

**ÖĞÜTÜLMÜŞ UÇUCU KÜL VE ÇELİKHANE CÜRUFUNUN CAM SERAMİK
ELDESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Serkan KESKİNBAS

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sedef DİKMEN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2021

ÖZET

ÖĞÜTÜLMÜŞ UÇUCU KÜL VE ÇELİKHANE CÜRUFUNUN CAM SERAMİK ELDESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Serkan KESKİNBAŞ

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2021

Danışman: Doç. Dr. Sedef DİKMEN

Bu tez çalışmasında, Çayırhan (Ankara) Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül (UK) ve yardımcı malzeme olarak da Erdemir Demir Çelik Fabrikası A.Ş'den temin edilen bazik oksijen fırını (BOF) cürufu atıklarının farklı oranlardaki karışımlarının 2, 4, 8, 12 ve 16 saat süreyle gezegen tipi bilyeli bir değirmende öğütme işlemlerinin sinterlenme davranışına etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, öğütme işleminin atık malzeme üzerinde mineralojik ve mikroyapısal olarak etkilerini görme amacıyla Parçacık Boyut Dağılımı (PSD), X-ışını Kırınım Analizi ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntülerinden parçacıkların 8 saatlik öğütme süresinden sonra topaklanma eğilimi göstermeye başladığı görüldü.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, öğütme süresi, karışım oranları ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak optimum sinterleme koşullarını belirlemek amacıyla, öncelikle UK ile BOF cürufunun farklı oranlarda karışımları 2, 4, 8, 12 ve 16 saat süreyle yaşı olarak öğütüldü. Öğütme işleminden sonra, herhangi bir katkı maddesi, bağlayıcı vb. kullanmadan silindirik formda preslenerek 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta sinterlenerek mekanik, mineralojik ve mikroyapısal özellikleri belirlenmiştir. Basınç dayanım testleri sonucunda mukavemet değerleri 4,56 ila 83,95 MPa aralığının da değişim gösterdiği sonucuna varıldı. 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımının 8 saat öğütülmesi ve 1050°C'de sinterlenmesi sonucunda en yüksek mukavemet değeri elde edildi.

Anahtar Sözcükler: Çelikhane cürufu, Uçucu kül, Sinterleme, Mekanik özellikler, XRD.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF GRINDING FLY ASH AND STEEL SLAG USABILITY IN GLASS CERAMIC

Serkan KESKİNBAŞ

Department of Physics

Programme in General Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sedef DİKMEN

In this thesis study, the effect of grinding processes on sintering behavior of the mixture of fly ash (FA) waste obtained from Çayırhan (Ankara) Thermal Power Plant and basic oxygen furnace (BOF) slag obtained from Erdemir Iron and Steel Factory as auxiliary material in different proportions was investigated in a planetary ball mill for 2, 4, 8, 12 and 16 h. In the first phase of the study, Particle Size Distribution (PSD), X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM) analyzes were performed to investigate the mineralogical and microstructural effects of the grinding process on the waste material. It has been revealed from the scanning electron microscope (SEM) images that the particles has started to clump after 8 hours of milling time. It shows that the grinding process plays an important role in the PSD of FA, but this size increases again at the 16 h grinding time.

In the second phase of the study, in order to determine the optimum sintering conditions depending on the grinding time and mixing ratios parameters. Firstly, FA and BOF slag used as auxiliary material in different proportions were grinded wet for 2, 4, 8, 12 and 16 h. After grinding, the samples were pressed into cylindrical form without using any additives, binders etc. The samples formed were sintered at four different temperatures: 950°C, 1000°C, 1050°C and 1100°C, their mechanical, mineralogical and microstructural properties have been determined. As a result of the compressive strength tests, it has been concluded that the strength values have varied between 4.56 and 83.95 MPa. The highest strength value was obtained as a result of grinding the mixture of 2/3FA and 1/3BOF slag for 8h and sintering at 1050°C.

Keywords: Steel slag, Fly ash, Mechanical properties, Sintering, XRD..

TEŞEKKÜR

Çayırhan (Ankara) Termik Santral uçucu kül ve Erdemir Demir-Çelik Fabrikası T.A.Ş'den temin edilen ve demir-çelik üretiminde yan ürün olarak açığa çıkan bazik oksijen fırını (BOF) cürufunun sinterlenme davranışlarının araştırılmasında, yüksek lisans derslerimde, Fen Fakültesi Fizik Bölümü Genel Fizik Laboratuvarını kullanmama olanak tanıyan, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan, zorlu pandemi süresince anlayış ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Sedef DİKMEN'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Genel Fizik Laboratuvarında bana yol gösteren yardımlarını esirgemeyen bilgi ve görüşlerinden yararlandığım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zafer DİKMEN'e en içten dileklerimle teşekkür ederim. Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde basınç dayanım testlerinin yapılmasına olanak sağlayan Sayın Prof. Dr. Nuran AY ve testleri gerçekleştiren Sayın Araş. Gör. Çağrı Özer'e teşekkürü bir borç bilirim. Seramik Araştırma Merkezi'nin Laboratuvarında bulunan Malvern Mastersizer 3000 cihazını kullanmamıza olanak sağlayan Sayın Prof. Dr. Alpagut KARA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim sırasında gösterdiği anlayış ve yardımları için sevgili eşim ve oğluma en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Serkan KESKİNBAŞ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Serkan KESKİNBAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GÖRSELLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. UÇUCU KÜL	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Uçucu Külün Tanımı	7
2.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	7
2.3.1. Tane boyut dağılımı	7
2.3.2. Yoğunluk.....	8
2.3.3. Renk	8
2.3.4. Kıvam (Atterberg) limitleri.....	9
2.4. Uçucu Külün Kimyasal Yapısı ve Sınıflandırması	9
2.5. Uçucu Külün Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri.....	11
2.5.1. Mineralojik oluşum.....	11
2.5.2. Morfolojik özellikleri.....	11
2.6. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları.....	12
2.6.1. Yapı endüstrisi	13
2.6.2. Yapı malzemesi	14

3. ÇELİKHANE CÜRUFU.....	16
3.1. Yüksek Fırın Çelik Üretimi	16
3.2. Bazık Oksijen Fırını (BOF) Çelik Üretimi	18
3.3. Bileşim ve Fiziksel Özellikleri.....	18
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	20
5. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN YÖNTEMLER	22
5.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar	22
5.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Atık Malzemeler	23
5.3. Öğütme İşlemi	23
5.4. Sinterleme İşlemi.....	25
5.4.1. Katı faz sinterlemesi	26
5.4.2. Sıvı faz sinterlemesi	27
5.5. Karakterizasyon Yöntemleri	29
5.5.1. Mikron boyutundaki malzemelerin parçacık boyut dağılımı.....	29
5.5.2. X-Işınları kırınımı (XRD) analizi	29
5.5.2.1. <i>X-ışınları</i>	29
5.5.2.2. <i>Bragg yasası</i>	30
5.5.2.3. <i>Kırınım yöntemleri</i>	31
5.5.3. Mikro yapı analizi (Taramalı Elektron Mikroskobu, SEM)	33
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	35
6.1. Atık Malzemelerin Karakterizasyonu	35
6.1.1.Parçacık boyut dağılımı analizi.....	35
6.1.2. Kimyasal analiz.....	35
6.1.3. Mineralojik analiz	37
6.1.4. Mikroyapısal analiz.....	38
6.2. Numunelerin Sinterlenmesi İşlemi	40
6.2.1. Parçacık boyut dağılımı.....	43
6.2.2. Öğütülmüş numunelerin mineralojik analizi	44
6.2.3. Öğütülmüş numunelerin mikroyapısal (SEM) analizi	45

6.3.	Sinterlenmiş Numunelerinin Karakterizasyonu	49
6.3.1.	Mekanik özellikler	49
6.3.2.	Mineralojik özellikler	50
7.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	56
7.1.	Sonuç ve Tartışma	56
7.2.	Öneriler	59
KAYNAKÇA		61
ÖZGEÇMİŞ		



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Bitümlü kömür uçucu küllerinde bulunan en önemli mineraller (Ahmaruzzaman, 2010).....	11
Tablo 2.2. Uçucu küllerin kullanım alanları (Ahmaruzzaman, 2010).	13
Tablo 3.1. Bazik oksijen fırını (BOF) çelik üretimine ait cürufun kimyasal kompozisyonu (Uysal ve Bahar, 2018).....	19
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan atık malzemelerin (Çayırhan UK ve Erdemir BOF cürufu) fiziksel özellikleri (Fırat vd., 2020).....	23
Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan Çayırhan UK ve Erdemir BOF cürufuna ait kimyasal analiz.....	36
Tablo 6.2. UK, UK/BOF cürufu karışımları ve BOF cürufunun farklı öğütme süreleri, sıcaklık ve karışım oranlarına göre kodlanması.....	42
Tablo 6.3. Farklı öğütme sürelerinde öğütülen uçucu külün parçacık boyut dağılımındaki ve özgül yüzey alanındaki değişimler.....	44
Tablo 6.4. UK, UK/BOF cürufu karışımları ve BOF cürufunun farklı öğütme süreleri, sıcaklık ve karışım oranlarına göre basınç dayanım testleri	49

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 5.1. Bragg yasası (Tilley, 2006).	30
Şekil 6.1. Öğütmeye tabi tutulmamış UK'e ait PSD eğrisi	35
Şekil 6.2. Deneylerde kullanılan (a) Çayırhan UK ve (b) Erdemir BOF cürufuna ait XRD desenleri ve mineralojik fazları	38
Şekil 6.3. Farklı sürelerde öğütülen UK parçacıklarına ait PSD eğrileri	43
Şekil 6.4. UK ve öğütülmüş UK'ün beş farklı öğütme süresine ait XRD desenleri	45
Şekil 6.5. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri.....	52
Şekil 6.6. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 1000°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri.....	52
Şekil 6.7. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 1050°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri.....	53
Şekil 6.8. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 1100°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri.....	53
Şekil 6.9. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C'de sinterlenen 1/2 oranında UK ile 1/2 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri	54
Şekil 6.10. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C'de sinterlenen 1/3 oranında UK ile 2/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri	54
Şekil 6.11. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C ve 1100°C'de sinterlenen 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri	55
Şekil 6.12. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C'de sinterlenen BOF cürufunun XRD deseni	55

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. (a) C-sınıfı (b) F-sınıfı uçucu külün görüntüsü	9
Görsel 2.2. Uçucu külün SEM görüntüsü (https-4).....	12
Görsel 3.1. Çelikhane cürufunun elde edilmesi	18
Görsel 5.1. Deneysel çalışmalara kullanılan UK ve BOF cürufu	23
Görsel 5.2. a) Öğütme işleminde kullanılan gezegen tipi bilyalı değirmenin fotoğrafı (b) Bilyalı değirmenin öğütme haznesi (c) Çalışma prensibi	25
Görsel 5.3. Toplanan tanelerin enerjisini düşürebileceği iki durumun şematik gösterimi (a) Yoğunlaşmayı takip eden tane büyümesi (b) Küçük tanelerin büyüdüğü kabalaşma (Barsoum, 2003).....	27
Görsel 5.4. X-ışınları difraksiyon (XRD) cihazı	33
Görsel 5.5. Taramalı elektron mikroskopu (SEM).....	34
Görsel 6.1. Deneylerde kullanılan (a) Çayırhan UK ve (b) Erdemir BOF cürufuna ait SEM görüntüleri.....	39
Görsel 6.2. Deneysel çalışmaların akış diyagramı	41
Görsel 6.3. Öğütülmemiş UK ve UK'ün beş farklı öğütme süresine ait SEM görüntüleri (a) Öğütülmemiş (3 K ×) (b) 2 saat (3 K×) (c) 4 saat (3 K×) (d) 8 saat (3 K×) (e) 12 saat (3 K×) (f) 16 saat (3 K×).....	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

UK	: Uçucu kül
BOF cürufu	: Bazik oksijen fırını cürufu
EAF cürufu	: Elektrik ark fırını cürufu
SiO ₂	: Silika
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu (Scanning electron microscopy)
XRD	: X-ışını difraktometresi (X-ray diffraction)
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi (X-ray fluorescence)
KK	: Kızdırma kaybı
PSD	: Parçacık boyut dağılımı (particle size distribution)
µm	: Mikrometre
MPa	: Megapascal
2θ	: Kırınım açısı

1. GİRİŞ

Enerji, ekonominin ana kollarından biri olan sanayileşmenin alt yapısını teşkil eder ve günlük yaşantımızın vazgeçilmez temel gereksinimlerindendir. Gelişmekte olan ülkelerde sanayileşme giderek artmakta, bununla beraber kişi başına düşen enerji tüketim miktarının artması ile enerjinin önemi daha da iyi anlaşılmaktadır. Hızla artan enerji ihtiyacının öncelikle güvenli, sürekli talebi karşılar, düşük maliyetli ve çevre dostu üretim yöntemleri ile tüketiciye sunulması gerekmektedir. Ülkemizin enerji talebinin karşılanmasında dışa olan bağımlılık risklerinin azaltılması ve dengede tutulması için kömüre dayalı elektrik üreten santraller yaygın olarak kullanılmaktadır. Kömür sadece elektrik üretiminde değil, aynı zamanda demir-çelik, çimento imalatında ve endüstriyel proseslerde buhar üretme amacıyla da kullanılır. Son güncellemeler göz önüne alındığında, Dünyada elektrik üretiminin %40 gibi önemli bir oranı kömüre dayalı termik santrallerden sağlanmaktadır. Bu oran Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Almanya'da %53, Çin'de %75, Avustralya'da %83, Yunanistan'da %69, Güney Afrika'da %93 ve Polonya'da %95'dir. Ülkemizde ise elektrik enerjisinin %32'si kömürden elde edilmektedir ([http-1](#)). TEİAŞ'ın güncel bilgileri dikkate alındığında ise toplam kömür tüketiminin %21'i elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 2018 yılı verilerine göre, kömürle çalışan termik santrallerden toplam 113,3 TWh elektrik üretilmiş olup toplam elektrik üretimi içerisindeki payı %37,3 seviyesindedir ([http-2](#)).

Çevrenin korunmasının sürdürülebilirliği ancak enerji tasarrufu ve atık madde geri dönüşümü ile sağlanır. Son yıllarda teknolojik gelişmelere paralel olarak, artan endüstriyel atıkların neden olduğu çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda ucuz bir malzeme kaynağı olarak kullanmak amacıyla demir-çelik cürufaları, termik santral külleri gibi endüstriyel atıkların çeşitli alanlarda değerlendirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Atıkların geri dönüştürülmemesi hem dünyamız hem de ülkemiz için büyük çevresel sorunlara neden olmaktadır. Toplama, nakliye, değerlendirme ve depolama, atık ile ilgili ana problemlerdir. Bu sebeple atıkların inşaat malzemesi gibi farklı alanlarda yeniden kullanımı önem arz etmektedir. Bu amaçla atıkların inşaat sektöründe kullanımı, ekonomik ve çevresel açıdan araştırılması gereken önemli bir konudur. Türkiye, Avrupa Birliği uyum süreci için yerine getirilmesi gereken şartlara sahiptir. Atık problemi, bu

uyum sürecinde çözülmesi gereken en önemli konulardan biridir. Sonuç olarak, atık azaltma mümkün olmadığında, geri dönüşüm en uygun çözümdür.

Termik santrallerde pulverize linyit ve taşkömürünün yüksek sıcaklıkta yanması sonucu oluşan ve baca gazlarıyla sürüklenerek siklon ve elektrofiltrelerde toplanan çok ince parçacıklı silis ve alümin silisli küller önemli endüstriyel atık malzemedir. Uçucu kül (UK) adı verilen bu kül parçacıkları elektrostatik yöntemlerle yakalanmakta ve baca gazlarıyla birlikte atmosfere karışması önlenmektedir (Delikurt ve Sevim, 2015; Söylemez ve Yıldırım 2016). Santrallerin ya da diğer tesislerin yakınında uçucu külün depolanması, çeşitli çevre kirliliği sorunlarına neden olmaktadır. Bu yüzden, ham atık madde olarak inşaat sektörüne geri dönüştürülmesi, ekonomik ve çevresel açıdan yararlı bir çözüm olmaktadır.

Uçucu küller, kömürle çalışan termik santrallerde çok ince öğütülmüş düşük kalorili kömür, kil ve şist karışımının yaklaşık olarak 1500°C’de yakılmasıyla tribünleri döndüren enerji elde edilirken, termik santralin bacalarından yakılan kömürün içerisinde bulunan silika, alümina, demir oksit gibi bileşenleri içeren çok ince taneli küller açığa çıkmaktadır.

Dünyada açığa çıkan uçucu kül miktarı, yılda 600 milyon tondur. Örneğin, Türkiye’de yılda 13 milyon tondan fazla uçucu kül üretilmektedir ve bu miktarın 2020’ye kadar yılda 50 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Fakat Türkiye’de bu atık uçucu külün, sadece küçük bir kısmı (%1’i) inşaat sektöründe, özellikle de çimento endüstrisinde kullanılmaktadır. Uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur. Uçucu kül kullanılarak üretilen ürünlerde veya uygulamalarında çeşitli teknik avantajlar elde edilir. Buna rağmen, yeniden kullanılarak değerlendirilen uçucu kül miktarları santrallarda açığa çıkan toplam miktarın yaklaşık olarak %10-20’sidir. Türkiye’de ise uçucu külün yapı malzemesi ve çimentoda katkı maddesi olarak kullanımı ABD, Çin, İngiltere ve Almanya gibi ülkelerin kullanım miktarları ile karşılaştırıldığında oldukça düşük oranda kaldığı görülmektedir (Çinçin, 2015). Geri kalanı ise, ekonomik ve çevresel açıdan elverişli olmayan arazi doldurmada kullanılmaktadır ya da kül deponi alanlarına atılmaktadır.

Uçucu kül için alternatif kullanım alanları bulmak için pek çok araştırma yapılmıştır. Uçucu külün sinterlenmiş malzeme, kompozit malzeme, doğal çini, seramik

sofra takımı ve çimento endüstrisinde katkı malzemesi olarak kullanılabileceği ortaya çıkmıştır (Güler vd., 2005; Tulga ve Kılınç, 2018; Sönmez ve Işık, 2020). Seramik üretiminde kullanılan killeri ile uçucu kül aynı oksitleri içerdiklerinden seramik üretiminde kullanılabilmektedirler. Uçucu küllerin seramiklerde kullanılması ile seramiklerin kuruma ve pişme küçülmeleri azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu küllerin içerdikleri karbon, seramiklerin sinterlenmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Uçucu küllerin seramik üretiminde kullanılmasının sağladığı avantajları sıralamak gerekirse; öğütme maliyetinin düşmesi, tane boyutunun küçük olması, içerdikleri karbon miktarının sinterleme işlemleri sırasında enerji tasarrufu sağlamasıdır. Uçucu küllerden aynı zamanda cam seramiklerinin üretiminde de yararlanılmaktadır (Eroğan, 2019).

Cüruf, metallerin veya metal içeren cevherlerin, eritildiklerinde oluşan, metalden daha hafif oksitler ve silikatlar kompleksi olan ve yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde biriken bir yan ürün olarak tanımlanmaktadır (Uysal ve Bahar, 2018). Çelikhane cürufu da uçucu kül gibi puzzolanik özellikli endüstriyel bir atıktır. Çelik üretiminde farklı çeşitlerde çelikhane cürufu oluşur. ASTM Standart Enstitüsü çelikhane cürufunu, bazik oksijen fırınında ya da elektrik ark fırınında çelik üretimi ile eş zamanlı olarak eriyik halde elde edilen ve başlıca demir, alüminyum, mangan, kalsiyum ve magnezyum oksitleri ile birleşmiş halde kalsiyum silikatlar ve ferritlerden oluşan ve metalik olmayan bir ürün olarak tanımlar. Çelikhane cürufu, pota fırın cürufunu (PF cürufu), elektrik ark fırını cürufunu (EAF cürufu) ve bazik oksijen fırını (BOF) cürufunu içermektedir.

Çelikhane cürufunun %13'ü arazi doldurmada kullanıldığı için ve bu kadar çok atık genel olarak inşaat sektörü ve inşaat malzemeleri endüstrisi ile geri dönüştürülebileceği için ağır metallerin önceden dönüştürülmesi önerilse de veya gerekse de (Huaiwei ve Xin, 2011) bilimsel literatürde EAF-CC cürufunun kullanımı ile ilgili inşaat mühendisliği alanında ve çimento üretiminde farklı deneyimlerden bahsedilmektedir. Farklı içeriğe sahip demir-çelik cürufunun, çeşitli seramik ürünlerin üretiminde alternatif atık malzeme olarak kullanılabilmesi için kimyasal kompozisyonunun yaygın killeri ile uyumlu özellikte olması ve maliyeti düşürecek özelliklere sahip olması gerekmektedir (Shih vd., 2004; Kaya ve Turan, 2004; Sarkar vd., 2010; Teo vd., 2014; Zhao vd., 2015).

Çoğu çelik üretim cürufları başlıca kalsiyum, magnezyum, silisyum ve demir oksitleri içerirler. BOF cürufunun başlıca bileşeni CaO'dur (yaklaşık olarak %40-50). BOF cürufundaki diğer oksitler ise kalsiyum, magnezyum, silisyum ve demirdir. Demir-

elik retiminde sıvı ham demirin çeliğe dönüştürülmesinde oluşturulan bu BOF cürufun kimyasal bileşiminde ortalama olarak ağrılıka %15-20 FeO, %4-9 SiO₂, %50-53 CaO, %3,7-5,7 MnO ve %2 MgO bulunur.

Yıllık olarak çok miktarda BOF cüruf üretimi vardır ve yüksek elik talebi nedeniyle bu miktar daha da artacaktır. Bu tür cürufların en geniş kullanım alanları karayolu temel ve alt temel uygulamaları ve imento sanayidir. Demiryolu raylarında balast malzemesi, toprak seti, dolgu gibi çoğunlukla inşaat endüstrisinde agrega olarak BOF cürufunun kullanımı artık standart uygulamalar haline gelmiştir. BOF cürufu, inşaat malzemelerini güçlendirmek, süresini uzatmak ve yüksek mukavemet elde etmek için de kullanılır. BOF cürufunu, yol temeli malzemelerinde bir bileşen olarak kullanmak bazı sorunları azaltabilir (Kaya ve Turan 2004; Soysal, 2014).

Seramik ve cam-seramik üretimi ile ilgili çevresel etkileri azaltmak için inşaat endüstrisinde atıkların alternatif hammadde olarak kullanılmaya başlanması özellikle enerji ve malzeme tasarrufu için uygulanabilir. Bu, eğer organik olan bir atık (Barbieri vd., 1999) ya da organik olmayan bir atık seramiğin içyapısına dâhil edilirse, atığın sinterleme süreci boyunca ısıl değerini ortaya çıkaran, yüksek sıcaklıklarda kaplama aşamasını içeren, seramik üretimine özgü durumlar sayesinde mümkün olur (Iyer ve Scott, 2001).

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı UK ve BOF cürufun geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması mit vadedicidir.

Yapılan bu tez çalışmasında, Çayırhan (Ankara) Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül (UK) atığının ve yardımcı malzeme olarak da Erdemir Demir elik Fabrikası T.A.ř' den temin edilen bazık oksijen fırını (BOF) cürufunun UK ile farklı oranlarda karışımlarının 4, 8, 12 ve 16 saat süreyle gezegen tipi bilyeli bir değirmende yaş olarak öğütme işlemlerinin farklı sıcaklıklarda sinterlenme davranışına etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında, öğütme işleminin ana atık malzeme olarak kullanılan UK atığı üzerinde mineralojik ve mikroyapısal olarak etkilerini görme amacıyla Parçacık Boyut Dağılımı (PSD), X-Işını Difraksiyon (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD analizi, Ca içeren anhidrit (CaSO₄) ve anortit (CaAl₂Si₂O₈) fazlarının öğütme süresi arttıkça pik şiddetlerinin azaldığını ve örgü gerinimlerinin artmasına bağlı olarak Si içeren kuvars (SiO₂)ve mllite (2Al₂O₃SiO₂) ait

piklerin genişliklerinin arttığını gösterdi. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerinden parçacıkların 8 saatlik öğütme süresinden sonra topaklanma eğilimi göstermeye başladığı görüldü. Uçucu külün medyan tane çapı D(50) 12 saatlik öğütme işlemi sonunda 9,35 μ m'den 1,21 μ m'ye düşmüştür. Öğütme işleminin uçucu külün parçacık boyutu dağılımında önemli bir rol oynadığını, ancak bu boyutun 16 saatlik öğütme süresinde tekrar arttığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar SEM görüntüleri ile de iyi bir uyum göstermektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, öğütme süresi ve karışım oranları parametrelerine bağlı olarak optimum sinterleme koşullarını belirlemek amacıyla, öncelikle UK ile yardımcı malzeme olarak kullanılan BOF cürufunun farklı oranlarda karışımları 2, 4, 8, 12 ve 16 saat süreyle yaş olarak öğütüldü. Öğütme işleminden sonra, numuneler süzülerek kurutuldu ve herhangi bir katkı maddesi, bağlayıcı vb. kullanmadan silindirik forma preslendi. Oluşturulan numuneler 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta sinterlenerek mekanik, mineralojik ve mikroyapısal özellikleri belirlenmiştir. Basınç dayanım testleri sonucunda mukavemet değerleri 4,56 ila 83,95 MPa aralığında değişim gösterdiği sonucuna varıldı. 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımının 8 saat öğütülmesi ve 1050°C'de sinterlenmesi sonucunda en yüksek mukavemet değeri elde edildi.

