott, J. E. & Wang, S. Synthesis of zeolites X and A from fly ashes for cadmium and zinc removal from aqueous solutions in single and binary ion systems. *Fuel* 103, 827–834 (2013).
417. Rayalu, S., Meshram, S. & Hasan, M. Highly crystalline faujasitic zeolites from flyash. *J. Hazard. Mater.* 77, 123–131 (2000).
418. Hollman, G., Steenbruggen, G. & Janssen-Jurkovičová, M. A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. *Fuel* 78, 1225–1230 (1999).
419. Chen, C., Park, D.-W. & Ahn, W.-S. CO<sub>2</sub> capture using zeolite 13X prepared from bentonite. *Appl. Surf. Sci.* 292, 63–67 (2014).
420. Kazemian, H., Naghdali, Z., Ghaffari Kashani, T. & Farhadi, F. Conversion of high silicon fly ash to Na-P1 zeolite: Alkaline fusion followed by hydrothermal crystallization. *Adv. Powder Technol.* 21, 279–283 (2010).
421. Chang, H.-L. & Shih, W.-H. A General Method for the Conversion of Fly Ash into Zeolites as Ion Exchangers for Cesium. (1998) doi:10.1021/IE970362O.
422. El-Naggar, M. R., El-Kamash, A. M., El-Dessouky, M. I. & Ghonaim, A. K. Two-step method for preparation of NaA-X zeolite blend from fly ash for removal of cesium ions. *J. Hazard. Mater.* 154, 963–972 (2008).
423. Volli, V. & Purkait, M. K. Selective preparation of zeolite X and A from flyash and its use as catalyst for biodiesel production. *J. Hazard. Mater.* 297, 101–111 (2015).
424. Jha, B. & Singh, D. N. Basics of Zeolites. in *Fly ash zeolites: innovations, applications, and directions 5–31* (Springer, 2016). doi:10.1007/978-981-10-1404-8\_2.
425. Moshoeshoe, M., Nadiye-tabbiruka, M. S. & Obuseng, V. A Review of the chemistry, structure, properties and applications of zeolites. *Am. J. Mater. Sci.* 7, 196–221 (2017).
426. Henmi, T. Chemical conversion of coal ash into artificial zeolite and its recycling. *New Ceram.* 7, 54–62 (1997).
427. Hansen, L. D., Silberman, D. & Fisher, G. L. Crystalline components of stack-collected, size-fractionated coal fly ash. *Environ. Sci. Technol.* 15, 1057–1062 (1981).
428. White, S. C. & Case, E. D. Characterization of fly ash from coal-fired power plants. *J. Mater. Sci.* 25, 5215–5219 (1990).
429. Park, M. et al. Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials: II. Characterization of zeolitic materials. *Microporous Mesoporous Mater.* 37, 91–98 (2000).
430. Park, M. et al. Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials: I. Zeolite formation in alkaline molten-salt system. *Microporous Mesoporous Mater.* 37, 81–89 (2000).
431. Soe, J. T., Kim, S.-S., Lee, Y.-R., Ahn, J.-W. & Ahn, W.-S. CO<sub>2</sub> Capture and Ca<sup>2+</sup> Exchange Using Zeolite A and 13X Prepared from Power Plant Fly Ash. *Bull. Korean Chem. Soc.* 37, 490–493 (2016).
432. Tanaka, H., Matsumura, S., Furusawa, S. & Hino, R. Conversion of coal fly ash to Na-X zeolites. *J. Mater. Sci. Lett.* 22, 323–325 (2003).
433. Tanaka, H., Matsumura, S. & Hino, R. Formation process of Na-X zeolites from coal fly ash. *J. Mater. Sci.* 39, 1677–1682 (2004).
434. Gross, M., Soulard, M., Caultet, P., Patarin, J. & Saude, I. Synthesis of faujasite from coal fly ashes under smooth temperature and pressure conditions: A cost saving process. *Microporous Mesoporous Mater.* 104, 67–76 (2007).
435. Belviso, C. et al. The crystallisation of zeolite (X- and A-type) from fly ash at 25 °C in artificial sea water. *Microporous Mesoporous Mater.* 162, 115–121 (2012).
436. Wang, C.-F., Li, J.-S., Wang, L.-J. & Sun, X.-Y. Influence of NaOH concentrations on synthesis of pure-form zeolite A from fly ash using two-stage method. *J. Hazard. Mater.* 155, 58–64 (2008).
437. Belviso, C. et al. Synthesis of magnetic zeolite at low temperature using a waste material mixture: Fly ash and red mud. *Microporous Mesoporous Mater.* 202, 208–216 (2015).
438. Chang, H.-L. & Shih, W.-H. Synthesis of zeolites A and X from fly ashes and their ion-exchange behavior with cobalt ions. (2000) doi:10.1021/IE990860S.
439. Fotovat, F., Kazemian, H. & Kazemeini, M. Synthesis of Na-A and faujasitic zeolites from high silicon fly ash. *Mater. Res. Bull.* 44, 913–917 (2009).
440. Yaping, Y., Xiaoqiang, Z., Weilan, Q. & Mingwen, W. Synthesis of pure zeolites from supersaturated silicon and aluminum alkali extracts from fused coal fly ash. *Fuel* 87, 1880–1886 (2008).
