



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DÖKME DEMİR ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN KOMPOZİT  
MALZEMELERİN FARKLI SİNERLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Benginur ÖZTÜRK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim  
Dalı**

**Temmuz-2023**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Benginur ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “Dökme Demir Atıklarından Elde Edilen Kompozit Malzemelerin Farklı Sinterleme Yöntemleri Kullanılarak Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 05/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA

.....

#### Üye

Doç. Dr. İlyas ŞAVKLIYILDIZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

### DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Benginur ÖZTÜRK

Tarih: 17.07.2023

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# DÖKME DEMİR ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN KOMPOZİT MALZEMELERİN FARKLI SİNERLEME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Benginur ÖZTÜRK**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA**

**2023, 82 Sayfa**

**Jüri**

**Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA  
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI  
Doç. Dr. İlyas ŞAVKLIYILDIZ**

Sinterleme günümüz teknolojisinde seramik, porselen ve ileri teknoloji seramik çalışmalarında oldukça çok kullanılan bir tekniktir. Son 15 yılda geleneksel sinterleme (GS) işlemi yerini daha farklı teknolojilere bırakmıştır. Bu teknolojilerin en önemli ve bu çalışmada kullanılanı flaş sinterlemedir (FS). FS ile sinterlenen malzemeler sıcaklık, süre, enerji, maliyet başta olmak üzere çevre kirliliği ve insan sağlığı göz önüne alınarak yapılmış çalışmalardır.

Konya bölgesinde 2023 yılı ikinci çeyreğinde bulunan dökümhanelerin sayısının 300 olduğu ancak her geçen gün arttığı bilinmektedir. Dökümhanelerden çıkan atıklar üretilen malzemelerin içeriğine göre çeşitlilik göstermektedir. Konya sanayisinin özellikle demir-çelik ve alüminyum sektörüne hitap eden ürünler üretmektedir. Bu üretimlerden artık kalan oldukça çok miktarda metal oksit içerikli metal atıkları dökümhanelerde yığın halinde biriktirilmekte ancak değerlendirilme kapsamı ise oldukça kısıtlıdır. Bu sebeple, bu tez çalışmasında, çevreye zarar verecek olan döküm atıklarının değerlendirilmesi ile çevreye bir kazanım ve bir ürün geliştirme potansiyeli araştırılmıştır.

Çalışmada dökme demir cüruf atıkları (DDCA) toz formunda kullanılarak köpek kemiği şeklindeki kalıplarda, yeni sinterleme yöntemi olan FS ile sinterlenmiştir. Bu yöntem ile geleneksel olarak yapılan sinterleme işlemi sonuçları fiziksel, kimyasal ve mekanik dayanımı açısından değerlendirilmiştir. FS yöntemi ile üretilen malzemelerin daha düşük sıcaklıklarda ve kısa sürede gerçekleştirilerek enerji tasarrufu da sağlanmıştır. Kullanılan bu metotta numune üzerine uygulanan elektrik alan ve sıcaklık sayesinde atomlar arası boşlukların daraldığı gözlenmiştir.

FS deneyleri, 20, 25 ve 30 V/mm elektrik alan altında gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik testleri (3-nokta eğme ve sertlik) yapılmıştır. Bu verilerden elde edilen deneysel sonuçlar ise 1000 °C’de sinterlenen DDCA’nın 20V/mm elektrik alan içerisinde FS ile 517 °C’de 15 s içerisinde gerçekleşebildiğini ve en iyi mekanik dayanımları da gösterdiği kanıtlanmıştır. 30 V/mm elektrik alan altında tüm FS işlemleri daha düşük sıcaklıklarda (474 °C) gerçekleşmesine rağmen mekanik özellikleri daha düşük olduğu gösterilmiştir. Bu sebeple, DDCA’larından elde edilen bu ürünün yer ve duvar karolarında kullanılabileceği ISO 10545 standartlarına göre mekanik dayanımlarının 20 V/mm elektrik alan altında FS ile diğer tüm sinterleme işlemlerinden daha iyi dayanımlara sahip olduğu kanıtlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dökme demir cüruf atığı, Flaş sinterleme, Geleneksel sinterleme, Geri kazanım, Mekanik dayanım

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT SINTERING METHODS ON MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS OBTAINED FROM CAST IRON WASTE**

**Benginur ÖZTÜRK**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Metallurgy and Materials Engineering**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Zeynep ÇETİNKAYA**

**2023, 82 Pages**

**Jury**

**Asst. Prof. Dr. Zeynep ÇETİNKAYA**

**Asst. Prof. Dr. Gökhan ARICI**

**Assoc. Prof. Dr. İlyas ŞAVKLIYILDIZ**

Sintering is a technique that is widely used in ceramic, porcelain, and high-tech ceramic works in today's technology. In the last 15 years, the conventional sintering (CS) process has been replaced by different technologies. The most important of these technologies used in this study is flash sintering (FS). Materials sintered by FS are carried out considering temperature, time, energy, cost, environmental pollution, and human health.

It is known that the number of foundries in the second quarter of 2023 in the Konya region is 300, but it is increasing day by day. Waste from foundries varies according to the content of the materials produced. It produces products that appeal to the iron-steel and aluminum sectors of the Konya industry. A large amount of metal oxide-containing metal wastes left over from these productions are collected in bulk in foundries, but the scope of the evaluation is very limited. For this reason, in this thesis study, the potential of an environmental benefit and product development has been investigated by evaluating the casting wastes that will harm the environment.

In the study, cast iron slag waste (DDCA) is used in powder form and sintered in dog bone-shaped molds by FS, a new sintering method. The results of the CS process with this method were evaluated in terms of physical, chemical, and mechanical strength. The materials produced by the FS method is produced at lower temperatures and in a short time, thus saving energy. In this method, it is observed that the interatomic spaces narrowed due to the electric field and temperature applied to the sample.

FS experiments were carried out under an electric field of 20, 25, and 30 V/mm. Physical, chemical, and mechanical tests (3-point bending and hardness) of the sintered materials are carried out. The experimental results obtained from these data, on the other hand, have proven that DDCA sintered at 1000 °C can be achieved by flash sintering in 20V/mm electric field at 517 °C within 15 s and it also shows the best mechanical strengths. Although FS processes under 30 V/mm electric field take place at lower temperatures (474 °C), it has been shown to have lower mechanical properties. For this reason, it has been proven that the mechanical strength of this product obtained from DDCA, according to ISO 10545 standards, where it can be used in floor and wall tiles, has better strengths than all other sintering processes with FS under 20 V/mm electric field.

**Keywords:** Cast iron slag waste, Conventional sintering, Flash sintering, Mechanical strength, Recycling

## ÖNSÖZ

Tez sürecimin planlanması ve yürütülmesinde desteğini esirgemeyen bilgi ve birikimlerinden fazlasıyla faydalandığım her daim çalışmalarında yanımda olan danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olarak sonsuz sevgilerini ve desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Benginur ÖZTÜRK  
KONYA-2023



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>3</b>
2.1. Genel Bilgiler.....	3
2.2. Birincil Üretim Yöntemleri.....	6
2.2.1. YF ile üretim.....	6
2.2.2. BOF ile üretim.....	7
2.2.3. EAO ile üretim.....	8
2.2.4. IO ile üretim.....	11
2.2.5. Direnç ocakları ile üretim.....	11
2.2.6. Kupol ocağı ile üretim.....	12
2.2.7. Potalı ocak ile üretim.....	13
2.2.7.1. Dökme demir üretimi.....	14
2.3. Endüstriyel Cüruflar.....	20
2.3.1. Demir döküm metal cürufları.....	21
2.3.2. Demir dışı metal döküm cürufları.....	23
2.4. Döküm Üretiminden Kalan Atık Cürufların Depolanması ve Yeniden Değerlendirilmesi.....	25
2.5. İkincil Üretim Yöntemleri.....	34
2.5.1. Döküm cürufunun kullanım alanları.....	34
2.5.1.1. Çimento betonu agregası ve çimento üretiminde kullanımı.....	38
2.5.1.2. Yol inşaatında ve hafif yapı malzemesi üretiminde kullanılması.....	39
2.5.1.3. Seramik sektöründe kullanılması.....	40
2.5.1.4. Kimya sektöründe kullanılması.....	40
2.5.1.5. Refrakter malzeme olarak kullanımı.....	40
2.5.2. Sinterleme Yöntemleri.....	41
2.5.2.1. Geleneksel sinterleme (GS).....	43
2.5.2.2. Flaş sinterleme (FS).....	44
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>47</b>
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar.....	47
3.2. DDCA'dan Üretilen Yeşil Yoğunluklu (Ham Yoğunluk) Numunelerin Hazırlanması.....	48
3.3. DDCA Numunelerin GS İşlemi.....	50
3.4. DDCA Numunelerin FS İşlemi.....	51
3.5. Karakterizasyon Çalışmaları.....	52

3.6. Mekanik Testler .....	55
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>56</b>
4.1. Öğütülmüş DDCA'nın Mineralojik ve Kimyasal Analizleri.....	56
4.2. Toz DDCA'nın Mikro yapı karakterizasyonu (SEM) Analizi.....	58
4.3. Toz DDCA'nın DSC/TGA Cihazı ile Termal Davranışlarının İncelenmesi .....	58
4.4. Toz DDCA'nın FTIR Analizi .....	59
4.5. Toz DDCA'nın Yüzey Alanı (BET), Tane Boyutu (DLS) Analizi ve Özgül Ağırlığın Hesaplanması .....	60
4.6. GS İşlemi .....	60
4.7. FS İşlemi .....	61
4.8. DDCA ile GS ve FS Yöntemi ile Üretilen Malzemelerin Mekanik Özellikleri ..	67
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>72</b>
5.1. Sonuçlar .....	72
5.2. Öneriler .....	73
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>74</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

Å	: Angström
°C	: Santigrat derece
cm	: Santimetre
cm <sup>-1</sup>	: Dalga sayısı
cm <sup>3</sup>	: Santimetre küp
Db	: Desibel
dk.	: Dakika
g	: Gram
kg	: Kilogram
m	: Kütle
mm	: Milimetre
ml	: Mililitre
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
m <sup>3</sup>	: Metre küp
mg	: Miligram
MPa	: Mega Pascal
sa.	: Saat
sn.	: Saniye
%	: Yüzde
kWh	: Kilowatt saat
rpm	: Dakikadaki devir hızı
t	: Süre
%w/w	: Ağırlıkça yüzde
2θ	: Tarama açısı
λ	: Dalga boyu(m)
α	: Alfa
pH	: pH ölçü birimi

### Kısaltmalar

A	: Amper
AC	: Alternatif akım
ACB	: Avrupa Cüruf Birliği
Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alümina
Ba	: Baryum
BET	: Yüzey alanı ve porozite tayini
BOF	: Bazik oksijen fırını
Ca	: Kalsiyum
CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum karbonat
CaF <sub>2</sub>	: Kalsiyum florür
Ce	: Seryum
Cl	: Klor
CaO	: Kalsiyum oksit

Ca(OH) <sub>2</sub>	: Kalsiyum hidroksit
Cr	: Krom
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Kromyum (III) oksit
CaS	: Kalsiyum sülfür
CaSi <sub>2</sub>	: Kalsiyum disilisit
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
CuO	: Bakır(II) oksit
DC	: Doğru akım
DDCA	: Dökme demir cüruf atığı
DSC/TG	: Diferansiyel termal ve termogravimetrik analizler
DÇÖ	: Demir Çelik Örgütü
DLS	: Dinamik ışık saçılımı spektrometresi(Tane boyutu ölçümü)
EAO	: Elektrik ark ocağı
FS	: Flaş sinterleme
Fe	: Demir
FeO	: Demir oksit
FeS	: Demir sülfür
FTIR	: Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Hematit
GS	: Geleneksel sinterleme
HV	: Vickers sertlik
H <sub>2</sub>	: Hidrojen gazı
H <sub>2</sub> O	: Su
IO	: İndüksiyon ocağı
K	: Potasyum
KKO	: Kapasite kullanım oranları
K <sub>2</sub> O	: Potasyum oksit
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum oksit
Mg(OH) <sub>2</sub>	: Magnezyum hidroksit
Mg <sub>2</sub> Si	: Silisür
Mn	: Mangan
MnO	: Mangan oksit
Na	: Sodyum
Na <sub>2</sub> O	: Sodyum oksit
Ni	: Nikel
Na <sub>2</sub> O	: Sodyum oksit
O	: Oksijen
P	: Fosfor
PEG	: Polietilen glikol
Pb	: Kurşun
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	: Di fosfor penta oksit
S	: Kükürt
SEM-EDX	: Taramalı elektron mikroskobu/ Enerji dağılım x-ışını spektrometresi
Si	: Silisyum
SiO <sub>2</sub>	: Silisyumdioksit
Sn	: Kalay

SnO <sub>2</sub>	: Kalay dioksit
SrO	: Stronsiyum oksit
Ti	: Titanyum
TiO <sub>2</sub>	: Titanyumdioksit
V	: Vanadyum
YF	: Yüksek fırın
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko oksit
Zr	: Zirkonyum
ZrO <sub>2</sub>	: Zirkonyum dioksit
XRD	: X-Işını Difraksiyon spektroskopisi
XRF	: X-ışınları floresans spektrometre



## 1. GİRİŞ

Dünya üzerinde ve ülkemizde hızlı nüfus artışına bağlı olarak yaşanan kentleşmeler ile birlikte teknolojik gelişmeler ve sanayileşmede hızlı bir artış yaşanmaktadır. Bunun sonucunda doğal kaynak kullanımının arttığı bunu sonucunda da atık miktarı ve çeşitliliğinde de artış görülmektedir (Gedikli 2019). Sürekli üretim ve tüketimin artması sonucu oluşan atıklar hem insan sağlığına hem de çevreye zarar vermektedir. Doğal kaynakların hızlı bir şekilde tüketilmesini engellemeye çalışmak ve üretim sonucunda oluşan bu atıkların insan ve çevre sağlığı bakımından “*tehdit*” olmaktan çıkarak “*ekonomik girdiye katkı*” hedefi gerekmektedir. Bu durum her malzeme için belirlenen uygun atık yönetim stratejileri ile gerçekleştirilebileceği çeşitli literatür kaynaklarında raporlandırılmıştır (Baalamurugan vd. 2021; Branca vd. 2020; Fisher ve Barron 2019; Rashad 2019). Bu yaklaşım sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin temel yapıtaşını oluşturmaktadır (Gedikli 2019). Doğal kaynak kullanımı sonrası üretimden kaynaklanan ikincil atık ürünler ortaya çıkmaktadır. Endüstriyel üretimlerden ortaya çıkan atıkların geri dönüşümleri yapılarak hem çevreye hem insan sağlığına zararı en aza indirmek hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemlidir.

Yaşam kalitesinin artırılması ve gelecekteki nesiller için sosyal, çevresel ve ekonomik yönden iyi hale getirilmesi gibi sebeplerden dolayı malzemeleri sürdürülebilir hale getirmek gerekmektedir. Sürdürülebilir hale getirmek için malzemelerden işlenmemiş veya az işlenmiş maddelerin çıkarılması, taşınması, geri dönüştürülmesi, işlenmesi, ürünü kullanımlı hale getirmesi gerekmektedir. Buna kısaca “*yaşam döngüsü*” denilmektedir (Yüksel 2017).

Bazı istatistiksel analizler çerçevesinde 2023 yılının ilk çeyreğinde Türkiye’de çelik üretimi 7,4 milyon ton olurken Dünya’da 462,1 milyon ton seviyelerinde gerçekleşmiştir (Türkiye Çelik Üreticileri 2023). Bu veriler doğrultusunda her yıl çelik üretiminden çıkması beklenen cüruf miktarı göz ardı edilemeyecek kadar fazla olduğu bilinmektedir. Dökümhane cürufları üretim sonucunda oluşan endüstriyel katı bir atık olarak bilinmektedir. Ayrıca, ağır metal içermelerinden dolayı insan sağlığı ve çevre kirliliği eğilimi bakımından dikkatli olunması önem arz eden konuların başında gelmektedir. Bu sebeple uygun bir şekilde bertaraf edilememesi, içerisindeki kaynaklanan alkali sızıntılardan dolayı yüzeye ve yeraltına ulaşmaları yüzünden çevreye tehdit haline gelmektedir.

Kullanılmayan cüruf malzemesinin geri dönüşümü veya depolanması günümüzde çok önemli bir problem olarak görülmektedir (Kavasoğlu 2022). Nüfusun gelişmesi ile birlikte ihtiyaçların da artmasından dolayı doğal kaynakların azalışının önüne geçmek ve sıfır atık fikrini hayata geçirmeyi yaygın hale getirmek amacıyla kullanılmayan cürufların geri dönüşümünü sağlamak için özellikle son 5 yılda literatürde birçok yeni çalışma yapılmıştır (Bosurgi vd. 2023; Erdenebold 2020; Han, Lin, ve Wang 2022; Li vd. 2023; Lin vd. 2021; Nunes ve Borges 2021; Revilla-Cuesta vd. 2023; Sarfo vd. 2017; Shu ve Sasaki 2022; Z. Su vd. 2022; Zhang vd. 2020). Döküm cüruf atıkları; kara yol inşaatında (Gao vd. 2017; Pasetto ve Baldo 2010), beton yapımında (Binici, Eken, ve Dinçer 2016; Carvalho vd. 2017; Yi vd. 2012) deniz dolgusu ve liman olarak, demiryolu balast malzemesi ve gübre yapımında (Poh, Ghataora, ve Ghazireh 2006; Yi vd. 2012) ve benzeri birden fazla alanda kullanımı bulunmaktadır (Develioğlu ve Pulat 2018; Jiang vd. 2018; Proctor 2000). Bununla birlikte, cürufun sahip olduğu mukavemet, yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi üstün özellikleri sayesinde kavşak, yol ve park alanları gibi birden fazla alanlarda katkı olarak kullanım imkânına sahip olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmada Mesa Makine A.Ş.'den dökme demir üretiminden arda kalan cüruftan yeni ürünler elde edilmesi ve/veya geri dönüşüm için yeni bir sektör alanı bulunması hedeflenmiştir. Bu sayede sınırlı miktardaki doğal kaynakların kullanımının azaltılması ile üretimde verimliliğe katkı sağlamak ve dökme demir cüruf atıklarının depolanması sonucunda oluşacak çevresel problemlerin en aza indirmek amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda döküm sanayisinden alınan dökme demir cürufların fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiş, bu malzemeden üretilen ürünler farklı sinterleme teknikleri (geleneksel ve flaş) kullanılarak sinterleme teknikleri arasındaki farkın mekanik özelliklere etkisi araştırılmış ve incelenmiştir. Böylece, dökme demir cürufunun ekonomiye ve çevreye fayda sağlayacağı alternatif kullanım alanları bulunması da hedeflenmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Genel Bilgiler

2020 yılı itibarıyla çelik sektöründe faaliyet gösteren otuz yedi tesisin on tanesi Akdeniz bölgesi, dokuz tanesi Marmara bölgesi, sekiz tanesi Ege bölgesi, yedi tanesi Karadeniz bölgesi ve üç tanesi İç Anadolu bölgesinde konumlandırılmıştır (SATSO - Bilgi Bankası - Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu 2020 t.y.). Ham çelik üreticisi olarak 2021 yılında ülkemizde demir cevherinden üretim yapan 3 adet entegre bazik oksijen fırını (BOF) tesis, hurdadan üretim yapan 26 adet elektrik ark ocağı (EAO) tesis ve 11 adet indüksiyon ocağı (IO) tesis olmak üzere toplamda 40 adet çelik üretim tesisi bulunmaktadır.