2. UÇUCU KÜL

2.1. Giriş

Kömür, yüksek oranda karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan ve az miktarda da azot ve kükürt içeren fiziksel ve kimyasal olarak farklı yapılara sahip fosil yakıt türüdür. Günümüzde kömür, elektrik üretimi amacıyla kullanılan yakıtlar arasında en yaygın olanıdır (Ahmaruzzaman, 2010). 2014 yılı verilerine göre, dünyadaki toplam elektrik üretiminin % 41'i kömürden sağlanmıştır. Doğal gazın payı ise neredeyse kömür tüketiminin yarısı seviyesindedir. Kömürün elektrik üretiminde en yüksek seviyede kullanılan yakıt olma niteliğinin öngörülebilir bir gelecekte de değişmeyeceği tahmin edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı tarafından, mevcut politikaların gelecekte de değişmeden devam edeceği varsayımıyla yapılan tahminlere göre, kömürün elektrik üretimindeki kullanım payı 2040 yılına kadar yaklaşık olarak aynı düzeyde kalacaktır. Aynı kuruluş, kömür karşıtı politikaları kapsayan senaryo çalışmalarında dahi, enerji üretiminde ne doğal gazın ne de hidroelektrik santrallerin yanına yaklaşabilmesi, önümüzdeki yirmi yıl içinde mümkün görünmemektedir.

Elektrik üretiminde kullanılan yerli kömürler, ağırlıklı olarak düşük kaliteli ve linyit olarak tanımlanan kömür türleridir. Linyit, ısı değeri düşük, içerdiği nem ve kül miktarı fazla olduğu için genellikle termik santrallerde yakıt olarak kullanılan bir kömür türüdür (http-3). Linyit rezervleri dünyada bolca bulunduğu için sıklıkla kullanılan bir enerji hammaddesidir. Taşkömürünün kullanımı ise oldukça sınırlıdır. Taşkömürü kullanan santraller arasında 1948 yılında faaliyetine başlayan ve 1980'lerin sonlarına dek çalışan Çatalağzı A Santrali ile 1989 yılında devreye alınan 300 MW kurulu gücündeki Çatalağzı B Santrali yer almaktadır. Linyit ile çalışan yüksek kapasiteli termik santraller ise 1973 yılından itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu tarihte, 600 MW gücündeki Seyitömer Termik Santralinin her biri 300 MW gücündeki ilk iki ünitesi faaliyete geçmiştir. Bu tarihten sonra 2000 yılına kadar, yerli kömüre dayalı büyük ölçekli termik santraller ardı ardına kurulmuştur. Bunlar arasında; Tunçbilek (Kütahya), Soma B (Manisa), Yatağan (Muğla), Yeniköy-Kemerköy (Gökova Körfezi), Afşin-Elbistan (Kahramanmaraş), Çayırhan (Ankara), Kangal (Sivas) ve Orhanlı (Bursa) termik santralleri bulunmaktadır. Günümüzde ise Türkiye'de kömüre dayalı toplam termik santral sayısı 26 adettir (TMMOB, 2017). Bu durumda, yıllık olarak yaklaşık 13 milyon ton uçucu kül açığa

çıkmaktadır ve bunun büyük çoğunluğunun kül barajlarında depolandığı bilinmektedir (Ersoy vd., 2008).

2.2.Uçucu Külün Tanımı

Kömürün yakılması sonucunda, uçucu kül, cüruf, kazan cürufu, baca gazı kükürtünün giderilmesi atığı ve akışkan yataklı yakma külünü içeren yan ürünler ya da kömür yanma atığı üretilmektedir. Uçucu kül, termik santrallerde pulverize (toz) kömürün yanması ile elde edilen ince taneli mineral atıktır. Uçucu kül, normal endüstriyel yan ürünlerden farklı olarak toksikliği nedeni ile baş edilmesi zor olan karmaşık antropojenik bir malzemedir. Toksikliği, farklı kalitedeki kömürlerden elde edilen, farklı oranlardaki organik ve inorganik bileşenleri kapsayan karışık bileşenler yüzündendir. Ayrıca, düşük kaliteli kömür kullanımı, artan küresel enerji talebi ve alternatif enerji kaynaklarının istikrarsızlığı nedeniyle, kömür bazlı enerji üretimi uçucu külün çok miktarda üretimine neden olmuştur (Pandey ve Singh, 2010).

2.3.Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin sahip olduğu fiziksel özellikler uçucu küllerin sınıflandırılmasına yardımcı olmaktadır ve bu özelliklerin bazıları mühendislik özellikleri ile ilgilidir. Özgül yüzey alanı, indeks özellikleri, yoğunluk ve tane boyut dağılımı sınıflandırma amacıyla araştırılan özellikleridir (Siddique, 2008).

2.3.1. Tane boyut dağılımı

Uçucu küller çeşitli şekil ve büyüklüklere sahiptir. Genellikle, içi dolu veya boşküre şeklindeki taneler ile sümgerimsi ve köşeleri aglomera tanelerden oluşur. Tane boyutu yakılan kömürün türüne ve öğütme derecesine göre değişir. Taş kömürünün yanması sonucunda açığa çıkan uçucu küllerinin tane boyutu, linyit kömürünün yanması sonucunda ortaya çıkan uçucu küllerin tane boyutundan daha küçüktür. Tane boyutuna etki eden diğer bir unsur ise, bacadan kaçan boyutu küçük uçucu küllerin elektrofiltrelerde veya siklonlarda tutulma derecesine bağlıdır.

Tane boyut dağılımı, bir malzemenin iyi ya da kötü gradasyon eğrisine sahip olup olmadığını, uygun ya da büyük boyutta olup olmadığını belirler ve uçucu küllerin sınıflandırılmasına yardımcı olur. Genel olarak uçucu küllerin tane boyut aralığı 1 ile 100 µm aralığındadır. Leonards ve Bailey (1982), siltli kum veya kumlu silt olarak sınıflandırılabilen cüruf ve uçucu küller için sınıflandırma aralığı belirlemiştir. Tane

boyut dağılımına bağlı olarak uçucu küller kumlu siltten siltli kuma kadar sınıflandırılabilir. 0,61 ve 3,70 μm aralığındaki eğrilik katsayısı ile olumsuz olarak sınıflandırılırlar. Tekdüzelik katsayısı 1,59 - 14,0 aralığındadır (Siddique, 2008).

2.3.2. Yoğunluk

Özgül ağırlık, geoteknik ve diğer uygulamalarda uçucu küllerin kullanımı için gereken önemli fiziksel özelliklerden biridir. Genelde, uçucu küllerin özgül ağırlığı 1,6 ile 3,1 g/cm^3 civarında değişir. Kum ile karşılaştırıldığında, düşük özgül ağırlığından dolayı genellikle kül dolgular düşük kuruluk yoğunluğu gösterme eğilimindedir. Birim ağırlıktaki azalma, yapıyı tutmak için uygulanan basınç, alt yapı kadar az olacağından duvarları tutmak için dolgu malzemesi olarak kullanılması bir avantajdır. Uçucu külün sınıflandırılması özgül ağırlık, tane şekli ve kimyasal bileşeni gibi birçok etkenin bir araya gelmesinin sonucudur. Uçucu kül çoğunlukla camsı hafif agrega ve bazı içi boş veya dolu katı kürelerden oluşmaktadır. Düşük özgül ağırlığı, demir içeriğindeki ya da kimyasal bileşenindeki ya da her ikisindeki farklılıktan veya çok sayıdaki içi boş hafif agregadan hapsolmuş havanın çıkarılmasından dolayı olabilir. Birçok durumda, aynı yerdeki taban ve havuz külleri ile karşılaştırıldığında uçucu kül daha fazla özgül ağırlığa sahiptir (Siddique, 2008).

2.3.3. Renk

Uçucu külün rengi, karbon ve Fe_2O_3 içeriğine bağlıdır. Yanmadaki kayıp ile ilişkili olarak yanmamış kömür içeriği uçucu külün rengini belirleyen en önemli etkidir. %0,5'ten %10-12'ye varan bu karbon yüzdesi belirli durumlarda bazı betonların siyah ya da gri olmasından sorumludur (Görsel 2.1-a). Aynı zamanda, çoğu uçucu küldeki Fe_2O_3 miktarının yüksek olması betonlarda koyu kahve renge sebep olmaktadır (Görsel 2.1-b). Uçucu kül içermeyen normal betonlar açık gri olduğu için homojen olarak dağılmadığı sürece betonlardaki bu koyu renk özellikle kentsel yapılarda çok uygun olmamaktadır.



Görsel 2.1. (a) C-sınıfı (b) F-sınıfı uçucu külün görüntüsü

2.3.4. Kıvam (Atterberg) limitleri

Toprak veya uçucu külün hacimsel değişiklik olasılığı Atterberg Limitleri ile belirlenebilir. Sıvı limiti (SL), plastik limiti (PL) ve aralarındaki fark plastiklik endeksi (PI). Sıvı limitini belirlemek için en yaygın Atterberg testine göre uçucu külün plastiklik endeksi ve plastik limiti ASTM-D4318 göre belirlenir. Plastiklik endeksi 10'dan küçük olan toprak ve uçucu küller nem içeriğindeki bir değişime maruz kaldıklarında hacimde merkezi değişim göstermektedir. Diğer bir deyişle, azalma potansiyeline sahiptirler. Plastik endeksi orta (10-20) olan toprak ve uçucu küller orta akma potansiyeline sahiptir. 20'den fazla plastiklik endeksi olan toprak ve uçucu küller yüksek akma potansiyeline sahiptir ve bu yüzden üzerlerine inşa edilen yapılara zarar verebilirler. Zemin ve uçucu kül içeriğindeki su, plastik limitinin altında olduğunda örnek küçülecektir ama büzülme gittikçe daha da küçülecektir. Ek suyun, örnek hacmini azaltmadığı su miktarına büzülme limiti denir. Büzülme limiti, ASTM D-427, toprakların büzülme etkenleri kullanılarak ölçülür. Uçucu kül için belirlenen büzülme limitleri, 38 ile 63 arasındadır. Karşılaştırıldığında birçok kil minerallerinin büzülme limitleri, uçucu küllerden daha düşük oranda, 8,5'dan ile 29 aralığında değişkenlik göstermektedir (Sear, 2001; Siddique vd., 2008; Ahmaruzzaman, 2010; Blissett ve Rowson, 2012).

2.4. Uçucu Külün Kimyasal Yapısı ve Sınıflandırması

Uçucu külde 188 mineral ve 316 özgün mineral bulunduğu için karakteristik açıdan en karmaşık malzemelerden biridir. Ancak, tüm uçucu küller önemli ölçüde kömür yataklarındaki ana mineral bileşenleri: silisyum oksit (SiO_2) (kristal ve/veya amorf), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) içermektedir. pH

değerine ve kalsiyum/sülfür dağılımına bağlı olarak uçucu küller asidik kül (pH 1,2-7), orta alkalın kül (pH 8-9) ve yüksek alkalın kül (pH 11-13) olarak sınıflandırılır. Uçucu kül, külün açığa çıktığı kömürün türüne göre sınıflandırılabilir. Temelde dört tür kömür vardır: antrasit, linyit, bitümlü az bitümlü. Bitümlü kömür uçucu külünün temel bileşenleri değişen karbon miktarı ile silika, alümin, demir oksit ve kalsiyumdur. Linyit ve az bitümlü kömür uçucu külü, bitümlü kömür uçucu külü ile karşılaştırıldığında düşük karbon içeriği kadar silika ve demir oksit yüzdesi ve yüksek kalsiyum ve magnezyum oksit konsantrasyonu ile anlaşılmaktadır. Yardımcı kazanlarda çok az antrasit kömür yakıldığı için sadece az miktarda antrasit kömür uçucu külü vardır. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri sadece süreçte kullanılan kömür türüne değil, aynı zamanda kömürü yakmak için kullanılan tekniklere de bağlıdır. Özellikle, uçucu külün yapısı, kazan türüne, yakma ortamına ve sıcaklığına, kömür parça boyutuna ve gaz temizleme ekipmanlarına bağlıdır. Uçucu küller dünya genelinde endüstriyel alandaki uygulamalara (genellikle çimento endüstrisinde) göre genellikle C ve F sınıfı olarak sınıflandırılmaktadır. Amerikan malzeme değerlendirme standardına (ASTM-C618) göre ağırlıkça %70'den fazla $\%SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ içeren küller F sınıfı iken, ağırlıkça %50-70 aralığında $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ içeren küller C sınıfıdır. ASTM-C618 sınıflandırmasında C ve F sınıfı kimyasal ve fiziksel gereklilikler SO_3 (S%5), nem (S%3), Na_2O (tercihen %1,5), tane boyutu (ortalama S%34-%5 45 mm), kızdırma kaybı (KK) (<%6 ve %12 performansına bağlı F sınıfı) içermektedir. Uçucu kül sınıflandırması Kanada, Rusya ve Avrupa Birliğinde Amerika'dan farklıdır. F ve C sınıfı uçucu küllere ek olarak ASTM-C618 üçüncü bir mineral karışım sınıfını N'yi tanımlamaktadır. N sınıfı mineral karışımları diatomik toprak, apalin, sileks ve killi şistler, volkanik küller veya pumisitler, kalsine veya kalsine edilmemiş bazı killi şistler ve killer gibi puzzolanik ve çimentomsu özellikleri azaltmak için kalsine edilmeyi gerektiren diğer çeşitli malzemeler gibi ham ve doğal puzzolanlardır. ASTM'ye göre, C sınıfı uçucu küller normalde F sınıfı uçucu küllerden daha fazla kalsiyum (CaO) içeriğine sahiptir. C sınıfı uçucu küller genelde %15'den daha fazla CaO ve F sınıfı uçucu küller normalde %5'den daha az CaO içermektedir. Genelde, daha sert ve daha eski antrasit ve bitümlü kömür yakmak F sınıfı uçucu kül üretirken, yüksek kalsiyumlu C sınıfı uçucu kül daha yeni linyit ve subbitümlü kömür yakma sonucunda elde edilir. F sınıfı uçucu kül, puzzolanik özellikleri oluşturur ve bu çimento özelliklerini meydana getiren bileşenleri oluşturacak oda sıcaklığında kalsiyum hidroksit ile reaksiyona giren silika bileşenlerini içerdiği anlamına gelir. Ancak,

F sınıfında CaO seviyesi düşük olduğu için çimento oluşturmak için bir aktivatör gerekir. Bunun yanı sıra yüksek CaO seviyesi ile uçucu kül çimentolaşma özelliklerine sahiptir. Su olduğunda C sınıfı uçucu kül zamanla daha çok güçlenir ve sertleşir. C sınıfı uçucu küllerde alkali ve sülfat (SO₄) içeriği genelde daha yüksektir (Sear, 2001; Ahmaruzzaman, 2010; Blissett ve Rowson, 2012; Ranjbar ve Kuenzel, 2017).

2.5.Uçucu Külün Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri

Uçucu küllerin mineralojik ve morfolojik doğasını belirleyen en önemli unsur külün elde edildiği kömürün özelliğidir. Özellikle yuvarlak parçalarla toz halinde ve incedir.

2.5.1. Mineralojik oluşum

Uçucu küllerin mineralojik ve kimyasal oluşumu, santralde yakılan kömür bileşenlerine ve özelliklerine bağlıdır. Malzemenin ani soğutulması sonucunda, uçucu küller başlıca camsı parçacıklar formundaki mineral maddeden oluşur. Külün çok az bir miktarı kristal formunda oluşur. Yanmamış kömür, yanma ısı ve oranına, orijinal kömürün tozlaşma derecesine, yakıt-hava oranına ve yakılan kömürün doğasına bağlı olarak toplamda %10 oluşabilen karbon parçacıkları olarak uçucu kül ile toplanır.

X-ışını difraktometresi camsı fazı belirlemek için kullanılmaktadır. Kızılötesi (IR) ve Mössbauer Spektroskopisi ve diğer teknikler, uçucu küllerde kristalleşme fazının araştırılmasında güçlü yöntemler olarak kullanılmaktadır.

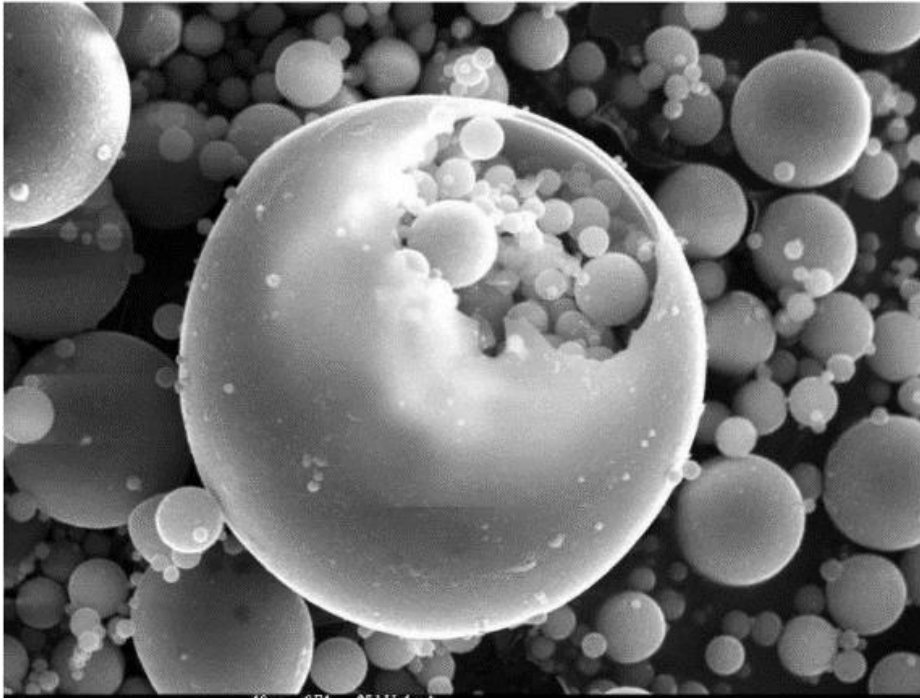
Tablo 2.1. Bitümlü kömür uçucu küllerinde bulunan en önemli mineraller (Ahmaruzzaman, 2010).

Mineral	(%)
Magnetit	%0,8-6,5
Hematit	%1,1-2,7
Kuvars	%2,2-8,5
Müllit	%6,5-9,0
Serbest Kalsiyum Oksit	%3,5'a kadar

2.5.2. Morfolojik özellikleri

Uçucu küller amorf (camsı) yapıda içi boşluklu veya dolu yapıda kürecikler ile mineral parçacıklardan ve yanmamış taneciklerden meydana gelir (Yıldız ve Yıldız, 2003).

Tanelerin şekline ve büyüklüğüne, kömürün alındığı yere, pulverizasyon durumuna, yanma şartlarına (sıcaklık ve oksijen seviyesi), elektrostatik toz toplama sistemi türü gibi çeşitli parametreler etkili olmaktadır. Uçucu külde büyüklükleri 0,5µm -150µm arasında değişen camsı küreler ve düzensiz şekilli taneler bulunmaktadır. Bu tanelerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün sınıfından (düşük veya yüksek kireç içermesi) kaynaklanmaktadır. Camsı küre şeklindeki tanecikler, içi dolu küreler (katı camsı küre), içi boş küreler (senosfer), büyük bir küre içerisinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (pleurosphere), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış mineral yapılar (dermasphere), deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz kümeler olan yanmamış yapılar gibi çeşitli morfolojik özelliklere sahiptir (Görsel 2.2) (Ranjbar ve Kuenzel, 2017).



Görsel 2.2. Uçucu külün SEM görüntüsü (<https-4>)

2.6.Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu küllerin yeniden kullanım miktarını arttırmak için pek çok neden vardır. Yeniden kullanım miktarının artması ile öncelikle bertaraf maliyetleri düşürülmüş olacaktır. İkinci olarak, bertaraf için daha az alan ayrılmaktadır. Bu, alanın farklı amaçlarla kullanılmasını sağlar ve bertaraf şartlarını azaltır. Üçüncü olarak, yan ürün

satışından finansal geri dönüş olabilir ya da en azından ortadan kaldırma ve işleme maliyetlerini telafi edebilir. Dördüncü olarak, yan ürün nadir ve pahalı olan bazı doğal kaynakların yerini alabilir. Kömür yanmasının uçucu kül olarak adlandırılan yan ürünlerinden faydalanma başka endüstriyel kaynak, süreç ve uygulamalarına bir alternatif olabilir. Çimento ve beton ürünlerine ek olarak bu süreç ve uygulamalar, yapısal dolgu ve örtü malzemesini, yol ve kaldırım kullanımını, hafif ağırlıktaki agrega yapı malzemesine ek olarak sızdırma bariyerini ve yeraltı boşluk doldurmayı, toprak, su ve çevre iyileştirmesini içermektedir ve sınırsızdır. Uçucu külün daha önce bahsetmiş olduğumuz her bir alternatif kullanımla ilişkisinin özeti aşağıda bulunmaktadır.

Tablo 2.2. Uçucu küllerin kullanım alanları (Ahmaruzzaman, 2010).

• Baca gazının temizlenmesi için emici maddeler			
Kükürt bileşikleri	NO _x 'in yüzeyde toplanması	Cıvanın ortadan kaldırılması	Gazlı organiklerin yüzeyde toplanması
• Atık sudan toksik metallerin giderimi Uçucu küldeki çeşitli ağır metal türlerinin yüzeyde toplanması			
• Atık sulardaki diğer inorganik bileşenlerin giderimi			
Fosfat giderimi	Florür giderimi	Bor giderimi	
• Atık sulardaki organik bileşiklerin giderimi			
Fenolik bileşikler	Haşarat öldürücüleri	Diğer organik bileşikler	
• Atık sulardan boyarmaddelerin giderimi			
• Su sistemindeki uçucu külün özütlenmesi			
• Zeolit sentezi			

2.6.1. Yapı endüstrisi

Çimento endüstrisinde uçucu külün yeniden kullanımı teknik olarak mümkün görülmektedir. Uçucu külün Portland çimento betonda çimento yerine kullanımı, puzzolanik çimento üretiminde puzzolanik malzeme olarak kullanımı, alçı taşı yerine çimento ile hazırlanan geciktirici malzeme olarak kullanımını içeren üç önemli uygulaması vardır. Çimento, beton bileşeninin en çok enerji tüketen ve en maliyetli bileşenidir. Çimento yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılarak beton birim fiyatı düşürülmektedir. Uçucu külün yeniden kullanımı, kısmen çimentonun yerine, puzzolanın

kısmi kullanımı ekonomik esaslara dayanmaktadır ve kısmen düşük ısı yayma, az sulatma, aynı işlenebilirlik için daha az su ihtiyacı gibi yararlı etkileri sayesinde. Özellikle, hidrasyon ısı yüzünden olan genleşmeyi kontrol etmek için geniş hacim yerleştirmesi ve kütle beton uygulamalarında kullanılmaktadır ve aynı zamanda, her dönemde çatlamayı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Lif takviyeli betonların en büyük eksikliği az işlenebilirliğidir. Bu eksikliğin giderilmesi için gücü içermeyen işlenebilirliği arttırabilecek bir malzeme gerekir. Betonda uçucu külün kullanımı işlenebilirliği artırır ve geniş çapta kısmi olarak çimento yerine önerilir. Bu, aynı zamanda yapı maliyetini düşürür. Uçucu kül betonu doğa hava olaylarına karşı daha istikrarlı ve güçlü koruyucu çelik bir örtü sağlar (Ahmaruzzaman, 2010).