441. Hui, K. S. & Chao, C. Y. H. Effects of step-change of synthesis temperature on synthesis of zeolite 4A from coal fly ash. *Microporous Mesoporous Mater.* 88, 145–151 (2006).
442. Tanaka, H., Eguchi, H., Fujimoto, S. & Hino, R. Two-step process for synthesis of a single phase Na-A zeolite from coal fly ash by dialysis. *Fuel* 85, 1329–1334 (2006).
443. Querol, X. et al. A Fast Method for Recycling Fly Ash: Microwave-Assisted Zeolite Synthesis. *Environ. Sci. Technol.* 31, 2527–2533 (1997).
444. Deng, H. & Ge, Y. Formation of NaP zeolite from fused fly ash for the removal of Cu(II) by an improved hydrothermal method. *RSC Adv.* 5, 9180–9188 (2015).
445. Aono, H. et al. Preparation of Na-P1-Type Zeolite and its Composite Material with Nanosized Magnetite. *J. Am. Ceram. Soc.* 96, 3218–3222.
446. Plessis, P., Ojumu, T. & Petrik, L. Waste Minimization

- Protocols for the Process of Synthesizing Zeolites from South African Coal Fly Ash. *Materials* (Basel), 6, 1688–1703 (2013).
447. Murayama, N., Yamamoto, H. & Shibata, J. Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. *Int. J. Miner. Process.* 64, 1–17 (2002).
  448. Inada, M., Eguchi, Y., Enomoto, N. & Hojo, J. Synthesis of zeolite from coal fly ashes with different silica–alumina composition. *Fuel* 84, 299–304 (2005).
  449. Amrhein, C. et al. Synthesis and Properties of Zeolites from Coal Fly Ash. *Environ. Sci. Technol.* 30, 735–742 (1996).
  450. Lin, C. F. & Hsi, H. C. Resource recovery of waste fly ash: synthesis of zeolite-like materials. *Environ. Sci. Technol.* 29, 1109–1117 (1995).
  451. Vichaphund, S., Aht-Ong, D., Sricharoenchaikul, V. & Atong, D. Characteristic of fly ash derived-zeolite and its catalytic performance for fast pyrolysis of *Jatropha* waste. *Environ. Technol.* 35, 2254–2261 (2014).
  452. Park, M. & Choi, J. Synthesis of phillipsite from fly ash. *Clay Sci.* 9, 219–229 (1995).
  453. Baerlocher, C., McCusker, L. B. & Olson, D. H. Atlas of zeolite framework types. (Elsevier Science, 2007).
  454. Belviso, C., Cavalcante, F. & Fiore, S. Synthesis of zeolite from Italian coal fly ash: Differences in crystallization temperature using seawater instead of distilled water. *Waste Manag.* 30, 839–847 (2010).
  455. Yao, Z., Ye, Y. & Xia, M. Synthesis and characterization of lithium zeolites with ABW type from coal fly ash. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 32, 790–796 (2013).
  456. Chareonpanich, M., Namto, T., Kongkachuichay, P. & Limtrakul, J. Synthesis of ZSM-5 zeolite from lignite fly ash and rice husk ash. *Fuel Process. Technol.* 85, 1623–1634 (2004).
  457. Ríos R., C. A., Williams, C. D. & Roberts, C. L. A comparative study of two methods for the synthesis of fly ash-based sodium and potassium type zeolites. *Fuel* 88, 1403–1416 (2009).
  458. Fukui, K., Katoh, M., Yamamoto, T. & Yoshida, H. Utilization of NaCl for phillipsite synthesis from fly ash by hydrothermal treatment with microwave heating. *Adv. Powder Technol.* 20, 35–40 (2009).
  459. Breck, D. W. Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use. (Wiley, 1973).
  460. Li, H., Hui, J., Wang, C., Bao, W. & Sun, Z. Extraction of alumina from coal fly ash by mixed-alkaline hydrothermal method. *Hydrometallurgy* 147–148, 183–187 (2014).
  461. Park, J.-E., Youn, H.-K., Yang, S.-T. & Ahn, W.-S. CO<sub>2</sub> capture and MWCNTs synthesis using mesoporous silica and zeolite 13X collectively prepared from bottom ash. *Catal. Today* 190, 15–22 (2012).
  462. Algoufi, Y. T. & Hameed, B. H. Synthesis of glycerol carbonate by transesterification of glycerol with dimethyl carbonate over K-zeolite derived from coal fly ash. *Fuel Process. Technol.* 126, 5–11 (2014).
  463. Babajide, O., Musyoka, N., Petrik, L. & Ameer, F. Novel zeolite Na-X synthesized from fly ash as a heterogeneous catalyst in biodiesel production. *Catal. Today* 190, 54–60 (2012).
  464. Hui, K. S. & Chao, C. Y. H. Pure, single phase, high crystalline, chamfered-edge zeolite 4A synthesized from coal fly ash for use as a builder in detergents. *J. Hazard. Mater.* 137, 401–409 (2006).