Türkiye 2021 yılında 40,36 milyon ton çelik üretiminde bulunarak Avrupa'nın en büyük, dünyanın 7. büyük çelik üreticisi konumunda bulunmaktadır. Ülkemizde demir çelik sektörü üretim kapasitesi 2021 yılı için EAO'lu tesislerde 40,39 milyon ton, BOF'lu tesislerde ise 13,60 milyon ton olmak üzere toplamda 53,99 milyon ton olmuştur. Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi ve kapasite kullanım oranı verileri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2021).

**Çizelge 2.1.** Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi (bin ton) (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2021).

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	%Değişim 21/20	%Pay 2021
<b>EAO+IO</b>	39.256	38.940	39.484	38.298	39.858	40.385	1,3	74,8
<b>BOF</b>	12.250	12.250	12.400	12.400	13.500	13.600	0,7	25,2
<b>Toplam</b>	51.506	51.190	51.885	50.698	53.985	53.985	1,2	100,0
<b>%KKO</b>	64,4	73,3	71,9	66,6	67,2	74,8	11,3	

Cüruf, çelik üretiminde, EAO, BOF veya IO'dan metal eriyiğinin rafine edilmesinde ve oksitlenmesi sırasında, yoğunluğunun çeliğe kıyasla daha düşük olması nedeniyle, çeliğin üzerinde oluşmaktadır. Cüruf ayrıca 1300 °C veya daha yüksek sıcaklıklar içinde ocaktan alınmaktadır. Pota ocağında oluşan ikincil metalurji işlemlerinde, alaşım elementlerinin ilave edilmesi, ne kadar karbon ilavesinin olacağı, fosfor ve kükürt gibi yan elementlerin giderilmesi, indirgeme, deoksidasyon, desülfürizasyon gibi aşamalar sonucunda da cüruf oluşmaktadır. Cüruf miktarı her ton ham çelik üretimi başına, 150–200 kg arasındadır.

2018 yılında, Türkiye genelinde 37.311.733 ton ham çelik üretimi sonucunda 5.562.018 ton cüruf açığa çıktığı rapor edilmiştir (Tozsın ve Öztaş 2023).

Yüksek fırın (YF) cürufu, YF'da demir cevherinin indirgeyerek sıvı halde bulunan ham demirin elde edilmesi sırasında, cüruf oluşturuç elementlerin oksitlenme işlemi ile birlikte sıcak maden üzerinde birikmesiyle oluşmaktadır. Granüle YF cürufları ise su ile hızlı soğutulma işleminden, camsı yapıya sahip özelliklerinden dolayı, çimento sektöründe, hammadde olarak kullanılmaya daha elverişlidir (SATSO - Bilgi Bankası - Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu 2020 t.y.).

Boşluk bulunan bir kalıba ergitilmiş sıvılaştıran metalin dökülmesi ve ardından katı forma getirilmesi ile istenilen şekle getirilmesi işlemine döküm denilmektedir (Başar ve Aksoy 2012). Döküm sektörü, çelik hurda, ferro alaşımları ve çeşitli pik demirlerin indüksiyon, kupol veya ark ocaklarda ergitilme işlemi yapılarak seramik, kum veya metal kalıplar kullanılarak şekillendirilmesiyle döküm sektörünün ihtiyacı olduğu çelik, pik, sfero ve temper döküm malzemelerinin işlenmemiş ya da işlenmiş halde üretildiği bir sektördür (Konstam ve Sylvia 1975). İstenilen özelliklerde uygun bir döküm malzemesi elde etmek için; uygun döküm metodunun belirlenmesi, belirlenen metoda göre uygun kalıbın tayini, maça ve kalıpların oluşturulması, hangi özelliklerde isteniliyorsa ona göre alaşımların hazırlanması ve ergitme metodunun seçilerek ergitme işleminin yapılması gerekmektedir (Gedikli 2019). Döküm yolu ile üretimi yapılmakta olan çelik, sfero, pik ve temper döküm malzemeleri; hafriyat ve inşaat ürünleri, tarım ve otomotiv parçaları, dayanıklı tüketim malları, demir çelik sanayisi, ulaşım altyapısı sanayisi, genel makine imalat sanayisi, toprak ve çimento sanayisi, kimyasal metalürji sanayisi ve savunma sanayisinde kullanılmaktadır (Dpt 2000).

Döküm yoluyla üretimin avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

### **Dökümün Avantajları;**

- Hem küçük parçalarda hem büyük ağırlığı fazla olan parçalar için uygun metotlar bulunmaktadır.
- Karmaşık şekle sahip parçalar üretilebilir.
- Demir, demir dışı ve çelik kompozisyonuna sahip neredeyse bütün alaşımlarda döküm uygulanabilir.
- Seri üretim açısından ekonomik yönden iyidir.

### Dökümün Dezavantajları;

- Kesiti ince olan parçalar zor imal edilir.
- Ergime sıcaklığı yüksek olan metallere göre değildir. Bu durum neden olmaz? Bunun için çok fazla enerji gerekmektedir. Bu da ekonomik yönden kötü bir durumdur. Çünkü elektrik enerjisi kullanılmaktadır.
- Avrupa Birliğince düzenlenen Çevre Mevzuatı ve Çevre Politikaları gereğince yapılan tesislerin maliyetinin yüksek olması.
- Bu iş kolundan kaynaklı atıkların geri dönüşümünün istenilen düzeye göre yaygın olmaması (Yaşar 2013).

Döküm yoluyla üretim, 4D (dirty, difficult, dangerous, dusty) adı verilen; güç, kirliliği, zararı ve toz ihtimali çok yüksek olan bir sanayi koludur. Bunun yanında sağladığı iş imkânı ve ülke sanayisine faydası ile birlikte bütün dünyada önemli sektörler arasında yer almaktadır (Başar ve Aksoy 2012).

Dökümde kullanılan farklı metal alaşımları üretilen ürünün kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirmekte aynı zamanda kullanım alanları da farklılaşmaktadır (Çizelge 2.2) (Hawaman 2009).

Döküm yoluyla üretimde metale şekil vermeye yarayan kalıbın tekrar kullanılıp kullanımının mümkün olmayacağına göre döküm metotları ikiye ayrılmaktadır. (Çizelge 2.3) (Hawaman 2009).

**Çizelge 2.2.** Kimyasal ve fiziksel özellikler olarak metal alaşımları

<b>Çelik Döküm</b>	<b>Demir Döküm</b>	<b>Demir Dışı Döküm</b>
Karbon çelikleri ve az alaşımlı çelikler	Lamel grafitli (gri, kır) dökme demir	Al içeren alaşımlar
Yüksek alaşımlı çelikler (ısıya dayanıklı, paslanmaz)	Küresel grafitli (sfero) dökme demir	Zn içeren alaşımlar
	Temper dökme demir	Cu içeren alaşımlar (bronz ve pirinç)
	Beyaz dökme demir	Mg içeren alaşımlar
	Vermiküler dökme demir	Ni içeren alaşımlar
		Diğer alaşımlar (Pb, Co ve Sn içeren)

Dökümhanelerde metalin ergitilme adımı, dökümü yapılacak olan metalin uygun fırınlarda ve yüksek sıcaklıklarda sağlanmaktadır. Ergitilmede farklı tip ocaklar ve fırınlar kullanılmaktadır. Fırın seçimi eritilme işlemi yapılacak malzemenin türüne, besleme metoduna ve alaşım özelliklerine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir.



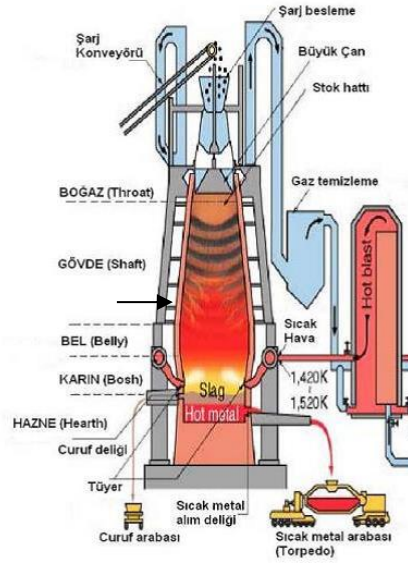
Bu fırınlar veya ocaklar çelik döküm, demir döküm (sfero ve gri) ve demir dışı döküm (kurşun/çinko/bakır ve alüminyum gibi) olarak üç farklı kategoride ele alınmaktadır. Bu ürünlerin kupol, potalı, alevli ve BOF, EAO ve IO ile YF'da üretimleri gerçekleştirilmektedir. Ergitme sonrasında ise eriyik içerisindeki saf haldekilerin uzaklaştırılması için cüruf alma yapılmaktadır (Aran 2007; Çelik 2007; Yıldız 2019).

## **2.2.Birincil Üretim Yöntemleri**

### **2.2.1. YF ile üretim**

Hammaddelerin (sinter, pelet, topak demir cevheri), katkı malzemelerinin (kireç taşı gibi cüruf oluşturuçular) ve indirgen malzemelerin (kok) kapalı bir sistemde yüksek fırına, sürekli beslenmesiyle pik demir üretimi gerçekleştirilir. Pik demir, kompozisyonunda %2'den daha çok karbon içeren demir karbon alaşımıdır. Yüksek fırının içine üflenen sıcak hava, kok kömürünü yakarak karbondioksit haline getirmektedir. Karbondioksit ( $CO_2$ ) ise kok ile yeniden yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek karbon monoksit haline gelmektedir. Karbon monoksit (CO) hammadde içindeki demir oksitleri metal demir haline getirmektedir.

İşlemin sonunda ergimiş demir, cüruf ve işletmenin farklı yerlerinde kullanılan yakıt, yüksek fırın gazı açığa çıkmaktadır. Bu gaz fırının üstünde toplanır ve işleme işlemi ile elektrik üretme veya ısıtma amacıyla yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu gaz yaklaşık olarak %20-28 CO, %1-5  $H_2$ , inert bileşenler, sülfür, siyanür ve ciddi miktarlarda toz kapsamaktadır. Bu nedenle, gaz fırının üstünden uzaklaştırılması ve gaz arıtma sistemine bağlanması prosedürün bu aşamasındaki emisyonların kontrol altına alınması amacıyla gerekli bir işlemdir. Yüksek fırın kesiti ve proses akım şeması Şekil 2.1'de verilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017).



Şekil 2.1. Yüksek fırın kesiti (Özdeş 2018)

YF doldurulup yakım işlemi başladıktan sonra yaklaşık olarak 10-15 saat sonra pik demir elde edilmektedir. Fırının içinde oluşacak tepkimelerin fırın duvarına zarar vermemesi için fırın duvarı içi refrakter ile kaplanmaktadır. YF beş kısımdan (boğaz, gövde, bel, karın ve hazne) oluşmaktadır. Hammaddeler üst kısımdan fırını beslemektedir. Malzemeler ve gazın ısınması ile birlikte hacimlerinde artış gözlenmektedir. Bu sebeple, hareket akışının rahat olması için gövde çapı aşağıya doğru genişlemektedir. Bel kısmı fırının en geniş olan yeridir. Cüruf ve metalin erimeleri sonucunda hacimlerde azalış olması da bu yerde gerçekleşmektedir. Karın kısmında erime işlemi tamamlanmaktadır. Eriyen metal ve cüruf en aşağıda bulunan hazne kısmında birikmektedir. (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017).

YF' de haznede biriken cüruf ve pik demir yoğunluk farkı nedeniyle birbirine karışmadan alınmaktadır. Fırından boşalan sıcak pik demir döküm kanalları ile akarak potalara boşaltılmaktadır. Fırından boşalan cüruf ise kanallar ile granüle tesisine, cüruf haznelere veya açık bir çukura dökülmektedir. Eritilmiş çelik cürufu; yol yapımı, çimento gibi yerlerde kullanılmak için granüle, mıcır veya pelet haline getirilmektedir (Özdeş 2018).

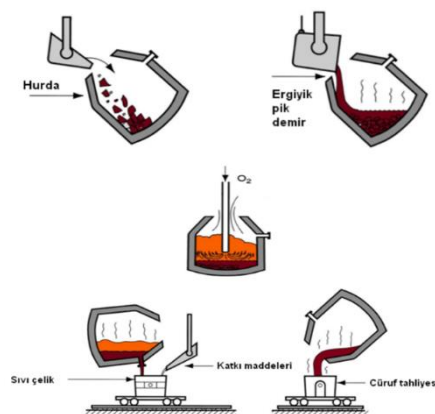
### 2.2.2. BOF ile üretim

YF'den çelikhaneye gönderilen sıvı pik demir, çeşitli ön işlem uygulamalarından (kükürt giderme, cüruf alma) sonra BOF'larda oksijenin üstten üflenmesi ile çeliğe dönüştürülmektedir.

Kükürt gidermek için kalsiyum karbür, kostik soda, soda külü, kireç ve magnezyum içeren malzemeler kullanılmaktadır. BOF'daki temel amaç metal girdisinin ihtiva ettiği kirlilikleri (karbon, silikon, manganez ve fosfor, vb.) oksitleyerek uzaklaştırmaktır. Bu kirlilikler baca gazı veya sıvı cüruf ile uzaklaştırılmaktadır. Bu prosesin en önemli hedefler;

- Karbon içeriğini istenilen düzeye indirilmesi,
- YF'den çıkan sıvılaştırılmış sıcak demirin içindeki safsız haldekilerin giderilmesi,
- İstenilen farklı özellikler için diğer elementlerin eklenmesidir.

BOF ile çelik üretimi Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Oksidasyon işlemini ikincil metalurji uygulamaları takip etmektedir. Oksijen enjeksiyonu ile CO<sub>2</sub> ve CO gazları ve ince demir oksit parçacıkları açığa çıkmaktadır. Ayrıca inert gazlar karışmayı ve sıcaklık dengesini sağlamak amacıyla ilave edilir. Bu esnada açığa çıkan duman ve gazlar baca gazı arıtma tesisinde arıtmaya tabi tutulmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017).



Şekil 2.2. BOF ile çelik üretimi (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017)

### 2.2.3. EAO ile üretim

EAO'nun yatırım maliyetleri, üretim esnekliği ve daha hızlı devreye alma/durdurma düşünüldüğünde yüksek fırınlara göre daha çok tercih edilmektedir. EAO' da iki tür ocak içi astarlama bulunmaktadır. Bunlar, asidik veya bazik olarak isimlendirilmektedir. Bu metotlardan asidik astarlamanın cüruf yapısının özelliği de asidiktir. Yükseltgenme metodu ile üretim yapılmaktadır. S (kükürt) ve P (fosfor)' nin uzaklaştırılması cüruf yapısından kaynaklı yapılamadığından, hammaddenin

seçilmesinde bu koşullar dikkate alınması gerekmektedir. Bu metotta kolaylıkla potasyum uzaklaştırılmaktadır (Özkan 2019).

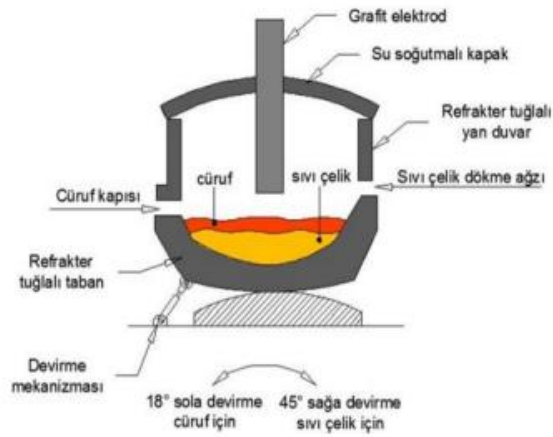
EAO doğru akım veya alternatif akım ile çalışmaktadır. Alternatif akımda kullanılan üç elektrotun arasından akım geçmesiyle metal eritilmektedir. Doğru akımda ise tek elektrot kullanılmaktadır. Anot ve katot şeklinde üstte ve ocağın taban bölümünde akım elde edilerek hurda eritilmektedir (Çamdali ve Tunç 2016). EAO'larında üretim prosesi hurda şarjı, eritme, yükseltgenme, indirgeme, alaşımlama, deoksidasyon, döküm alma ve ocağın hazırlanması şeklinde gerçekleşmektedir (Çamdali ve Tunç 2016).