2.6.2. Yapı malzemesi

Uçucu kül tuğla imalat birimleri termik santrallerin yakınına kurulabilir. Çünkü ana uçucu kül hammaddesi termik santraller tarafından çok miktarda üretilmektedir. Uçucu kül termik santraller tarafından maliyet olmadan üretilir, girişimcinin yapması gereken tek şey uçucu kül tuğla imalat birimlerine termik santrallerden taşıma maliyetini karşılamaktır. Uçucu kül tuğlalarına çok fazla talep vardır. İnsanlar arasında farkındalık yaratmak gerekmektedir ve aynı zamanda devlet de bu tür girişimler için bazı özel teşvik tedbirleri uygulamalıdır. Bu teknolojiler çevre dostudur ve doğadaki katı atığı ve tozu azaltmaktadır. Delikli ve kil tuğlalarla karşılaştırıldığında maliyeti makuldür. Tuğla yapım endüstrisinde daha iyi kalitede tuğla üretmek için farklı atık malzemelerin nasıl yeniden kullanılacağı üzerine araştırmalar bulunmaktadır. Uçucu kül, çimentolarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen tuğlalarda nadiren kullanılmaktadır. Son zamanlarda uçucu külün tuğlaların sıkıştırıcı gücünü arttırabileceği ve tuğlaları donmalara karşı daha dirençli yapabileceği görülmüştür. Çiçek ve Tanrıverdi, (2007) tuğlaların sıkıştırıcı gücünde uçucu kül, kum ve sönmüş kireç katkısının olumlu etkilerini gözlemlemiştir. Mimari miras alanında uçucu külün katılması ile ilgili neredeyse hiç araştırma yoktur. Restorasyon işinde kullanılması için değiştirme tuğla üretiminde, tuğlaların bina restore edilirken kullanılan orijinal tuğlalar gibi aynı fiziksel ve mekanik parametrelere (renk, porozite, hidrolik özellikler vb.) sahip olması bu durumda önemli bir kriterdir. Tuğlaların porozitesi doğrudan hammaddenin mineralojik bileşenlerine bağlıdır ancak, yüksek ısıda pişirilen tuğlalar genellikle camsıdır ve porozite ve büyüklük olarak en fazla değişime maruz kalır. Uçucu kül tuğlalarının kil tuğlalar kadar dayanıklı olduğu bulunmuştur. Hatta belirli yoğun çevrelerde kil tuğlalardan daha iyi performans

göstermektedir. Uçucu kül %40-70 oranlarında kullanılabilir. Kireç, alçı taşı (çimento), kum ve mıcır diğer malzemelerdir. 70kg/cm² minimum sıkıştırma gücüne (28 gün) kolaylıkla ulaşılabilir ve bu 250 kg/cm² (otoklavlanmış) kadar yükselebilir.

Yapılan pek çok araştırma, uçucu kül tuğlasının pişmiş kil tuğladan çok daha nitelikli olduğunu göstermektedir. Uçucu kül tuğlası kullanmak, mantıklı tasarruflar ile yapı maliyetindeki fazlalıktan ve boşa harcamalardan koruyarak daha güçlü ve dayanıklı yapılar sağlamaktadır. Uçucu külün en büyük yararı ise iki ana ekolojik problemi ortadan kaldırmayı ve pişmiş kil tuğla üretimi için gereken işlenebilir toprağın azalmasını kontrol etmektir. Pişmiş kile göre bu tuğlaların avantajları yapıda daha az harç gerektirmesi, tuğla üstüne sıvadan kaçınılması, kontrollü boyutlar, köşeler, pürüzsüz ve ince bitiş ve pigmentleri kullanarak farklı renklerde üretilen, uygun maliyetli, enerji tasarruflu, çevre dostu (verimli kil kullanımından kaçındığı için) olmasıdır (Iyer ve Scott 2001; Yılmaz, 2012; Uysal ve Bahar, 2018; Erdoğan, 2019).

3. ÇELİKHANE CÜRUFU

Çelik üretim süreçleri sırasında yan ürün olarak çeşitli cüruflar üretilir (Shen ve Forssberg, 2003). Çelik üretiminin ilk aşaması demir cevherinin çeşitli miktarlarda karbon, silisyum, magnezyum, sülfür ve fosfor içeren pik demirine dönüştüğü yüksek fırın çelik üretimidir. Yüksek karbon içeriği nedeniyle malzeme oldukça gevrek ve ikincil süreçler (örneğin haddeleme veya biçimlendirme) için uygun değildir (Huaiwei ve Xin, 2011). Bu nedenle pik demiri bazik oksijen çelik üretimi (BOS-Basic Oxygen Slag) yoluyla saflaştırılmalıdır ki, bu işlem yan ürün olarak cüruf oluşumuna neden olur. Başka bir ikincil çelik üretim işlemi olan Elektrik Ark Fırını (EAF- Electricity Arc Furnace) çelik üretimi de cüruf oluşuma neden olur. BOF ve EAF cürufları genellikle çelikhane cürufları olarak bilinirler. BOS cürufu aynı zamanda BOF (Basic Oxygen Furnace) olarak da bilinir ve kısaltma seçimi hammaddeye göre seçilir, ancak yapılan bu tezde biz kısaltma olarak “BOF cürufu” kullanacağız.

Avrupa’da yılda yaklaşık olarak 20 milyon ton cüruf üretilmektedir, bunun yarısı da BOF türü cürufdur (Liu vd., 2016). Bu da her yıl yüksek miktarda endüstriyel yan ürün oluştuğunu gösterir. Bu tarz yan ürünlerin değerlendirilmesine yönelik belirgin bir alternatif de cürufların çelik üretiminde tekrar kullanılması veya ikincil uygulamalar için kullanılmasıdır. Kaynaklar 1589 yılı gibi erken zamanlarda bile Almanya’da çelik üretim cüruflarının top mermisi yapımında kullanıldığını (ve 1950’lerde demiryolu balastı, yapay taş, akustik ve termal yalıtım malzemesi olarak kullanımının yanı sıra nehir yataklarını sağlamlaştırmak için kullanılmıştır (Garside, 1957; Motz ve Geiseler, 2001; Donga vd., 2021).

Çelik üretiminin çevresel etkilerinin azaltmak ve ekonomik sürdürülebilirliğini korumak için yapılan daha geniş çaplı bir hareketin bir parçası olarak, hem çevreyi korumak hem de çelik endüstrisinin ekonomik sürdürülebilirliğini korumak amacıyla cüruf yan ürünlerinin geri dönüşümüne yönelik önemli teşviklerde bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir yan ürün değil ana ürün potansiyelinde olan malzemenin daha ileri seviyede araştırılmasına ve uygulanmasına önayak olma umuduyla, endüstri yan ürünlerinin çevresel etkilerini azaltılması üzerine özellikle odaklanarak, çelik üretimi cüruflarının tekrar kullanımına yönelik yaklaşımları da gözden geçirmiştir.

3.1.Yüksek Fırın Çelik Üretimi

Ham demir, cevherin içinde en fazla bulunan demir içerikli minerale göre karakterize edilir. Bunlar, Magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), sideritler ($FeCO_3$) ve

limonitlerdir ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (Walker, 1986). Demir cevherindeki tüm safsızlıklar (silisyum, alüminyum, titanyum, sülfür ve fosfor) gang olarak bilinir. Madenden çıkarılmış tüm demir cevherleri parçalanmalı ve eğer tane boyutu uygun değilse doğrudan yüksek fırına yüklenmelidir; ancak eğer tane boyutu gereğinden fazla inseyse yüksek fırına girmeden önce sinter ya da pelet ünitesinde sürece tabi tutulmalıdır (Walker, 1986). Sinterleme süresince, ince demir cevheri partikülleri küçük bir miktar kömürle (ağırlıkça %5) karıştırılır ve daha sonra karışım tutuşturulur (Peters, 1982). Süreç, partiküllerin uçlarının kaynaşmasını sağlayan yüzey enerjisindeki düşme sonucunda (yüzey alanı) işler. Bu şekilde üretilen partiküller pelet ünitesinde üretilen partiküllere oranla daha düşük yoğunluğa sahiptir (Walker, 1986).

Peletleme sürecinin ilk aşaması külçelemedir. Cevher bağlayıcı bir madde (bentonit kili) ile karıştırılır ve daha sonra fazla su ile birlikte döner tambura yerleştirilir. Partiküller temas ettiğinde partiküller arasında bir sıvı köprüsü kurulur; partikülleri birbirine bağlayan kapiler absorpsiyon önce flokülasyon ve sonrasında düşük parçalanma direncine (2-4 Psi) sahip küçük yeşil topar aglomerasyon yoluyla oluşur (Peters, 1982; Walker, 1986). Peletlerin 300°C 'e ısıtılması fazla suyun buharlaşmasını ve $1250-1350^\circ\text{C}$ 'e ısıtılması ise beraberinde parçalanma direncinde artışı (500-1000 psi) getiren peletlerin birleşmesiyle sonuçlanır.

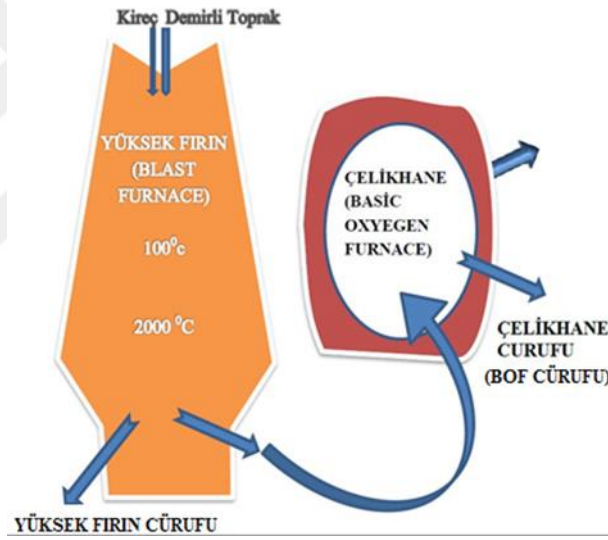
Yüksek fırın sürecinde oluşan atık ürünlerin toplanması amacıyla kireçtaşı (CaCO_3) eklenir: silika (SiO_2), fosfor pentaoksit (P_2O_5), kalsiyum sülfid (CaS), magnezyum oksit (MgO) ve alüminyum oksit (Al_2O_3). Bunlar eriyik metalin yüzeyinin üzerinde yüzen yüksek fırın cürufunu oluşturur (Peters, 1982). Yüksek fırın ters akım yöntemiyle çalışmak üzere tasarlanmıştır. Bu da fırının tabanında oluşan gazlar yükselirken katı cevher yükü ve kokun çökmesi anlamına gelir.

Yüksek fırınlar genellikle 50 m yüksekliğe ve ocak kısmı da 14 m genişliğe sahiptir. Tipik bir fırın 24 saatte 10000 ton pik demiri, 3000 ton cüruf oluşturur ve $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ gaz emisyonuna neden olur (Coudurier vd., 1978).

Genel olarak yüksek fırında meydana gelen reaksiyon cevherin kok ile eriyik demire dönüşmesidir; ancak detaya inildiğinde daha komplekstir.

3.2. Bazik Oksijen Fırını (BOF) Çelik Üretimi

Yüksek fırın sürecinde pik demiri üretildikten sonra, eriyik demir çelik hurdası, kireç ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ile karıştırılacağı BOS fırınına gönderilir. BOS metodu bir saatten kısa bir sürede 300 ton çelik üretebilir. En yaygın kullanılan dizayn tepesi açık koni şeklinde olan (Shi, 2004) ve periklastan (kübik-MgO) refrakter kaplamalı (Barker vd., 1998; Peters, 1982; Barker vd., 1998) silindirik BOS tankıdır (Görsel 3.1). BOS tankının kenarında örnek alma, döküm alma ve cüruf bertarafı amaçlı bir fırın deliği vardır. BOS tankının kenarındaki bir yatırma mekanizması çeşitli farklı fonksiyonlara olanak sağlar: (a) eğer tank 60° geri doğru yatırılırsa tanka yükleme yapılabilir ya da çelik örneği alınabilir, (b) eğer tank 90° 'den fazla geriye doğru yatırılırsa cüruf tanktan çıkarılabilir, (c) ayrıca tank 135° ileri doğru yatırılabilir. Sonrasında da fırın deliğinden çelik dökümü alınabilir.



Görsel 3.1. Çelikhane cürufunun elde edilmesi

3.3. Bileşim ve Fiziksel Özellikleri

Bazik oksijen çelik üretim cürufuna ait tipik kimyasal bileşim Tablo 3.1'de gösterilmiştir (Shi, 2004). Cüruf başlıca silikatlar, alüminyum oksit silikatlar, kalsiyum alüminyum silikatlar ve demir oksitlerden oluşan ametal yan üründür (Joulazadeh ve Joulazadeh, 2010). BOF sürecinde eriyik demirin bir kısmı geri kazanılamaz, bu nedenle cüruf içinde elemental demir sıkça bulunur (Yıldırım ve Prezzi, 2011). Cüruflar üç farklı kategoride sınıflandırılabilir: demirli cüruf (demir içerir), demir içermeyen cüruf ve yakım cürufu. Cüruf genellikle büyük miktarlarda zararlı ve ağır metal içerir, bu nedenle

cüruf çevresel etkisinin olmadığından emin olunarak dikkatli bir biçimde kullanılmalıdır (Shen ve Forssberg, 2003).

Tablo 3.1. Bazik oksijen fırını (BOF) çelik üretimine ait cürufun kimyasal kompozisyonu (Uysal ve Bahar, 2018)

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	P ₂ O ₅
(%)	10-15	1-5	45-60	3-9	7-20	3-13	2-6	1-4

Bazik oksijen çelik üretim cürufunda ayrıca yüksek miktarda fosfor mevcuttur, ki bu da fosfor üretilen çeliğin kalitesi üzerinde negatif etkiye neden olacağından çelik üretiminde tekrar kullanımını kısıtlar (Gautier vd., 2013). Kazandan kazana her bir elementin miktarı kullanılan hammaddenin cinsine ve süreç koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir (Shi, 2004). Tipik olarak, çelik cürufu gözeneksizdir, yüksek yoğunluğa ve parçalanma direncine sahiptir.

BOF cürufunda dikalsiyum silikat (Ca₂SiO₄, C₂S), trikalsiyum silikat (Ca₃SiO₅, C₃S) ve volastonit (CaSiO₃) gibi kalsiyum silikatların varlığı BOF cürufunun çimentomsu özelliklere sahip olmasına neden olur (Shi, 2004). Cüruf karakterizasyonunda baziklik cüruf örneğindeki CaO'nun SiO₂'ye oranını belirtir (Rehackova vd., 2015). CaO miktarı ne kadar yüksek olursa örneğin alkaliliği o kadar yüksek olur. Cüruf örneğinin bazikliği arttıkça da o cüruf örneğinin çimentomsu özellikleri de artacaktır. Sıvı formdayken yüksek baziklik cürufun viskozitesini arttırabilir (Rehackova vd., 2015).

Hem BOF hem de EAF cürufu ağırlıkça %10-40 arasında metal formunda demir (demir oksitler hariç) içerebilir (Horii vd., 2013). Metalik demiri ayırmak için cüruf ayırma işlemini kolaylaştırmak amacıyla bir manyetik tambur süreci kullanılarak parçalanır (Alanyalı vd., 2006; Ma ve Houser, 2014; Matino vd., 2017; Bölükbaşı ve Tufan, 2014). Cürufu daha küçük parçalara ayırmak döner tambur ve bıçak arasındaki mesafeyi de arttırır. Cürufun bu şekilde soğutulmasının cüruftan geri kazanılacak metalik demir miktarının artmasında etkisi olabilir (Wang vd., 2012). Manyetik ayırma süreci ve parçalama süreci süreçten geri kazanılan metalik demirin miktarını ve kalitesini arttırmak amacıyla sıklıkla birkaç defa tekrar ettirilir (Horii vd., 2013). Ayrıca cürufun erime sıcaklığını ve bazikliğini azaltmak amacıyla cürufa eklenebilecek katkı maddeleri (kaolin: Al₂SiO₅(OH)₄), karbon tozu, alüminyum oksit ve silika) de mevcuttur, ki bu da geri kazanılabilecek demir miktarını arttırır (Guo vd., 2018).

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Uçucu kül miktarının her geçen gün katlanarak artması ve bunun sonucunda yaşanan depolama alanı problemleri, doğaya veya bitki örtüsüne verebileceği zarardan doğan endişeler gibi sorunlar meydana gelmiştir. Bu alanda ortaya çıkan ihtiyaç üzerine, akademik alanda uçucu küllerin ekonomik değer kazanması ve aynı zamanda çevreye verdiği etkileri önlemek için ulusal ve uluslararası birçok çalışma yapılmıştır. Bunun yanı sıra yapılan çalışmaların asıl amacı uçucu külü ana ve/veya yan ürün olarak yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Yapılan çalışmalar öncelikli olarak uçucu küllerin özellikleri, sınıflandırılması ve kullanım alanlarının tespit edilmesi üzerinedir. Bu alanda yapılmış olan çalışmaların bazıları aşağıda yer almaktadır.

Kibar (2009), yaptığı çalışmada tuğla kiline öğütülmüş cam katkısının tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Afyon ilinden alınan tuğla kiline, ağırlıkça % 0, % 2,5, % 5 ve % 10 oranlarında öğütülmüş cam katılarak tuğla örnekleri üretilmiştir. Örnekler, yüksek sıcaklık kapasiteli laboratuvar tipi elektrikli fırınında; 850 °C, 950 °C ve 1050 °C’ de sıcaklıklarda pişirilmiştir. Öğütülmüş cam katkılı pişmiş örneklerde, porozite ve buna bağlı olarak su emme değerlerinin azaldığını, katkısız örneklerle göre birim hacim ağırlığın nispeten arttığını ve basınç mukavemeti değerlerinin büyük ölçüde artırdığını belirlemiştir (Kibar, 2009).

Görhan vd. (2008), yapmış oldukları çalışmada uçucu külün sınıflandırılması ve kullanım alanları araştırılmıştır. Buna göre uçucu kül yaygın olarak inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Çimento ve beton üretimi, gazbeton ve tuğla üretimi, zemin ve yol stabilizasyonu uygulamaları, hafif agrega üretimi vb. alanlarda yaygın kullanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Aytekin (2009), Afşin-Elbistan Termik Santralinden alınan uçucu küllerinin killi zeminlerin ıslahında kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla illit ağırlıklı Almanpınarı kiline uçucu kül eklenerek hazırlanan yapay zeminler kürde bekletildikten (1-8-16-32 gün) sonra zemin sınıflama, konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneylerine tabi tutularak fiziko-mekanik özellikleri araştırılmıştır. Uçucu kül eklenerek hazırlanan yapay zemin örneklerinde kesme mukavemetinin ve konsolidasyon hızının arttığı; permeabilitenin ise azaldığı saptanmıştır. Ayrıca sonuçlar artan bekleme süresinin malzemenin mukavemetini daha da artırdığını göstermiştir. Tez çalışması neticesinde, Afşin – Elbistan Termik Santrali uçucu külünün zemin stabilizasyon çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Tokay ve Çetin (1991), Soma – B ve Tunçbilek Termik santrallerinden alınan küller ile çalışmışlardır. Uçucu küllerin pozolanik özelliğinden yola çıkarak uçucu kül kireç karışımından üretilen preslenmiş duvar blok elemanlarının basınç dayanımı ve su emme özellikleri araştırmışlardır. Küllerin değişik oranlarda kireç ve toplam katı oranın % 10'u kadar su ile karıştırması ve preslenmesi sonucunda klasik tuğla boyutlarında ürünler üretilmiştir. Tuğlalara ilk 6 saat buhar kürü ve deney gününe kadar da rutubetli kür uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre iki uçucu külün duvar blok üretiminde kullanılabileceğini tespit etmişlerdir

Türkiye’de cürufun kullanımı gelişmiş ülkelerin gerisindedir. Oluşan cüruf dağları yer işgal etmekte ve çevresel problemlere neden olmaktadır. Hava, toprak ve su kirliliği gibi çevresel problemler insan sağlığı ve bitki büyümesini etkilemektedir. Cüruf kullanımının arttırılması bu problemleri çözmek için önemli bir yoldur. Metalurjik ergitme cürufu sadece bir atık olarak düşünülmez, fakat aynı zamanda hem metalurjik proseslerde hem de diğer endüstri uygulamalarında kullanılabilen değerli ikincil bir hammadde olarak düşünülebilir.

Birçok farklı özelliğe sahip cüruflar, değişik mikro yapı ve minerolojik bileşimli olup, duvar yer karolarının ve kristalin cam malzemelerin üretimlerinde kullanılmaktadır. Seramik ürün üretiminde bakır cürufu, silisyumlu manganer cürufu ve demir-çelik cürufu gibi atık malzemelerin kullanabilmesi için kimyasal bileşimi ve maliyeti açısından uygun olması, yapılacak cüruf değerlendirme çalışmalarında önem arz etmektedir (Kaya ve Turan, 2003).

Dünya Çelik Örgütü cüruf, çamur ve toz gibi çelik üretimi yan ürünlerini tekrar kullanarak ve geri kazanarak çelik endüstrisinde sıfır atığa ulaşmayı hedeflemektedir. Cüruf geri dönüşüm çabalarının hedefi hem çevresel hem de ekonomiktir. Tekrardan işlenen cüruf gerekli diğer çoğu maliyetli malzemelerle yer değiştirebilir. Cürufu geri dönüştürmek atığı, bertaraf maliyetini, enerji kullanımını azaltmaktadır ve fırın ömrünü uzatmaktadır (Dietz, 2014).

Dünya’da son yıllarda kaynak verimliliği kavramı gittikçe önem kazanmış olup, Avrupa birliği nezdinde atıkların geri dönüşümü kullanım çalışmaları demirçelik sektörünü çok yakından ilgilendirmektedir. Entegre demir-çelik firmalarının yüksek fırın cürufları 2007 yılında Avrupa Komisyonu tarafından yayınlanan “Atık ve Yan Ürünlerin Tanımlanmasına Yönelik Tebliğ” kapsamında yan ürün olarak tanımlanmış olup, atık sınıflandırmasının dışına çıkartılmıştır (TTGV, 2012).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN MALZEMELER VE UYGULANAN YÖNTEMLER

5.1.Deneylerde Kullanılan Cihazlar

- *Ultra Saf Su Cihazı (Sartorius Arium 611VF):* Ultra Saf Su Cihazı (Sartorius Arium 611VF): Yaş öğütme esnasında kullanılan ultra saf suyun eldesinde kullanıldı. Suyun iletkenliği 25 °C’de yaklaşık olarak 0,070 µS/cm’dir.
- *Etüv (Nüve FN 120):* Öğütüldükten sonra süzülen numunelerin kurutulmasında kullanıldı.
- *Piknometre (100 ml):* Uçucu kül ve çelikhane cürufunun yoğunluk tayininde kullanıldı.
- *Gezegen Tipi (Planet) Bilyalı Değirmen (Fritsch Pulverisette 7):* Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzemelerin mikron ve mikron altı boyutlarda öğütme yapmak için kullanıldı.
- *Manuel Hidrolik Press (Specac):* Silindirik formda numunelerin preslenmesinde kullanıldı.
- *Yüksek Sıcaklık Fırını (Nabertherm, 30-3000 °C):* Hazırlanan peletlerin sinterlenmesi işleminde kullanıldı.
- *X-Işınları Floresans Spektrometresi: (XRF, Rigaku ZSX Primus):* Deneysel çalışmalarda kullanılan atık malzemelerin elemental kompozisyonunu belirlemede kullanıldı.
- *X-Işınları Difraktometresi: (Bruker, Bruker D8 Advance)* Öğütme öncesi ve sonrası uçucu kül ve çelikhane cürufunun mineralojik yapısının belirlenmesinde kullanıldı.
- *Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM, Zeiss Ultra Plus EVO 50 EP):* Öğütülmüş uçucu kül ve çelikhane cürufunun yaklaşık olarak tane boyutu ve tane şeklini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, sinterlenmiş numunelerin yüzey morfolojisi incelenmiştir. Mikro yapı analizinin gerçekleştirilebilmesi için analizi yapılacak numunelerin iletken bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle numunelerin yüzeyi Baltec Sputtering SCD/005 marka kaplama cihazı ile 40 mA akımda 1 dakika boyunca Au-Pd ile kaplanmıştır.
- *Instron:* Sinterlenmiş numunelerin basınç dayanım (mukavemet, MPa) değerlerini belirlemede kullanıldı.

- *PSD (Malvern Mastersizer 3000)*: Parçacık Boyut Dağılımı (Particle Size Distribution) analizlerinde kullanıldı.

5.2. DeneySEL Çalışmalarda Kullanılan Atık Malzemeler

DeneySEL çalışmalarda Çayırhan (Ankara) Termik Santralinden temin edilen uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Yardımcı malzeme olarak Erdemir Demir-Çelik Fabrikası T.A.Ş.'den temin edilen ve demir-çelik üretiminde yan ürün olarak açığa çıkan bazik oksijen fırını cürufu (BOF cürufu) kullanılmıştır. Görsel 5.1'de gösterilmiştir. BOF cürufu öncelikle çeneli kırıcı yardımıyla toz haline getirilmiştir. Atık malzemelerin bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.1'de sunulmuştur. Bu özellikler Fırat vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir.