  465. Itskos, G., Koutsianos, A., Koukouzas, N. & Vasilatos, C. Zeolite development from fly ash and utilization in lignite mine-water treatment. *Int. J. Miner. Process.* 139, 43–50 (2015).
  466. Wozzuk, A., Zofka, A., Bandura, L. & Franus, W. Effect of zeolite properties on asphalt foaming. *Constr. Build. Mater.* 139, 247–255 (2017).
  467. Karakasi, O. K. & Moutsatsou, A. Surface modification of high calcium fly ash for its application in oil spill clean up. *Fuel* 89, 3966–3970 (2010).
  468. Rashidi, N. A. & Yusup, S. Overview on the Potential of Coal-Based Bottom Ash as Low-Cost Adsorbents. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4, 1870–1884 (2016).
  469. Li, W., Liu, J. & Zhao, D. Mesoporous materials for energy conversion and storage devices. *Nat. Rev. Mater.* 1, 16023 (2016).
  470. Kumar, P., Mal, N., Oumi, Y., Yamana, K. & Sano, T. Mesoporous materials prepared using coal fly ash as the silicon and aluminium source. *J. Mater. Chem.* 11, 3285–3290 (2001).
  471. Dhokte, A. O., Khillare, S. L., Lande, M. K. & Arbad, B. R. Synthesis, characterization of mesoporous silica materials from waste coal fly ash for the classical Mannich reaction. *J. Ind. Eng. Chem.* 17, 742–746 (2011).
  472. Misran, H., Singh, R., Begum, S. & Yarmo, M. A. Processing of mesoporous silica materials (MCM-41) from coal fly ash. *J. Mater. Process. Technol.* 186, 8–13 (2007).
  473. Li, D. et al. One-pot synthesis of Aluminum-containing ordered mesoporous silica MCM-41 using coal fly ash for phosphate adsorption. *J. Colloid Interface Sci.* 404, 42–48 (2013).
  474. Chandrasekar, G., Son, W.-J. & Ahn, W.-S. Synthesis of mesoporous materials SBA-15 and CMK-3 from fly ash and their application for CO<sub>2</sub> adsorption. *J. Porous Mater.* 16, 545–551 (2009).
  475. Chandrasekar, G. et al. Synthesis of hexagonal mesoporous aluminophosphate using Al dross. *Korean J. Chem. Eng.* 26, 1389–1394 (2009).
  476. Hui, K. S. & Chao, C. Y. H. Synthesis of MCM-41 from coal fly ash by a green approach: Influence of synthesis pH. *J. Hazard. Mater.* 137, 1135–1148 (2006).
  477. Chen, C., You, K.-S., Ahn, J.-W. & Ahn, W.-S. Synthesis of mesoporous silica from bottom ash and its application for CO<sub>2</sub> sorption. *Korean J. Chem. Eng.* 27, 1010–1014 (2010).
  478. Bhagiyalakshmi, M., Yun, L. J., Anuradha, R. & Jang, H. T. Synthesis of chloropyrimidine grafted mesoporous MCM-41, MCM-48 and SBA-15 from rice husk ash: their application to CO<sub>2</sub> chemisorption. *J. Porous Mater.* 17, 475–484 (2010).
  479. Yan, F. et al. A Green and Facile Synthesis of Ordered Mesoporous Nanosilica Using Coal Fly Ash. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4, 4654–4661 (2016).
  480. Mureseanu, M. et al. Selective Cu<sup>2+</sup> adsorption and recovery from contaminated water using mesoporous hybrid silica bio-adsorbents. *Microporous Mesoporous Mater.* 146, 141–150 (2011).
  481. Pizarro, J. et al. Adsorption of Cu<sup>2+</sup> on coal fly ash modified with functionalized mesoporous silica. *Fuel* 156, 96–102 (2015).
  482. Zhang, Y., Kang, L., Shang, J. & Gao, H. A low cost synthesis of fly ash-based mesoporous nanocomposites for production of hydrogen by photocatalytic water-splitting. *J. Mater. Sci.* 48, 5571–5578 (2013).
  483. Li, Z.-D. et al. Preparation and photocatalytic performance of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@TiO<sub>2</sub> core-shell microspheres supported by silica aerogels from industrial fly ash. *J. Alloys Compd.* 659, 240–247 (2016).
  484. Smirnova, I., Mamic, J. & Arlt, W. Adsorption of Drugs on Silica Aerogels. *Langmuir* 19, 8521–8525 (2003).
  485. Gualtieri, A., Norby, P., Artioli, G. & Hanson, J. Kinetics of formation of zeolite Na-A [LTA] from natural kaolinites. *Phys. Chem. Miner.* 24, 191–199 (1997).
  486. Deng, Z., Wang, J., Wu, A., Shen, J. & Zhou, B. High strength SiO<sub>2</sub> aerogel insulation. *J. Non. Cryst. Solids* 225, 101–104 (1998).
  487. Shi, F., Liu, J.-X., Song, K. & Wang, Z.-Y. Cost-effective synthesis of silica aerogels from fly ash via ambient pressure drying. *J. Non. Cryst. Solids* 356, 2241–2246 (2010).