Hurda ya soğuk olarak ya da bacadan çıkan gaz ile ısıtılıp sıcak şekilde EAO'na şarj edilmektedir. Geri kullanım malzemesi olarak hurda, şarj işlemi yapıldıktan sonra fırın kapağı kapatılarak fırının içinde bulunan grafit elektrotlara verilen akım sayesinde şiddeti yüksek ark oluşturmakta ve bu akım sayesinde hurda eritilmektedir. Bunu yapmak için yüksek miktarlarda elektrik enerjisi gerekmektedir. Ergitme işlemi sonrasında güç düşürme yapılmaktadır. Yükseltgenme ve indirgenme aşamaları arıtma işleminde oluşmaktadır. İstenilmeyen malzemeler yükseltgenme aşamasında oksitlenerek cürufa katılım göstermektedir. Erimiş metal oluştuktan sonra sistemden cüruf alınarak fosfor verilmektedir. Baziklik oranının bu fırında oldukça önemlidir. Sürekli olarak ocaktan numune alınarak sıcaklık ölçümü ile kompozisyon kontrol edilmektedir. Numunelerde eksik görülen elementler varsa alaşımlama işlemi veya fazla element varsa onların giderimi yapılmaktadır. Ardından sırasıyla fosfor, kükürt, mangan, silikon ve son olarak karbon oranlarının ayarlanması yapılmaktadır. Bu işlem yapılırken sistem içerisinde bulunan oksitler alınmakta ve oksijen oranının en alt seviyeye indirebilmek için kireç ve karbon ilavesi yapılarak cüruf meydana getirilmektedir.

Genelde fırın içinde bulunan cürufu sistemden almak için fırın 18° açı ile eğilmekte ve ardından cüruf alınmaktadır. Fırında kalan eritilmiş çelik ise ters yönde 45° açı ile pota içerisine alınmaktadır (Şekil 2.3) (Yıldız 2019). EAO'da çelik üretimi öncesi girdiler ve sonrası çıktılar Çizelge 2.3'te verilmiştir (A. O. Kaya 2014).

Hurda EAO'ya şarjı yapıldıktan sonra elektrotlardan geçen elektrik ile oluşturulan ark sayesinde açığa çıkan ısı hurdayı ergitmede kullanılmaktadır. Ergitmenin ilk aşamasında uygulanan elektrik, fırının kapak kısmını ve duvarlarını oluşturan radyasyondan elde edilen hasardan muhafaza etmek amacıyla minimum düzeyde tutulmaktadır. Daha sonra tam ergime işlemi için güç arttırılmaktadır.

Ergitmenin ilk safhasında yardımcı olmak için oksijen yakıt brülörleri ve/veya oksijen nozulları kullanılmaktadır. Yakıt olarak EOF'da fueloil ve doğalgaz tercih edilmektedir. Ayrıca fırının alt kısmında ya da yan duvarlarından nozullar ile sıvı çeliğe oksijen verilmektedir. EAO ile çeliğin üretiminde kullanılan oksijen metalürjik olarak aynı zamanda da enerji ve üretim verimliliği açısından büyük öneme sahiptir. Oksijen girişi ile karbon monoksit ve diğer kullanılan hidrokarbonların yakılması ile erimiş metalin karbon kompozisyonu hacimsel olarak azalmakta aynı zamanda da ekzotermik reaksiyon sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Karbon giderilmesinin yanı sıra oksijen sayesinde P, Mn (mangan), S ve silikon gibi istenmeyen elementlerin uzaklaştırılması da sağlanmaktadır. Diğer taraftan oksijen enjeksiyonu sonucunda fırında CO ve CO<sub>2</sub> gazları ve küçük demir parçacıkları oluşumu artmaktadır. Oksijen enjeksiyonu dışında ocağa inert gazlar da eklenmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017).



Şekil 2.3. EAO'nun genel görünümü (Yıldız 2019)

Çizelge 2.3. EAO'da Çelik Üretimi Öncesi Girdiler ve Sonrası Çıktılar

Girdiler			Çıktılar		
Hurda	kg/t	1080-1130	Sıvı metal	kg/t	1000
Toplam Enerji	kWh/t	650-750	Cüruf	kg/t	100 - 150
Elektrik	kWh/t	345-490	Partiküller	kg/t	10 - 20
Oksijen	m <sup>3</sup> /t	24-47	Birincil tozlaşma	mg/m <sup>3</sup>	3400 - 33900
Kireç	kg/t	30 - 80	İkincil tozlaşma	mg/m <sup>3</sup>	150 -275
Grafit elek.	kg/t	1,5 - 4,5	Atık refrakter	kg/t	10
Astar	kg/t	ort. 8,1	İşl. Hurdası	kg/t	
Su		Kısa devre döngü	Gürültü	dB (A)	125 - 139 (< 70)

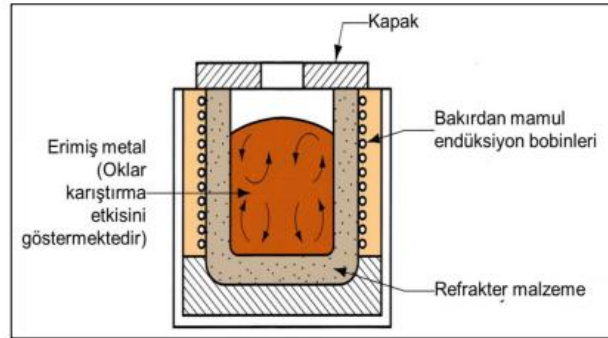
Bu gazların sıcaklık dengesinin sağlanmasının yanında erimiş metalin karışmasına da destek olmaktadır. Bu metot metal-cüruf dengesinin olmasına yardımcı olmaktadır. Ocağa yükleme hareketli olan üst kapağın açılması ile boşaltma işlemi ise fırının belli açılarda eğilmesi ile yapılmaktadır. Refrakterlerin ömrünü uzatmak için

ocaklarda kapak ve yan duvarlarda su soğutmalı paneller kullanılarak ve ocak astarlarında geliştirilen uygulamalar kullanılmaktadır. Eritme işlemi sırasında ortaya çıkan gazlar ve duman baca gazı arıtımına tabii tutulmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017).

#### 2.2.4. IO ile üretim

Bu ocak türü son teknoloji ürünü olup alternatif akım ile ergitme işlemi amaçlanmaktadır. Manyetik alan oluşturacak bakır bobinler içermektedir. İndüklenen akım metale hızlı şekilde olarak bir erimeye neden olurken elektromanyetik alan tarafından oluşturulmuş ergimiş halde bulunan metal içinde karıştırma tesiri oluşturmaktadır. Üretimi planlanan metalin başka farklı malzemeyle ergitilmeden saf halini muhafaza etmekte, bu vesile ile yüksek özellikte metal üretimi elde edilmektedir. Bu yöntemle çelik, dökme demir ve alüminyum alaşımlı dökümlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 2.4) (Yıldız 2019).

Ocak türüne ve üretilmek istenen malzemeye göre değişkenlik gösteren ancak yaklaşık olarak her bir ton döküm metalin oluşumu esnasında 600 - 800 kg arasında atık ürün oluşmaktadır. Bu atık ürünlerin 400 - 600 kg arası atık kum, 10 - 80 kg arası dökümhane cürufu yani ocak cürufu veya kupol ocağı cürufunu oluşturmaktadır. Cüruf miktarı indüksiyon ocaklarında 10 - 20 kg arasında oluşmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2012).

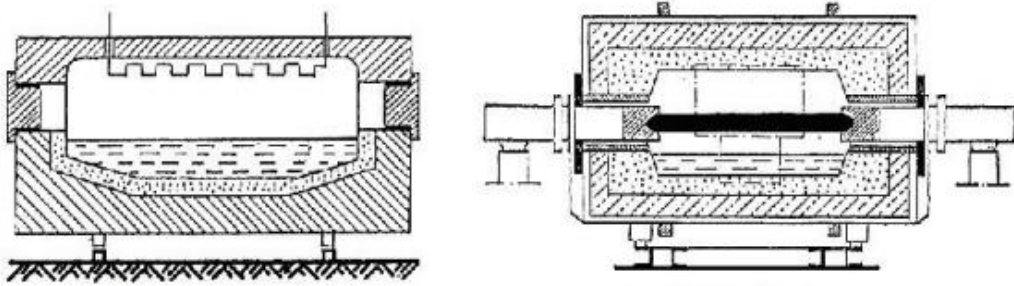


Şekil 2.4. İndüksiyon Ocağı Kesiti (Yıldız 2019)

#### 2.2.5. Direnç ocakları ile üretim

Direnç ocaklarında elektrik akımının bir direnç üzerinden geçmesi esnasında oluşmakta olan ısıdan yararlanılmaktadır. Bu ocakların uygulama yerleri kısıtlı olup genellikle erime sıcaklığı düşük olan malzemeler için tercih edilmektedir. Direnç için

içerisinden yüksek akım geçirilen silisyum karbür ve karbür çubuklar veya tel kullanılabilir (Şekil 2.5) (Aran 2007).



Şekil 2.5. Tel ve çubuk dirençli ocak gösterimi

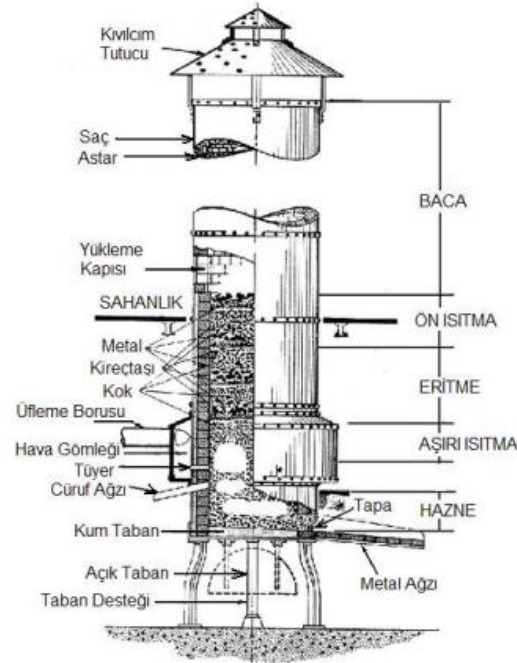
### 2.2.6. Kupol ocağı ile üretim

Döküm sanayisinde dökme demirin (özellikle gri) ergitilmesinde yaklaşık olarak %80'i ve uygulamaya bağlı 20 ton/saat üretim bu ocaklarda olmaktadır. Ocağın dışı sacla kaplıdır. Tabanı ve içi alttan yukarıya doğru refrakter tuğla ile örülüdür ama en üste ateş tuğlası örülmemektedir. Bu ocaklar silindirik ve düşey olarak iki çeşittir. Ocağa döküm kırıkları, demir cevheri veya çelik hurdalar, dökme demir, kok, kireç taşı ve başka alaşımlar ilave edilerek ergitilme yapılmaktadır. Kok kömürü yakıt, kireç taşı da yabancı elementlerin cüruf oluşturmasında önemli rol oynamaktadır.

Bu ocaklarda şarj, YF' deki gibi üst taraftan olmaz, üst yana açılan kısımdan yapılmaktadır. Sürekli çalışma halinde olduğu için şarj işleminin rahat şekilde yapılması için ayrı bir yer bulunmaktadır. Ocak ilk çalışmada içi temizlenir, alt kapak kapatılır ve ardından üzerine kum dökülmektedir. Hava kanal açıklıklarına kadar odun, tahta ve kok konularak fırın yakılmaktadır. Sürekli bir indirgenme ortamı olunca ardından metal parçalar, biraz daha kok ve kireç taşı atılmaktadır. Yanmaya neden olan hava, ocağın ortasının hemen alt bölümünden tüyerlerden basınçlı püskürme şekilde verilmektedir. Bu vesile ile yüksek sıcaklıklara çıkan potalarda dökme demir eritilmektedir. Üst kısımdan baca gazlarının çıkışı olmaktadır.

Ocağın altında karşılıklı şekilde cüruf ve döküm alma delikleri bulunmaktadır. Cüruf deliği, döküm almanın yukarısında ve hava deliklerine yakın olmaktadır. Ocağın en altında açılır bir kapak bulunmaktadır. Bu kapak hem ocağı temizlemede hem de onarımında yardımcı olmaktadır. Bu ocaklarda ilave ve yakıt malzemelerinin çok fazla ve direkt temas halinde olması sebebiyle başka fırınlara kıyasla daha çok cüruf oluşumuna neden olmaktadır (Şekil 2.6) (Aran 2007; Yıldız 2019).

Ocağın özellikleri; sürekli, maliyeti düşüktür, ertme zamanı kısadır, üretimi yapılan dökme demirin kompozisyonunun kontrolü ve ertilme esnasında potadaki sıcaklığın kontrolü zordur.



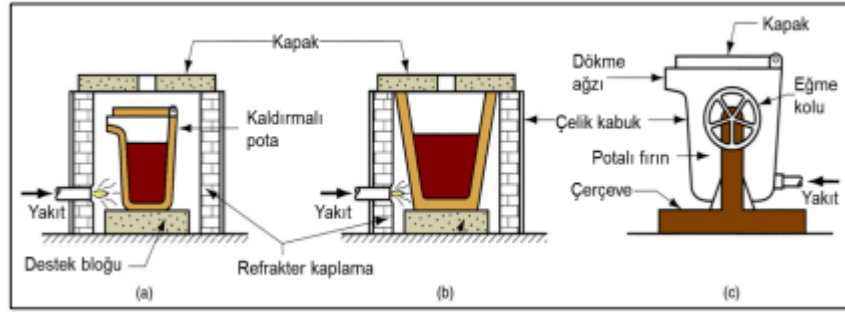
Şekil 2.6. Kupol ocağı gösterimi (Aran 2007)

### 2.2.7. Potalı ocak ile üretim

En eski ve en basit olan metal ertilme ocaklarıdır. Bu ocakların sabit, kaldırmalı ve devrilen potaları vardır. Potalı ocağın içi refrakter tuğla ile örülü bir metal kabukla açılıp kapanabilen kapaktan oluşmaktadır. Potalı ocağın içinde refrakter (silisyum, dökme demir, grafit, karbür vs.) malzeme ve metalden yapılmış pota yerleştirilmektedir. 15 ile 1000 kg arasında olan kapasiteleri ocakların ısısı sıvı, katı ve gaz yakıtlar ya da elektrik enerjisinden yararlanılmaktadır. Bu ocaklarda alüminyum, çinko, bronz, bakır alaşımları gibi düşük sıcaklıklarda üretimi olan demir dışı metaller ertilmektedir (Şekil 2.7).

Bu ocaklar, kupol ocağının aksine metalin yanmakta olan yakıt ile direkt temas yokken erimesidir. Ortamdaki nemden ötürü oluşan buhar veya yanma gazları ile eriyen metalin temas halinde olmasıdır. Bu gazların çözünmesini engellemek için ortam tamamen nemden uzaklaştırılmalıdır. Ocak atmosferinin az oksitleyici olarak ayarımı ve yanma gazlarının ertilmiş metalle daha az temasının sağlanması gerekmektedir (Aran 2007; Yıldız 2019).





Şekil 2.7. Potalı ocak; (a) kaldırmalı, (b) sabit ve (c) devrilen pota ocak

### 2.2.7.1. Dökme demir üretimi

Amerikan Dökümcüler Birliği, Aralık 2021 tarihinde yayınladığı 2020 yılı verilerini kapsayan 55. Dünya Döküm Üretimi verilerine göre Türkiye, toplamda 2 milyon 170 bin 759 ton üretim ile dünyada 9., Avrupa'da ise 2. sırada metal döküm üreticisi konumuna gelmiştir. Gri döküm ihracat oranı 2021'de %47'de kalırken sfero döküm ihracat hacmi %16 artarak ihracat oranı %77'ye yükselmiştir. Pazar verileri bazında Türkiye döküm sektöründe; dayanıklı tüketim %56, iş makinaları, inşaat, şehircilik %21 ve ağır sanayi %23'lük bir paya sahiptir. Ayrıca Türkiye yaklaşık olarak 1 milyon ton/yıl spesifik ürün üretiminde toplam üretimin %71'i gri dökme demir, %14'ü sfero dökme demir, %10'u dökme çelik, %4'ü demir dışı metaller ve %1'i temper dökme demir olarak gerçekleşmektedir (Aran 2007).

Dökme demirler, kompozisyonunda %2,06 - 4,4 arasında karbon ve %0,5-3,5 arasında Si içeren Fe-C-Si alaşımıdır. Literatürde %2 den %6,67'ye kadar Fe-C diyagramında dökme demir olarak adlandırılmaktadır ama karbon içeriğinin yüksek olması kırılganlığa yol açtığından %4,4' e kadar karbon ve %3,5' e kadar Si içerdiği kaynaklara geçmiştir (Aytaçoğlu 2012; Kurt 2019).

Karbon oranının büyük bir bölümünü katılaşma esnasında ayırmakta ( $Fe_3C$ , yarı kararlı katılaşma) ve dökme demirin mikro yapısında grafit (kararlı katılaşma) olarak görülmektedir. Soğuma hızı yavaş olursa yapıda fazla bulunan karbon elementi karbon olarak çökmektedir. Ancak soğuma hızı, hızlı olduğunda karbon bakımından zengin kompozisyon  $Fe_3C$  olarak kalmaktadır. Grafitin büyüklük, dağılım ve şekli dökme demirin cinsini ve özelliklerini belirlemektedir (Bulut 2021; Ünal 2017).

Çeliklere göre dökme demirlerin sünekliği ve tokluğu daha düşük olduğu için, sertlik, mukavemet, işlenebilirliği, aşınma ve korozyon özelliklerinin arttırmak için bazı alaşım elementleri ilave edilebilmektedir. Örneğin; krom (Cr), molibden (Mo), mangan

(Mn), P, S, bakır (Cu) ve nikel (Ni) ile alaşımlama yapılabilmektedir (Akın 2014; Bartın Üniversitesi t.y.; Öztürk t.y.; Ünal 2017). Dökme demirler çeşitli alaşımlama elementlerinin özelliklerine olumlu etkileri düşünüldüğünde döküm sanayinin en büyük üretim çeşitliliği kapasitesine sahip olduğu aşikardır. Hem döküm hem de mamul parça özellikleri açısından birden fazla üstün özellik göstermektedir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi listelenmiştir (Aytaçoğlu 2012).