Görsel 5.1. DeneySEL çalışmalarda kullanılan UK ve BOF cürufu

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan atık malzemelerin (Çayırhan UK ve Erdemir BOF cürufu) fiziksel özellikleri (Fırat vd., 2020)

Özellikler	Atık Malzemeler	
	Uçucu Kül (UK)	BOF cürufu
Likit Limiti, %	21,80	Plastik olmayan
Plastik Limiti, %	17,50	Plastik olmayan
Plastiklik İndeksi, %	4,30	Plastik olmayan
Özgül Ağırlık	2,47	2,76
Kil/Silt/Kum, %	7/47/46	–/4,4/40

5.3. Öğütme İşlemi

Genel olarak, 25 mm'nin altında yapılan boyut küçültme işlemine *öğütme* adı verilir. Malzemenin (cevherin) toz haline getirilmesi için kullanılan bu araçlara *değirmen*

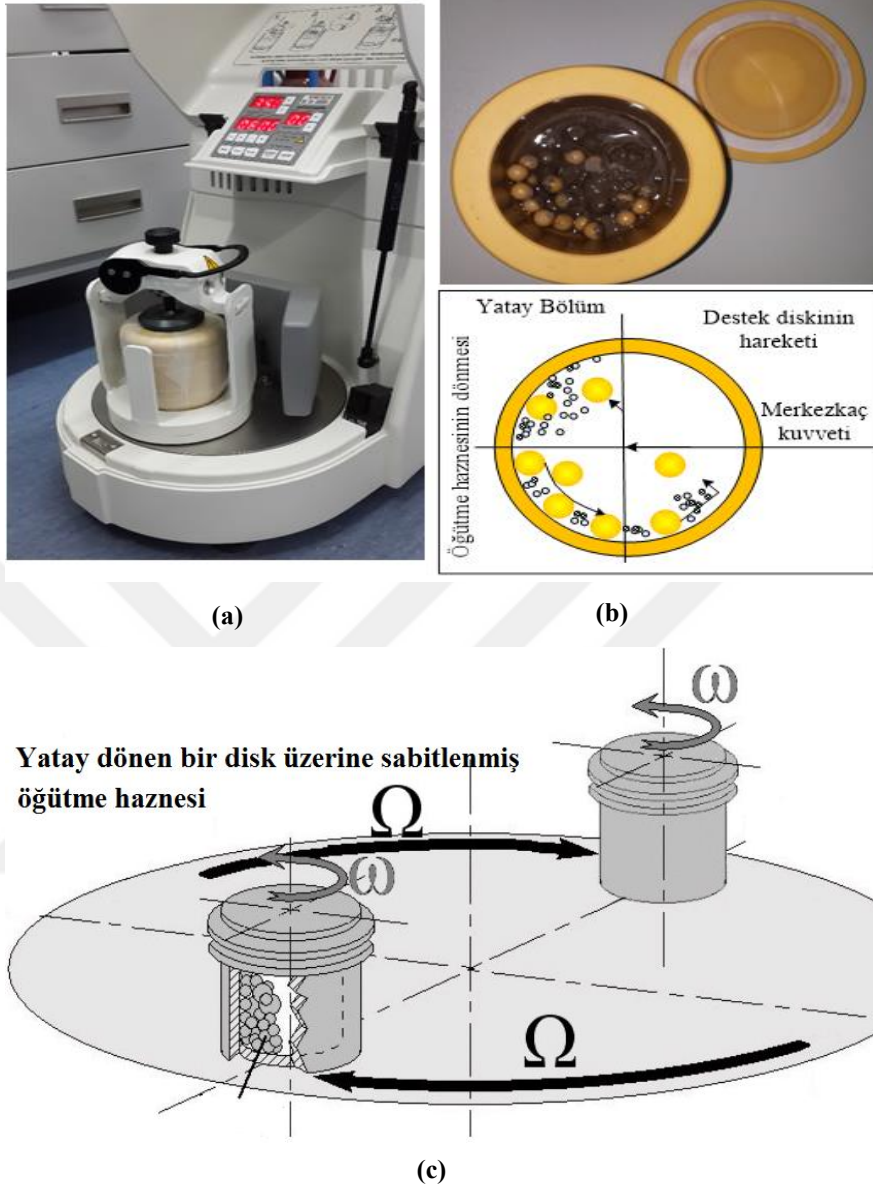
(*öğütücü*) adı verilir. Değirmenlerde öğütülecek malzeme; darbe, ezme, kesme ve sürtünme kuvvetleri ile toz boyutuna getirilir. Bir malzemeyi öğütmenin amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- Taneciklerin serbestleşmesini sağlamak ve cevher içindeki mineralleri serbest hale getirmek için uygun tane boyutlu malzemeyi hazırlamaktır.
- Mevcut haliyle kullanılabilir olan bir ürünün, diğer bir kullanım alanı için gerekli olan tane boyutuna getirilmesidir.
- Kimyasal zenginleştirme işlemlerinde, malzemenin yüzey alanını olabildiğince büyütmek gerekir. Yüzey alanı artan malzemeler daha kolay çözünerek zenginleştirme verimi artar.

Öğütme işlemi “kuru” veya “yaş” olarak yapılabilmektedir. Şayet malzemenin ıslatılması uygun değil ise kuru öğütme tercih edilmelidir. Çimento, kalsit, kömür, fosfat, kaolen ve bentonitin endüstriyel ölçekte öğütülmesinde kuru öğütme yöntemi ile zenginleştirilir. Altın, bakır, krom cevherleri, seramik hammaddeleri ise yaş olarak öğütülür.

Kuru öğütme ile yaş öğütme karşılaştırıldığı takdirde kuru öğütme esnasında yaş öğütmeye göre yaklaşık olarak 1,3 kat daha fazla enerji harcanır. Bunun nedeni; kuru öğütmede ince tanelerin topaklanması ve öğütücü ortamla teması keserek yastıklama etkisi sonucunda öğütmeyi yavaşlatmasıdır. Kuru öğütmede topaklanmayı azaltıcı bazı dağıtıcı kimyasallar kullanılmak gerekebilir. Kuru öğütme yöntemi kullanılarak öğütülmüş malzemelerin birim kapasitesi yaş öğütmeye göre daha düşüktür.

Gezegen tipi (yörüngesel) değirmen, malzemelerin mikron ve mikron altı boyutlara indirilmesi için geliştirilmiş olan bir çeşit bilyalı değirmen tipidir (Görsel 5.2-a). Yörüngesel değirmende, birbirine ters yönde iki hareket vardır. Birinci harekette, yörüngesel değirmenin gövdesi bir eksen etrafında dairesel olarak döner. Bu dairesel hareketi sayesinde merkez eksen boyunca santrifüj alanı oluşur. İkinci harekette ise değirmen gövdesi kendi eksen etrafında dönmektedir. Dolayısıyla, yörüngesel değirmen yüksek oranda bir yerçekimi kuvveti alanında çalışmaktadır. Ayrıca, yüksek santrifüj alanının etkisiyle değirmen içerisinde çok yüksek enerji açığa çıkmaktadır. Bu nedenle, yörüngesel bir değirmen ile klasik bilyalı değirmenlere kıyasla çok daha kısa sürede çok ince boyutlu malzeme elde edilmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2009).



Görsel 5.2. a) Öğütme işleminde kullanılan gezegen tipi bilyalı değirmenin fotoğrafı (b) Bilyalı değirmenin öğütme haznesi (c) Çalışma prensibi

5.4.Sinterleme İşlemi

En genel tanımı ile sinterleme, parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıtma işlemidir. Sinterleme işlemi, tozların mutlak ergime sıcaklıklarının Kelvin cinsinden değerlerinin $2/3$ 'ü ile $3/4$ 'ü arasındaki sıcaklıklarda belirli sürelerde bekletilerek tozlar arasında bağ oluşumu ile şekillendirilmesidir (Callister ve Rethwisch, 2015).

Sıkıştırılmış tozlardaki bağlanma, sadece yüzeylerin birbirine yapışık şekilde durması nedeni ile zayıf bir bağlanmadır. Sinterleme ile parçacık temas noktaları artmakta, atomlar ve iyonlar arasında fiziksel bir bağ oluşmaktadır. Sıcaklık arttıkça kontak noktalarında kaynaşma olur ve gözenekler kapanmaya başlar. Sinterleme sürecini ve sinterlenen mikro yapıyı difüzyon katsayısı, yüzey gerilimi, parçacık boyutu gibi birçok parametre vardır (Kang, 2005). Sinterlenen malzeme, parlatma ve diğer mekanik işlemlerden sonra doğrudan kullanıma hazır hale gelir. Tek fazlı sistemlerde (saf toz kullanımında) sinterleme tamamen katı fazda gerçekleşir (Barsoum, 2003).

Sıkıştırılarak pelet şeklinde bir form kazandırılmış toz malzemelerin sinterlenmesi sonucunda, özgül yüzey alanının küçülmesi, parçacık temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olayı olarak tanımlanır. Diğer bir ifade ile sinterleme, gözenekli yapıda sıkıştırılmış toz parçacıkların gözeneksiz yapıya sahip malzemeye dönüştürmek için bir ısı işlem uygulamasıdır. Bu işlemde katı-gaz etkileşimi ve kimyasal tepkimeler vardır. Ayrıca süreç birçok malzeme taşınım olayını içeren karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Sinterleme, temas noktalarının katı hal bağına dönüşümü ile başlamış olur. Burada bir parçacığa ait yüzey atomu en az iki parçacık tarafından paylaşılır duruma geçer (Kang, 2005)

Sinterleme, ileri teknoloji seramiklerinin üretiminde en önemli aşamalardan birisini oluşturmaktadır. Sinterleme sonunda malzemenin mikro yapısı, malzemenin fizikokimyasal özelliklerini de etkileyeceği için, sinterlemeye etki eden en uygun parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir (Kang, 2005).

Genelde sinterleme işlemi, katı hal sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesi olarak iki başlık altında toplamak mümkündür. Katı hal sinterlemesi, sıkıştırılmış tozların katı halde sinterleme sıcaklığında yoğunlaşmasıyla, sıvı faz sinterlemesi ise sinterleme esnasında sıvı bir fazın bulunması ile gerçekleşmektedir (Kang, 2005).

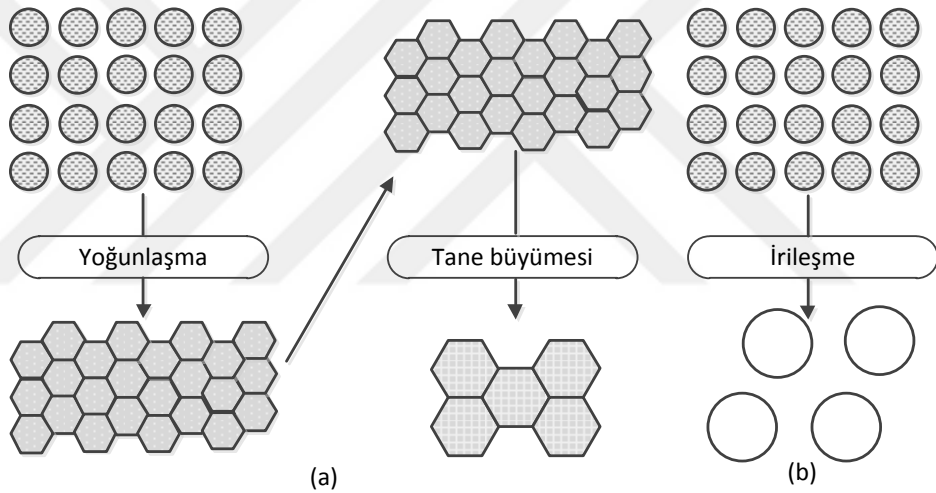
5.4.1. Katı faz sinterlemesi

Katı faz sinterlemesi, hiçbir sıvı fazın var olmadığı durumu ifade eder. Sinterleme esnasında etkili olan makroskopik itici kuvvetler yüzeylerdeki fazla enerjidir.

(i) İrileşmeye yol açan, ortalama tane boyutunun azalması sonucu toplam yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir (Görsel 5.3-a).

(ii) Yoğunlaşmaya neden olan, katı/buhar ara yüzeylerinin giderilmesi ve tane sınırı bölgesinin oluşumu, bunu takip eden tane büyümesi (Görsel 5.3-a) ile gerçekleşebilir. Bu iki mekanizma genellikle rekabet halindedir. Eğer yoğunlaşmaya yol açan atomik prosesler baskınlaşırsa, gözenekler küçülür ve zamanla yok olur, sıkışık bünye büzüşür. Ama irileşmeye yol açan atomik prosesler daha hızlıysa, hem gözenekler hem de taneler zamanla büyür (Görsel 5.3-b)

Sinterlemenin birinci aşamasında ısıtmayla birlikte boyun oluşumları başlar, ancak henüz yeterli seviyede kütle akışı yoktur. Bir sonraki aşamada gözenek yapısı daha düzleşir ve birbirine bağlı silindirik gözenekler ortaya çıkar. Sinterlemenin son aşamasında ise tane büyümeyle birlikte malzeme, daha az taneli ve daha az boşluklu bir mikro yapıya ulaşılır (Ataşer, 2010).



Görsel 5.3. Toplanan tanelerin enerjisini düşürebileceği iki durumun şematik gösterimi (a) Yoğunlaşmayı takip eden tane büyümesi (b) Küçük tanelerin büyüdüğü kabalaşma (Barsoum, 2003).

5.4.2. Sıvı faz sinterlemesi

Yüksek ve düşük ergime sıcaklığına sahip farklı tozların sinterlenmeleri sırasında oluşan sıvı faz sinterlemesi düşük ergime sıcaklığına sahip toz parçacıklarının ergiyerek katı tanelerin etrafını sarması ve kaynaşması, bu sıvı köprü yardımı ile sağlanması prensibine dayanır. Sıvı faz sinterlemesi üzerine gerçekleştirilen çok sayıdaki araştırmalar sonucu bu sürecin üç aşamada oluştuğu kabul edilmiştir. Bu aşamalar sırasıyla sıvı akışıyla yeniden düzenlenme aşaması, çözünme, yeniden çökelme aşaması, katıhal sinterlenmesi aşamasıdır (Barsoum, 2003).

Sıvı faz sinterleme, birçok ticari uygulamada sıkça kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemin başlıca avantajları, düşük sinterleme sıcaklıkları ile hızlı yoğunlaşma ve homojenleşmesidir. Yüksek nihai yoğunluklara sahip ve katı-faz sinterlenmiş malzemelerden daha üstün mekanik veya fizikokimyasal özellikler gösteren mikro yapıları da önemli avantajlarındandır. Katı parçacıklar arasındaki sıvı faz tarafından oluşturulan hızlı yayılım yollarından dolayı kimyasal homojenleşme sıvı faz sinterleme sırasında daha da hızlı gerçekleşir. Oluşan az miktardaki sıvı faz bile sinterleme işlemine önemli derecede katkıda bulunabilmektedir. Ancak, yoğunlaşma hızı yapıda oluşan sıvı faz miktarına bağlıdır ve bu sıvı faz miktarı da sisteme bağlı olarak hacimce %30'lara kadar olabilmektedir.

Sinterleme işlemi, yapıda sıvı fazın bulunmasına göre geçici sıvı faz ve kalıcı sıvı faz sinterleme olarak iki şekilde gerçekleşebilir. Geçici sıvı faz sinterlemede, oluşan sıvı faz yapıdaki katı faz ile reaksiyona girmekte ve sinterleme işleminin sadece belli süresinde sistemde bulunmaktadır. Bu çeşit sinterleme genellikle alaşım elementlerini homojenleştirmek için uygulanır ve sonuçta bir katı çözelti oluşturulur. Oluşan sıvı faz bileşenler arasındaki temas alanlarını artırır ve yayılımı kolaylaştırır. Kalıcı sıvı faz sinterlemesi ise sert metallerin, yüksek hız çeliklerinin ve birçok seramik sistemin sinterlenmesi sırasında meydana gelir. Buradaki hedef, yüksek mukavemet ve tokluğun bir arada olduğu mümkün olabilecek en yüksek yoğunlaşmaya ulaşmaktır. Sıvı faz sinterlemenin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. En önemli avantajı ise, sinterleme işleminin hızlı olmasıdır. Yapıda oluşan sıvı faz, katı faz sinterlemeye göre daha hızlı atomik yayılım meydana getirmektedir. Katı parçacıklar sıvı faz tarafından ıslatılmakta ve bu sıvı fazın etkisi ile ortaya çıkan kılcal kuvvetler parçacıkları birbirlerine doğru çekmekte ve dıştan bir basınç olmaksızın hızlı kompakt yoğunlaşması meydana gelmektedir. Bu sıvı faz ayrıca, parçacıklar arasındaki sürtünmeyi de azaltarak katı parçacıkların hızlı bir şekilde yeniden düzenlenmelerine olanak sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, keskin parçacık köşe ve kenarları yüksek kimyasal potansiyele sahip olmalarından dolayı sıvı faz içerisinde çözünmekte, böylece daha etkili bir ikincil paketlenme meydana gelmektedir. Birçok sinterleme sisteminde, daha yüksek erime sıcaklığına sahip olan faz, aynı zamanda daha sert olan seramik fazdır. Bu tür bir sinterlemenin sonucunda genellikle, sert faz miktarının daha fazla olmasına rağmen, sünek davranışa sahip sinterlenmiş iki fazlı kompozit malzemeler elde edilir. Sıvı faz

sinterlemede karşılaşılan en büyük sorun sinterleme sırasında fazla miktarda oluşan sıvı fazın kompaktın şeklinin bozulmasına sebep olmasıdır [Kang, 2005; Özer, 2015].

5.5.Karakterizasyon Yöntemleri

5.5.1. Mikron boyutundaki malzemelerin parçacık boyut dağılımı

Mikron boyutundaki parçacıklardan oluşan malzemelerin parçacık boyut dağılımı tayini Lazer kırınım yöntemi ile belirlenir. Yöntemin temeli parçacık büyüklüğü ile ışınların kırılma açısı arasındaki ters orantı ilişkisine dayanır. Lazer kırınım yönteminde, parçacık üzerine lazer ışını gönderilmekte ve parçacığa çarparak kırılan ve ileri yönde yansıyan ışınlar bir mercekten geçtikten sonra dedektörün üzerine düşmektedir. Dedektörün üzerine düşen ışınlar bir dönüştürücü tarafından sayısallaştırılarak bir bilgisayar programı vasıtasıyla parçacık boyutu büyüklüğü ve yüzdesi hesaplanır.

Uçucu külün tesisten geldiği haliyle ve 2, 4, 8, 12 ve 16'şar saat öğütme işlemleri sonucunda elde edilen öğütülmüş numunelerin parçacık analizleri, parçacıkların izopropil alkol içerisinde dağıtılarak lazer kırınım metodu prensibine dayanılarak ölçüm yapan Malvern Mastersizer 3000 marka cihazda belirlenmiştir.

5.5.2. X-Işınları kırınımı (XRD) analizi

5.5.2.1.X-ışınları

Vakum ortamında enerji verilerek hızlandırılmış elektron demetinin anota çarpması sonucunda meydana gelen çok yüksek enerjili ve nüfuz etmesi çok yüksek olan bir ışın demetidir. Tungstene elektrik akımı verildiğinde katot ısıtılmış olur. Daha sonra elektronların kinetik enerjileri artar ve metalden ayrılır. Bu olay termo etki olarak adlandırılır. Bu durum oluştuktan sonra katot ile anot arasında çok yüksek mertebelerde bir potansiyel fark oluşturulduğunda katot bölgesinden bir ışın demeti çıkar. Bu ışın demeti belirli bir doğrultuda hızlandırılmış olan elektron demetidir. Bu elektron demetinin anota çok hızlı bir şekilde çarpması sonucunda x-ışınları elde edilir.

0,1–1 Å dalga boyu ve 1 MeV–100 keV enerji aralığındaki x-ışınlarının bazı özellikleri aşağıdaki gibidir:

- i. Gazlar x-ışınları etkisiyle iyon haline geçebilirler.
- ii. Bir kimyasal etkileşme vasıtasıyla meydana gelen fotoğraf plakalarının etkilenmesi x-ışınları varlığında meydana gelir.

iii. Nüfuz gücünün çok yüksek olması nedeniyle birçok cismin içinden geçebilirler.

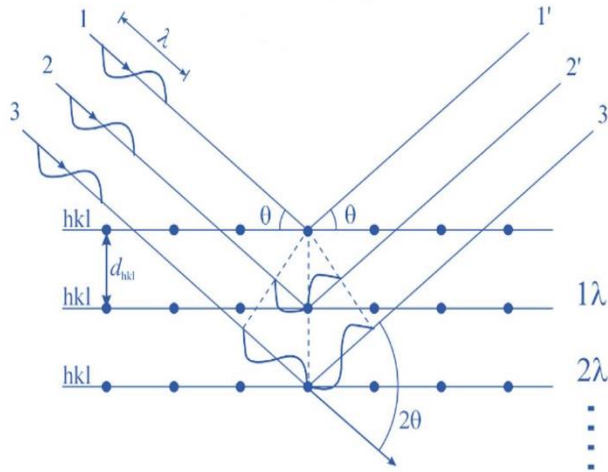
iv. Hafif atomların bileşiminden (H, C, O,...) meydana gelmiş maddeler için x-ışınları iki kat daha geçirgendir.

5.5.2.2. Bragg yasası

Bu teori İngiliz fizikçi W. H. Bragg tarafından 1912 yılında oluşturulmuş olup x-ışınlarının düzgün bir kristale gönderilmesi sonucunda, saçılmaya uğrayan ışınların matematiksel olarak ifade edilmesidir. Birbirlerine paralel olan iki tane A ve B düzlemi olduğunu ve bu düzlemlerin aralarında eşit uzaklıklar olan atomlardan oluştuğunu varsayalım. Bu düzlemler arasındaki uzaklığın d olduğu varsayılır. Birbirlerine paralel ve θ gelme açısıyla gelen 1, 2 ve 3 olarak adlandırılan λ dalga boyu ışınlar, 1', 2' ve 3' şeklinde yansır. Birbirlerine paralel olan bu ışınların yansıma yasaları gereği yine gelme açısına eşit büyüklükteki θ yansıma açısıyla yansır. 1 ve 2 ışınlarını incelediğimizde dalga düzlemleri arasında net bir yol farkı olmadığından dolayı sadece bu doğrultuda yansıyan ışınların aynı fazda olduğunu ve dolayısıyla birbirlerini kuvvetlendirdiklerini söyleyebiliriz. Üstte olduğu düşünülen A düzlemi içindeki bütün noktaların 1' saçılmış ışınına paralel yansıttığı bütün ışınlar aynı fazdadır. 1 ve 3 ışınlarını düşünecek olursak, 11' ve 33' ışınları arasında $2d\sin\theta$ olarak ifade edilen bir yol farkı vardır. Bu yol farkının kullanılan ışığın dalga boyunun tam katlarına eşit olduğu durumlarda; saçılan 1' ve 3' ışınları aynı fazda olur:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (5.1)$$

Eş. (5.1), Bragg kırınım yasası olarak bilinir.



Şekil 5.1. Bragg yasası (Tilley, 2006).

5.5.2.3. Kırınım yöntemleri

Bragg eşitliğine göre; aynı dalga boylu ışınların kullanılmasıyla, uygun saçılma açılarının olması gerektiği görülür. Saçılmada kullanılan dalga boyunun büyüklüğüne göre tek ve belirli bir saçılma açısının olduğu görülür. λ ve θ değişen ve sabit tutulan değerlerine göre üç temel kırınım yöntemi vardır.

- *Laue yöntemi*

İlk olarak bu yöntem kullanılmıştır. Belirli kristalografik yönlere sahip bir kristale belirli bir yönden x-ışını etki ettirilir. Kristalin bütün ağ yüzeyleri için Bragg kırınım yasasının gerçekleşeceği çeşitli dalga boylarında x-ışını mevcuttur. Bütün bu ağ yüzeylerinden saçılan ışınlar, arkada tutulan fotoğraf filmi üzerinde girişim izlerine sebep olurlar. Bu izler aynı zamanda “Laue izleri” olarak da isimlendirirler. Bu izlerin üzerinde yapılan matematiksel incelemeler vasıtasıyla kristal yapı hakkında karakteristik bilgilere ulaşılabilir (Uz, 1990).

- *Döner kristal yöntemi*

Bu yönteme göre herhangi bir kristal kristalografik doğrultusu kullanılan tek dalga boylu X-ışının doğrultusuna dik olacak şekilde monte edilir. Silindirik bir film vasıtasıyla kristalin etrafı çevrilir ve daha sonra kristal seçilen bir eksen etrafında döndürülür. Silindirik film ile kristalin merkezi çakışıktır. Kristalin dönmesi sırasında kristale gönderilen tek dalga boylu x-ışını demeti kristaldeki herhangi bir örgü düzlemi tarafından Bragg kırınım yasasına uygun olacak şekilde saçılır. Saçılan bu x-ışınları silindirik film üzerinde iz bırakacaklardır. Kristalin dönme eksenine bir tek olduğundan dolayı Bragg kırınım açısı 0° ile 90° arasındaki dar açı değerlerini almaz. Bundan dolayı bütün örgü düzlemleri bir kırınım demeti oluşturamaz. Dönme eksenine dik olan örgü düzlemleri bu duruma örnek verilebilir. Bu yöntem özellikle bilinmeyen kristal yapı tayinlerinde sıkça kullanılır (Kabak, 2004).