  488. San Cristóbal, A. G., Castelló, R., Martín Luengo, M. A. & Vizcayno, C. Zeolites prepared from calcined and mechanically modified kaolins: A comparative study. *Appl. Clay Sci.* 49, 239–246 (2010).
  489. Chandrasekar, S., Raghavan, P., Sebastian, G. & Damodaran, A. D. Brightness improvement studies on 'kaolin based' zeolite 4A. *Appl. Clay Sci.* 12, 221–231 (1997).
  490. Sugano, Y. et al. Hydrothermal synthesis of zeolite A using blast furnace slag. *ISIJ Int.* 45, 937–945 (2005).
  491. Cheng, Y. et al. Effect of surface modification on physical properties of silica aerogels derived from fly ash acid sludge. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 490, 200–206 (2016).
  492. Wu, X., Fan, M., McLaughlin, J. F., Shen, X. & Tan, G. A novel low-cost method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique. *Powder Technol.* 323, 310–322 (2018).
  493. Hower, J. C. et al. Case study of the conversion of tangential- and wall-fired units to low-NO<sub>x</sub> combustion: Impact on fly ash quality. *Waste Manag.* 17, 219–229 (1998).



494. Hower, J. C. et al. Mercury capture by native fly ash carbons in coal-fired power plants. *Prog. Energy Combust. Sci.* 36, 510–529 (2010).
495. Hachmann, L., Burnett, A., Gao, Y. M., Hurt, R. H. & Suuberg, E. M. Surfactant adsorptivity of solid products from pulverized-coal combustion under controlled conditions. in *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute vol. 27* 2965–2971 (1998).
496. Bailey, J. G., Tate, A., Diessel, C. F. K. & Wall, T. F. A char morphology system with applications to coal combustion. *Fuel* 69, 225–239 (1990).
497. Keppeler, J. G. Carbon burn-out, an update on commercial applications. in *2001 International Ash Utilization Symposium University of Kentucky Center for Applied Research 1–5* (2001).
498. Cangialosi, F., Notarnicola, M., Liberti, L. & Stencil, J. The role of weathering on fly ash charge distribution during triboelectrostatic beneficiation. *J. Hazard. Mater.* 164, 683–688 (2009).
499. Aplan, F. F. The historical development of coal flotation in the United States. in *Advances in Flotation Technology*, SME, Littleton, CO 269–287 (1999).
500. Uçurum, M. Influences of Jameson flotation operation variables on the kinetics and recovery of unburned carbon. *Powder Technol.* 191, 240–246 (2009).
501. Emre Altun, N., Xiao, C. & Hwang, J. Y. Separation of unburned carbon from fly ash using a concurrent flotation column. *Fuel Process. Technol.* 90, 1464–1470 (2009).
502. Mehrotra, V. P., Sastry, K. V. S. & Morey, B. W. Review of oil agglomeration techniques for processing of fine coals. *Int. J. Miner. Process.* 11, 175–201 (1983).
503. Fisher, G. L. L., Chang, D. P. Y. P. & Brummer, M. Fly ash collected from electrostatic precipitators: Microcrystalline structures and the mystery of the spheres. *Science* (80-. ). 192(4239), 553–555 (1976).
504. Acar, I. & Atalay, M. U. Recovery potentials of cenospheres from bituminous coal fly ashes. *Fuel* 180, 97–105 (2016).
505. Hirajima, T. et al. Recovery of cenospheres from coal fly ash using a dry separation process: Separation estimation and potential application. *Int. J. Miner. Process.* 95, 18–24 (2010).
506. Borm, P. J. Toxicity and occupational health hazards of coal fly ash (CFA). A review of data and comparison to coal mine dust. *Ann. Occup. Hyg.* 41, 659–676 (1997).
507. Jegadeesan, G., Al-Abed, S. R. & Pinto, P. Influence of trace metal distribution on its leachability from coal fly ash. *Fuel* 87, 1887–1893 (2008).
508. Kolay, P. K. & Bhusal, S. Recovery of hollow spherical particles with two different densities from coal fly ash and their characterization. *Fuel* 117, 118–124 (2014).
509. Bradlo, D. & Żukowski, W. Determination of cenospheres concentration in fly ashes and choice of its acquisition method on the laboratory scale. *Logistyka* 13–22 (2013).
510. Petrus, H. T. B. M. et al. Performance of dry-separation processes in the recovery of cenospheres from fly ash and their implementation in a recovery unit. *Int. J. Miner. Process.* 98, 15–23 (2011).
511. Gurupira, T. et al. New products from coal combustion ash: Selective extraction of particles with density smaller than 2. in *International ash utilization symposium 1–5* (2001).
512. Chalivendra, V. B., Shukla, A., Bose, A. & Parameswaran, V. Processing and mechanical characterization of lightweight polyurethane composites. *J. Mater. Sci.* 38, 1631–1643 (2003).
513. Cardoso, R. J., Shukla, A. & Bose, A. Effect of particle size and surface treatment on constitutive properties of polyester-cenosphere composites. *J. Mater. Sci.* 37, 603–613 (2002).
514. Parameswaran, V. & Shukla, A. Processing and characterization of a model functionally gradient material. *J. Mater. Sci.* 35, 21–29 (2000).