- 1150-1300 °C sıcaklık aralığında ergime sıcaklığı,
- İyi akışkanlık gösterme,
- Kalıp şeklini alabilme yeteneği,
- Düşük ergime sıcaklığı nedeniyle maliyetin ucuzluğu,
- Kimyasal kompozisyon sınırlarının genişliği ve benzer özellikler elde edilmesi sebebiyle üretim kolaylığı,
- Karmaşık parçaların tek seferde üretilmesi,
- Üretiminin kolay ve basit olmasından dolayı en son ürüne geçişin hızlı yapılması,
- Talaşlı imalat yöntemi ile iyi işlenebilirliği,
- Titreşim durdurma özelliğinin iyi olması,
- Basma mukavemetinin yüksekliği,
- Korozyon ve aşınmaya karşı gösterdiği dayanıklılık,
- 10kg/mm<sup>2</sup> ile 16kg/mm<sup>2</sup> aralığında mukavemet, 120 ile 300HB standartları arasında değişen ve özel aşınmaya karşı dayanıklı dökme demirlerde 600HB sertlik değerine sahip olmaları,
- Çeliklere göre aynı mukavemet değerleri kıyaslandığında dökme demirler düşük viskozite ve yüksek termal iletkenliklere sahip olmaları,
- Yüksek kapasite ve hızlarda iyi işlenebilirlik, özellikle yapıdaki serbest haldeki grafit yağlayıcı niteliği göstererek işlem kolaylığı sağlamaları,
- Gri dökme demirlerin iyi sönüm özelliği göstermeleri,
- Benzer ürünlerle kıyaslandığında oluşan arta kalan gerilimlerin daha düşük çarpılmaya neden olduğu,
- Kopma mukavemeti 14 ile 30kg/mm<sup>2</sup>, kopma uzamasının oldukça az olduğu rapor edilmiştir.

Dökme demirler, döküm mikro yapısına göre sınıflandırılırlar. Karbon kompozisyonu, ilave edilen alaşım elementi oranı ve emprüte miktarı, katılaşma esnasında ve sonrasındaki soğuma hızı, dökümden sonra uygulanan ısıl işlemler mikro yapıyı tayin etmede yardımcı olmaktadır. Bunlar karbonun cinsini ve fiziksel özelliklerini de kontrol etmektedir. Dökme demirler beş grupta incelenmektedir (Çizelge 2.4) (Bartın Üniversitesi t.y.).

- Gri (kır, lamel grafitli) dökme demir (A,B,C,D ve E tipleri)
- Sfero (küresel grafitli, nodüler) dökme demir
- Beyaz dökme demir
- Temper dökme demir
- Vermiküler (kompakt, yumru grafitli ) dökme demir

**Çizelge 2.4.** Dökme demirlerin kompozisyonları (Bartın Üniversitesi t.y.).

	%C	%Si	%S	%P	%Mn
<b>Gri (kır) dökme demir</b>	2,5-4	1-3	0,02-0,25	0,02-1	0,2-1
<b>Beyaz dökme demir</b>	1,8-3,6	0,5-1,9	0,06-0,2	0,06-0,2	0,25-0,8
<b>Temper dökme demir</b>	2,2-2,9	0,9-1,9	0,02-0,2	0,02-0,2	0,15-1,2
<b>Sfero dökme demir</b>	3-4	1,8-2,8	0,01-0,03	0,01-0,1	0,1-1
<b>Vermiküler dökme demir</b>	2,5-4	1-3	0,01-0,03	0,01-0,1	0,2-1

Beyaz ve gri dökme demir isimlerini kırılma yüzeylerinden almaktadır. Temper dökme demir, beyaz dökme demir olarak dökülmektedir ve ısıl işlemlerden geçirilmektedir.

Sünek dökme demir, sünek davranış sergilemesinden dolayı çil dökme demir, katılaşma esnasında çok hızlı soğutulmuş dışı beyaz dökme demir ve yavaş soğutulmuş içi gri dökme demir olan yapı; benekli dökme demir (lamel grafit ve  $Fe_3C$ ), soğumaya bağlı olarak hem kır hem beyaz dökme demir yapılarının bir arada görüldüğü yapılar olarak rapor edilmiştir (Bulut 2021).

### a) Gri (Kır, Lamel Grafitli) Dökme Demir

En yaygın kullanılan dökme demirdir. Gri dökme demirler kupol ocaklarında üretilmektedir. Gri dökme demire gri denilmesinin sebebi kırılma yüzeylerinde oluşan isli gri görüntüden dolayı ismini buradan almıştır. Yavaş soğutulma ile katılaşmadan sonra kompozisyonundaki karbonun büyük bir bölümü serbest grafit lamelleri olarak bulunmaktadır. Bu sayede yapıda çatlak gibi davranan grafit sünekliği düşürmektedir. Si, gri dökme demirde grafitleşmeyi sağlayan en önemli bir faktördür. Si' nin azaltılması ve soğuma hızının arttırılması  $Fe_3C$ ' nin grafitleşmesini önlemektedir.

Grafit şekillerine göre A, B, C, D ve E tipleri bulunmaktadır. Ayrıca gri dökme demirler lamel uzunluklarına göre de sınıflandırılmaktadır. Gri dökme demirin (%3,5 C) katılaşma sıcaklığı  $1175^{\circ}C$  ve döküm sıcaklığı  $1250-1350^{\circ}C$  arasındadır (Akın 2014; Aran 2007; Aytaçoğlu 2012; Pürçek t.y.). Mukavemet değerleri düşük ancak karbon miktarını arttırıldığında mukavemet ve sertlik de arttığı literatürdeki kaynaklardan bilinmektedir. Titreşim enerjisi söndürme iyi ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle çok kullanım alanına sahiptir. İşlenebilirliği yüksek olan gri dökme demirin, mukavemetini arttırmak için ısıl temperleme uygulanmaktadır. Mo, Ni, Cr ve Cu alaşım elementleri ilave edilerek gerilme mukavemeti  $550MPa$ 'a kadar yükseltilebilmektedir. Gri dökme demirler çekme gerilmelerinde gevrek ve zayıf özelliktedirler. Bunun sebebi grafit lamellerinin keskin uçlarında gerilme yığınları oluşmasıdır. Basma mukavemetleri iyidir ancak sünektirler. Aşınma dayanımları iyidir, ince kesitli parçalarda yüksek akışkanlıkları sayesinde döküm yolu ile üretilmesine imkân sağlamaktadır. Dökümün ardından katılaşma esnasında çekinti oluşmasının az olduğu rapor edilmiştir (Bartın Üniversitesi t.y.; Bulut 2021; Türen 1998; Ünal 2017).

### b) Sfero (küresel grafitli, nodüler, düktil) dökme demir

Ergimiş halde yapıya döküm öncesi aşılama Mg veya seryum (Ce) ilave edilmesi ile katılaşma veya ısıl işlem sonrası karbonun küresel grafit halini almasıyla küresel grafitli dökme demir elde edilmektedir. Grafitler katılaşma esnasında oluşmaktadır. Mg katkısı grafiti küresel hale getirmesinin yanında erimiş metal için S ve oksijen (O) uzaklaştırıcı rol oynamaktadır. Bu olaya "*Mg tretmanı*" denilmektedir.

Sfero dökme demirin kırık yüzeyi gümüş gridir. Grafit şeklinin küresel olması dökme demire süneklik özelliği kazandırmaktadır. Yüzeyleri ise parlak görünümündedir

(Şekil 2.9) (Aytaçoğlu 2012; Bartın Üniversitesi t.y.; Bulut 2021; Kurt 2019; Öztürk t.y.). İşlenebilirliği iyi, dökümü kolay, düşük ergime sıcaklığı ve yüksek aşınma dayanımı olan gri dökme demirlerin; süneklik, tokluk ve yüksek mukavemet gibi çeliklerin avantajlarını kapsadığından geniş kullanım alanına sahiptir. Çekme mukavemetleri 415 ile 830MPa arasında değişkenlik gösterirken alaşım elementlerinin ilavesiyle korozyon direnci ve yüksek sıcaklık gerektiren alanlarda kullanımları da bulunmaktadır (Akın 2014; Ünal 2017).

### c) Beyaz dökme demir

Yapısında karbonun büyük bir bölümü  $Fe_3C$  şeklindedir. Soğuma hızlı olduğu için karbon, karbür olarak kararlı yapıda kalmaktadır. Dökme demirler arasında karbonun  $Fe_3C$  olarak kaldığı tek dökme demir çeşididir. Yapıda  $Fe_3C$  olması nedeniyle aşınma direnci ve sertliği yüksektir ancak gevreklerdir. Bununla birlikte, yapıda birden fazla intermetalik bileşik kapsadığından sünekliği düşüktür. Çekme mukavemeti 140-620 MPa, basma mukavemeti 1410-1760 MPa ve sertlik değerleri 375-600 HB arasında değişkenlik göstermektedir. Beyaz dökme demirin (%2,8 C) katılaşma sıcaklığı  $1240^{\circ}C$  ve döküm sıcaklığı  $1280-1320^{\circ}C$ 'dir. İşlenebilirlik ve darbe direnci düşük olduğu için sınırlı kullanım alanına sahiptir.

Beyaz dökme demirin kırık yüzeyi gümüş beyaz renktedir. Ayrıca, temper dökme demir için hammadde olarak da kullanılabilir (Aran 2007; Aytaçoğlu 2012; Bulut 2021; Ünal 2017).

### d) Temper dökme demir

Beyaz dökme demirin temper işlemi ile karbürlerinin parçalanmasının sonucunda oluşan yapıya temper dökme demir denilmektedir. Beyaz dökme demirler, kapsadığı demir karbürü, grafit ve demire ayırmak için ısı işleminden geçirilmektedir. Bu işlemler sonucunda temper dökme demir, beyaz dökme demire göre daha sünek bir yapıya dönüşmektedir. Temper dökme demirin katılaşma sıcaklığı  $1250^{\circ}C$  ve döküm sıcaklığı  $1325-1400^{\circ}C$  'dir. Temper dökme demirdeki grafitler patlamış mısıra (temper karbon) benzeyen görünümde bulunmaktadır. Temper dökme demirin kırık yüzeyi gümüş gri renktedir. Yapıda karbon küresel formda olduğu için gri dökme demire göre daha iyi mukavemete sahip olmaktadır. Temper dökme demirler, iyi işlenebilirlik, yüksek mukavemet ve tokluğa sahip ayrıca sünek yapılarıdır. Beyaz temper dökme demir

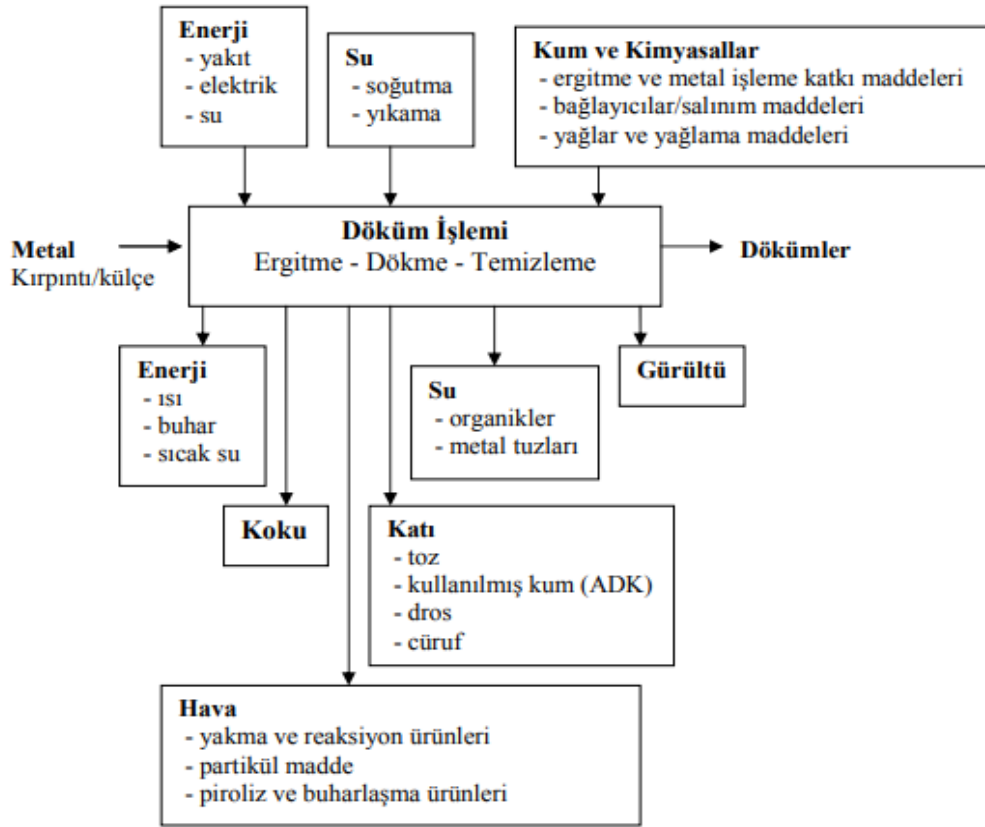
(oksitleyici ortamda temperleme) ve siyah temper dökme demir (nötr ortamda temperleme) olmak üzere iki farklı yapıda da bulunmaktadır. İnce kesitli parçaların dökümlerinde, soğuk şekillendirme işlemlerinde, talaşlı imalatta ve aşınma direnci istenilen malzemelerde tercih sebebidir (Akın 2014; Aran 2007; Aytaçoğlu 2012; Bulut 2021).

Temper dökme demirin çekme mukavemeti 310 ile 620 MPa arasında değişmektedir. Temper dökme demirin kompozisyonundaki karbon miktarı kontrolü önem arz etmektedir. Karbon bulunması ergimiş metal akışkanlığını azaltmakta, katılaşma sırasında çekilmeyi arttırmakta ve tavlanabilirlik yeteneğini düşürmektedir. Birincil grafit oluşumuna engel olmak için kompozisyon içindeki Si miktarını sınırlamak gerekir. Mn ve S, S'ün Mn' a bağlı olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir (Akın 2014; Ünal 2017).

#### **e) Vermiküler (kompakt, yumru grafitli, yüksek mukavemetli) dökme demir**

Mikro yapısı solucana benzer, kıvrımlı oldukları için bu yapıları vermiküler dökme demir denilmektedir. Yeterli olmayan Mg veya Ce ıslah işlemi (aşılmasında) sonucunda grafit tam olarak küresel hale gelemese yanlılıkla imal edilmesi sonucunda oluşmuştur. Hata olarak algılanan bu durum bazı tesislerde bilerek imal edilmektedir. Gri ve küresel grafitli dökme demir arasında bir fazdır. Vermiküler dökme demirler, gri dökme demirlerden daha iyi sertliğe, süneklığe, daha yüksek akma mukavemetine ve yorulma direncine sahiptir. Bu özelliklerinin yanında sfero dökme demirden daha iyi işlenebilirliğe ve termal iletkenliğe sahiptir. Yapısında lamel grafit bulunması istenmemektedir. Bununla birlikte yapısal olarak küresel grafit oranı %20'yi aşmamalıdır (Akın 2014; Aytaçoğlu 2012; Bulut 2021).

Demir çelik sanayisinde döküm sektörü, geri kazanımı diğer sektörlerden daha fazla olan endüstri dallarından biri olduğu bilinmektedir. Dökümhanedeki atıkların, Şekil 2.8'te temel girdi ve çıktıları gösterilmektedir (Başar ve Aksoy 2012). Dökümhaneler ve demir çelik tesisleri hurda demir, pik demir ve demir dışı metaller ile beraber ferro alaşımların YF, BOF, EAO ve IO kullanılarak ergitme işleminin yapıldığı ve üretim sonrasında da atık olarak düşünülen malzemelerin çeşitli sektörlerde kullanım olanağı sunduğu yerlerdir.



Şekil 2.8. Döküm sektörünün temel girdi ve çıktıları (Başar ve Aksoy 2012)

### 2.3. Endüstriyel Cüruflar

Metalurjik alanda katı atıkların en önemlisi cüruf, metallerin veya metal içeren cevherlerin yüksek sıcaklıkta eritilme işlemlerinden sonra oluşan, ilave edilen malzemeler ile ve metalden daha hafif olan metal oksidi dışında kalan diğer oksitli yapıların ve silikatlar karışımından olan ve üretilen erimiş metalden yoğunluk farkı nedeniyle üstte biriken bir atık olarak tanımlanmaktadır. Cürufu oluşturan oksitler; silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), mangan oksit ( $\text{MnO}$ ), kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), demir oksit ( $\text{FeO}$ ) ve magnezyum oksit ( $\text{MgO}$ ) bileşikleridir. Üretilen metale ve katılma prosesine göre kimyası ve morfolojisine bağlı olmaktadır. Endüstriyel cüruflar, demir (demir/çelik) ve demir dışı (kurşun/çinko/bakır ve alüminyum gibi) döküm atıkları olarak sınıflandırılmaktadır (Çelik 2007; Uzun 2014; Ünal 2017).

Metalin üretiminde cürufun birden fazla önemli işlevi bulunmaktadır. Metal üretim esnasında yapısındaki kükürt (S) ve fosfor (P) gibi safsızlıkların alınması; metalle arasına ara bir yüzey oluşturarak metalin atıklardan dolayı kirlenmesi ve ısı kaybını önlemeyi sağlamaktadır (G. C. Wang 2016b). Ayrıca, üretim ocaklarının sürekli bir şekilde faaliyetine devam etmesi, üretilen cevherin kalitesine, tipine ve cürufun niteliğine

bağlı olmaktadır. Cürufun bu nitelikleri verilen malzemelerin mineralojik yapısı ve cürufun kimyasal kompozisyonu ile belirlenmektedir (Çelik 2007). Cürufu cüruf yapan katı malzemeler silis, kalker, magnezit, kalsiyum florür ve dolomittir. Cüruflar bazik ve asidik özellikte bulunup kahverengi, koyu yeşil ve siyah renklerde olabilmektedir. Bileşimdeki demir oksit cürufa rengini vermektedir. Özgül ağırlığı ise metalinkinden daha düşüktür (Önkibar 2006).

### 2.3.1. Demir döküm metal cürufları

BOF cürufu ve EAO cürufu çelik cürufları olarak adlandırılır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015). Çelik cürufu farklı ergime koşulları ve besleme malzemesi sonucunda oluşan, değişik bir aralığa sahip kimyasal ve mineral kompozisyonu olan demirden çelik yapılmasının yan malzemesidir. YF cürufu ile kıyaslandığında çelikhane cürufu ve EAO cürufu oksidasyon (yükseltgenme) yöntemi ile elde edilmektedir ve bundan dolayı birden çok değerli malzemeleri kapsamaktadır (Reuter, Xiao, ve Boin 2004).