- *Toz Yöntemi (Debye-Scherrer Yöntemi)*

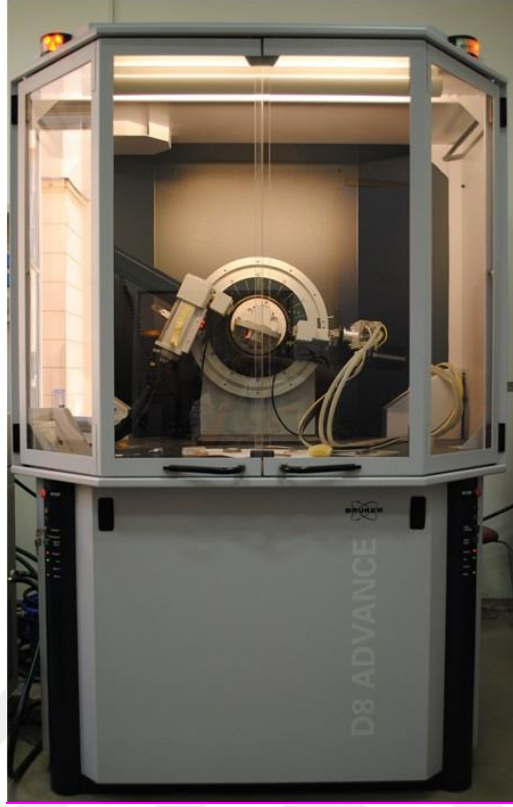
Bu yöntem için silindirik bir kamera ve tek dalga boyu olan bir x-ışını gereklidir. Bu yöntemin öteki yöntemlerden farkı kullanılan numune tek bir kristal parça halinde değildir, toz haline getirilmiştir. Bu toz numune bir cam içine doldurulduktan sonra kameranın önüne konur. Bu yöntem ince taneli kristallerin incelenmesi için oldukça idealdir. Bu yöntemde kullanılan x-ışınlarının film üzerindeki girişim izleri oluşumu yapısal olarak diğer yöntemlere benzemesine rağmen, kullanılan toz numunenin her bir

taneciğine gelen x-ışının doğrultusuna göre rastgele yönelmiş küçük birer kristal olarak düşünülür. Bundan dolayı, kullanılan bu toz numunenin her bir taneciği kullanılan x-ışınına göre her türlü açı ile durduğu düşünülür. Bu açıların içinde kullanılan küçük taneciklerin üzerinden yansımaları için gerekli olan 2θ Bragg açıları da vardır. Bu durumlarda kullanılan taneciklerin çok olmasından dolayı saçılma bir kere olmayacaktır ve saçılan ışın demetinin oluşturduğu koni içinde birçok defa tekrarlanacaktır.

Kullanılacak olan film, silindirik olarak büküldükten sonra toz numune silindirin eksenine yerleştirilir. Kullanılacak olan x-ışını demeti bu eksene dik olmalıdır. Kırınımı oluşturan saçılma konileri silindir şeriti çizgiler boyunca keser. Film açıldığında birçok sayıdaki kristal parçacıklarının oluşturduğu izlerin olduğu görülür. Bu küçük izler birbirlerine o kadar yakındır ki, çizgiler şeklinde algılanabilir.

Debye-Scherrer filmleri sayesinde kullanılan toz numune hakkında birçok karakteristik bilgiye ulaşmak mümkündür. Dünyada var olan birçok kristal yapıları için Bragg yasasına göre elde edilmiş olan (hkl) düzlemleri arasındaki uzaklıkları ve yansıma şiddetlerini de içeren ASTM olarak isimlendirilen kartlar vardır. Yeniden yapılan ölçümlerin sonucu bu kartlara eklenir (Tilley, 2006).

Çalışmada kullanılan numunelerin XRD analizleri Bruker D8 Advance marka x-ışınları kırınım cihazı ile $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanılarak 40 kV'luk potansiyel fark altında ve 20 mA'lık akımla, 10° ile 60° aralığında yapılmıştır. Elde edilen difraksiyon desenleri üzerinde 2θ açısına karşılık gelen tüm kristal pikleri PDF kartları ile karşılaştırılarak mevcut fazlar tespit edilmiştir. Tüm analizler Fen Fakültesi Fizik Bölümü X-ışınları Laboratuvarında bulunan XRD cihazı ile yapılmıştır. Cihazın fotoğrafı Görsel 5.4'de verilmiştir.



Görsel 5.4. X-ışınları difraksiyon (XRD) cihazı

5.5.3. Mikro yapı analizi (Taramalı Elektron Mikroskobu, SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek potansiyel farkı altında hızlandırılan elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması esnasında elektron ve numune atomları arasındaki girişimler sonucunda oluşan etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne gönderilir. Ayırım gücü (resolution), odak derinliği (depth of focus) görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını daha da genişletmektedir (Ayvacıkl, 2011).

Taramalı elektron mikroskobu optik kolon, numune tutucusu ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında, elektron demeti kaynağı, elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek voltajın uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerine odaklayan için objektif merceği ve

elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune $\sim 10^{-4}$ Pa değerinde vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demetinin numune üzerine girişimi sonucunda meydana gelen çeşitli elektron ve ışınları toplayan dedektörler ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır (Ayvacıklı, 2011).

Mikro yapı analizinin gerçekleştirilebilmesi için analizi yapılacak numunelerin iletken bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden üretilen numuneler Baltec Sputtering SCD/005 marka kaplama cihazı ile 100 mA akımda 40 s boyunca Au-Pd ile kaplanmıştır. Au-Pd ile kaplanarak iletken hale getirilen numunelerin mikro yapısını incelemek için Zeiss EVO 50 EP marka taramalı elektron mikroskobu ile malzeme yüzeyinden veya ihtiyaç duyulduğunda kırık yüzeyden SEM görüntüleri alınarak mikro yapı analizi gerçekleştirilmiştir. Cihazın fotoğrafı Görsel 5.5’de sunulmuştur.



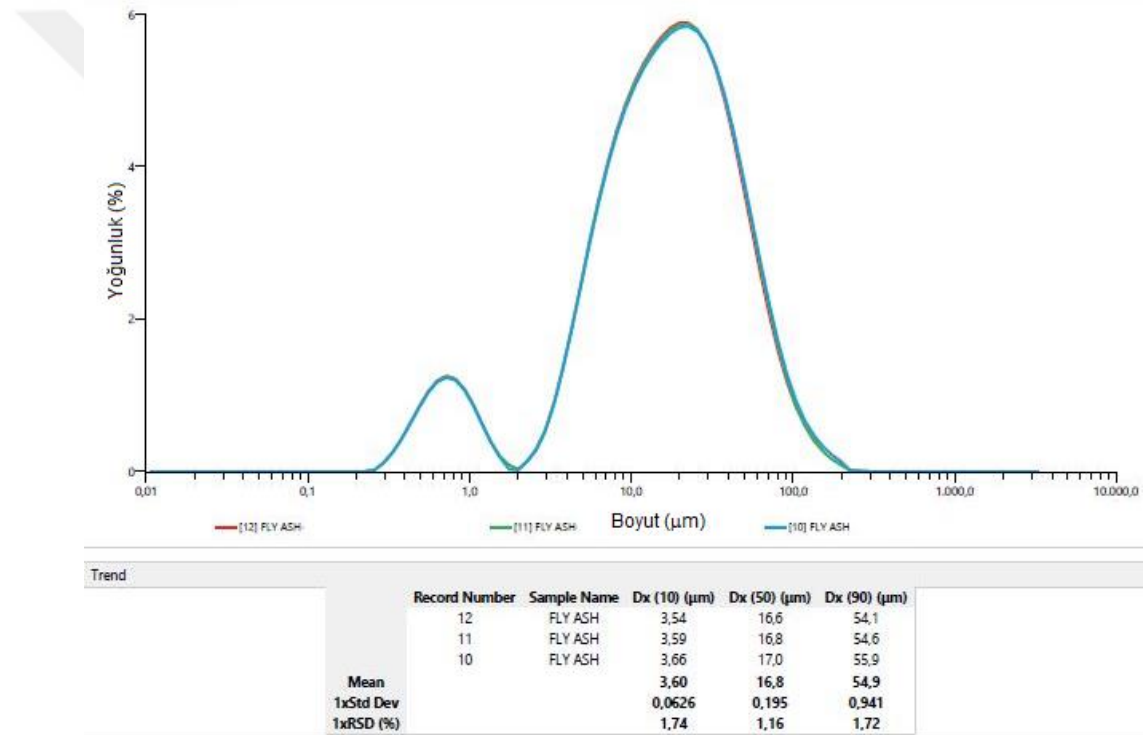
Görsel 5.5. *Taramalı elektron mikroskobu (SEM)*

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Atık Malzemelerin Karakterizasyonu

6.1.1. Parçacık boyut dağılımı analizi

Öğütmeye tabi tutulmamış uçucu küle ait boyut dağılımı eğrisi Şekil 6.1’de verilmiştir. Burada BOF cürufunun parçacık boyut dağılımı çok geniş çaplı bir dağılıma sahip olduğundan boyut dağılımı ölçümü gerçekleştirilememiştir. Tamamı 1 mm’nin altında olan uçucu kül numunesi geniş bir boyut aralığına sahiptir. Üç ölçümün ortalama D(50) değeri 16,18 μm ’dur. D(10) değeri 3,6 μm ; D(90) değeri ise 54,90 μm olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1. Öğütmeye tabi tutulmamış UK'e ait PSD eğrisi

6.1.2. Kimyasal analiz

Çayırhan Termik Santralinden getirilen uçucu külün kimyasal analizi hiçbir ön işleme tabi tutulmaksızın XRF cihazında kimyasal kompozisyonunu belirlemek için yapılmıştır. Kızdırma kaybı (KK) 1000 °C sıcaklıkta kül fırınında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ASTM C-618 standardına göre değerlendirilip, uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı %65,69’tir. Bu değer %50’nin üzerinde olması durumunda uçucu kül

C sınıfı kül olarak sınıflandırılır. Aynı zamanda kireç (CaO) miktarı %10'un üzerindedir. Bu tür küller yüksek kireç içeren kireçsi kül sınıfına dâhil edilmektedir. Linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen C-sınıfı küller hem puzolan özelliğine hem de bağlayıcı özelliğe sahiptir. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, Çayırhan UK, ASTM C618 ve TS 639'daki $S+A+F > 50$ koşulunu sağlamaktadır. TÇMB'nin hazırladığı "Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri" raporuna göre Çayırhan uçucu külü, kireç içeriğinin % 10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V sınıfına (silissi uçucu kül) dahil edilmektedir. Yine ASTM C-618 standardına göre $S+A+F$ değerinin % 70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) girmesiyle birlikte, analitik CaO miktarının % 10'un üzerinde olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Çelik vd. (2003) tarafından Çayırhan uçucu külünün portland çimentosu- uçucu külün priz başlama ve sonu sürelerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan Çayırhan külünün $S+A+F$ miktarı %70,66, CaO miktarı da %5,73 olarak belirtilmiştir. Buna göre, bu Çayırhan uçucu külünün her iki uçucu kül sınıfı içinde sınırda olduğu düşünülmüştür. Termik santralin işletim parametreleri, yakılan kömürün türü ve içeriği, kömürün pulverize derecesi, kazan türü, yakma sıcaklığı gibi çeşitli unsurlar uçucu külün fiziksel özelliklerini ve kimyasal içeriğini etkilemektedir (Güler vd. 2005).

Ayrıca Erdemir Demir-Çelik Fabrikası'nın cüruf sahalarından alınan BOF cürufunun kimyasal analiz sonucu Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan Çayırhan UK ve Erdemir BOF cürufuna ait kimyasal analiz

Kimyasal Analiz (% ağı.)		
Oksit	Uçucu Kül (UK)	BOF Cürufu
SiO ₂	45,37	13,30
Al ₂ O ₃	10,96	5,02
CaO	19,27	46,57
Fe ₂ O ₃	9,36	5,57
TiO ₂	0,68	0,47
MgO	4,49	5,25
Na ₂ O	1,33	0,14
K ₂ O	2,83	0,17
MnO	0,14	2,70
SO ₃	4,35	0,32
FeO	-	20,49
K.K.*	0.63	-

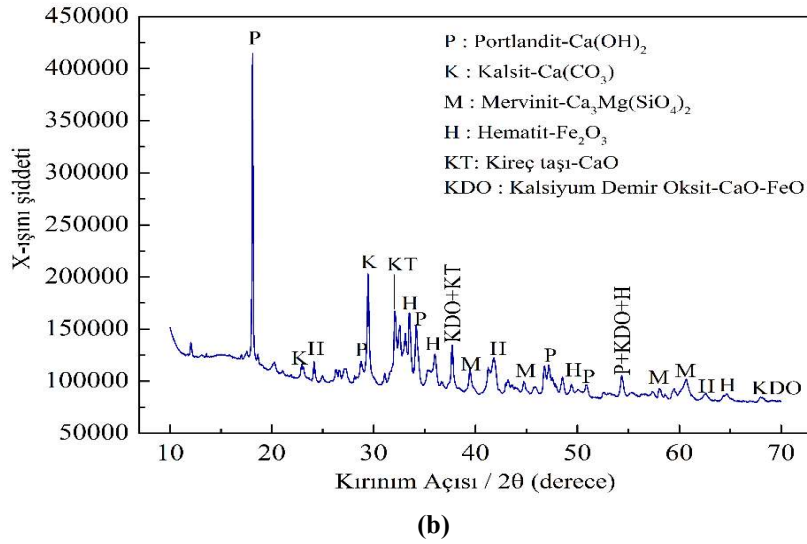
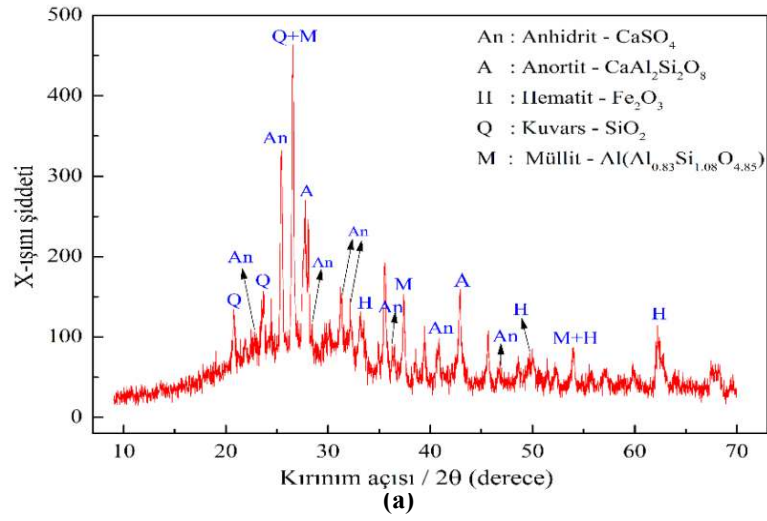
*K.K.: Kızdırma Kaybı

Alataş vd. (2006) yapılan çalışmada çelikhane cürufu için CaO miktarı ağırlık %47-55 arasında bildirilmiştir. SiO₂ miktarı ağırlık %7,5-15,0; Al₂O₃ ise ağırlık %1,2-1,7 aralığındadır. Toplam demir (FeO) ağırlık %20-26 değerleri arasındadır. Elde edilen değerler bu çalışmada bildirilen değerler ile uyum göstermektedir.

6.1.3. Mineralojik analiz

Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri, X-ışınları difraktometresinde toz difraksiyon yöntemiyle 10 ila 70° 2θ aralığında belirlenmiştir. Şekil 6.2-a Çayırhan uçucu külün x-ışını kırınım desenini göstermektedir. C- tipi UK numunesinin anhidrit (CaSO₄) ve kuvars (SiO₂) ana fazlarına, mullit (Al₆Si₂O₁₃), anorthit (CaAl₂Si₂O₈) ve hematit (Fe₂O₃) gibi diğer fazlar eşlik etmektedir.

BOF cürufunun XRD desenleri, numunedeki mevcut minerallerin çeşitliliği nedeniyle birçok üst üste binen tepe olduğunu göstermektedir (Şekil 6.2-b). Portlandit [Ca(OH)₂], BOF cürufunda bulunan ana kristal fazlardır. Bu, başka yerlerde bildirilen sonuçlarla uyumludur. CaCO₃ ve Ca(OH)₂'nin tanımlanması, BOF cürufunda hidrasyon aktif minerallerin varlığını göstermektedir (Ahmedzade ve Şengöz, 2009).

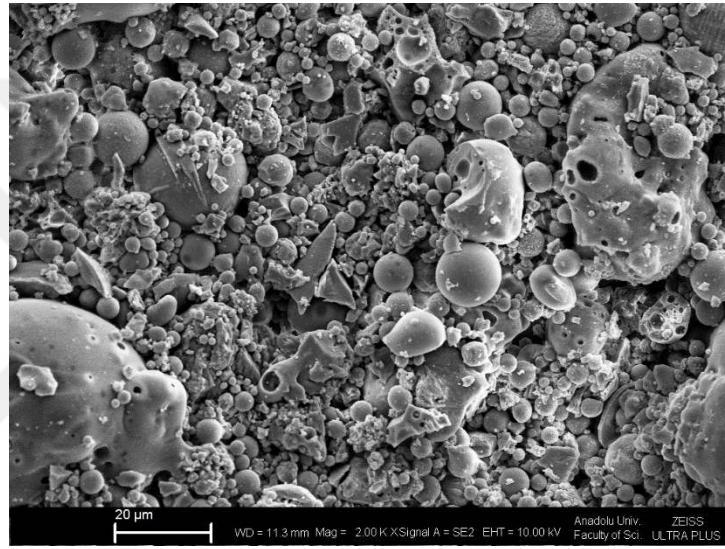


Şekil 6.2. Deneylerde kullanılan (a) Çayırhan UK ve (b) Erdemir BOF cürufuna ait XRD desenleri ve mineralojik fazları

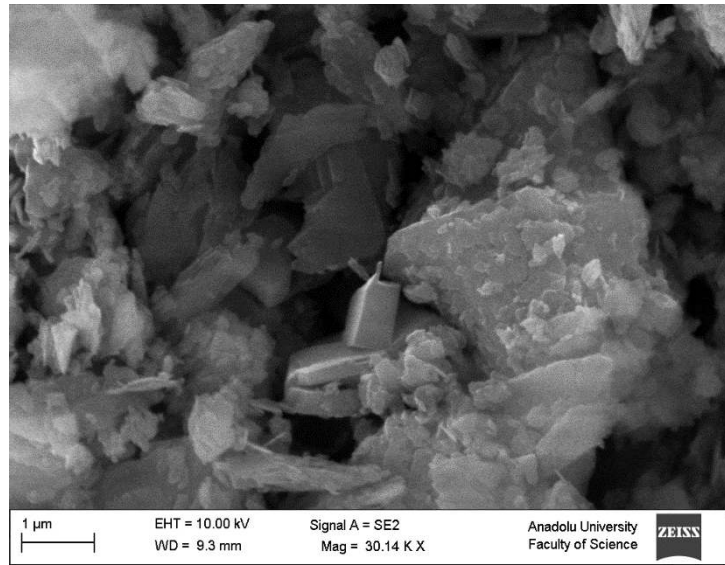
6.1.4. Mikroyapısal analiz

Deneyisel çalışmalarda kullanılan C tipi UK tanelerinin ağırlıklı olarak değişen çaplarda küresel bir morfolojiye sahip olduğu Görsel 6.1-a'da görülmektedir. C tipi UK küresel veya düzensiz şekilli parçacıklardan oluşan tek tek taneleri ve aglomeraları içerir. Bu küre şeklindeki parçacıklar, kömürün yüksek sıcaklıkta yakılması sırasında eriyen damlacıklardan üretilen camsı yapılardır. SEM görüntüsünden küresel parçacıkların birçoğunun çapının 20 μm 'den küçük olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, Şekil 6.1'de verilen UK parçacık boyutu dağılımı ile uyumludur. Deneyisel çalışmalarda kullanılan

uçucu külün PSD analizine göre parçacık çapı yaklaşık olarak 3 ile 55 μm arasında değişir, ortalama parçacık boyutu yaklaşık $D(50)=16,8 \mu\text{m}$ 'dir. Mikroyapının uçucu küllerde farklılıklar göstermesi yakılan kömürün kompozisyonuna ve pulverize derecesi ve yakma tekniği nedeniyle olağandır (Dikmen vd. 2017). Görsel 6. 1-b'de verilen SEM görüntüsü, BOF cüruf parçacıklarının heterojen olduğunu ve düzensiz şekil ve boyutlara sahip olduğunu gösterir. Bu, başka yerlerde bildirilen birçok sonuçla benzerdir (Xue vd., 2006). BOF cürufunun SEM görüntülerine göre kalker ve bazalt agregasına benzer doku ve morfoloji gösterir (Xue vd., 2006).



(a)



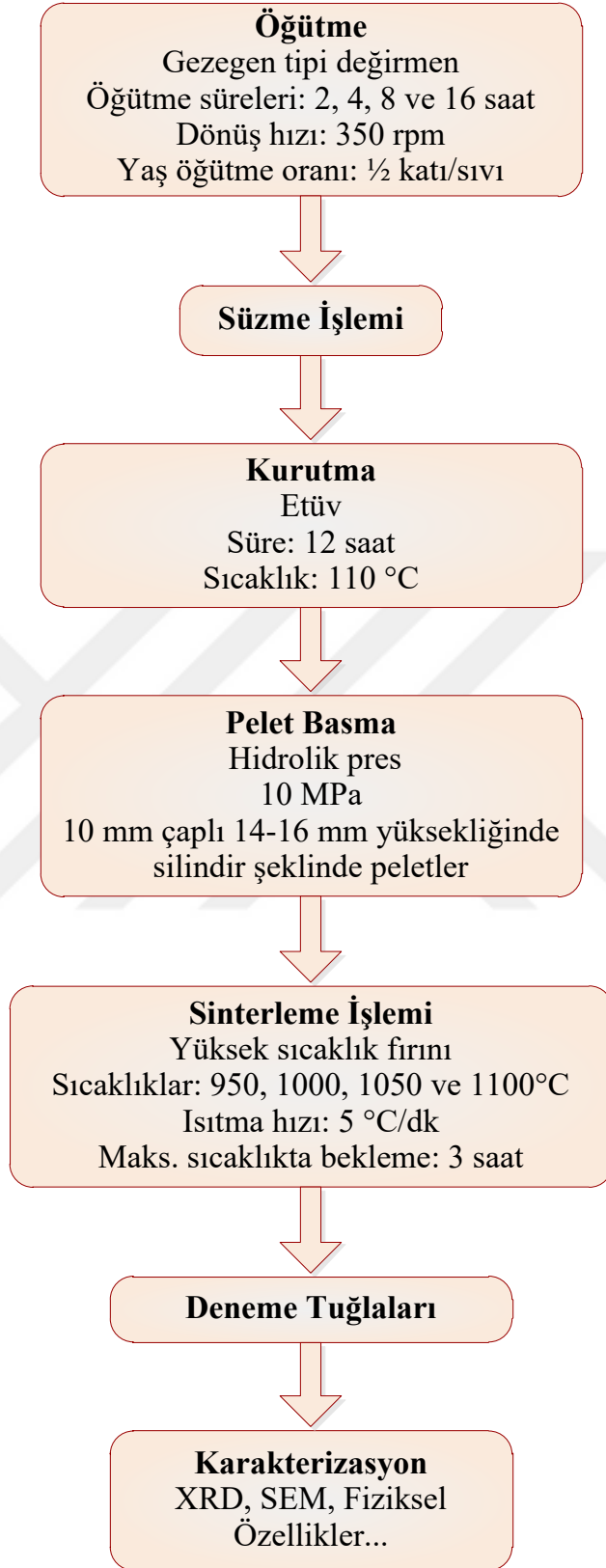
(b)

Görsel 6.1. Deneylerde kullanılan (a) Çayırhan UK ve (b) Erdemir BOF cürufuna ait SEM görüntüleri

6.2. Numunelerin Sinterlenmesi İşlemi

Sinterleme işleminde kullanılan UK ile yardımcı malzeme olarak kullanılan UK/BOF cürufu karışım oranları ve öğütme süreleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Gezegen tipi bilyalı değirmende UK ve UK/BOF cürufu karışımları yaş olarak öğütülmüştür.

Öğütme işlemi 1 birim katıya (50 ml kuru atık malzeme) 2 birim (100 ml ultra saf su) sıvı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Öğütme esnasında taneciklerin mekanik olarak daha da küçülerek homojenliğinin artması için havan içerisinde 40 adet zirkonyum oksit bilye ($\Phi 10$ mm) kullanılmıştır. Öğütme hızı her defasında 350 dev/dk olarak ayarlanmıştır. Öğütme işlemi tamamlandıktan sonra zirkonyum havan içindeki karışım filtre kağıdı kullanılarak süzüldü. Süzülen numuneler etüvde saat camları üzerinde 110°C’de bir gece boyunca kurutuldu. Seramik bir havanda toz haline getirilen numunelerden 10 MPa’lık hidrolik pres yardımıyla 10 mm çapında 14-16 mm yüksekliğinde silindir şeklinde peletler hiçbir bağlayıcı kullanılmadan hazırlandı. Silindirik peletler 5°C/dk ısıtma hızında, 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta erişilen maksimum sıcaklıkta 3 saat bekletilerek kül fırınında sinterlenmiştir. Daha sonra sinterlenen bu numuneler atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Görsel 6.2’de deneysel çalışmaların şematik özeti verilmiştir. Tablo 6.2’de ise öğütme süreleri, sinterleme sıcaklığı ve karışım oranlarına göre belirlenen numune kodları belirtilmiştir.