515. Wasekar, P. A., Kadam, P. G. & Mhaske, S. T. Effect of Cenosphere Concentration on the Mechanical, Thermal, Rheological and Morphological Properties of Nylon 6. *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 11, 807–812 (2012).
516. Shukla, S. et al. Study of mechanism of electroless copper coating of fly-ash cenosphere particles. *Appl. Surf. Sci.* 181, 35–50 (2001).
517. Shukla, S., Seal, S., Rahaman, Z. & Scammon, K. Electroless copper coating of cenospheres using silver nitrate activator. *Mater. Lett.* 57, 151–156 (2002).
518. Jha, N., Badkul, A., Mondal, D. P., Das, S. & Singh, M. Sliding wear behaviour of aluminium syntactic foam: A comparison with Al–10 wt% SiC composites. *Tribol. Int.* 44, 220–231 (2011).
519. Rohatgi, P. K., Gupta, N., Schultz, B. F. & Luong, D. D. The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams. *JOM* 63, 36–42 (2011).
520. Chávez-Valdez, A., Arizmendi-Morquecho, A., Vargas, G., Almanza, J. M. & Alvarez-Quintana, J. Ultra-low thermal conductivity thermal barrier coatings from recycled fly-ash cenospheres. *Acta Mater.* 59, 2556–2562 (2011).
521. Ozcivici, E. & Singh, R. P. Fabrication and Characterization of Ceramic Foams Based on Silicon Carbide Matrix and Hollow Alumino-Silicate Spheres. *J. Am. Ceram. Soc.* 88, 3338–3345 (2005).
522. Barbare, N., Shukla, A. & Bose, A. Uptake and loss of water in a cenosphere–concrete composite material. *Cem. Concr. Res.* 33, 1681–1686 (2003).
523. Liu, F., Wang, J., Qian, X. & Hollingsworth, J. Internal curing of high performance concrete using cenospheres. *Cem. Concr. Res.* 95, 39–46 (2017).
524. Blanco, F., García, P., Mateos, P. & Ayala, J. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. *Cem. Concr. Res.* 30, 1715–1722 (2000).
525. Tiwari, V., Shukla, A. & Bose, A. Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete. *Appl. Acoust.* 65, 263–275 (2004).
526. Lilkov, V., Djabarov, N., Bechev, G. & Petrov, O. Properties and hydration products of lightweight and expansive cements Part II: Hydration products. *Cem. Concr. Res.* 29, 1641–1646 (1999).
527. Lilkov, V., Djabarov, N., Bechev, G. & Kolev, K. Properties and hydration products of lightweight and expansive cements Part I: Physical and mechanical properties. *Cem. Concr. Res.* 29, 1635–1640 (1999).
528. McBride, S. P., Shukla, A. & Bose, A. Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres. *J. Mater. Sci.* 37, 4217–4225 (2002).
529. Hanif, A., Parthasarathy, P., Ma, H., Fan, T. & Li, Z. Properties improvement of fly ash cenosphere modified cement pastes using nano silica. *Cem. Concr. Compos.* 81, 35–48 (2017).
530. Ranjbar, N. et al. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Compos. Sci. Technol.* 122, 73–81 (2016).
531. Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrli, M., Alengaram, U. J. & Jumaat, M. Z. Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites. *Cem. Concr. Res.* 76, 222–231 (2015).
532. Drozhzhin, V. S. et al. Functional materials on the basis of cenospheres. in *Proceedings of the 2005 World of Coal Ash Conference* (2005).
533. Hanif, A., Lu, Z. & Li, Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. *Constr. Build. Mater.* 144, 373–384 (2017).
534. Yang, B., Yang, Y. & Gai, G. Preparation of SiO<sub>2</sub>/Cenosphere Composites and Super-Hydrophobic Surface. *Adv. Mater. Res.* 826, 215–222 (2013).
535. Xu, B., Ma, H., Hu, C. & Li, Z. Influence of cenospheres on properties of magnesium oxychloride cement-based composites. *Mater. Struct.* 49, 1319–1326 (2016).
536. Wang, M.-R., Jia, D.-C., He, P.-G. & Zhou, Y. Microstructural and mechanical characterization of fly ash cenosphere/metakaolin-based geopolymeric composites. *Ceram. Int.* 37, 1661–1666 (2011).
537. Yavuz, C. T., Prakash, A., Mayo, J. T. & Colvin, V. L. Magnetic separations: From steel plants to biotechnology. *Chem. Eng. Sci.* 64, 2510–2521 (2009).
538. Zyrjanov, V. V., Petrov, S. A. & Matvienko, A. A. Characterization of spinel and magnetospheres of coal fly ashes collected in power plants in the former USSR. *Fuel* 90, 486–492 (2011).
539. Stripriya, R., Rao, P. V. T., Bapat, J. P., Singh, N. P. & Das, P. Development of an alternative to magnetite for use as heavy media in coal washeries. *Int. J. Miner. Process.* 71, 55–71 (2003).
540. Prakash, S., Mohanty, J. K. I., Das, B. I. & Venugopal, R. Technical note: Characterisation and removal of iron from fly

- ash of Talcher Area, Orissa, India. 14, 123–126 (2001).