Çelik cürufu başlıca  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $\text{FeO}$ , alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ , fosfor pentoksit ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) içermektedir. Çelik cürufunun kimyasal kompozisyonu, fırın tipine ve ön çalışma yöntemine göre değişkenlik göstermektedir. Çizelge 2.5'te BOF ve EAO cüruflarının kimyasal kompozisyonu özetlenmiştir (Yi vd. 2012).

**Çizelge 2.5.** BOF ve EAO cüruflarının kimyasal kompozisyonu karşılaştırılması

Oksitler (%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
BOF Cürufu	45-60	10-15	1-5	3-9	7-20	3-13	2-6	1-4
EAO Cürufu	30-50	11-20	10-18	5-6	8-22	8-13	5-10	2-5

Öğütülmemiş YF cürufun yapısı, yavaş bir şekilde soğutulduğunda kristal formda ancak hızlı soğuma olursa camsı yapıda olmaktadır. Bu cüruflara granüle YF cürufları denilmektedir. Ani soğutma su kullanılarak yapılmaktadır. Granüle YF cürufları büyük bir camsı yapıya sahiptir ancak içerisinde melilit (kalsiyum, alüminyum, magnezyum silikat ve  $\text{SiO}_2$ ) ve az miktarda mervinit gibi kristal fazlar da içerebilmektedir (Karalar ve Konak 2019; Tokyay ve Erdoğan 2011).

YF cüruflarının ve EAO cüruflarının Çizelge 2.6 ve 2.7'de (Çelik 2007), demir ve çeşitli cürufların kimyasal kompozisyonları ise Çizelge 2.8'de gösterilmiştir.



**Çizelge 2.6.** YF cürufu kimyasal kompozisyonları, % (Çelik 2007).

Bileşikler	Yüzde (%) Dağılım	Bileşikler	Yüzde (%) Dağılım
FeO	0,29	S	0,96
SiO <sub>2</sub>	36,87	Na <sub>2</sub> O	0,29
MnO	1,29	K <sub>2</sub> O	0,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,27	TiO <sub>2</sub>	0,64
CaO	37,61	Bazite	0,812
MgO	5,62	-	-

**Çizelge 2.7.** EAO cürufu kimyasal kompozisyonları, % (Çelik 2007).

Bileşikler	Kaynak	Yüzde (%) Dağılım
CaO	Şarjdan	40-60
SiO <sub>2</sub>	Oksidasyon Sonucu	5-15
FeO	Oksidasyon Sonucu	10-30
MgO	Dolomit Şarjından	2-5
CaF <sub>2</sub>	Cüruf Akışkan Yapıcı Şarjından	2-5
MnO	Oksidasyon Sonucu	2-5
S	Çelikten Geçiş	2-5
P	Oksidasyon Sonucu	2-5

EAO cürufu soğutulduktan ve katılaştıktan sonra birden fazla basamaklı kırma prosesinde kaba partikülden ince partiküle doğru parçalanma işlemine tabii olmaktadır. Her kırma adımını metalik bölümün elektromanyetik uzaklaştırması takip etmektedir. Metalik malzeme EAO 'ya geri döndürülmektedir. Metali giden cüruf malzemesi “yapay taş” olarak isimlendirilmektedir (Mihok, Seilerová, ve Baricová 2004). Çelik üretim prosesinin her adımında EAO cürufunun metalik demir miktarına bakmak gerekmektedir. Çünkü her adımda farklı türde cüruf oluşmakta olup bunlar da farklı demir kompozisyonuna sahip olabilmektedir (Varvara vd. 2014).

Döküm cürufu, metal üretim yerlerinde ergitme esnasında oluşan istenilmeyen bir yan malzemedir. Kompozisyon açısından üretilmek istenen metale ve üretim yerine göre bazı değişiklikler gösterebilmektedir. Bütün bu değişikliklere rağmen döküm cürufları beton, silis kumu ve çimento ile birlikte mineral içeriği açısından emsal ve reaktif olmayan bir forma sahip olması, aynı zamanda fiziksel belirleyici özellikleri bakımından çeşitlilik bakımından endüstriyel alanlarda geri kazanım olarak elde edilmesi yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır (Yıldız 2019).

Döküm cürufu, erimiş metalin saf halini elde etmek için içine bazı flaksların karıştırılmasıyla istenilmeyen malzemelerin oksidasyon sonucunda oluşan silikat, kükürt ve oksit bileşiklerinden meydana gelen metal dışı bir yan üründür. Çoğu zaman gri tonlarda poroziteli ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir.

Çizelge 2.8. Çeşitli cürufların kimyasal kompozisyonlar (Tokyay ve Erdoğan 2011)

Oksit (%)	Demir Cürufları				Diğer Cüruflar			
	YF Cürufları			Witz- Linz Dona Cürufu (Almanya)	Pb-Zn Cürufu (İngiltere)	Ni Cürufu (Kanada)	Cu Cürufu (Güney Afrika)	P Cürufu (ABD)
	Fransa	Japonya	Türkiye					
SiO <sub>2</sub>	35	31	40,2	13	18	29	34	41
CaO	43	37	34,5	47	20	4	9	44
MgO	8	8	9,4	1	1	2	4	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	16	11	1	6	1	6	9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	0,7	0,8	31	38	53	44	1

Dökümhane cürufunun kompozisyonu değişkenlik göstermekle beraber şu şekildedir;

- Demir içeren oksitler ve diğer bileşikler: FeO, Hersinit (FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ve magnezyoferrit,
- Alüminyum içeren çeşitli bileşikler: Mullit (2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub>), Safir ((Mg,Al)<sub>8</sub>(Al,Si)<sub>6</sub>O<sub>20</sub>),
- Kalsiyum içeren bileşikler,
- Kükürt içeren bileşikler,
- Magnezyumlu bileşikler: Spiel (MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Periklaz (MgO), Forsterit (2MgO.SiO<sub>2</sub>) (Yıldız 2019).

Döküm cürufu kimyasal ve fiziksel özellikler olarak ele alındığında, cürufun parke, bordür, oluk, beton ilave maddesi, çimento, hazır beton malzemeleri, raspa kumu, beyaz eşya ve asansör denge ağırlığı, asfalt agregası, asfalt dolgu ürünü, alt ve üst temel dolgu ürünü olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015). Metalurjik üretimlerde çelik cürufu hammaddenin ikincil kaynağıdır. Doğrudan sinterlemede ve çelik üretiminde kullanılmaktadır. Böylelikle değerli elementler geri kazandırılmaktadır. Ayrıca çelik cürufu; yapı, kaldırım ve mühendislik malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Reuter, Xiao, ve Boin 2004).

### 2.3.2. Demir dışı metal döküm cürufları

Genellikle demir ve çelikten daha pahalı olan demir dışı metaller, arzu edilen özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır; örneğin, alüminyumun yüksek

mukavemet-ağırlık oranı, bakırın yüksek iletkenliği ve işlenebilirliği ve nikel ve çinkonun korozyona karşı yüksek direnç özellikleri örnek verilebilmektedir.

Demir dışı cüruflar birincil ve ikincil hammaddelerden demir dışı metalin geri kazanımı ve işlenmesi sırasında üretilmektedir. Demir dışı metallerin üretiminde yan ürün olarak cüruf oluşmaktadır. Demir dışı cüruflar, demir dışı metali diğer bileşenlerden ayırmak için kullanılan yüksek sıcaklık işlemlerinin erimiş yan ürünleridir. Demir dışı metallerin ergitilmesi sonucunda demir ve silikon ayrılarak silikon bazlı bir cüruf oluşmaktadır. Ortaya çıkan cüruf, yüksek oranda çelik içermektedir. Erimiş cüruf soğutulduğunda kaya benzeri veya tanecikli bir malzemeye dönüşmektedir. En yaygın olan demir dışı metal döküm cürufları; bakır, nikel cürufları, fosfor cürufları, kurşun, kurşun ve çinko, çinko cürufları ve alüminyum cüruflarıdır. Bakır cürufu, silisyum ilave edilerek bakır cevherlerinden Pirometalürjik işleme bakır üretmek için mat ergitme ve tanecikli malzemeye dönüştürme aşamalarında gerçekleştirilmektedir. Sülfid cevherlerinin Pirometalürjik işlemi sırasında kurşun, kurşun-çinko ve çinko cürufu oluşmaktadır.

Demir dışı bir metali cevherinden ayırmak için birden fazla adım söz konusudur. Çıkarılan metalin türüne ve cevherin saflığına bağlı olarak kalsinasyon, kavurma, eritme, dönüştürme ve rafine etme işlemlerini içerebilmektedir. Demir cevherlerinden farklı olarak, çoğu demir dışı metal cevheri, sülfidlerin, oksitlerin, karbonatların ve silikatların karmaşık karışımları halindeki metallerle düşük derecededir. Bu nedenle, ekonomik olarak çıkarılmak üzere, demir dışı metal cevherleri normal olarak mineral zenginleştirme yoluyla konsantre edilmektedir. Ekstraksiyon adımlarından önce metali atık kayadan ayırmak için mineral zenginleştirme, dökme cevherin ezilmesini ve ince parçacıklara öğütülmesini içerebilmektedir; herhangi bir gangı (fazla atık kaya ve mineral) uzaklaştırmak, mineral kristallerini köpük flotasyonu ile cevher matrisinden serbest bırakmak ve gangdan metal değerleri toplamak ile yapılabilmektedir. Ekstraksiyon işleminde kalsinasyon, örneğin bir cevheri ayrıştırmak ve uçucu ürünü, karbondioksiti veya suyu ortadan kaldırmak için bir cevherin ısı işlemidir. Kavurma, eritmeden önceki bir süreçtir. Kavurma, oksijen veya diğer elementleri kullanarak kimyasal dönüşümü gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca ince cevherler ve konsantreler, sinter kavurma ile tamamlanabilecek bir yüksek fırına yüklenmeden önce topaklaştırılmalıdır. Kavurma işleminde cevher, bileşenlerin erime noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Örneğin bakır ve nikel cevherlerinde uçucu oksitler halinde bulunan kükürt ve diğer elementler uzaklaştırılmaktadır. Eritme, bir metal veya mat üretimi için bir ısıtma işlemidir. Bu süreçte cüruf oluşmakta ve boşaltılmaktadır.

Genel olarak bu işlem, metal oksidin uygun bir fırında karbon, kükürt, sülfür ile indirgenmesidir. Örneğin; YF, flaş veya EAO'da yapılmaktadır. Eritme sırasında, bir cüruf oluşturmak için eritici maddeler eklenir.

Demir dışı cürufların inşaat malzemelerinde kullanımını belirleyen kurşun (Pb), Ni ve Cu cürufudur. (Kovacs vd. 2017; Labrincha vd. 2017; G. C. Wang 2016a).

#### 2.4. Döküm Üretiminden Kalan Atık Cürufların Depolanması ve Yeniden Değerlendirilmesi

Ülkemiz demir-çelik sanayisi bakımından geniş bir üretim alanına sahiptir. Bunun sonucu her yıl üretim sonrasında tesislerin neden olduğu tonlarca döküm atığı ortaya çıkmaktadır. Bir ton döküm üretimi sonunda yaklaşık olarak 0,6 ile 0,8 ton arasında atık oluşmaktadır. Bu atıkların 0,4'den 0,6'ya kadarını kullanılmış döküm kumları kapsamaktadır. Dökümde yaş kum kalıplama aşamalarında ana süreçlerde oluşabilecek atıklar Çizelge 2.9'da özetlenerek ifade edilmiştir. Ayrıca, demir dışı metallerin döküm işlemlerinden oluşabilecek atıklar da Çizelge 2.10'da gösterilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2012).

**Çizelge 2.9.** Demir dökümhanelerinde oluşabilecek atıklar

Atık oluşumu	Atık türü	Miktar
Ergitme	Ocak cürufu	Ocak türü ve malzemeye bağlı
Ergitme Kalıp üretimi	Ocak iç kaplamaları Tehlikeli atık içerikli demir ambalajlar Tehlikeli atık içermeyen demir ambalajlar	Ocak tipine bağlı Ender, genelde geri dönüşüm veya tekrar eritip geri kazanma
Kalıp üretimi	Bağlayıcı madde atıklar	Az
Kalıp üretimi (Coldbox)	Amin sülfat	Az, 0,1 %
Kalıp üretimi ve döküm	Kalıp kumu	0-5%
Kalıp üretimi ve döküm	Kum kalıbı kumu	20-50%
Kum geri kazanımı (Kuru toz emici)	Kum geri kazanımı tozları	1-30% geri kazanıma göre
Kum geri kazanımı (Yaş toz emici)	Kum geri kazanımı çamurları	Ender, olursa 1- 20%
Temizleme (kumlama taşlama)	Kumlama kumları	0,1-1%
Ek işlem (döküm temizlemesi, toz temizleme)	Demir içerikli tozlar	Çok az ortalama 0,1%
Ek işlem (kalite kontrolü)	Çatlak kontrol işlemi sonucu atık olarak çıkan penetrant toz ve sıvılar	Çok az

Cüruflar Pirometalürjik uygulamalarda çok büyük miktarlarda üretilmekte ve uygun olarak geri dönüştürülmedikleri ve kullanılmadıkları zamanda büyük miktarda atık olarak geriye kalmaktadırlar. Endüstrileşmenin günümüzde artmasıyla metalürjik cüruflar için depolama yerlerine ihtiyaç duyulmakta ve bertaraf maliyetleri de artmaya başlamaktadır. Atık maddeler ile dolan yerler toprak, hava ve su kirliliği gibi çevresel sorunların yanında insan sağlığına da zarar vermeye başlamaktadır (Reuter, Xiao, ve Boin 2004).

**Çizelge 2.10.** Demir dışı metallerin döküm işlemlerinden oluşabilecek atıklar

Atık oluşumu	Atık türü	Miktar
Ergitme	Ocak cürufları	Ocak türü ve malzemeye bağlı
Ergitme	Ocak iç kaplamaları (Metalürjik proseslerden kaynaklanan, tehlikeli maddeler içeren diğer astarlar ve refraktörler)	Ocak türüne bağlı
Kalıp üretimi	Tehlikeli atık içeren demir ambalajlar Tehlikeli atık içermeyen demir ambalajlar	Ender, genelde geri kazanım
Kalıp üretimi	Bağlayıcı madde atıkları	Az
Kalıp üretimi ve döküm	Kalıp kumu	Ender 0-5%
Kalıp üretimi ve döküm	Kum kalıbı kumu	Alüminyum dökümünde 100- 200%
Kum geri kazanımı (Kuru toz emici)	Kum geri kazanımı tozları	1-30 % geri kazanıma göre
Kum geri kazanımı (Yaş toz emici)	Kum geri kazanımı çamurları	Ender, olursa 1-20%
Temizleme (kumlama taşlama)	Kumlama kumları	0,1-1%
Ek işlem (döküm temizleme, toz temizleme)	Demir içermeyen diğer tozlar	Çok az ortalama 0,1%
Ek işlem (kalite kontrolü)	Çatlak kontrol işlemi sonucu atık olarak çıkan penetrant toz ve sıvılar	Çok az

Dünya Çelik Örgütü (DÇÖ) cürufu yeniden kullanarak ve geri dönüşüm ile üretime kazandırarak sıfır atığa ulaşmayı hedeflemiştir. Cürufun geri dönüşüm çabalarının hedefi hem çevresel hem ekonomiktir (Uysal ve Bahar 2018). Ancak cürufun içerisinde, geri dönüştürme sırasında çevreye zarar verecek kimyasal bileşikler olduğu bilinmektedir. Bu yüzden geri dönüşüm işleminden önce elementel analizi yapılmalıdır (Uysal ve Bahar 2018).

Dünyada yılda yüksekliği 50-66 m demir olmayan cüruf yığınlarının olduğu tahmin edilmektedir. Cüruf yığınlarının poroziteli olması yüzünden yağmur suyu cüruf yığınlarından süzülüp aşağıya inince çevrenin kirlenmesine neden olan cüruf ile etkileşime girmektedir. Araştırmalar cürufun reaktif olduğunu ve zamanla aşınmaya

uğradığını göstermiştir. Aşınmayı fiziksel olarak dışında olarak düşünülmemeli aynı zamanda da yığının içinde de oluştuğu bilinmelidir (Souter ve Watmough 2017). Cürufunun pH aralığı 8-10 arasında olup orta düzeyde alkali bir malzemedir. Cürufların sızıntı suyunun pH değeri 11'i geçebilir ve cüruf ile doğrudan temas eden galvaniz borular veya alüminyuma oksitlenerek aşınmaya neden olabilmektedir (Dpt 2023).

YF hammaddeleri, gang mineraller, flaksları ve kok külü ile beraber magnezyum ve kireç içermektedir. Termal mineral oksitler silika, alüminadır. Bunlar flaks malzemelerle beraber cüruf içerisine alınmaktadır. Sonunda oluşan sıvı haldeki cüruf, erimiş halde bulunan sıvı ham demirin içerisinde çözünme gerçekleştirilmemektedir. Ayrıca, sıvı cüruf daha hafif olduğundan sıvı halde olan ham demirin üzerinde birikmeye başlamaktadır. Bazı flaks malzemeler yalnızca asidik olan bileşenlerin Erime noktasını azaltmak için gerekli değildir, ayrıca cürufun yeterince akma kabiliyetinde olmasını; S, Si ve Mn kontrolü ile sıvı halde olan ham demirin kalitesinin kontrolünü sağlamaktadır. %95-96 oranlarında bulunan dört temel metal oksidin (asidik özellikli olanlar  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; bazik özellikli olanlar ise  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ) dışında hammaddeye bağlı halde olarak az miktarlarda diğer oksitler de bulunmaktadır. Bunlar genelde  $\text{FeS}$ ,  $\text{CaS}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$  ve alkali silikatlardır (Uzun 2014).

YF cürufları silis, kireç, alüminyum, demir, mangan oksit ve kükürt gibi malzemeler içermektedir. Kullanım hammadde miktarına göre bunların oranları değişkenlik göstermektedir. YF cürufları granüle edildikten sonra mesela çimento tesislerine satışı yapılarak Portland çimento üretiminde kullanılmaktadır. Demir çelik fabrikalarında 1 ton sıvı halde olan ham demir üretimi esnasında 300 ila 400 kg arasında cüruf oluşmaktadır. Cürufun oluşum tepkimeleri denklem 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6'da gösterilmektedir (Uzun 2014).