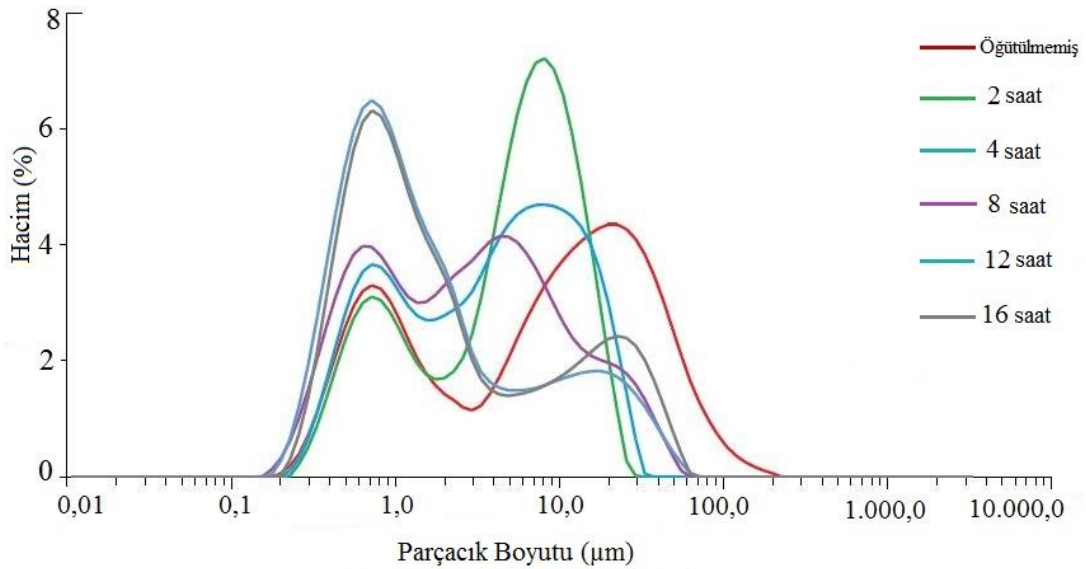
Görsel 6.2. Deneyisel çalışmaların akış diyagramı

Tablo 6.2. UK, UK/BOF cürufu karışımları ve BOF cürufunun farklı öğütme süreleri, sıcaklık ve karışım oranlarına göre kodlanması

Numune Kodu	Öğütme Süresi/Sinterleme Sıcaklığı	Karışım Oranı
A1	2 sa/950°C	1/1UK
A2	4 sa/950°C	1/1UK
A3	8 sa/950°C	1/1UK
A4	12 sa/950°C	1/1UK
A5	16 sa/950°C	1/1UK
B1	2 sa/1000°C	1/1UK
B2	4 sa/1000°C	1/1UK
B3	8 sa/1000°C	1/1UK
B4	12 sa/1000°C	1/1UK
B5	16 sa/1000°C	1/1UK
C1	2 sa/1050°C	1/1UK
C2	4 sa/1050°C	1/1UK
C3	8 sa/1050°C	1/1UK
C4	12 sa/1050°C	1/1UK
C5	16 sa/1050°C	1/1UK
D1	2 sa/1100°C	1/1UK
D2	4 sa/1100°C	1/1UK
D3	8 sa/1100°C	1/1UK
D4	12 sa/1100°C	1/1UK
D5	16 sa/1100°C	1/1UK
E1	8 sa/950°C	1/2UK+1/2ÇÇ
E2	8 sa/1000°C	1/2UK+1/2ÇÇ
E3	8 sa/1050°C	1/2UK+1/2ÇÇ
E4	8 sa/1100°C	1/2UK+1/2ÇÇ
F1	8 sa/950°C	1/3UK+2/3ÇÇ
F2	8 sa/1000°C	1/3UK+2/3ÇÇ
F3	8 sa/1050°C	1/3UK+2/3ÇÇ
F4	8 sa/1100°C	1/3UK+2/3ÇÇ
G1	8 sa/950°C	2/3UK+1/3ÇÇ
G2	8 sa/1000°C	2/3UK+1/3ÇÇ
G3	8 sa/1050°C	2/3UK+1/3ÇÇ
G4	8 sa/1100°C	2/3UK+1/3ÇÇ
H1	8 sa/950°C	1/1ÇÇ

6.2.1. Parçacık boyut dağılımı

Tesisten alınan UK'ün 2, 4, 8, 12 ve 16'şar saat öğütme işlemleri sonucunda elde edilen öğütülmüş numunelerin parçacık boyutu dağılımı Şekil 6.3'de verilmiştir. Çayırhan uçucu külü geniş çaplı bir dağılıma sahiptir. Bu nedenle, boyut dağılımı ölçmek zorlaşmaktadır. Benzer şekilde UK/BOF cürufu karışımlarının da çok geniş çaplı bir dağılıma sahip olması nedeniyle analiz işlemi gerçekleştirilememiştir. Bunun sebebi, BOF cürufunun içerdiği yüksek oranda CaO'in ölçüm sürecinde su ile tepkimeye girmesi olabilir. Tablo 6.3 ve Şekil 6.3'te görüldüğü gibi, uçucu külün medyan tane çapı D(50) öğütme yoluyla 9,35 μm 'den 1,21 μm 'ye düşerek 8,14 μm azalmıştır. Öğütme işleminin uçucu külün parçacık boyutu dağılımında önemli bir rol oynadığını, ancak bu boyutun 16 saatlik öğütme süresinde tekrar arttığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar SEM görüntüleri ile de iyi bir uyum göstermektedir. Öğütme işlemi daha büyük değerlerde özgül yüzey alanının oluşmasına yol açar. Ancak, genellikle uzun süreli öğütmelerde karşılaşılan aglomerasyon (öğütme sırasında çeşitli etkilere parçacıkların topaklanması) pozzolanik özelliği ters yönde etkiler. Aglomerasyon, elektrostatik çekim, ortamın ısınması sonucunda parçacıkların birbirine kaynaması, yeni oluşan yüzeylerin birbirine yapışma eğilimi gibi sebeplerden dolayı meydana gelir. Öğütme süresindeki artış parçacık büyüklüğünün azalmasına neden olur, ancak parçacık büyüklüğünün azalma hızı öğütme süresiyle orantılı değildir. (Sadique vd., 2013).



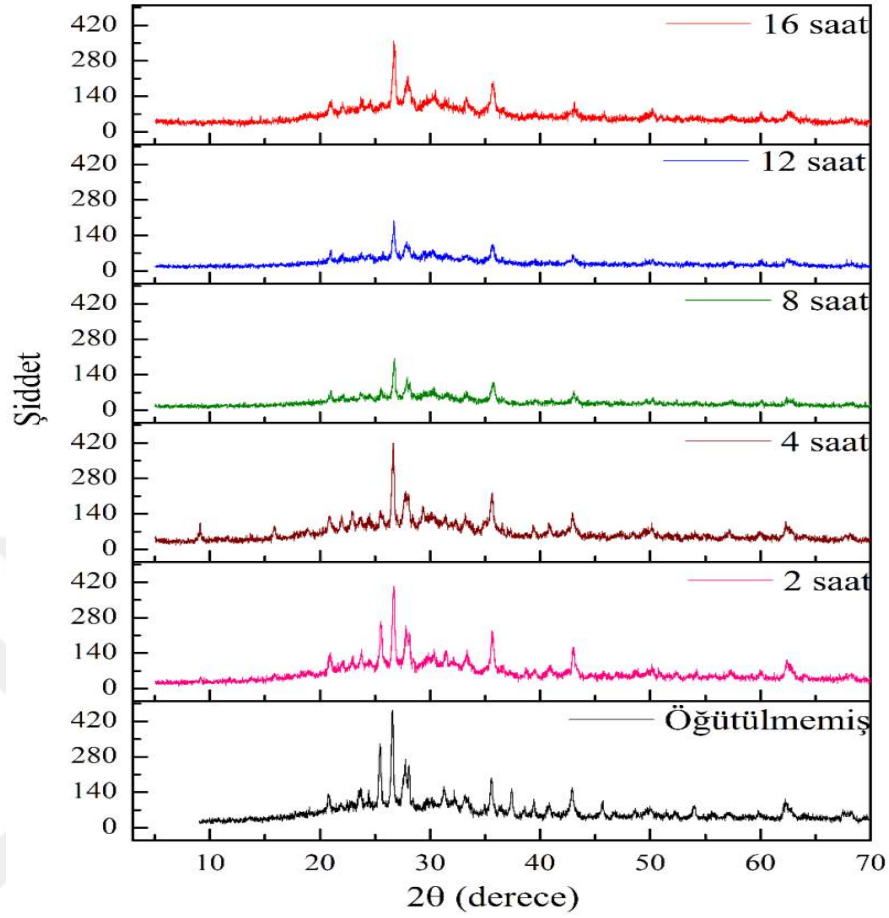
Şekil 6.3. Farklı sürelerde öğütülen UK parçacıklarına ait PSD eğrileri

Tablo 6.3. Farklı öğütme sürelerinde öğütülen uçucu külün parçacık boyut dağılımındaki ve özgül yüzey alanındaki değişimler

Öğütme Süresi	D(10) (μm)	D(50) (μm)	D(90) (μm)	Özgül Yüzey Alanı (g/m^2)
Öğütülmemiş	0,603	9,35	43,40	0,183
2 sa	0,650	5,51	13,90	0,218
4 sa	0,592	4,05	15,90	0,252
8 sa	0,472	2,75	17,30	0,194
12 sa	0,423	1,21	16,50	0,328
16 sa	0,465	1,38	22,70	0,231

6.2.2. Öğütülmüş numunelerin mineralojik analizi

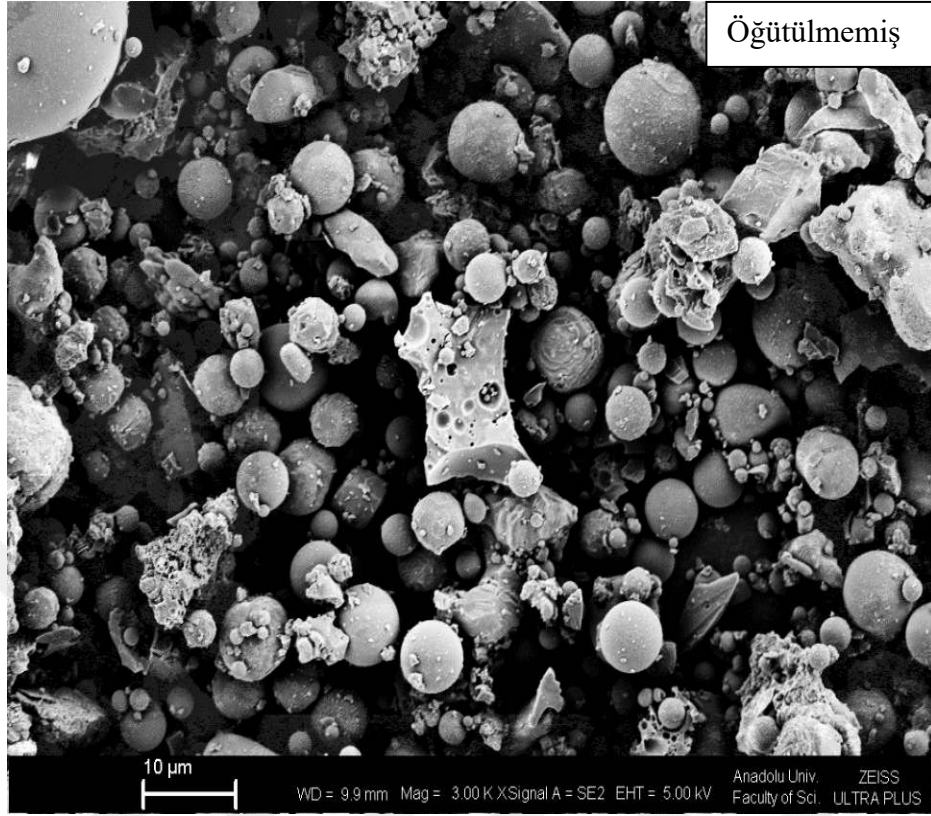
Farklı zamanlarda öğütülmüş uçucu külün XRD desenleri Şekil 6.4’de verilmiştir. Uçucu külün öğütülmesinden önce ve sonra piklerin değişmediği sonucuna varılmıştır. Buradaki en önemli bulgu, öğütme işleminden sonra uçucu külde yeni bir kristal fazın ortaya çıkmamasıdır. Bu nedenle, numunelerin öğütülmesi nedeniyle mineral bileşiminin değişmediği açıktır. Bununla birlikte, bazı öğütme sürelerinde birkaç tepe noktasının genişliğinde ve yüksekliğinde önemli farklılıklar gözlenmiştir. Bazı piklerin şiddeti, öğütme süresi 4 ila 12 saat arasında arttıkça azalmıştır. Ancak 4 saatlik öğütmeden sonra $2\theta=9,2^\circ$ ’deki pik daha da şiddetlenmiştir. 4 ve 8 saatlik öğütme işleminde, anhidrite ait kırınım piklerinin yoğunluğu, özellikle $2\theta = 25,40^\circ$ ’deki pik, azalmıştır. 12 ve 16 saatlik öğütme için bile, bu pikler neredeyse kaybolmuştur. Bu, özellikle kuvars ve mullit fazlarında 8 ve 12 saatlik öğütme süresi için de geçerlidir. Sonuçlar, öğütme işleminin kristal düzlemlerin tercihli yönelimi ile sonuçlandığını ve bunlara karşılık gelen Ca içeren amorf yapıların miktarının azaldığını, dolayısıyla puzolanik aktiviteye yol açtığını göstermiştir (Duan vd., 2018).



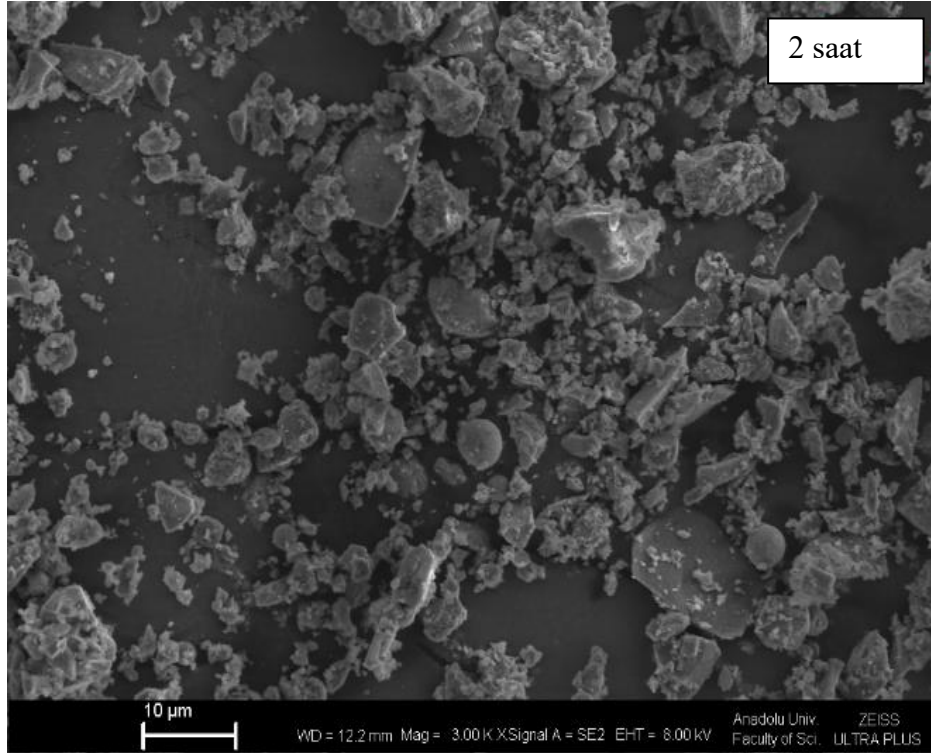
Şekil 6.4. UK ve öğütülmüş UK'ün beş farklı öğütme süresine ait XRD desenleri

6.2.3. Öğütülmüş numunelerin mikroyapısal (SEM) analizi

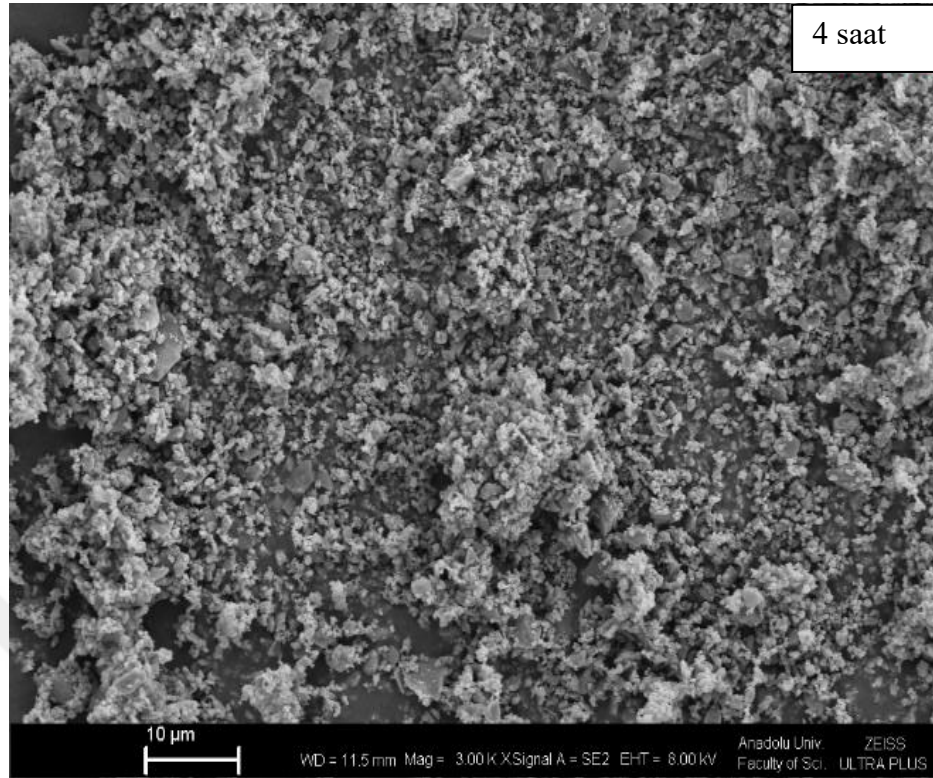
Öğütülmemiş ve 2, 4, 8, 12 ve 16 saat öğütülmüş uçucu kül tanelerinin SEM görüntüleri Görsel 6.3. a – f'de verilmiştir. Öğütme işleminin morfolojiyi önemli ölçüde değiştirdiği ve öğütme süresi olarak parçacık boyutu küçülür. SEM görüntülerinden küçük boyuttaki uçucu kül taneleri küresel halde kalır, ancak büyük boyuttaki uçucu kül taneleri küçük parçacıklar halinde ezilir ve artık küresel durumda değildirler. Kenosferlerin and perosfer formdaki küresel tanelerin çatlaması sonucunda kabuk şeklinde parçalar ve diğer kısımlarının parçalanmış ve oldukça düzensiz şekiller oluşturduğu görülmektedir. Parçacıkların şekli, öğütme ve aglomerasyon nedeniyle küreselden küresel olmayana değişmiş, özellikle Görsel 6.3-f 'de 20-30 µm'lik aglomeratlarda 3 µm'den küçük ince parçacıkların da gözlendiği görülmektedir. Daha küçük çaplı parçacıkların daha büyük bir kütle oluşturmak için topaklanma eğiliminde oldukları fark edilebilir.



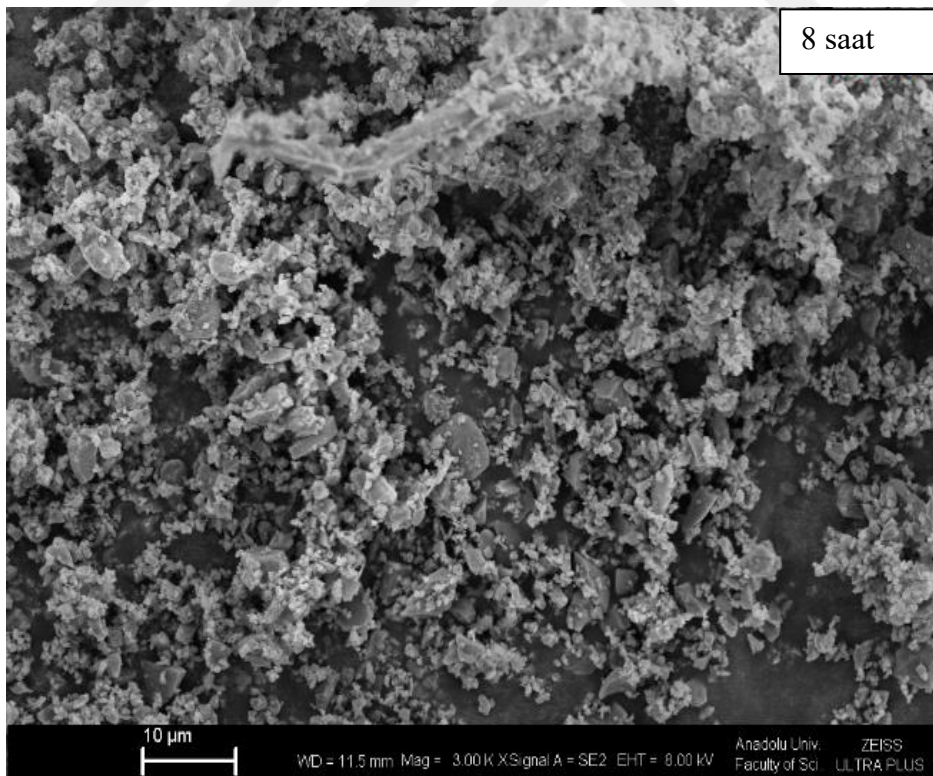
(a)



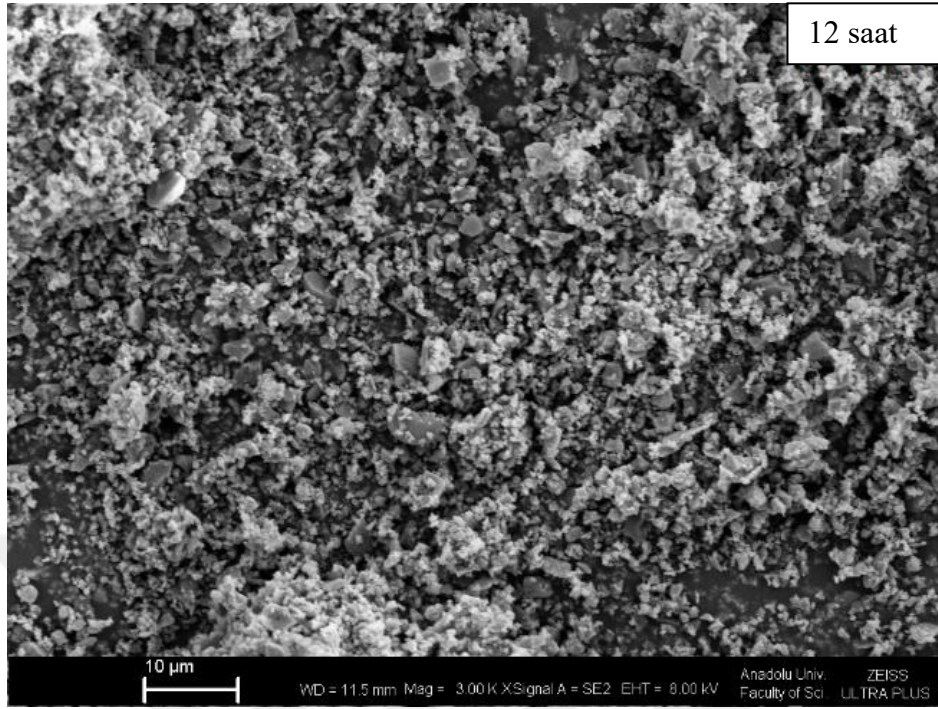
(b)



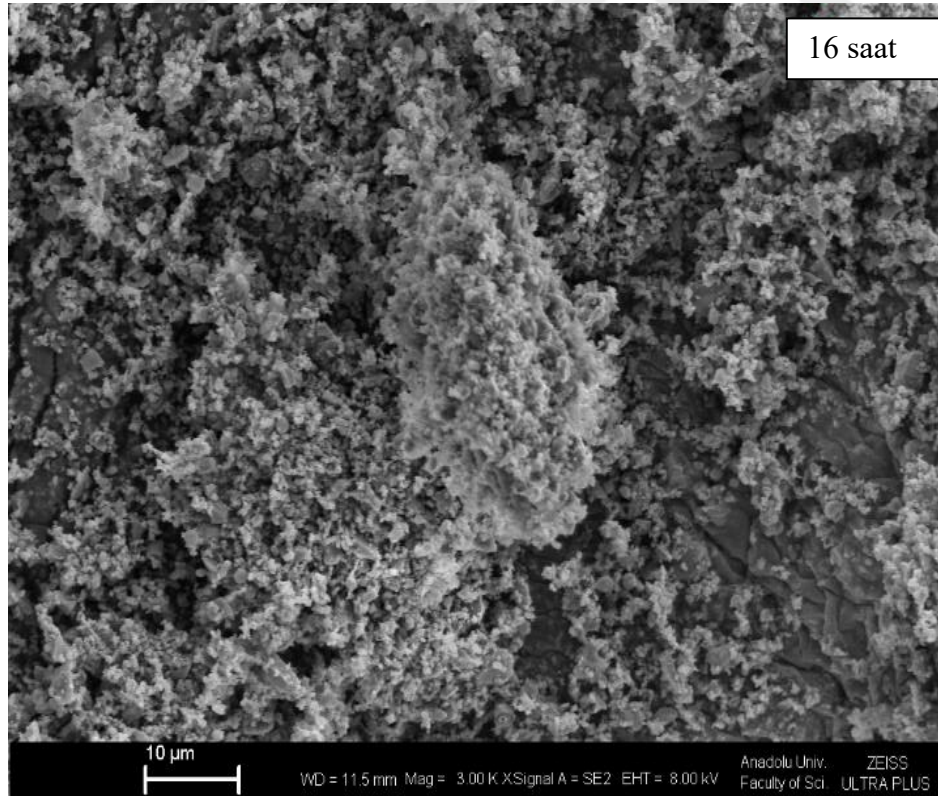
(c)



(d)



(e)



(f)

Görsel 6.3. Öğütülmemiş UK ve UK'ün beş farklı öğütme süresine ait SEM görüntüleri (a) Öğütülmemiş (3 K ×) (b) 2 saat (3 K ×) (c) 4 saat (3 K ×) (d) 8 saat (3 K ×) (e) 12 saat (3 K ×) (f) 16 saat (3 K ×)

6.3.Sinterlenmiş Numunelerinin Karakterizasyonu

6.3.1. Mekanik özellikler

UK, UK/BOF cürufu karışımları ve BOF cürufunun farklı öğütme süreleri, sıcaklık ve karışım oranlarına göre basınç dayanım testleri Tablo 6.4’de verilmiştir. Sadece UK’ün 2, 4, 8, 12 ve 16 saat öğütülmesi sonucunda 950 °C, 1000 °C, 1050 °C ve 1100 °C’de sinterlenmesi sonucunda elde edilen sinterlenmiş gövdelerin basınç dayanım test sonuçları 4,56 MPa ile 69,36 MPa aralığında değişmektedir. UK ve BOF cürufu karışımlarının 2, 4, 8, 12 ve 16 saat öğütülmesi sonucunda 950 °C, 1000 °C, 1050 °C ve 1100 °C’de sinterlenmesi sonucunda elde edilen sinterlenmiş gövdelerin basınç dayanım test sonuçları ise 9,77 MPa ile 83,95 MPa aralığında bir değişim göstermektedir.