541. Gomes, S. et al. Characterization of magnetite in silico-aluminous fly ash by SEM, TEM, XRD, magnetic susceptibility, and Moessbauer spectroscopy. *Cem. Concr. Res.* 29, 1705–1711 (1999).
  542. Sokol, E. V. et al. Ferrospheres from fly ashes of Chelyabinsk coals: Chemical composition, morphology and formation conditions. *Fuel* 81, 867–876 (2002).
  543. Zyryanov, V. V. & Zyryanov, D. V. Complex Processing of Pulverized Fly Ash by Dry Separation Methods. *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)* 01, 293–301 (2010).
  544. Shoumkova, A. S. Magnetic separation of coal fly ash from Bulgarian power plants. *Waste Manag. Res.* 29, 1078–89 (2011).
  545. Groppo, J. & Honaker, R. Economical recovery of fly ash-derived magnetics and evaluation for coal cleaning, in 3rd World of Coal Ash, WOCA Conference - Proceedings (2009).
  546. Bienias, J., Walczak, M., Surowska, B. & Sobczak, J. Microstructure and corrosion behaviour of aluminum fly ash composites. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 5, 493–502 (2003).
  547. Ramachandra, M. & Radhakrishna, K. Synthesis-microstructure-mechanical properties-wear and corrosion behavior of an Al-Si (12%)--Flyash metal matrix composite. *J. Mater. Sci.* 40, 5989–5997 (2005).
  548. Mahendra Boopathi, M., Arulshri, K. P. & Iyandurai, N. Evaluation of mechanical properties of Aluminium alloy 2024 reinforced with silicon carbide and fly ash hybrid metal matrix composites. *Am. J. Appl. Sci.* 10, 219–229 (2013).
  549. Rohatgi, P. K. Low-cost, fly-ash-containing aluminum-matrix composites. *JOM* 46, 55–59 (1994).
  550. Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., Pai, B. C., Satyanarayana, K. G. & Rohatgi, P. K. Fabrication and characterisation of Al-7Si-0.35Mg/fly ash metal matrix composites processed by different stir casting routes. *Compos. Sci. Technol.* 67, 3369–3377 (2007).
  551. Rayzman, V. L., Shcherban, S. A. & Dworkin, R. S. Technology for Chemical - Metallurgical Coal Ash Utilization. *Energy & Fuels* 761–773 (1997).
  552. Grzymek, J. Self-disintegration method for the complex manufacture of aluminum oxide and Portland cement. *Pap. from "Light Met. 1976"*. 2, (1976).
  553. Hosterman, J. W., Patterson, S. H. & Good, E. E. World nonbauxite aluminium resources excluding alunite. (Alexandria, VA (USA); U.S. Geological Survey, 1990).
  554. Baudet, G. A Documentary Study on Alumina Extraction Processes. (1977).
  555. Bayer, K. J. A process for the production of aluminum hydroxide. German Patent 43,977, 03-08-1888. (1888).
  556. Pedersen, H. Process of manufacturing aluminum hydroxide - US Patent 1618105 A. (1927).
  557. Hignett, T. P. Production of Alumina from Clay by a Modified Pedersen Process. *Ind. Eng. Chem.* 39, 1052–1060 (1947).
  558. Eriksson, J., Eriksson, J., Björkman, B. & Björkman, B. MgO modification of slag from stainless steelmaking. VII Int. Conf. Molten Slags Fluxes Salts 455–460 (2004).
  559. Guzzon, M., Mapelli, C., Memoli, F. & Marcozzi, M. Recycling of ladle slag in the EAF: improvement of the foaming behavior and decrease of the environmental impact. *Rev. Métallurgie* 104, 171–178 (2007).
  560. Padilla, R. & Sohn, H. Y. Sodium aluminate leaching and desilication in lime-soda sinter process for alumina from coal wastes. *Metall. Trans. B* 16, 707–713 (1985).
  561. Lin, H. Y., Wan, L. & Yang, Y. F. Aluminium Hydroxide Ultrafine Powder Extracted from Fly Ash. *Adv. Mater. Res.* 512–515, 1548–1553 (2012).
  562. Adolf Kayser. Process of separating alumina from silica - US708561 A. (1902).
  563. Chesley, J. A. & Burnet, G. Sulfate-Resistant Portland Cement from Lime-Soda Sinter Process Residue. *MRS Proc.* 113, 163 (1987).
  564. Ding, J. et al. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review. *Waste Manag.* 60, 375–387 (2017).
  565. Goodboy, K. P. Investigation of a sinter process for extraction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from coal wastes. *Metall. Trans. B* 7, 716–718 (1976).
  566. Yang, Z., Sun, J., Zhang, Z., Ye, J. & Miao, R. Using silicate-calcium slag generated in process of extracting alumina from fly ash as cement admixture. 8, 3989–3995 (2014).
  567. Bai, G. H. et al. Alkali desilicated coal fly ash as substitute of bauxite in lime-soda sintering process for aluminum production. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)* 20, s169–s175 (2010).
  568. Jiang, Z., Ma, H., Yang, J., Ma, X. & Yuan, J. Thermal Decomposition Mechanism of Desilication Coal Fly Ash by Low-Lime Sinter Method for Alumina Extraction. *Ferroelectrics* 486, 143–155 (2015).