YF'den sonra neredeyse 1400 ila 1600 °C arasında erimiş durumda olan cüruf hava koşullarında ağır şekilde soğumaya konulduğunda genelde taş, gri ve kristal yapıya benzer bir ürün olmaktadır. Soğutmaya göre cüruflar;

- Hava koşullarında soğutulmuş cüruf,
- Köpürtülme yapılmış cüruf,
- Havada atomize işlemi yapılmış cüruf,
- Suda granüle işlemi yapılmış cüruf,
- Pelet hale getirilmiş cüruf elde edilmektedir.

YF'den erimiş olarak çıkartılmış cüruf metoduna ve soğutma hızına göre farklı karakteristik özellikler göstermektedir. Önce sıradan atmosferik şartlarda daha sonrasında ise su ile soğutulma yapılan cüruflara “*hava şartlarında soğutulmuş YF cürufü*” ve su, buharla ve basınçlı hava ile soğutulanlara ise “*granüle olmuş YF cürufü*” denilmektedir. Kontrol edilerek belli oranlarda su ile soğutulma yapılarak içinde buhar hapsi elde edilen cüruf genişletilmiş veya köpürtülme yapılmış forma getirilmekte ve bu özellikteki cüruflar ponza taşlarına benzer poroziteli ve hafif bir forma sahip olmaktadır. Bol su içinde aniden soğutma yapılan cüruflar ise granüle hale getirilmekte ve bu tür cüruflarda camsı yapı elde edilmektedir (Uzun 2014).

Silis ve alüminyum içeren forma sahip olan YF cürufları granüle edilmiş cüruf olarak camsı yapıya sahip olarak üretildiklerinden bu ürünler ince taneye getirildiklerinde doğal mineral katkıları (puzolanlar) veya yapay puzolan malzemeler uçucu kül gibi puzolanik nitelik göstermektedirler. Öğütülmüş olan granüle YF cürufları kapsadıkları kireçten ötürü çok fazla miktarda olmasa da kendi başlarına bir miktar bağlayıcı madde özelliğini kazanan malzemelerdir. Cürufun hidrolik bağlayıcı özelliği;

- Su verme esnasında oluşan amorf malzeme miktarına (soğutma hızı),
- Kimyasal kompozisyonuna,
- Mineral kompozisyonuna,
- Petrolojik yapısına veya amorf yapıya bileşenin re aktivitesine,
- Öğütülmüş olan cürufun inceliğine bağlıdır (Uzun 2014).

Malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği dayanım agregaların önemli bir özelliğidir. Bu kırılmaya karşı dayanımı belirlemek için Los Angeles deney yöntemi yöntemler arasında en önemlisidir. Bu yöntem sonucunda elde edilen değerler farklı veya benzer

özelliğe sahip agregaların birbirlerine karşı dirençlerini de belirler. Genellikle kireç taşının parçalanma direnci %19 – 30 oranında, dolomitin ise %18 – 30 arasındadır (Kvasoğlu 2022).

Aşınma oranının düşük olması parçalanmaya karşı direncin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Çizelge 2.11’de çeşitli çalışmalar sonucunda elde edilen çelikhane cürufunun Los Angeles aşınma oranları verilmiştir.

**Çizelge 2.11.** Çelik Cüruflarının Los Angeles Aşınma Oranı (%)

Cüruf Tipi	Referans	Aşınma Oranı (%)
EAO	(Manso, Gonzalez, ve Polanco 2004)	15-20
EAO	(Beshr, Almusallam, ve Maslehuddin 2003)	11,6
BOF	(Geiseler 1996)	22

Çelik cürufuna ait karakteristik özellikler Çizelge 2.12’ de gösterilmiştir. Bu çalışmaların sonunda, çelik cürufunun Los Angeles aşınma oranının %15,8 olduğu ve normal agregalar ile kıyaslandığında bu oranın yüksek bir değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum çelik cüruflarının aşınmaya karşı yüksek bir dayanımının olduğunu göstergesidir. Ayrıca birim ağırlık değeri 3,19 olarak bulunmuştur ve bu oran diğer geleneksel olarak kullanılan agregaların özgül ağırlığından daha yüksektir. Yüksek orandaki birim ağırlık değerinden ötürü balast malzemesi olarak kullanıma uygun olduğu rapor edilmiştir (Chamling, Haldar, ve Patra 2020).

**Çizelge 2.12.** Çelik Cürufunun Karakteristik Özellikleri (Chamling, Haldar, ve Patra 2020).

Özellikler	Çelikhane Cürufu
Los Angeles Aşınma Oranı (%)	15,8
Agrega Darbe Değeri (%)	17,6
Agrega Parçalanma Direnci	22,4
Birim Ağırlık ( $t/m^3$ )	3,19
Su Emme (%)	1,7
Donma-Çözünme (%)	5,4
Tane Şekli	Kübik-Köşeli

Çelikhane cürufunun doğal tane boyutu 4 cm civarlarındadır. Bazik oksijen fırını cürufunun %6’lık tane boyutu miktarı ise 75  $\mu$ ’un altındadır. Bu bahsedilen boyutların kil zemin iyileştirilmesinde kullanımları uygun olmamaktadır (Kvasoğlu 2022).



Cürufun üstün özellikler göstermesinin nedeni çok yoğun, sert ve dayanımı yüksek bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. EAO cürufu ve doğal agreganın fiziksel özelliği birbirine benzemekte olup her ikisinin fiziksel özellikleri kıyaslamalı olarak Çizelge 2.13'te verilmektedir (Ünal 2017).

**Çizelge 2.13.** EAO cürufu ve doğal agreganın fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması (Uysal ve Bahar 2018).

Özellikler	Elektrik Ark Ocağı Cüruf Agregası	Doğal Agregası
Los Angeles Aşınma Katsayısı	13,0	15-29
Aşınma Direnci (Mikro Level)	8,0	8,0-11,0
Dona Dayanıklılık Süreci (Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , % w/w)	1,0	0-1,7
Dona Dayanıklılık Süreci(Don ve Buz Çözülmesi (% w/w)	0,4	0-0,3
Cilalı Taş Değeri	70,0	32,0
Tane Gradasyonu (% w/w)	0,5	0,5
Su Absorpsiyonu (% w/w)	>1	>1
Yığın Yoğunluğu (mg/m <sup>3</sup> )	3,4	2,8
Hacim Stabilitesi (% V/V)	2,9	

Farklı alanlarda kullanılabilmesi için fiziksel özelliklerine bakılır. Yapay agrega halinde çelik cürufunun kullanılabilmesi için eleme, manyetik seperasyon, parçalama ve ihtiyaç halinde yaşlandırma aşamaları gibi belli işlemlerden geçmesi gereklidir. Kaba taneleri istenilen boyutlara getirebilmek için çeneli parçalayıcılar kullanılan geleneksel yöntemler olabilir. 0-5 mm arasındaki tane boyutuna getirmek için tersiyer parçalayıcılar kullanılır (Fronek 2012).

Çelik üretiminde yan ürün çelik cürufu elde edildiğinden ötürü üretim tam kontrollü olarak yapılması zordur. Bu aşamada oluşan taneler silt boyutundan çok kaba tanelere kadar farklı boyutlarda oluşmaktadır. Tane boyutlarındaki bu farklılık nedeniyle cüruflar genel olarak üretim yerlerinde 2 ile 3 boyuta ayrılmaktadır. Bu tane boyutlarından ince taneler 5 mm, orta taneler 5 – 64 mm ve iri taneler 64 – 200 mm boyutlarında sınıflandırılırlar. Silt boyutundaki tane boyutlarının cüruf içerisindeki oranı %10 - 15 civarındadır (Yildirim ve Prezzi 2011).

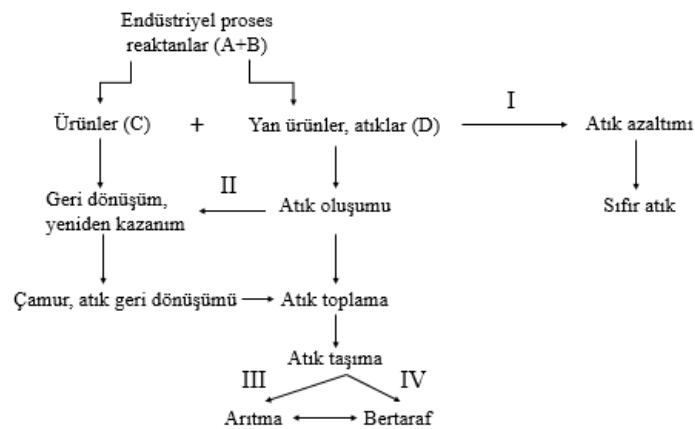
Birim hacim ağırlığı çelik cürufunun elde edilme metoduna göre değişkenlik göstermektedir. EAO çelik cürufunun birim hacim ağırlığı, uygulanan yöntem ve kompozisyonu ile farklılık göstermektedir. EAO çelikhane cürufu, içinde olan demir oksit nedeniyle doğal agrega ile karşılaştırıldığında daha yüksek birim hacmine sahip olur (Fronek 2012).

Farklı tesis yerlerinin üretimlerini yapmış oldukları çelikhane cüruflarının Çizelge 2.14'te farklı tesislerde bulunan cürufların yoğunluk değerleri verilmiştir (Kvasoğlu 2022).

Tehlikeli atıkların temelinde özelliklerine bağlı olarak ayrılması, toplanması, geçici olarak muhafaza edilmesi, geri dönüşümü, taşınması ardından bertaraf ve bertaraf sonrasında idaresi gibi aşamaların tamamı 'tehlikeli atık yönetimi' olarak isimlendirilmektedir. Tehlikeli atık yönetiminde temel hedef; maliyeti az, etkin ve güvenli yollarla atıkların toplanması, taşınması, arıtımı ve bertaraf sağlanmasının olmasıdır (Başar ve Aksoy 2012). Tehlikeli atık yönetim çizelgesi gösterilmiştir (Şekil 2.9).

**Çizelge 2.14.** Farklı Tesislerin Çelik Cüruflarının Yoğunluk Değerleri (Kvasoğlu 2022)

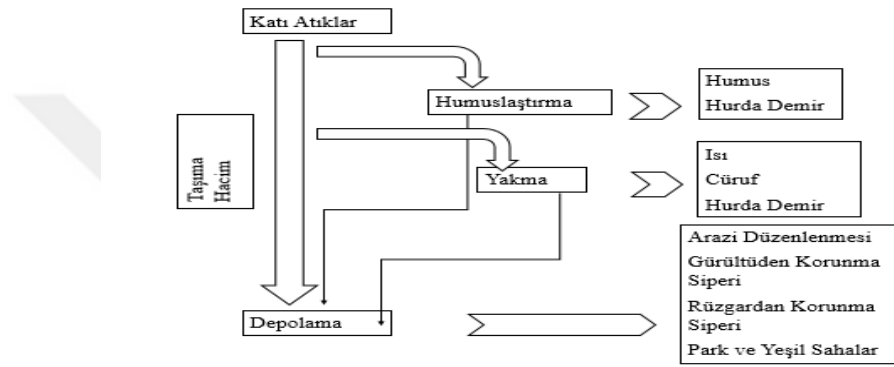
Referans	Cüruf Tipi	Yoğunluk (g/cm)
(Akın Altun ve Yılmaz 2002)	BOF	3,5 - 3,6
(Ramonich ve Barra 2001)	EAO	3,5
(Geiseler 1996)	BOF	3,1 - 3,7
(Luxán vd. 2000)	EAO	3,1 - 3,4
(Mahieux, Aubert, ve Escadeillas 2009)	BOF	3,3
(Manso vd. 2006)	EAO	3,3 - 3,7
(Motz ve Geiseler 2001)	BOF	3,3
(Motz ve Geiseler 2001)	EAO	3,5
(Rohde, Núñez, ve Ceratti 2003)	EAO	3,4 - 3,5
(Shen, Forssberg, ve Nordström 2004)	BOF	3,4 - 3,5
(G. Wang 1992)	BOF	3,1 - 3,3
(Xue vd. 2006)	BOF	3,3



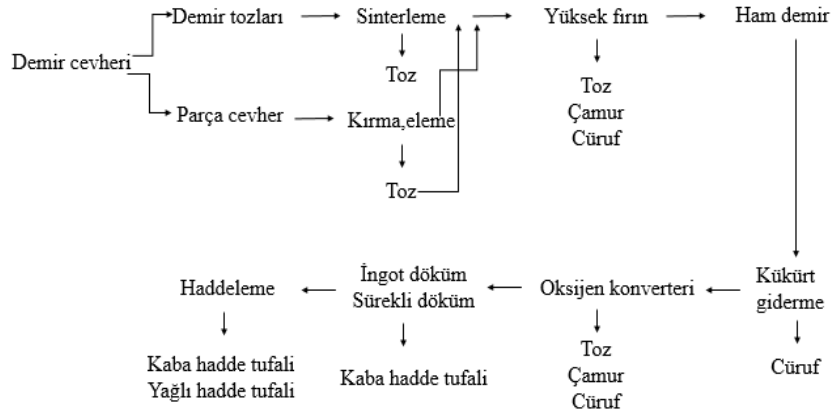
**Şekil 2.9.** Tehlikeli atık yönetim planı (Başar ve Aksoy 2012)

Metalurjik katı atıkların depolanmasının şematik gösterimi Şekil 2.10'da ve demir/çelik fabrikalarında oluşan katı atık türleri Şekil 2.11'de verilmiştir (Önkibar 2006).

Çelik cürufu, çelik üretiminde hammadde olarak bulunan ve kompozisyonunda istenilmeyen demir içermeyen elementleri yapısında toplayabilmesi için yüksek miktarda CaO içermektedir. Bu cürufun mekanik özellikleri ve içeriği, cürufun nasıl kullanılacağı kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Bu nedenle çelik cürufunun mineralojik, mekanik ve kimyasal özellikleri YF cüruflarından farklıdır (Yildirim ve Prezzi 2011).



Şekil 2.10. Metalurjik katı atıkların depolanması (Önkibar 2006)



Şekil 2.11. Demir-çelik fabrikalarında ortaya çıkan katı atık türleri (Önkibar 2006)

EAO cüruflarının ana mineral fazları manyetit, melanterit ve portlandittir. EAO, kaba taneli keskin kenarlı ve ince taneli açılı/yuvarlak görüntüye sahiptir. EAO cüruflarında yüksek sürtünme karakteristiği ve kimyasal yapılarından ötürü yüksek ısı tutma kapasitesi gözlenmiştir. Su ile etkileşim sonucunda CaO ve MgO bileşimlerinde genleşme meydana gelebilmektedir (Yildirim ve Prezzi 2011).

EAO ve BOF cürufu çelik üretimi esnasında oluşmaktadır. Bu nedenle EAO ve BOF cüruflarının mineralojik ve kimyasal özellikleri benzerlik göstermektedir. BOF ve EAO cüruflarının iki temel bileşeni FeO ve CaO elementleridir (Yildirim ve Prezzi 2011).

Demir oksit kompozisyon içeriği BOF cürufunda %38 oranına kadar olabilmektedir. Demir oksitin sahip olduğu bu oran demirin çeliğe dönüştürülme sırasında ürüne dâhil olamamaktadır.

Demir cevherinde bulunan silika safsızlıklarının büyük bir bölümü bazik oksijen fırını aşamasında CaO ile tepkimeye girmesi nedeniyle YF oranla SiO<sub>2</sub> kompozisyon içeriği daha düşüktür. Silika içeriği BOF cürufunda %7 – 18 arasında bulunmaktadır. MgO ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozisyon içerikleri sırasıyla %0,4 – 14 ile %0,5 – 4 arasında değişkenlik göstermektedir. Ayrıca serbest kireç içeriği %12'ye kadar yükselebilmektedir (Tsakiridis vd. 2008).

Kimyasal içerik olarak birbirlerine yakın olan BOF ve EAO cüruflarının üretimleri için EAO'da çelik üretimi olarak hurda çelik kullanılmaktadır. EAO cürufunun kimyasal içeriği belli sıcaklıklarda ergitilen çeliğin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kimyasal içerik olarak EAO cürufları BOF cüruflarına kıyasla daha geniş bir kompozisyon içeriğine sahiptir. EAO cürufu genel olarak şu oranlarda olacak şekilde; % 22-60 CaO, % 10-40 FeO, % 6-34 SiO<sub>2</sub>, % 3-13 MgO ve % 3-14 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kapsamaktadır. EAO cürufunun kompozisyon içeriğinde bulunan FeO paslanmaz çelik üretiminde % 2'ye kadar düşebilmektedir (Shen, Forssberg, ve Nordström 2004).

Çelik cürufunun kristalizasyonu, soğuma hızı ve kimyasal kompozisyon içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, farklı miktarda kimyasal bileşenlere sahip BOF ve EAO cüruflarının soğutma hızının yapıya etkisi incelenmiş ve granüle EAO ve BOF cüruflarının yavaş soğutulan cüruflar ile benzer olarak karmaşık kristal yapı olduğu tespit edilmiştir (Manso, Gonzalez, ve Polanco 2004; Tsakiridis vd. 2008).

Yapılan diğer çalışmalarda, tavlama değirmeninde soğutulan BOF cürufunun kristalize bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmalardan anlaşıldığı üzere çelik cürufu hızlı soğursa kristalize olmaktadır (Manso, Gonzalez, ve Polanco 2004; Reddy, Pradhan, ve Chandra 2006; Tsakiridis vd. 2008).

Cürufun yapay kullanımına etki eden en önemli parametreler MgO ve CaO literatürde rapor edilmiştir. Serbest halde bulunan CaO hidrate olup Ca(OH)<sub>2</sub>'ye dönüşerek genleşmeye neden olmaktadır. Genleşmeye sebep olan bir diğer elementte MgO'dur. Benzer şekilde MgO de hidrate olup Mg(OH)<sub>2</sub>'ye dönüşmektedir.

Cürufun inşaat sektöründe kullanılabilmesi için her iki bileşiminde hidrate edilip genişlemenin kabul edilebilecek seviyeye getirilmesi gerekmektedir (Yonar 2017).