Basınç dayanım testleri sonucunda mukavemet değerleri 4,56 ila 83,95 MPa aralığının da değişim gösterdiği sonucuna varıldı.

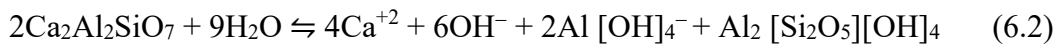
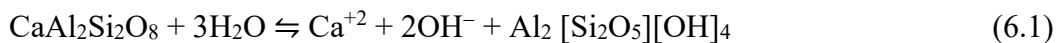
Tablo 6.4. UK, UK/BOF cürufu karışımları ve BOF cürufunun farklı öğütme süreleri, sıcaklık ve karışım oranlarına göre basınç dayanım testleri

Numune Kodu	Öğütme Süresi ve Sıcaklığı	Karışım Oranları	Basınç Dayanım Değerleri (MPa)
A1	2 sa/950°C	1/1UK	4,56
A2	4 sa/950°C	1/1UK	56,73
A3	8 sa/950°C	1/1UK	27,88
A4	12 sa/950°C	1/1UK	76,09
A5	16 sa/950°C	1/1UK	10,39
B1	2 sa/1000°C	1/1UK	25,89
B2	4 sa/1000°C	1/1UK	32,28
B3	8 sa/1000°C	1/1UK	34,63
B4	12 sa/1000°C	1/1UK	43,57
B5	16 sa/1000°C	1/1UK	46,04
C1	2 sa/1050°C	1/1UK	39,58
C2	4 sa/1050°C	1/1UK	56,83
C3	8 sa/1050°C	1/1UK	56,43
C4	12 sa/1050°C	1/1UK	69,36
C5	16 sa/1050°C	1/1UK	48,72
D1	2 sa/1100°C	1/1UK	14,58
D2	4 sa/1100°C	1/1UK	35,25
D3	8 sa/1100°C	1/1UK	10,34

D4	12 sa/1100°C	1/1UK	21,55
D5	16 sa/1100°C	1/1UK	26,38
E1	8 sa/950°C	1/2UK+1/2BOF cürufu	35,85
E2	8 sa/1000°C	1/2UK+1/2BOF cürufu	42,97
E3	8 sa/1050°C	1/2UK+1/2 BOF cürufu	12,78
E4	8 sa/1100°C	1/2UK+1/2 BOF cürufu	9,77
F1	8 sa/950°C	1/3UK+2/3 BOF cürufu	10,66
F2	8 sa/1000°C	1/3UK+2/3 BOF cürufu	13,48
F3	8 sa/1050°C	1/3UK+2/3 BOF cürufu	12,93
F4	8 sa/1100°C	1/3UK+2/3 BOF cürufu	13,57
G1	8 sa/950°C	2/3UK+1/3 BOF cürufu	30,48
G2	8 sa/1000°C	2/3UK+1/3 BOF cürufu	29,25
G3	8 sa/1050°C	2/3UK+1/3 BOF cürufu	83,95
G4	8 sa/1100°C	2/3UK+1/3 BOF cürufu	54,27
H1	8 sa/950°C	1/1 BOF cürufu	12,24

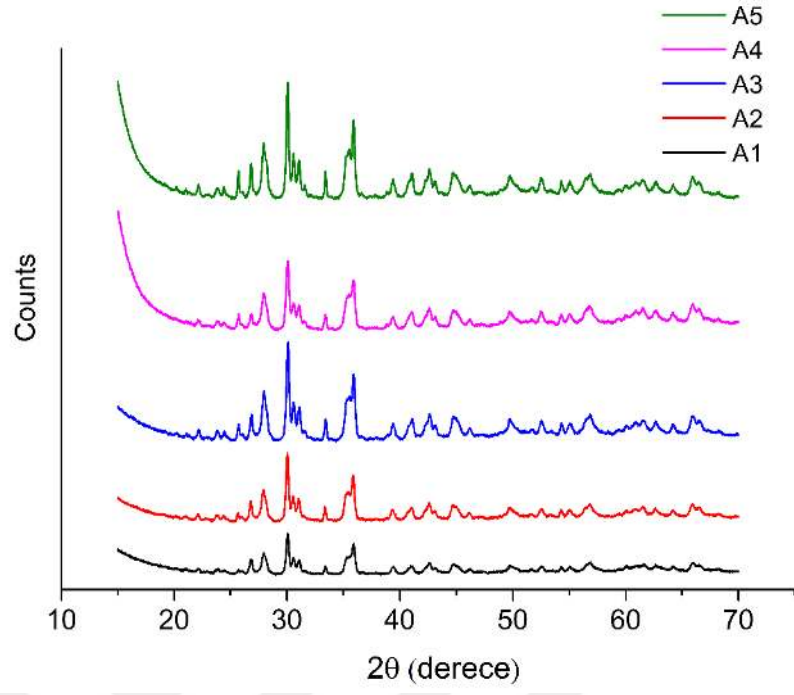
6.3.2. Mineralojik özellikler

UK, UK/BOF cürufu karışımı ve BOF cürufünün 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra üretilen cam seramik numunelerinin XRD desenleri Şekil 6. 8-12'de verilmiştir. Şekil 6.5'de 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenlerinden UK'ün anortit bileşenine ait pikler kaybolmuştur. Sinterleme sıcaklığı ve 8 saate kadar artan öğütme süresiyle, kristal yapıdaki hasarları göstermesi ve amorf faz miktarının artması nedeniyle kuvars pik şiddetleri azalmıştır. Ancak, sinterleme işleminde katı hal reaksiyonlarından oluşan ana kristal fazlar olarak gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) ve vollastonit (CaSiO_3) gözlenmektedir. Literatür bilgilerine göre, sinterlenme işleminin Na ve K gibi safsızlıkların varlığının, anortitin kristal yapı stabilitesini azalttığı öne sürülmüştür. Sonuç olarak, çalışmada, denklemlerde gösterildiği gibi anortit ve gehlenitin bir kısmı uyumsuz olarak çözülebilir [Eş. (6.1) ve (6.2)]. Ek olarak, mevcut kireç ve su arasındaki reaksiyon, Denklem 6.3'de gösterildiği gibi daha fazla Ca^{+2} ve OH^- salımına da yol açmıştır. Bu nedenle bu kristal fazların varlığı, hazırlanan seramzitlerden Ca^{2+} ve OH^- salınımını sağlamıştır (Walder, 1949).

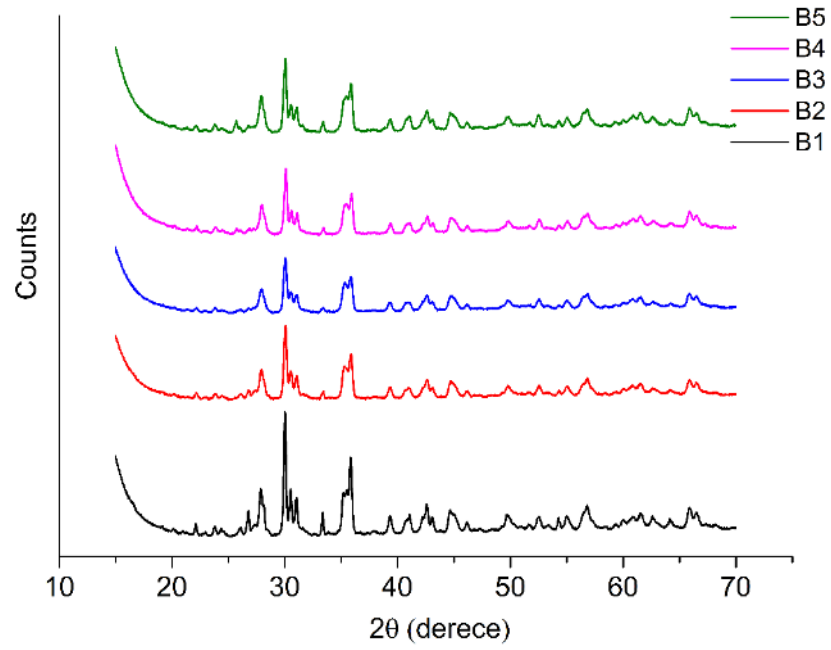




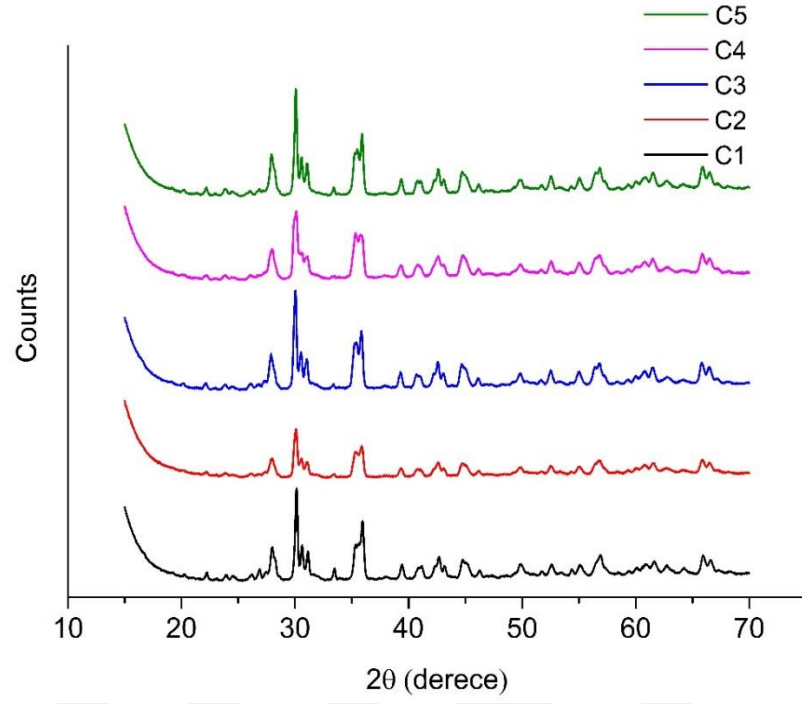
Şekil 6. 9’da 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C’de sinterlenen ½ oranında UK ile ½ oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri verilmiştir. Burada, 1050°C ve 1100°C’de hematit ve volastonit gibi yeni fazlar ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, portlandit $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, kalsit $[\text{CaCO}_3]$ ve mervenit $[\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2]$ fazlarındaki CaO ve MgO’nun açığa çıkması sonucunda, Ca ve Mg’nin yeni mineral fazlarına, özellikle hematit, volastonit ve diopsid gibi yüksek sıcaklık silikatlarında dahil edilmeleri ve erime sürecini engelleme eğiliminde olmasıdır (Samal 2015). Şekil 6.10’de 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C’de sinterlenen 1/3 oranında UK ile 2/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri görülmektedir. Burada 1050°C ve 1100°C’de sinterlenme işlemine tabi tutulmuş numunelerin 950° ve 1000°C’de sinterlenen numunelere göre daha fazla kristallenme gösterdiği görülmektedir. Şekil 6.11’de ise 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C ve 1100°C’de sinterlenen 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri verilmiştir. Bu XRD desenleri, 1/3 oranında UK ile 2/3 oranında BOF cürufu karışımlarının 1050°C ve 1100°C’de sinterlenmesi sonucunda elde edilen XRD desenlerine benzerlik göstermektedir.



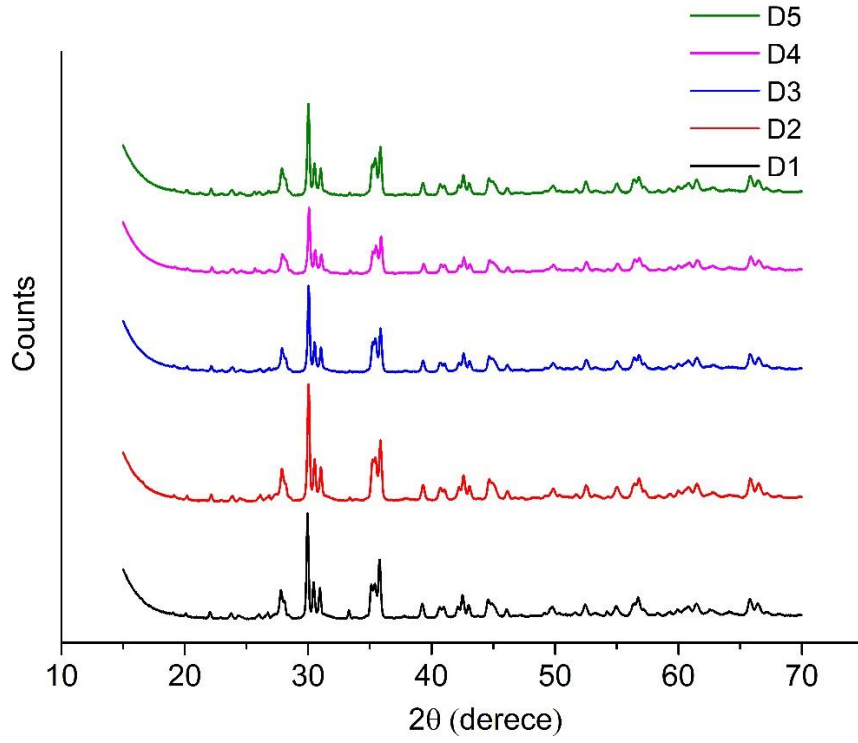
Şekil 6.5. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri



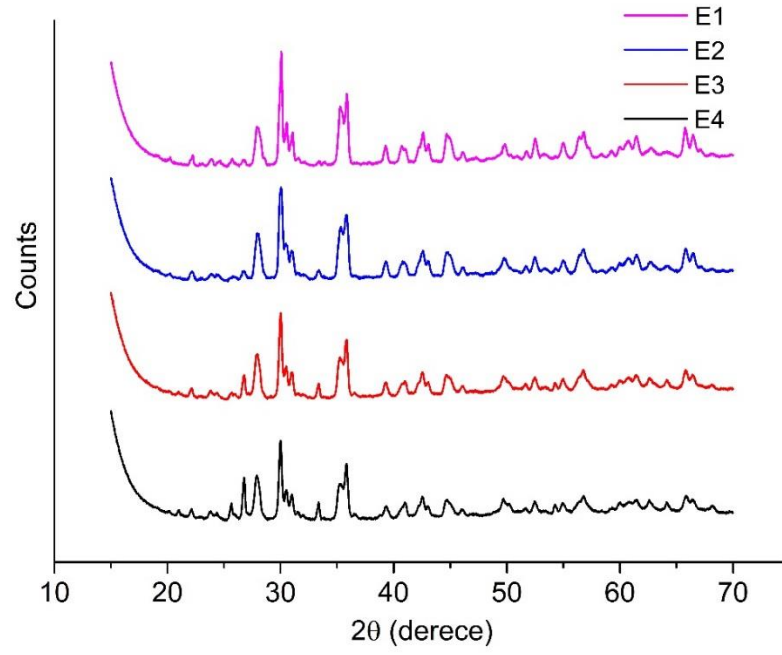
Şekil 6.6. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 1000°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri



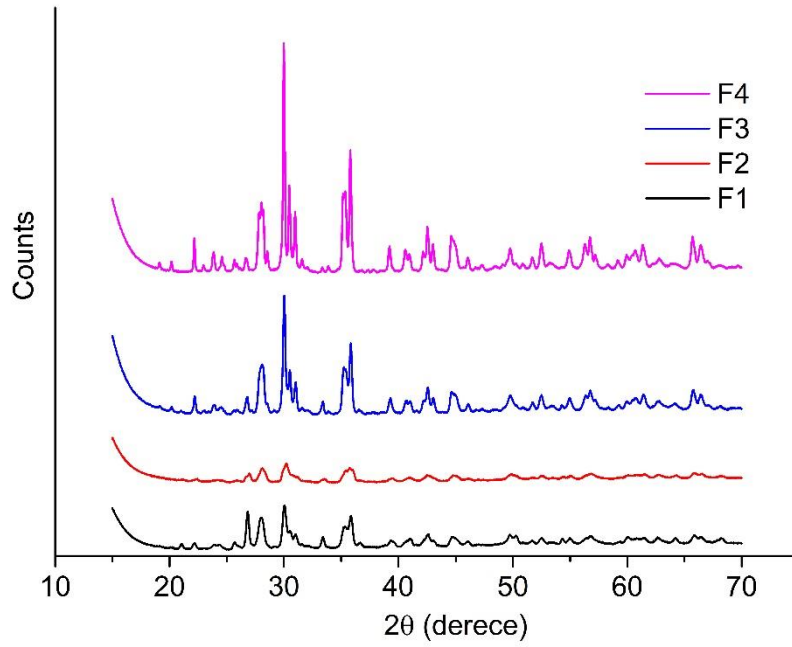
Şekil 6.7. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 1050°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri



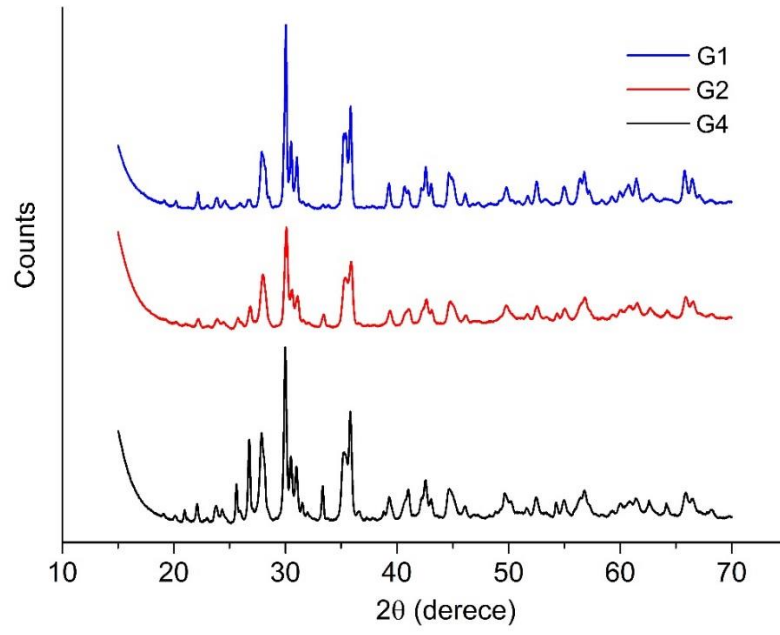
Şekil 6.8. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 1100°C'de sinterlenen UK'ün XRD desenleri



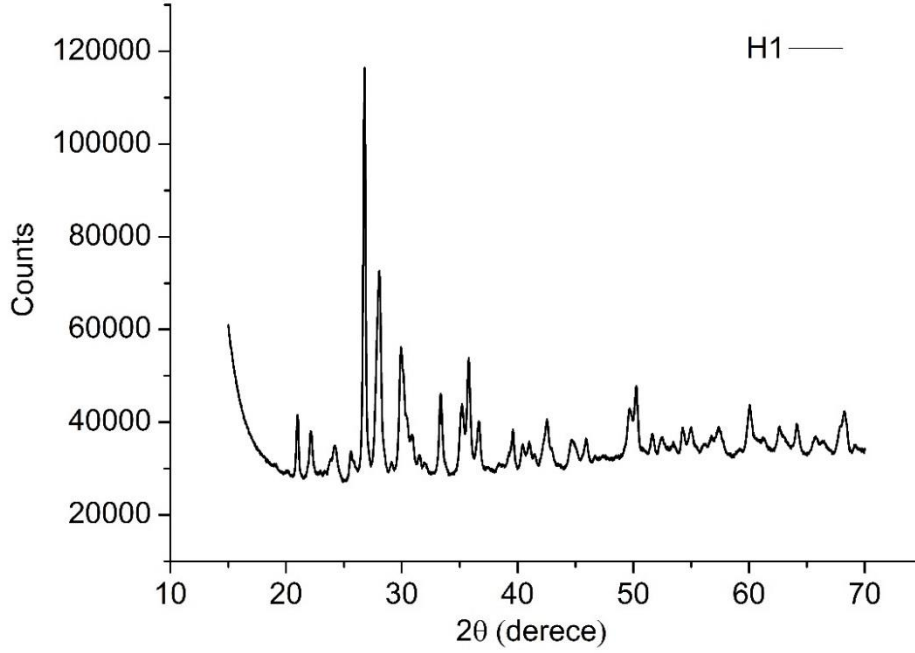
Şekil 6.9. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C’de sinterlenen 1/2 oranında UK ile 1/2 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri



Şekil 6.10. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C, 1050°C ve 1100°C’de sinterlenen 1/3 oranında UK ile 2/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri



Şekil 6.11. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C ve 1100°C’de sinterlenen 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri



Şekil 6.12. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950°C’de sinterlenen BOF cürufunun XRD deseni

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1.Sonuç ve Tartışma

- Uçucu külün kimyasal ve mineralojik bileşimleri kömürün doğasına, yanma koşullarına ve emisyon kontrol cihazlarının tipine bağlı olarak değişiklik gösterir. Çayırhan Termik Santralinden getirilen uçucu külün kimyasal analizinden elde edilen sonuçlar ASTM C-618 standardına göre değerlendirildiğinde, uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı %65,69 olduğu görülmektedir. Bu değerin %50'nin üzerinde olması durumunda uçucu kül C sınıfı kül olarak sınıflandırılır. Aynı zamanda kireç (CaO) miktarı %10'un üzerindedir. Bu tür küller yüksek kireç içeren kireçsi kül sınıfına dâhil edilmektedir. Linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen C-sınıfı küller hem puzolan özelliğine hem de bağlayıcı özelliğe sahiptir. Çayırhan UK, ASTM C618 ve TS 639'daki $\text{S} + \text{A} + \text{F} > 50$ koşulunu sağlamaktadır. Buna göre, bu Çayırhan uçucu külünün her iki uçucu kül sınıfı içinde sınırda olduğu düşünülmüştür. Termik santralin işletim parametreleri, yakılan kömürün cinsi ve kompozisyonu, kömürün pulverize derecesi, yakma kazanının türü ve yakma sıcaklığı gibi çeşitli unsurlar uçucu külün kimyasal içeriğini etkilemektedir. Ayrıca Erdemir Demir-Çelik Fabrikası'nın cüruf sahalarından sağlanan BOF cürufunun kimyasal analiz sonucuna göre, BOF cürufundaki ana oksitler CaO , FeO ve SiO_2 'dir. Diğer oksitler ise Fe_2O_3 , MgO ve MnO 'dir. Toplam demir oksit içeriği ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) %26,6'dır. CaO ve MgO içeriği yaklaşık % 52'dir.