  569. Jiang, Z., Yang, J., Ma, H., Wang, L. & Ma, X. 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. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 25, 2065–2072 (2015).
  570. Xiao, Y. F. et al. Mechanism and Kinetics Study of Sintering Process for Alumina Recovery from Fly Ash. *Adv. Mater. Res.* 955–959, 2824–2830 (2014).
  571. Wang, M. W. et al. Extraction of Aluminum Hydroxide from Coal Fly Ash by Pre-Desilication and Calcination Methods. *Adv. Mater. Res.* 396–398, 706–710 (2011).
  572. Bai, G., Teng, W., Wang, X., Zhang, H. & Xu, P. Processing and kinetics studies on the alumina enrichment of coal fly ash by fractionating silicon dioxide as nano particles. *Fuel Process. Technol.* 91, 175–184 (2010).
  573. Sun, Z., Li, H., Bao, W. & Wang, C. Mineral phase transition of desilicated high alumina fly ash with alumina extraction in mixed alkali solution. *Int. J. Miner. Process.* 153, 109–117 (2016).
  574. Seeley, F. G., McDowell, W. J., Felker, L. K., Kelmers, A. D. & Egan, B. Z. Determination of extraction equilibria for several metals in the development of a process designed to recover aluminum and other metals from coal combustion ash. *Hydrometallurgy* 6, 277–290 (1981).
  575. Luo, Q. et al. Dissolution kinetics of aluminum, calcium, and iron from circulating fluidized bed combustion fly ash with hydrochloric acid. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 18184–18191 (2013).
  576. Verbaan, B. & Louw, G. K. E. A mass and energy balance model for the leaching of a pulverised fuel ash in concentrated sulphuric acid. *Hydrometallurgy* 21, 305–317 (1989).
  577. Cui, L., Guo, Y., Wang, X., Du, Z. & Cheng, F. Dissolution kinetics of aluminum and iron from coal mining waste by hydrochloric acid. *Chinese J. Chem. Eng.* 23, 590–596 (2015).
  578. Nayak, N. & Panda, C. R. Aluminium extraction and leaching characteristics of Talcher Thermal Power Station fly ash with sulphuric acid. *Fuel* 89, 53–58 (2010).
  579. Matjie, R. H. H., Bunt, J. J. R. & van Heerden, J. H. P. H. P. Extraction of alumina from coal fly ash generated from a selected low rank bituminous South African coal. *Miner. Eng.* 18, 299–310 (2005).
  580. Shemi, A. et al. Alternative techniques for extracting alumina from coal fly ash. *Miner. Eng.* 34, 30–37 (2012).
  581. Huiming Ji, Huixiang Lu, Xiaoguang Hao & Ping Wu. High purity alumina powders extracted from fly ash by the calcining-leaching process. *J. Chinese Ceram. Soc.* 35, 1657 (2007).
  582. Yang, Q. C., Ma, S. H., Zheng, S. L. & Zhang, R. Recovery of alumina from circulating fluidized bed combustion Al-rich fly ash using mild hydrochemical process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)* 24, 1187–1195 (2014).
  583. Ding, J. et al. A novel process for synthesis of tobermorite fiber from high-alumina fly ash. *Cem. Concr. Compos.* 65, 11–18 (2016).
  584. Zhong, L., Zhang, Y. & Zhang, Y. Extraction of alumina and sodium oxide from red mud by a mild hydro-chemical process. *J. Hazard. Mater.* 172, 1629–1634 (2009).
  585. Wang, R. C., Zhai, Y. C., Wu, X. W., Ning, Z. Q. & Ma, P. H. Extraction of alumina from fly ash by ammonium hydrogen sulfate roasting technology. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)* 24, 1596–1603 (2014).
  586. Wang, R. C., Zhai, Y. C. & Ning, Z. Q. Thermodynamics and kinetics of alumina extraction from fly ash using an ammonium hydrogen sulfate roasting method. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 21, 144–149 (2014).
  587. Park, H. C., Park, Y. J. & Stevens, R. Synthesis of alumina from high purity alum derived from coal fly ash. *Mater. Sci. Eng. A* 367, 166–170 (2004).
  588. Shabtai, Y. & Mukmenev, I. A combined chemical -

- biotechnological treatment of coal fly ash (CFA). *J. Biotechnol.* 51, 209–217 (1996).
589. Ramdoo, I. Shopping for raw materials: Should Africa be worried about EU Raw Materials Initiative. Maastricht, ECDPM, discussion paper 105 (2011).
590. Arroyo, F. et al. Germanium recovery from gasification fly ash: Evaluation of end-products obtained by precipitation methods. *J. Hazard. Mater.* 167, 582–588 (2009).
591. Font, O. et al. Ge extraction from gasification fly ash. *Fuel* 84, 1384–1392 (2005).
592. Hernández-Expósito, A. et al. Ion flotation of germanium from fly ash aqueous leachates. *Chem. Eng. J.* 118, 69–75 (2006).
593. Marco-Lozar, J. P., Cazorla-Amorós, D. & Linares-Solano, A. A new strategy for germanium adsorption on activated carbon by complex formation. *Carbon N. Y.* 45, 2519–2528 (2007).