Cürufta  $\text{SiO}_2$ 'de önemli bir bileşiktir. Kuvars olarak adlandırılan  $\text{SiO}_2$ 'nin doğal halinin sertliği, Mohs göstergesinde 7'dir. Çelik malzemenin sertliği ise 4- 4,5 arasında değişmektedir (Yonar 2017). Çok fazla sertliğe sahip olan bu bileşimin cürufun stabilitesini büyük oranda artırabileceği düşünülmektedir (Kavasoglu 2022).

Çelik cürufu Şekil 2.12 gösterildiği gibi koyu/açık gri renkte, pürüzlü, tane şekli köşeli ve poroziteli bir yapıya sahiptir. BOF cürufu ve EAO cürufları YF cüruflarından farklı olarak yükseltgenme ile elde edilmekte ve bu sebeple birçok değerli madde içermektedir (Reuter, Xiao, ve Boin 2004).



Şekil 2.12. Çelik cürufu örnekleri (Yonar 2017)

## 2.5. İkincil Üretim Yöntemleri

### 2.5.1. Döküm cürufunun kullanım alanları

Döküm cürufları, farklı metalürjik prosesler sonucunda elde edildikleri için farklı karakteristik özellikleri bakımından farklı kullanım alanlarına ayrılmaktadırlar. Metalürjik ergitme yapılmış cürufu yalnızca atık olarak düşünülmemelidir. İkincil hammadde olarak farklı sektörlerde kullanım alanı bulunmaktadır (Reuter, Xiao, ve Boin 2004).

Öğütülmüş granüle YF cürufunun, cürüflü çimento üretiminde, beton yapımında mineral doping maddesi olarak kullanımı bulunmaktadır. Ayrı bir şekilde öğütülmesi sonrasında istenilen inceliğe gelince özellikleri deformasyona uğramadan depolanabilmekte ve iyi kalitede beton yapabilmek için esnek şekilde olarak sunmaktadır. Metalürjik cürufların grit olarak yüzey temizleme işlemlerinde kullanılması örnekler içerisinde (Çelik 2007).

Erimiş cüruf havada soğutulduktan sonra yüksek fırın cürufunun kullanım alanları bulunmaktadır, bu alanlara örnek olarak; beton yapımında yol agregası, yol temel ve alt temel malzemesi, kayma dayanımı yüksek agrega olarak kar ve buz ile uğraşında, asfalt betonu agregası, demiryolu balastı, zemin iyileştirme (stabilizasyon) malzemesi, yapısal dolgulara dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yüksek fırın cürufu, tek başına bağlayıcı olmayıp ancak Portland Çimentosu klinkeri ve alçıtaşı ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği oluşan bir malzemedir. YF cürufunun olumlu dopinglerinin betonunun fiziksel ve mekanik özelliklerine sebep olduğu belirtilmektedir (Reuter, Xiao, ve Boin 2004).

Dünyada cürufu kara ve demir yollarında balast ürünü veya temel ve temel altı ürünü olarak kullanım imkânı olabileceği kanıtlanmıştır. Aynı zamanda deniz dolgularında ve buzlanmada kaymayı önleyici kum olarak kullanılabilmesi de kanıtlanmıştır (Uysal ve Bahar 2018).

Cürufların briket ve tuğla yapımı, demiryolu balastı, çimento sanayi, beton agregası, asfalt agregası, dolgu malzemesi, yalıtım, cam üretimi gibi geniş bir kullanım alanı vardır. Tarım ve çevre uygulamaları konusunda araştırmalar yapılarak cürufun kullanımının arttırılmasına çalışılmaktadır. Örneğin, çelik cürufu atık sudan iyonik bakır ve iyonik kurşun gibi bazı tehlikeli maddeleri uzaklaştırmada kullanılabilir. Gelecekte daha sık atık bertaraf yönetmelikleri beklenmektedir. Bu nedenle atık geri dönüşüm alternatiflerinin daha önem kazanacağı beklenmektedir (Uysal ve Bahar 2018).

Cüruflar, çimento parke agregası ve asfalt olarak da kullanılmaktadır. Geçmişte, alan doldurma ürünü olarak kullanılmış, ancak son 10 yıldır yol ve inşaat yapılarında, çimento üretiminde ve uzun ömürlü kaldırım-parke ürünleri üretmede kullanılmaktadır. Aynı zamanda, direnci sebebiyle demiryolu balastı oluşturmak için kullanılırken kayma dayanımından dolayı ağır yük taşıyan asfalt yollar oluşturmak için de yararlanılmaktadır. Ayrıca Portland çimentosunda agrega olarak kullanılmaktadır (Uzun 2014). Cüruflar dünyada;

- Yollar için agrega,
- Karayolu dolgu malzemesi,
- Çimento sanayisinde doping malzemesi ve klinker üretiminde,
- Beton sektöründe agrega,
- Demiryolu balastı,
- Toprağa dolgu,

- Su kanalları için agrega,
- Cüruf yünü,
- Tarımda gübreleme ve kireçleme amaçlı,
- Değişik uygulamalar için bulk /katı malzeme olarak kullanılmaktadır.

Avrupa Cüruf Birliği (ACB)'nin 2012 yılındaki verilerine göre YF cürufunun %60 kadarı çimento üretimi veya beton katkı malzemesi olarak kullanılırken %24 kadarı yol inşaatında agrega olarak kullanılarak yan ürün olmuştur. Örneğin, Almanya'da 2006 yılında YF cüruflarının %72,2'si çimento ham maddesi olarak, %27,6'ü yol inşaatında, %0,2'si ise gübre olarak kullanılmıştır (Demirbaş ve Çevik 2017). Diğer Avrupa ülkelerinde YF cüruflarının imalat süreci ve uygulama alanları ve ayrıca çelik cüruflarının, uygulama alanları Çizelge 2.15 'te gösterilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015).

**Çizelge 2.15.** Yüksek Fırın Cüruflarının ve Çelik Cüruflarının Avrupa'daki Uygulama Alanları

Cüruf	Üretim Süreci	Örnek Uygulama Alanları
YF Cürufu ( Hava Soğutmalı )	Hava soğutmalı cürufun kırılması ve elenmesi. Öğütülmemiş cüruf olarak da mevcuttur.	<b>Aşağıdakiler için agrega olarak:</b> - Bitümlü ve hidrolik olarak bağlı karışımlar (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) - Bağlanmamış karışımlar (bağımsız yüzey katmanları ve aşınma tabakaları vb.) - Atık su arıtma - Bent ve dolgu - Demiryolu balast - Çatı kaplama <b>Zemin stabilizasyonu imalatı:</b> - Taş yünü - Cam (diğer bileşenlerle harmanlanmış) - Gübre
Granüle Yüksek Fırın Cürufu	Erimiş cürufun yüksek basınçlı, yüksek hacimli su spreyları ile hızlı bir şekilde söndürülmesi, granül cürufun çimento inceliğine kadar öğütülmesi	<b>Aşağıdakiler için agrega olarak:</b> - Bitümlü ve hidrolik olarak bağlı karışımlar (asfalt, beton, yol bağlayıcısı vb.) - Bağlayıcısız karışımlar (bağımsız yüzey katmanları ve aşınma tabakaları vb.) - Bent ve dolgu - Kumlama <b>Zemin stabilizasyonu imalatı:</b> - Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar - Beton - Gübre (zemin) - Taş yünü - Cam (diğer bileşenlerle harmanlanmış)
BOF Cürufu (Çelik Cürufu)	Hava soğutmalı ve sulanmış cürufun kırılması ve elenmesi.	<b>Aşağıdakiler için agrega olarak:</b> - Bitümlü ve hidrolik olarak bağlı karışımlar (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.) - Yüksek kayma direnci için üst tabakalar - Bağlanmamış karışımlar (bağımsız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.)

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barajlar (yol yapımı ve gürültü koruması)</li> <li>- Atık su arıtma</li> <li>- Bent ve dolgu</li> <li>- Demiryolu balastı</li> <li>- Birikintileri korumak için yüzey katmanlarında sızdırmazlık çatı</li> <li>- Zırh taşı</li> <li>- Gabyonlar(istihkâm duvarı) ve ses emici duvarlar</li> </ul> <p><b>Zemin stabilizasyonu imalatı:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar</li> <li>- Taş yünü</li> <li>- Cam (diğer bileşenler ile karıştırılmış)</li> <li>- Gübre</li> </ul>
EAO Cürufu (Çelik Cürufu- EAO Karbon çelik üretimi)	Hava soğutmalı ve sulanmış cürufun kırılması ve elenmesi.	<p><b>Aşağıdakiler için agrega olarak:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bitümlü ve hidrolik olarak bağlı karışımlar (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.)</li> <li>- Yüksek kayma direnci için üst tabakalar</li> <li>- Bağlanmamış karışımlar (bağırsız yüzey tabakaları ve aşınma tabakaları vb.)</li> <li>- Barajlar (yol yapımı ve gürültü koruması)</li> <li>- Atık su arıtma</li> <li>- Bent ve dolgu</li> <li>- Demiryolu balast</li> <li>- Birikintileri korumak için yüzey katmanlarında sızdırmazlık çatı</li> <li>- Zırh taşı</li> <li>- Gabyonlar (istihkâm duvarı) ve ses emici duvarlar</li> </ul> <p><b>Zemin stabilizasyonu imalatı:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar</li> <li>- Taş yünü</li> <li>- Cam (diğer bileşenler karıştırılmış)</li> </ul>
EAO Cürufu (Çelik Cürufu- EAO Paslanmaz/ Yüksek alaşımlı çelik üretimi)	Hava veya su ile soğutulan ve sulanan cürufun kırılması ve elenmesi.	<p><b>Aşağıdakiler için agrega olarak:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bitümlü ve hidrolik olarak bağlı karışımlar (asfalt, beton, yol bağlayıcı vb.)</li> <li>- Bağlanmamış karışımlar (bağırsız yüzey katmanları ve aşınma tabakaları vb.)</li> <li>- Barajlar (yol yapımı ve gürültü önleme)</li> <li>- Dolgu</li> <li>- Yüzeydeki sızdırmazlıklar birikintileri korumak için katmanlar</li> <li>- Yüksek kayma direnci için üst katmanlar</li> <li>- Çatı kaplama</li> <li>- Zırh taşı</li> <li>- Gabyonlar (istihkâm duvarı) ve ses emici duvarlar</li> <li>- Endüstriyel nötralizasyon ürünü</li> </ul> <p><b>Zemin stabilizasyonu imalatı:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar</li> <li>- Taş yünü</li> <li>- Cam (diğer bileşenlerle karıştırılmış)</li> </ul>

DÇÖ'nün 2014 verilerine göre çelik sektörünün yan yani atık ürünleri ile ilgili yayınladığı paylaşımında; çelik cüruflarının (BOF ve EAO) bir bölümünün geri kazanılmasında fırında veya sinterde kullanılabilirliği yaklaşık olarak %50 geri dönüştürülmüş cürufun inşaat uygulamalarında öncelikli olarak yollarda kullanıldığını belirtmiştir. Çelik cürufunun yüksek miktarda serbest kireç kapsamı inşaat alanında uygulanmasını sınırlamaktadır, serbest kirecin uzaklaştırmasını geliştirmek için, çeşitli teknolojiler geliştirilmektedir. Ayrılan kireç; gübre olarak ya da çimento ve beton



üretiminde, atık su arıtmada ve deniz kıyı bloklarında kullanılabilir. Önceleri katı atık sahalarında bertaraf edilen cüruf, şimdi satılabilir bir ürün olarak kullanılabilir. Dünyada çelik cürufunun geri kazanım oranı ortalama %80'in üzerinde iken, demir cürufu (YF Cürufu) %100 geri kazandırılmaktadır. Çevresel ve ekonomik yarar açısından, birçok ülkede halen, çelik cürufu kullanımının artma potansiyeli bulunduğu rapor edilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015).

### 2.5.1.1. Çimento betonu agregası ve çimento üretiminde kullanımı

Çimento, su ve agrega karışımından oluşan çimento betonu üretiminde doğal kaynaklardan üretilmiş agregalar en çok maliyet girdisine neden olmaktadır. Aynı zamanda kullanılan doğal agregaların üretilmesi aşamasında gözden kaçırılmayacak çevresel etkileri vardır. Bütün bu bahsedilen nedenlerden ötürü doğal agregaların yerine kullanılabilir, yakın özellikte, maliyeti düşük ve üretiminde çevresel olumsuzlukların en aza indirildiği bir hammadde bulunması teknolojik gelişme açısından gerekli hale gelmektedir. Bu nedenlerden ötürü Avrupa göstergesi bazında çelik üretimi ile birlikte oluşan bir çıktı olan ve 10 milyon tonu bulan EAO cürufunun çimento betonu üretiminde doğal agrega yerine kullanılması en ideal seçenek olarak düşünülmektedir. Bu alanda yıllardır süregelen laboratuvar çalışmaları endüstriyel alanlarda başarı ile gerçekleştirilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015). BOF cürufu gibi EAO cürufunun da betonda kullanımının ideal olduğuna dair yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Carvalho vd. 2017; Liu vd. 2019; San-José vd. 2014). EAO cürufunun güçlü tutunma özelliği nedeniyle çimento ile kullanımı sonucu mukavemet artışının yanı sıra, donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve asitlere karşı koruma gibi birçok önemli faydalı özelliği gözlemlenmiştir (Manso vd. 2006; Maslehuddin vd. 2003; Netinger vd. 2016; San-José vd. 2014; Yun vd. 2018).

Yapılan araştırmalara göre, cürufu ilaveli çimentonun klasik çimentodan farklı özellikleri şu şekilde sıralanabilir; (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015).

- İlerleyen süreyle birlikte yüksek mukavemet
- Düşük sıcaklıkta hidrasyon
- İyi aşınma direnci
- İyi geçirgenlik
- Mikro genleşme
- İyi donma ve korozyon dayanımı

Çelik cürufu katkılı çimento için tespit edilmiş olan uygulama alanları ise aşağıda sıralanmıştır; (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015).

- İnşaat mühendisliği uygulamaları
- Endüstriyel bina uygulamaları
- Baraj yapımı uygulamaları
- Yol yapımı uygulamaları

#### **2.5.1.2.Yol inşaatında ve hafif yapı malzemesi üretiminde kullanılması**

Çelik cürufları, dayanım, mukavemet ve yığın yoğunluklarının yüksek olması aynı zamanda durağan malzeme olması nedeniyle hidrolik yöntemlerde ve yol yapımında kullanılmaktadır. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısının yüksek olmasından ötürü asfalt esaslı yüzeyde doğal agreganın yerine kullanımı tercih edilebilmektedir. Bağlanma/tutunma özelliğinin iyi olması nedeniyle taneler birbirine daha kuvvetli bağlanarak asfalt yüzeyinde meydana gelen lastik izi oluşumunu ve yüksek sıcaklık altında deformasyonu azaltmaktadır. Çelikhane cüruflarının sürtünme katsayısının fazla olması kaymayı minimuma indireceğinden araçların yol tutuş performansını artırarak daha güvenli bir sürüş imkânı sağlamaktadır (Kavasoğlu 2022).

Atık döküm cüruflarının yol inşaatında kullanılması durumunda önemli olan noktalardan biri, malzemenin içinde bulunan inorganik ve organik kirleticilerin, yağmur suyu ile özgür forma geçerek yer altı sularına ve ardından içme sularına sızabilmesi yani 'liç' olabilmesidir. Bu kirleticiler yağmur suyu ile beraber yer altı sularına sızdıkları zaman hem çevreye hem insan sağlığına zarar vermektedir (Uysal ve Bahar 2018).

Fakat yapı ve yol malzemesinde kullanılacak çelik cüruflarının MgO ve CaO içerikleri de çok önemlidir. Çelik cürufların içerisinde serbest halde olan MgO ve CaO olduğundan ötürü yapısal olarak poroziteli bir yapıya sahiptir. Kompozisyon içeriğindeki CaO, zaman boyunca malzeme içerisinde genleşme ile poroz yapı oluşturarak nihai kullanımda önemli bir soruna neden olabilmektedir.

Atık döküm cürufları su ile temas edince hacimsel olarak %10 oranında genleşebilmektedir. Bu durumda, yol yapımı için kullanılmadan önce serbest halde olan oksitlerin meydana getirebileceği sorunlar ortadan kaldırılmalıdır. Meydana gelen kalsiyum karbonat çökerek drenaj sistemlerinin tıkanmasına sebep olur. Bu sebeple cürufun yol yapımında kullanılabilmesi için cüruf içeriğindeki CaCO<sub>3</sub>'ün %1'den daha az olması gerekmektedir (Barišić, Dimter, ve Netinger 2010).

### **2.5.1.3.Seramik sektöründe kullanılması**

Birden fazla özelliğe sahip döküm cürufları, farklı mikro yapıları ve mineralojik kompozisyonlara sahip olup, yer ve duvar karolarının ayrıca kristal cam ürünlerinin üretimlerinde bulunmaktadır. Seramik malzeme ürün elde edilmesinde silisyumlu manganez, demir/çelik ve bakır cürufu gibi ürünlerin kullanıldığı araştırmalar mevcuttur (G. Kaya ve Turan 2004).

### **2.5.1.4.Kimya sektöründe kullanılması**

Cüruf yığınları poroziteli olduğu için yağmur suları süzülüp aşağıya inmekte ve çevrenin zarar görmesine sebep olan cüruf ile etkileşime girmektedir. Doğal durumlarda metaller sucul ve karasal çevrelerin kirlenmesine sebep olmaktadır. Yapılan araştırmalar cürufun bir reaktif olduğunu ve zaman geçtikçe de aşındığını göstermiştir; aşınma, cürufun içindeki başlıca metal ve sülfür kompozisyonlarının çözünmesi dolayısıyla aşınma durumunun bir kanıtı olduğunu göstermektedir. Bu aşınma olayı yalnızca yığınlarda fiziksel dışında değil, yoğun olarak içerisinde de oluşmaktadır (Souter ve Watmough 2017). Metaller yüzey sularına cüruftan geçtiğinde, çevresel etkileme oluşturabilen bir seri biyojeokimyasal durumlar oluşturmaktadırlar. Örnek olarak flokülasyon ve çökelme birçok yıldır sedimanlarda metallerin tutulması için önemli tepkimeler olarak kabul görmüştür. Sudaki askıdaki metaller soğurma mekanizmaları vasıtasıyla partiküllere, flok ve koloidal maddelere yapışabilmektedir (Bradl 2004).