- C-sınıfı Çayırhan UK numunesi öğütülmeden önce, X-ışını difraktogramında yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu küllere karşılık gelen tipik pikler mevcuttur. XRD analizinin sonuçlarına göre, anhidrit (CaSO_4) ve kuvars (SiO_2) ana fazlarına mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ve hematit (Fe_2O_3) gibi diğer fazlar eşlik etmektedir. BOF cürufunun XRD desenleri ise, numunedeki mevcut minerallerin çeşitliliği nedeniyle birçok üst üste binen piklerin olduğunu göstermektedir. Portlandit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], BOF cürufunda bulunan ana kristal fazlardır. CaCO_3 ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin tanımlanması, BOF cürufunda hidrasyon aktif minerallerin varlığına işaret etmektedir.

- Deneysel çalışmalarda kullanılan C sınıfı Çayırhan UK tanelerinin SEM görüntülerinden genelde farklı çaplarda küresel bir morfolojiye sahip olduğu ve bu küresel parçacıkların çoğunluğunun 20 μm 'den daha küçük çapa sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç, UK tane boyutu dağılımı ile uyum göstermiştir. Uçucu külün PSD analizine göre parçacık çapı yaklaşık olarak 3 ile 55 μm arasında değişir, ortalama parçacık boyutu yaklaşık $D(50)=16,8 \mu\text{m}$ 'dir. BOF cürufunun SEM görüntüsü

incelendiğinde, BOF cüruf parçacıklarının heterojen olduğu ve düzensiz şekil ve boyutlara sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, BOF cürufunun SEM görüntülerine göre kalker ve bazalt agregasına benzer doku ve morfoloji göstermiştir.

- C sınıfı UK'ün 2, 4, 8, 12 ve 16'şar saat öğütme işlemleri sonucunda elde edilen öğütülmüş numunelerin parçacık boyutu dağılımı incelendiğinde, geniş çaplı bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Bu da, numunenin parçacık boyut dağılımının ölçümünü zorlaştırmıştır. Benzer şekilde UK/BOF cürufu karışımlarının da çok geniş çaplı bir dağılıma sahip olması nedeniyle analiz işlemi gerçekleştirilememiştir. Bunun sebebi, BOF cürufunun içerdiği yüksek oranda CaO'in ölçüm sürecinde su ile tepkimeye girmesi olabilir. Uçucu külün medyan tane çapı D(50) öğütme sonucunda 9,35 μm 'den 1,21 μm 'ye düşerek 8,14 μm azalmıştır. En küçük medyan çap (D50) değerine 12 saat süreyle öğütülen numune sahiptir. Öğütme işleminin uçucu külün parçacık boyutu dağılımında önemli bir rol oynadığını, ancak bu çap dağılımının 16 saatlik öğütme süresinde tekrar arttığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar SEM görüntüleri ile de uyumludur. Öğütme işlemi daha büyük değerlerde özgül yüzey alanının oluşmasına yol açar. Ancak, genellikle uzun süreli öğütmelerde karşılaşılan aglomerasyon (öğütme sırasında çeşitli etkilere parçacıkların topaklanması) puzolanik özelliği ters yönde etkiler. Öğütme süresindeki artış sonucunda aglomerasyon, tane büyüklüğünün azalmasına neden olur.

- Farklı zamanlarda öğütülmüş uçucu külün XRD desenleri incelendiğinde, en önemli bulgunun öğütme işleminden sonra uçucu külde yeni bir kristal fazın ortaya çıkmamasıdır. Numunelerin öğütülmesi nedeniyle mineral bileşiminin değişmediği açıktır. Ancak, bazı öğütme sürelerinde birkaç pikin genişliğinde ve yüksekliğinde önemli farklılıklar gözlenmiştir. Bazı piklerin şiddeti, öğütme süresi 4 ila 12 saat arasında arttıkça azalmıştır. Ancak, 4 saatlik öğütmeden sonra $2\theta=9,2^\circ$ 'deki pik daha da şiddetlenmiştir. 4 ve 8 saatlik öğütme işleminde, anhidrit ait kırınım piklerinin yoğunluğu, özellikle $2\theta = 25,40^\circ$ 'deki pik azalmıştır. 12 ve 16 saatlik öğütmede bu pikler neredeyse kaybolmuştur. Bu, özellikle kuvars ve mullit fazlarında 8 ve 12 saatlik öğütme süresi için de geçerlidir. Sonuçlar, öğütme işleminin kristal düzlemlerin tercihli yönelimi ile sonuçlandığını ve bunlara karşılık gelen kalsiyum içeren amorf yapıların miktarının azaldığını, bunun da puzolanik aktiviteden kaynaklandığını göstermiştir.

- Öğütülmemiş ve 2, 4, 8, 12 ve 16 saat öğütülmüş uçucu kül tanelerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, öğütme işleminin uçucu külün morfolojisini önemli ölçüde değiştirdiği ve öğütme süresi ile tane boyutunun küçüldüğü görülmüştür. SEM

görüntülerinden küçük boyuttaki uçucu kül taneleri küresel halde kalır, ancak büyük boyuttaki uçucu kül taneleri küçük parçacıklar halinde ezilir ve artık küresel durumda değildirler. Parçacıkların şekli, öğütme ve aglomerasyon nedeniyle küreselden küresel olmayana değişmiş, özellikle de 16 saatlik öğütme işleminden sonra, 20-30 μm 'lik aglomeralar dışında 3 μm 'den daha küçük ince tanelerin de bulunduğu görülmüştür. Ayrıca, 12 ve 16 saatlik öğütme işlemi sonunda, çok küçük çaplı parçacıkların daha büyük bir kütle oluşturmak için topaklanma eğiliminde oldukları görülmüştür.

- Basınç dayanım testleri sonucunda mukavemet değerleri 4,56 ila 83,95 MPa aralığında değişim gösterdiği sonucuna varıldı. 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımının 8 saat öğütülmesi ve 1050 °C'de sinterlenmesi sonucunda en yüksek mukavemet değeri elde edildi. Kilden üretilmiş geleneksel tuğlaların TS 705'e göre basınç dayanımları min. 5 MPa olması gerektiği bilinmektedir. Bu durumda 2 saat öğütme süresi sonunda 950 °C'de sinterlenmiş UK numunesi bu değer altında kalmıştır.

- UK, UK/BOF cürufu karışımı ve BOF cürufünün 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 950 °C, 1000 °C, 1050 °C ve 1100 °C'de sinterlenmesi sonucunda öğütülmüş numunelerde mevcut olan kristal fazların yanısıra spinel (MgAl_2O_4), gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), vollastonit (CaSiO_3) ve spinel (MgAl_2O_4) pikleri de gözlemlenmiştir. 2, 4, 8, 12 ve 16 saatlik öğütme işleminden sonra 950 °C'de sinterlenen UK'ün XRD desenlerinden UK'ün anortit bileşenine ait piklerin kaybolduğu görülmüştür. Ayrıca, sinterleme sıcaklığının artması ve 8 saate kadar artan öğütme süresiyle, kristal yapıdaki hasarları göstermesi ve amorf faz miktarının artması nedeniyle kuvars pik şiddetleri azalmıştır. Ancak, sinterleme işleminde katı hal reaksiyonlarından oluşan ana kristal fazlar olarak gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) ve vollastonit (CaSiO_3) gözlenmektedir. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 1/2 oranında UK ile 1/2 oranında BOF cürufu karışımlarının sinterlenmesi sonucunda 1050°C ve 1100°C'de hematit ve vollastonit gibi yeni fazlar ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, portlandit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], kalsit (CaCO_3) ve mervenit [$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$] fazlarındaki CaO ve MgO'nun açığa çıkması sonucunda, Ca ve Mg'nin yeni mineral fazlarına, özellikle hematit, volastonit ve diopsid gibi yüksek sıcaklık silikatlarında dâhil edilmeleri ve erime sürecini engelleme eğiliminde olmasıdır. 8 saatlik öğütme işleminden sonra 950 °C, 1000 °C, 1050 °C ve 1100°C'de sinterlenen 1/3 oranında UK ile 2/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenlerinden, 1050°C ve 1100°C'de sinterlenme işlemine tabi tutulmuş numunelerin 950° ve 1000°C'de sinterlenen numunelere göre daha fazla kristallenme gösterdiği görülmektedir. 8 saatlik

öğütme işleminden sonra 950°C, 1000°C ve 1100°C’de sinterlenen 2/3 oranında UK ile 1/3 oranında BOF cürufu karışımlarının XRD desenleri 1/3 oranında UK ile 2/3 oranında BOF cürufu karışımlarının 1050°C ve 1100°C’de sinterlenmesi sonucunda elde edilen XRD desenlerine benzerlik göstermektedir. Ayrıca, hematit, gehlenit, volastonit ve diopsid gibi yeni fazlar, sinterleme sırasında çelikhane cürufu ile uçucu kül arasındaki farklı kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak ortaya çıkar. Camsı faz, sinterleme işlemi sırasında kuvarsın kısmi çözünmesi ve diğer küçük fazların birleşimi nedeniyle oluşur. Öğütme süresinin artması, kuvarsın kısmi çözünmesini azaltır ve bu nedenle amorf faz miktarı artar. Seramik gövdeler çelikhane cürufu ve uçucu kül karışımlarında sinterleme sıcaklıklarında gelişen silikat fazlarıdır.

7.2.Öneriler

- Yapılan tez çalışması neticesinde, endüstriyel atık olan uçucu kül ve çelikhane cürufunun yapı malzemelerinde kullanılabileceği, ancak daha detaylı laboratuvar araştırmaları yapılarak ilave testlerle geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıntılı karakterizasyon ve mikroyapının daha detaylı olarak araştırılması, gelecekte malzeme üretimi için malzemelerin sinterleme aşamasında işleme olanaklarına yol gösterir. Böylelikle çevre kirliliğinin ve geri dönüşümün önem kazandığı bir dönemde, çelikhane cürufu ve uçucu kül gibi bir endüstriyel atıklar kullanılabilir hale gelecektir.
- Çelikhane cürufunun ve uçucu külün yapı malzemelerinde kullanılabilirliğin araştırılması, mevcut kaynakların verimli kullanılmasına katkı getirecektir. Ayrıca, ülkemizin içinde bulunduğu sosyo ekonomik koşullar altında enerji ve konut açıklarının meydana getirdiği sorunlara da bir ölçüde katkıda bulunabileceklerdir.
- Atık malzemelerin stoklanması için oluşturulan sahalar azalacaktır.
- Endüstriyel atıkların kullanımı, çeşitli yapı malzemelerinin üretimi için harcanan; taş ocaklarının kamulaştırılması, ocaklarda yapılan patlatma gibi yüksek maliyetli işler, ithalatını yaptığımız petrol ürünleriyle çalışan iş makinelerinin kullanımının azalması gibi sonuçlara sebep olarak ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.
- Termik santrallere yakın bölgelerde kullanılabilecek olan uçucu küller sayesinde, yapı malzemelerinin tedariki için maliyette ciddi anlamda düşüşler

gözlemlenecektir. Uzak bölgeler için ise taşıma maliyet analizi yapılarak olabilirliği tartışılmalıdır.

- Sonuç olarak, her iki endüstriyel atık malzemenin seramik, cam seramik, tuğla gibi sektörlerde kullanımı ile ülke ekonomisine yüksek katma değerler getireceği öngörülmüştür.



KAYNAKÇA

- Alanyalı, H., Çöl, M., Yılmaz, M., Karagöz, Ş. (2006). Application of magnetic separation to steelmaking slags for reclamation. *Waste Manag.*, 26(10), 1133–1139.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 36, 327–363.
- Ahmedzade P., Şengöz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *J. of Hazard. Mater.*, 165, 300-305.
- Alataş, T., Somunkıran, E. ve Ahmedzade, P. (2006). Ereğli demir çelik fabrikası cürufunun asfalt betonunda agrega olarak kullanılması, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimi Dergisi*, 18(2), 225–234.
- Ateşer, H.O. (2010). *Amorf Silika Seramiklerin Andaluzit Katkısıyla Sinterlenme ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aytekin, S. (2009). *Uçucu küllerinin killi zeminlerin ıslahında kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ayvacıklı, M. (2011). *Nadir Toprak elementleri ile Katkılandırılmış Seramik Fosforların Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barbieri, L., Lancellotti, I. ve Manfredini, T. (1999). Design, Obtainment and Properties of Glasses and Glass-Ceramics from Coal Fly Ash, *Fuel*, 78(2), 271–276.
- Barker, K.J., Paules, J.R., Rymarchyk, N., Jancosko, R.M. (1998). Oxygen Steelmaking Furnace Mechanical Description and Maintenance Considerations. Steel and Refining Volume. Chapter 8. pp. 431–524.
- Barsoum, M.W. (2003). *Fundamentals of Ceramics*. New York: Taylor&Francis Group.
- Blissett, R.S. ve Rowson N.A. (2012). A review of the multi-component utilization of coal fly ash, *Fuel*, 97, 1-23.
- Bölükbaşı, O. ve Tufan, B. (2014). Steelmaking slag beneficiation by magnetic separator and impacts on sinter quality. *Sci. Sinter.*, 46(3), 331-344.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. D. (2015). (Ed.: K. Genel), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Nobel Akademik Yayıncılık, (ISBN: 978-605-133-418-9).
- Coudurier, L., Hopkins, D. ve Wilkomirsky, I. (1978). *Fundamentals of Metallurgical Processes*. Pergamon Press Ltd., Oxford.

- Çelik, M. H., Aruntaş, Y.H. ve Baran, Y. (2003). Seyitömer ve Çayırhan Uçucu Küllerinin Portland Çimentosu-Uçucu Kül (Pç-Uk) Hamurunun Priz Başlama ve Sonu Sürelerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 6 (1), 397-409.
- Çicek, T. & Tanrıverdi, M. (2007). Lime based steam autoclaved fly ash bricks, *Contr Build Mater.* (21), 1295-1300.
- Çinçin, Y. (2015). *Linyit Yakan Termik Santral Uçucu Küllerinden Kireç Katkısı ile Hafif Tuğla Üretiminin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Delikurt B. C. ve Sevim U. K. (2015). Sugözü Uçucu Külünün Betonun Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi, *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, 4(1), 47-58.
- Dietz, S. (2014). Zero Waste Initiatives a Boon for the Scrap Metal Industry, Thermo Fisher Scientific.
- Dikmen, S., Dikmen, Z., Yılmaz, G., Fırat, S. (2017). Effect of Particle Size Distribution on the Sintering Behaviour of Fly Ash, Red Mud and Fly Ash-Red Mud Mixture, *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium, Lecture Notes in Civil Engineering*.
- Duan S, Liao H, Ma Z, Cheng F, Fang L, Gao H, Yang H.(2018). The relevance of ultrafine fly ash properties and mechanical properties in its fly ash-cement gelation blocks via static pressure forming. *Constr Build Mater.* (186), 1064-1071.
- Donga, Q., Wangb, G., Chenc, X., Tand, J., Gu, X. (2021). Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview, *Journal of Cleaner Production*, 124447.
- Eroğan, İ. (2019). *Termik Santral Uçucu Küllerinin Seramik Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ersoy, B., Kavas, T., Evcin, A., Baspınar, S., Sarıışık, A., Once, G. (2008). The effect of BaCO₃ addition on the sintering behavior of lignite coal fly ash, *Fuel*, 87, 2563-2571.
- Fırat, S., Dikmen, S., Yılmaz, G, Khatib, J.M. (2020). Characteristics of Engineered Waste Materials Used for Road Subbase Layers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(9), 2643-2656, 1-14.
- Garside, J.E. (1957). *Process and Physical Metallurgy*. Griffin, 76-79.

- Gautier, M., Poirier, J., Bodéan, F., Franceschini, G., Véron, E. (2013). Basic oxygen furnace (BOF) slag cooling: laboratory characteristics and prediction calculations. *Int. J. Miner. Process.* Elsevier, 123, 94-101.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar M. S. ve Demir, İ. (2008). Uçucu kül Bölüm I: Oluşumu, sınıflandırılması ve kullanım alanları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 85-94.
- Guo, H., Yin, S., Yu, Q., Yang, X., Huang, H., Yang, Y., Gao, F. (2018). Iron recovery and active residue production from basic oxygen furnace (BOF) slag for supplementary cementitious materials. *Resour. Conserv. Recy.*, 129, 209–218.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu Ü., Mordoğan, H. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, IMCET2005. İzmir, Dokuz Eylül Üniversitesi, 419–423.
- Hacıfazlıoğlu, H. (2009). İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 17-30.
- Horii, K., Tsutsumi, N., Kitano, Y., Kato, T., (2013). Processing and Reusing Technologies for Steelmaking Slag. Nippon Steel Technical Report. (Erişim: 9 Eylül 2018).
- Huaiwei, Z. ve Xin, H. (2011). An overview for the utilization of wastes from stainless steel industries, *Resour. Conserv. Recy.*, 55(8), 745–754.
- Iyer R.S. ve Scott J.A., (2001). Power station fly ash-a review of value-added utilization outside of the construction industry. *Resour. Conserv. Recy.*, 31(3), 217–228.
- Joulazadeh, M.H. ve Joulazadeh, F. (2010). Slag; value added steel industry byproducts. *Arch. Metal. Mater.*, 55(4), 1137–1145.
- Kabak, M. (2004). X-Işınları Kristalografisi. (1. Baskı). Bıçakçılar Yayınevi.
- Kang, S.J.L. (2005). Sintering, Densification, Grain Growth and Microstructure. Butterworth Heinemann Elsevier, England.
- Kaya, G., ve Turan, S. (2003). Yüksek Fırın Curufunun Seramik Sektöründe Katma Değeri Yüksek Ürünlerin Eldesinde Değerlendirilmesi, *Mühendis ve Makina*, 45(536), 48-60.
- Kıbar, H. (2009). *Cam Atık Katkılı Tuğla Üretiminin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı.

- Leonards, G.A., Bailey, B. (1982). Pulverized coal ash as structural fill, *J. Geotech. Eng.*, 108, 517–550.
- Liu, Q., Liu, J. ve Liqian, Q. (2016). Effects of temperature and carbonation curing on the mechanical properties of steel slag-cement binding materials, *Constr. Build. Mater.*, 124, 999-1006.
- Ma, N. ve Houser, J.B. (2014). Recycling of steelmaking slag fines by weak magnetic separation coupled with selective particle size screening. *J. Clean. Prod.*, 82, 221-231.
- Matino, I., Colla, V., Branca, T.A., Romaniello, L. (2017). Optimization of by-products reuse in the steel industry: valorization of secondary resources with a particular attention on their pelletization. *Waste Biomass Valorization*, 8(8), 2569–2581.
- Motz, H., Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Manage.*, 21(3), 285–293.
- Ranjbar N. ve Kuenzel C. (2017). Influence of preheating of fly ash precursors to produce geopolymers. *J. Am. Ceram. Soc.*, 100(7), 3165–3174.
- Řeháčková, L., Rosypalová, S., Dudek, R., Kukutschová, J., Dobrovská, J. (2015). Effect of CaO/SiO₂ ratio on viscosity and structure of slag. *Metalurgija*. 54(3), 455-458.
- Özer, S. Ç. (2015). *Bor Karbür-Tungsten Esaslı Kompozitlerin Spark Plazma sinterleme (sps) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pandey, V. C. and Singh, N. (2010). Impact of fly ash incorporation in soil systems, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 136, 16-27.
- Peters, T.J. and Waterman, R.H. (1982). In Search of Excellence: Lessons from America's Best-Run Companies. Harper & Row, New York.
- Sadique M, Al-Nageim H, Atherton W, Seton L, Dempster N. (2013). Mechano-chemical activation of high-Ca fly ash by cement free blending and gypsum aided grinding, *Constr. Build. Mater.*, 43, 480-489.
- Samal, S., Ray, A. K., Bandopadhyay, A. (2015) Characterization and microstructure mbservation of mintered red mud-fly ash mixture at various elevated temperature, *J. of Clean. Prod.*, 101, 368-376.
- Sarkar, R., Singh, N. and Das, S. K. (2010). Utilization of steel melting electric arc furnace slag for development of vitreous ceramic tiles, *Bull. Mater. Sci.*, 33(3), 293-298.

- Sear, K. A. (2001). Properties and Use of Coal Fly Ash: A Valuable Industrial By-Product, London, Thomas Telford Yayınevi, (ISBN: 0727730150).
- Siddique, R., Khatib, J. ve Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28, 1835-1852.
- Soysal, B. (2014). *Çelikhane Cürufunun Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sönmez, G. ve Işık, M. (2020). Kömür Yanma Atıklarının Çevresel Etkileri ve Kullanım Alanları, *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, 9(1), 72–83 (ISSN: 2564-6605).
- Söylemez, M. ve Yıldırım, A. (2016). Termik Santral Uçucu Külünün Tuğla Dayanımına Etkisi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4, 19-31.
- Shen, H. ve Forssberg, E. (2003). An Overview of Recovery of Metals from Slags, *Waste Management*, 23(10), 933-49.
- Shih, Pai-H., Wu, Zong-Z., Hung-L. Chiang. (2004). Characteristics of bricks made from waste steel slag, *Waste Management*, 24, 1043–1047.
- Shi, C. (2004). Steel slag-its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials In Civil Engineering*, 16(3), 230-236.
- Teo, P., Seman, A. A., Basu, P., Sharif, N. M. (2014). Recycling of Malaysia’s electric arc furnace (EAF) slag waste into heavy-duty green ceramic tile. *Waste Management*, 34, 2697–2708.
- Tilley, R. J. D. (2006). Crystals and Crystal Structures, Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- TTGV.(2012). Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı Raporu, Demir-Çelik Sektörü Atıklarının Ekonomiye Kazandırılması.
- Tokay, M. ve Çetin, B. (1991). Preslenmiş, buhar kürü uygulanmış uçucu kül-kireç tuğlalarının dayanım ve su emme özellikleri. *Teknik Dergi*, 2(9), 385-394.
- Tulga, İ. ve Kılınç, K. (2018). Uçucu Kül Kullanımının Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Kırklareli Üniv. J. Eng. Sci.*, 4(2), 212–236.
- TMMOB (2017). Türkiye’de Termik Santraller, Makine Mühendisleri Odası, Ankara, (ISBN: 978-605-01-1018-0)
- Uysal, F. F. ve Bahar, S. (2018). Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları, *Trakya Univ. J. Eng. Sci.*, 19(1), 37-52.
- Uz, B. (1990). Mineraller Kristallografi- Mineraloji, Birsan Yayınevi , İstanbul.

- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., Zha, J. (2006) “Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture.” *J. Hazard. Mater.*, B138, 261–268.
- Yıldırım, İ.Z ve Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Adv. Civ. Eng.*, 1-13.
- Yıldız, T. ve Yıldız, C. (2003). Soma Termik Santrali Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Yeni Bir Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 163-169.
- Yılmaz, G. (2012). Structural characterization of glass-ceramics made from fly ash containing $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ and analysis by FT-IR-XRD-SEM methods. *J. Mol. Struct.*, 1019, 37-42.
- Zhao, J., Yan, P. ve Wang, D. (2017). Research on mineral characteristics of converter steel slag and its comprehensive utilization of internal and external recycle. *J. Clean. Prod.*, 156, 50–61.
- Walker, R.D. (1986). Modern Ironmaking Methods. The Institute of Metals ISBN: 0901462276.
- Walder, K.S. (1949). Injection molding of ceramics materials, *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, 28(11), 459-461.
- Wang, D., Jiang, M., Liu, C., Min, Y., Cui, Y., Liu, J., Zhang, Y. (2012). Enrichment of Fecontaining phases and recovery of iron and its oxides by magnetic separation from BOF slags. *Steel Res. Int.*, 83(2), 189–196.
- http-1: Kömür İşletmeleri Kurumu, Ankara, <http://www.tki.gov.tr/bilgi/komur/enerji-ve-komur/232>. (Erişim tarihi: 03.03.2019)
- http-2: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ, 2015), <https://www.teias.gov.tr> (Erişim tarihi: 07.05.2019)
- http-3: <https://www.monolithic.org/blogs/construction/fly-ash-properties-and-uses> (Erişim tarihi: 02.10.2019)
- http-4: Turkish Statistical Institute, www.tuik.gov.tr (Erişim tarihi: 12.06.2019).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler:

Adı Soyadı

Serkan KESKİNBAŞ

Yabancı Dil

İngilizce

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise	Sümer Lisesi,	2005
Lisans	Anadolu Üniversitesi,	2013
Pedagojik Formasyon	Osmangazi Üniversitesi,	2014

İş Tecrübesi

T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı	İŞKUR Memur,	2014
T.C. Milli Eğitim Bakanlığı	Fizik Öğretmeni,2015-Devam	