594. Torralvo, F. A. & Fernández-Pereira, C. Recovery of germanium from real fly ash leachates by ion-exchange extraction. *Miner. Eng.* 24, 35–41 (2011).
595. Arroyo, F., Fernández-Pereira, C., Oroz, P. B. & Olivares Del Valle, J. Industrial equipment design for the recovery of germanium from coal fly ash leachates by solvent extraction. in *World of Coal Ash (WOCA) Conference - May 9-12 (2011)*.
596. Arroyo, F., Fernández-Pereira, C., Olivares, J. & Coca, P. Hydrometallurgical Recovery of Germanium from Coal Gasification Fly Ash: Pilot Plant Scale Evaluation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 3573–3579 (2009).
597. Arroyo, F. & Fernández-Pereira, C. Hydrometallurgical Recovery of Germanium from Coal Gasification Fly Ash. Solvent Extraction Method. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 3186–3191 (2008).
598. Moskalyk, R. R. Gallium: The backbone of the electronics industry. *Miner. Eng.* 16, 921–929 (2003).
599. Fang, Z. & Gesser, H. D. Recovery of gallium from coal fly ash. *Hydrometallurgy* 41, 187–200 (1996).
600. Font, O. et al. Recovery of gallium and vanadium from gasification fly ash. *J. Hazard. Mater.* 139, 413–423 (2007).
601. Gutierrez, B., Pazos, C. & Coca, J. Recovery of Gallium From Coal Fly Ash By a Dual Reactive Extraction Process. *Waste Manag. Res.* 15, 371–382 (1997).
602. Moskalyk, R. R. & Alfantazi, A. M. Processing of vanadium: A review. *Miner. Eng.* 16, 793–805 (2003).
603. Guibal, E., Guzman, J., Navarro, R. & Revilla, J. Vanadium Extraction from Fly Ash - Preliminary Study of Leaching, Solvent Extraction, and Sorption on Chitosan. *Sep. Sci. Technol.* 38, 2881–2899 (2003).
604. McCarthy, M. J. & Dhir, R. K. Towards maximising the use of fly ash as a binder. *Fuel* 78, 121–132 (1999).
605. Font, O. et al. Speciation of major and selected trace elements in IGCC fly ash. *Fuel* 84, 1364–1371 (2005).
606. Özer, M. & Orhan, M. Zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının lazer kırınım yöntemiyle belirlenmesi. *Politek. Derg. - J. Polytech. Cilt* 10, 331–337 (2007).
607. ASTM C186 -15a. Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement. (2015) doi:10.1520/C0186-15A.2.
608. RILEM TCE. Adiabatic and semi-adiabatic calorimetry to determine the temperature increase in concrete due to hydration heat of the cement. *Mater. Struct.* 30, 451–457 (1997).
609. Langan, B. W., Weng, K. & Ward, M. A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. *Cem. Concr. Res.* 32, 1045–1051 (2002).
610. Pane, I. & Hansen, W. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cem. Concr. Res.* 35, 1155–1164 (2005).
611. ASTM C 1702 - 15b. Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction. (2015) doi:10.1520/C1702-15B.2.
612. Gallucci, E., Mathur, P. & Scrivener, K. Microstructural development of early age hydration shells around cement grains. *Cem. Concr. Res.* 40, 4–13 (2010).
613. EÜAŞ Çatalağzı Termik Santrali İşletme Müdürlüğü. Çatalağzı Termik Santrali Web Sayfası. Çatalağzı Termik Santrali Tarihçesi <http://www.cates.gov.tr/cates/tanitim.html> (2008).
614. Yeniköy Kemerköy Elektrik Üretim ve Ticaret A.Ş. Yeniköy - Kemerköy Termik Santrali Web Sayfası. <http://www.ykenerji.com.tr/> (2016).
615. Çelikler Holding. Seyitömer Termik Santrali. <http://celiklerseyitomer.com.tr/tarihce.aspx> (2017).
616. Konya Şeker Sanayi ve Ticaret A.Ş. Soma Termik Santral Elektrik Üretim A.Ş. <http://www.somatermik.com.tr/Tr/kurumsal> (2017).
617. Kocaekiz, B. Biör termik santraliñ enerjii ve veriñ analiziñ. (Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010).
618. Siddique, R. Waste materials and by-products in concrete. (Springer Science & Business Media, 2007).
619. Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89, 913–933 (2010).
620. Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, 19–39 (2013).
621. Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel* 105, 40–76 (2013).
622. Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. & Morgan, T. J. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel* 94, 1–33 (2012).
623. Dong, Jinxiang, et al. Hydrogen storage in several microporous zeolites. *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 4998–5004 (2007).
624. UKQAA. Ash Statistics for 2014. <http://www.ukqaa.org.uk/wp-content/uploads/Annual-ash-statistics-2014-Public-domain-table-bar-chart.pdf> (2014).
625. Hafez, H., Kurda, R., Cheung, W. M. & Nagarathnam, B. Comparative life cycle assessment between imported and recovered fly ash for blended cement concrete in the UK. *J. Clean. Prod.* 244, 118722 (2020).