### **2.5.1.5.Refrakter malzeme olarak kullanımı**

Çelik cürufları, çelik üretim endüstrisinde yan ürünlerdir ve farklı amaçlar için kullanılabilirler; Örneğin, beton veya asfaltta agrega olarak ve harmanlanmış çimentolar kullanılmaktadır. Bu çalışmada, karbon çeliği üretiminden elde edilen elektrik ark ocağı cürufunun refrakter betonda olası kullanımını incelenmiştir.

Cürufun, 800 °C'den daha yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında wustitin manyetite mineralojik bir dönüşümüne uğradığı, bu dönüşüme hacimsel genleşmenin eşlik ettiği, bu da refrakter betonda çatlaklara neden olduğu ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde kötüleştirdiği bulunmuştur. Bu dönüşüm geri döndürülemez, böylece cüruf refrakter beton için kullanılmadan önce 1000°C'ye kadar ısıtıldığında, nihai ürünler, geleneksel refrakter agregası, örnek olarak boksit. Beklenenin aksine incelenen cürufun yüksek

sıcaklıklarda kararlı olmadığı görülmüştür. Isıtıldıktan sonra, bu tür cüruf kullanılarak yapılan refrakter beton numuneleri, sonuç olarak mekanik özelliklerini düşüren önemli genişleme ve çatlaklar sergilemiştir. DTA/TG aracılığıyla, 700°C ile 800°C arasında cürufta faz dönüşümü olduğu doğrulanmıştır ve bu yerinde yüksek sıcaklıkta XRD analizi ile doğrulanmıştır ve dönüşümün wüstite geçişinin manyetit içine bir sonucu olduğu bulunmuştur. Bu dönüşüm geri döndürülemez, bu da dilatometri ile doğrulanmıştır.

Bu, cürufun önceden 1000°C'ye kadar ısıtılmasına tabi tutulması durumunda, müteakip ısıtmadan sonra stabil kaldığı ve dolayısıyla refrakter endüstrisinde en az 1000°C'ye kadar sıcaklıklarda kullanılabileceği anlamına gelmektedir (Ducman ve Mladenović 2011).

### 2.5.2. Sinterleme Yöntemleri

Malzeme toz halinde iken ilk olarak şekillendirme esnasında sıkıştırırken malzemedeki gözenek miktarı biraz azalmaktadır. Kuruma ile de tozlar tamamıyla birbirleriyle temasa geçmektedir. Ama malzeme hala pekişmiş halde değildir. Tozlar arasında boşluklar vardır. Saydamlık, ısı iletkenliği ve mukavemet gibi özellikler için yapıda bulunan porozitenin tamamen yok edilmesi gereklidir.

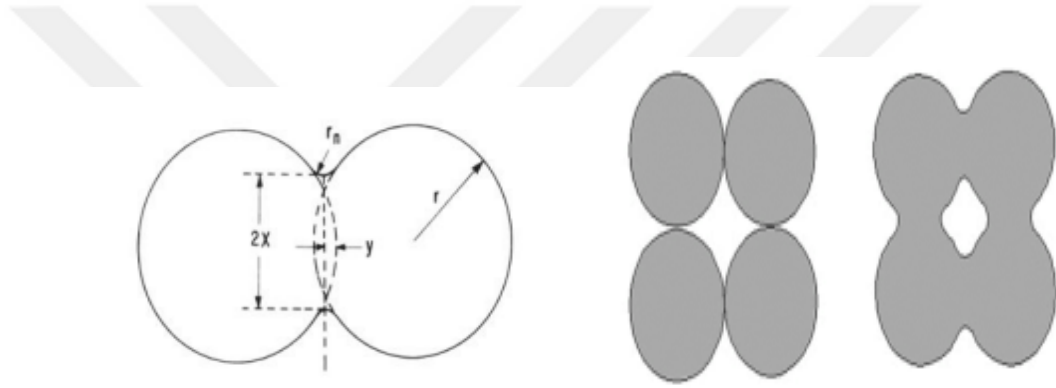
Mikro boyutta bakıldığında pişirme sırasında, yayınma hızlanınca birbiriyle temas halinde bulunan tozlar arasında özellikle de yüzeyde yer alan karşılıklı atom yayılması sonucunda tozlar birbirlerine dokundukları yerlerde bağ yaptıkları ve bu kaynama noktasında daha sonra boyunlar oluştuğu gözlemlenmiştir.

Sinterleme sonucunda gözenek ortadan kalkar ve malzeme pekişmiş hale gelmektedir. Yani kuvvetli bir yapı oluşmaktadır (Soyhan 2007). Erime sıcaklığının altında malzemelerin pişirilmesi birbiriyle temas halinde olan malzemelerin yüksek sıcaklıklar altında bir süre bekletilerek uygulanan ısıtılma işlemi teknik olarak sinterleme diye tanımlanmaktadır. Malzemenin yoğun hale gelmesi, toz parçacıkların kaynaşması, birleşmesi, poroziteli yapının zamanla kapanması ve malzemenin büzülerek içerisine doğru çekilmesi aşama boyunca oluşmaktadır. Aşama sonunda elde edilen ürün zımparalama, parlatma ve başka diğer mekanik işlemlerden sonra direkt uygulamaya hazır hale gelmektedir (Okur 2020; Soyhan 2007).

Sinterlemenin gerçekleşmesi için burada itici güç ihtiyacı vardır. İtici güç olarak sıcaklık düşünülebilir. İtici gücün oluşturulması için toz partiküllerinin arasındaki mesafeler azaltılarak poroziteleri azaltılır veya yok olur. Ayrıca sinterleme süresinin

uzaması durumu da vardır. Bunun nedeni ise porlar arasında gazların kalması difüzyon akışını engellemektedir. Yani tam yoğunluk engellenmiş olmaktadır. Bu durumda numuneye basınç uygulaması yapılabilir (Okur 2020). Şekil 2.13'te gösterildiği gibi partiküllerin merkezleri arasındaki mesafeler azalmaktadır. Böylece atomik boyutta difüzyon meydana gelerek boyun oluşumu gözlenmektedir. Meydana gelen boyun oluşumunda büzülme ve yoğunlaşma gözlenmektedir (Okur 2020).

Sinterleme düzeneği, bütünle malzemenin taşınımına dayanmaktadır. Atomların yayılması (hacimsel ve yüzey) ile birlikte viskoza akışı kapsamaktadır. Malzemenin taşınımını kolay hale getirmek için bu işlem sadece yüksek sıcaklıklar altında gerçekleştirilmektedir. Sinterleşmeye sebep olan itici güç, Gibbs serbest enerjisindeki azalmadır (Soyhan 2007).



Şekil 2.13. Partiküller arası boyun oluşumu (Demir 2021;Okur 2020)

Çizelge 2.16'da sinterleme yöntemindeki değişim ve sinterlemedeki etkisi gösterilerek şöyle sıralanabilir; sıcaklık, zaman, malzeme, pişirme atmosferi, paketleme yoğunluğu ve ısıtma hızı gibidir (Soyhan 2007).

**Çizelge 2.16.** Sinterleme prosesini etkileyen faktörler ve etkileri

<b>Sinterleme Yöntemindeki Değişim</b>	<b>Etkisi</b>
Toz boyutunun küçülmesi	Hızlı sinterleme Maliyet yükselir Yüksek safsızlık miktarı Tehlike yükselişi
Sürenin yükselmesi	Maliyet yükselir Tane büyümesi Verimlilik azalışı
Sıcaklığın artması	Daha fazla büzülme Tane büyümesi Maliyet yükselir Düşük hassasiyet Özellikler iyileşir Fırın sınırlaması Poroziteli büyümesi
Paketleme yoğunluğunun yükselmesi	Daha az büzülme Küçük poroziteli Yüksek son yoğunluk Düzenli boyutlar Yoğunluk gradyanı
İlave ve alaşımda artış	Yüksek mukavemet Homojenlik problemi Yüksek sinterleme sıcaklığı
Sinterleme ilavesi kullanmak	Hızlı sinterleme Düşük sinterleme sıcaklığı Kırılganlık Çarpılma Tane büyüme kontrolü

### 2.5.2.1. Geleneksel sinterleme (GS)

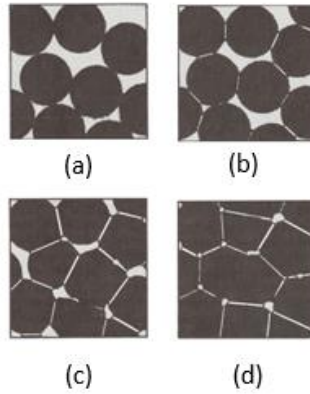
Tozlar farklı gerilmeler altında sıvılar gibi davranış gösterirler ve şekillendirilebilirler. Bu özelliklerinden ötürü de karmaşık şekilli parçalar bu yöntemle kolaylıkla elde edilebilir. Şekillendirilen tozlar, istenen mukavemete sinterleme yapılmaksızın sahip olamazlar. Sinterleme, genellikle geleneksel olarak sinterleme fırınlarında gerçekleştirilen toz parçacıkları arasında bağ oluşmasıyla gerçekleşen ve toz parçacıklarının mukavemet kazandığı ısıl işlem prosedürüdür.

GS metodunun yanı sıra, hızlı sinterleme yöntemleri olarak adlandırılan, ısınmanın hızlı bir şekilde gerçekleştiği indüksiyonla sinterleme, mikrodalga ile sinterleme, plazma sinterleme, lazer sinterleme, deşarj sinterleme, gibi yöntemler de mevcuttur (Çivi ve Atik 2017).

Katı hal sinterlemesi, hiçbir ikinci sıvı faz bulundurmadan katı tozların yoğunlaşma işlemidir (Soyhan 2007). Katı hal sinterlemesi süreçleri Çizelge 2.17' de ve Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.17. Geleneksel sinterleme süreçleri (Soyhan 2007)

Süreç	Proses	Yüzey alan kaybı	Yoğunlaşma	Büyüme
(A) Yapışma	Temas oluşturma	En az, eğer yüksek basınçta paketlenmediyse	-	-
(B) Başlangıç süreci	Boyun büyümesi	Belirgin, % 50 kadar kayıp	Başlangıçta küçük	En az
(C) Ara süreç	Poroz yuvarlaklaşması ve uzaması	Neredeyse açık porozların tamamının kaybı	Belirgin	Tane ve poroz çapında büyüme
(D) Son süreç	Poroz kapanması ve son yoğunlaşma	Önemli olmayan kayıp	Yavaş ve görel olarak en az	Kapsamlı tane ve poroz büyümesi



Şekil 2.14. Katı hal sinterleme süreçleri a) yapışma, b) başlangıç süreci, c) ara süreç, d) son süreç (Soyhan 2007)

### 2.5.2.2. Flaş sinterleme (FS)

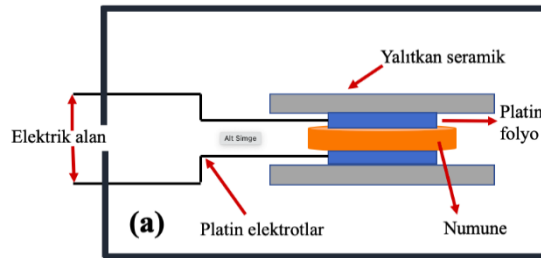
FS prosesi, ısıtma işlemi esnasında numuneye düşük voltaj (AC) ve (DC) akım (elektrik alan) uygulanarak kütle transferini (difüzyonu) arttırmak ve düşük sinterleme sıcaklıklarında yüksek oranda malzemeye hızlı şekilde (birkaç saniyede) sinter tozu sıkıştırmak için orta düzeyde elektrik alanı ve akım kullanan elektrik alan destekli sinterleme yoğunluk kazandırmayı amaçlamaktır. Numunede iletkenlikte ani bir artışın olması fırın içinde sinterleme sırasında gerçekleşmektedir. FS' de kullanılan paralel plaka kondansatör tipi deney düzeneği Şekil 2.15'te verilmiştir.

Malzemeye bu özellikler kazandırılırken diğer amaç tane büyümesini engellemeye çalışmaktır. Bunlara ek olarak bu proses sayesinde enerji tasarrufu sağlanmış olmaktadır (X. Su vd. 2019; M. Yu vd. 2017).

Yapılan çalışmalardan birinde başlangıç sıcaklığında elektrik iletkenliğindeki ani artış sonrasında parçacıklar arasında bölgesel olarak Joule ısınmasına neden olması yaşanmıştır. Farklı oksitler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler

üzerine, FS esnasında harcanan gücün  $10 - 50 \text{ mW/mm}^3$  (güç yoğunluğu) arasında oldukça dar bir aralıkta olduğu gözlemlenmiştir (Raj 2016). Bu güç aralığının parçayı ısıtma hızından, parçaya uygulanan elektrik alanından, parçanın hacminden ve toz partikül boyutundan bağımsız olduğunu gösterilmektedir (Chaim ve Estournès 2019). Tipik olarak  $40 \text{ V/cm}$ 'den az, sinterleme oranı GS' ye göre kademeli olarak artmaktadır. Böylece uygulanan alan doğrultusunda tane büyümesinde bir azalma meydana gelmektedir (Francis, Cologna, ve Raj 2012).

FS olayını yorumlamak için farklı mekanizmalar önerilmiştir; Joule ısıtma, frenkel çiftlerinin çekirdeklenmesi, bölgesel ısıtma ve termal kaçaktır (X. Su vd. 2019). Flash sinterleme ile GS' yi kıyaslırsak birkaç saniye içerisinde düşük fırın sıcaklıklarında tamamlanan bir sinterleme sürecidir diyebilmekteyiz. Sıcaklık ile güç tüketimi doğru orantılıdır (X. Su vd. 2019). Düşük fırın sıcaklıklarında sinterlenen malzemeler daha yüksek mukavemet ve tokluğa sahip olmaktadır. Bu özellikler sayesinde malzemede tanecik büyümesi de engellenmiş olmaktadır (M. Yu vd. 2017). İşleme parametrelerini (örnek olarak; elektrik alan büyüklüğü, akım yoğunluğu, dalga biçimleri (AC, DC) ve frekans, fırın sıcaklığı, elektrot malzemeleri/konfigürasyonu, harici olarak uygulanan basınç ve sinterleme atmosferi) mikro yapılar ve yoğunlaştırma mekanizmalarıdır (Min Yu vd. 2017).

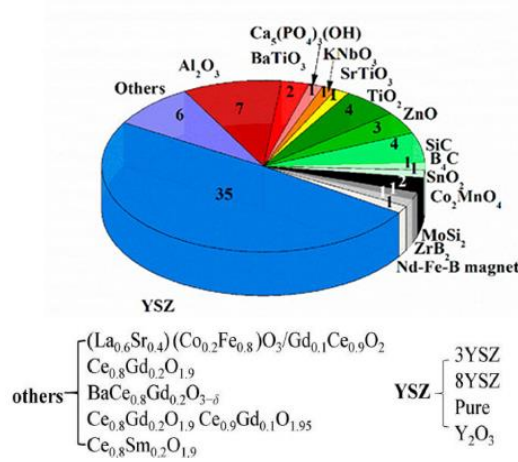


**Şekil 2.15.** Flaş sinterlemede kullanılan paralel plaka kondansatör tipi deney düzeneği (Cetinkaya 2022)

FS mekanizması, genelde yarıiletken malzemelerde başarılı olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi bu süreç geniş bir malzeme listesinde kullanılmaktadır. Aşağıda gösterilen pasta diliminin en büyük bölümünü oluşturan mavi bölüm iyonik iletkenlerde, kırmızı bölüm yalıtkan oksitlerde, yeşil bölüm yarı iletken oksitlerde ve son olarak gri bölüm ise metalleri göstermektedir. Bu grafikten de görüleceği gibi çeşitli malzeme sistemlerinde kullanılan bu teknolojiye bilinen örnekler verecek olursak, yttria stabilize zirkonya, alüminyum oksit ve kalay, çinko ve titanyum oksitleri verebiliriz.



Farklı gruplarda ise silikon ve bor karbür, zirkonyum diborid, katı oksit yakıt uygulamaları için malzemeler, ferroelektrik malzemeler ve kompozit malzemeler de kullanılmaktadır (Demir 2021).



Şekil 2.16. Flaş sinterleme ile literatürde yayınlanmış makalelerdeki malzeme sistemleri (M. Yu vd. 2017).

FS, GS işlemleriyle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlara sahiptir. Bunlardan en bariz olanı, seramik yoğunlaştırma için gereken zaman ve sıcaklıktaki büyük azalma ile açıkça ilişkilidir. Bu, belirgin enerji tasarrufu, daha ucuz donanım ve daha genel olarak çevresel faydalar anlamına gelmektedir. Konsolidasyon süresi tipik olarak bir ila üç büyüklük mertebesine düşürülür, konvansiyonel prosesler için birkaç saatten FS’ de birkaç saniye/dakikaya değişmektedir.

FS’ nin bir başka avantajı da “denge dışı” bir süreç olması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Son derece yüksek ısıtma hızları ve kısa işlem süreleri ile ilişkilidir. Bu nedenle, mümkün yarı kararlı malzemeleri sinterleme veya istenmeyen faz geçişlerinden kaçınmaktır. FS, denge dışı bir süreç olmasına ve dolayısıyla zor kontrol edilebilir olmasına rağmen, geleneksel olanlara büyük ölçüde benzer veya onlardan daha yüksek özelliklere sahip nesnelere üretmektedir. FS’ nin diğer bir avantajı, kısıtlı sinterlemenin olmamasıdır. Flaş işleminin ana sınırlaması, “oto katalitik” olması ve sıcak noktaların olması gerçeğinde yatmaktadır. Yani tercihli yollar boyunca elektrik akımı konsantrasyonu bileşenlerde oluşturulabilir, birkaç milimetreden daha büyük olabilir. FS’ nin diğer bir sınırlaması, genellikle iletken macunların kullanılması gerçeğinde yatmaktadır. Metal elektrotlar ve numune arasındaki elektriksel teması iyileştirmektedir. Bu tür macunların kullanımı, bileşenin yerel olarak kirlenmesine neden olmaktadır (Biesuz ve Sglavo 2019).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

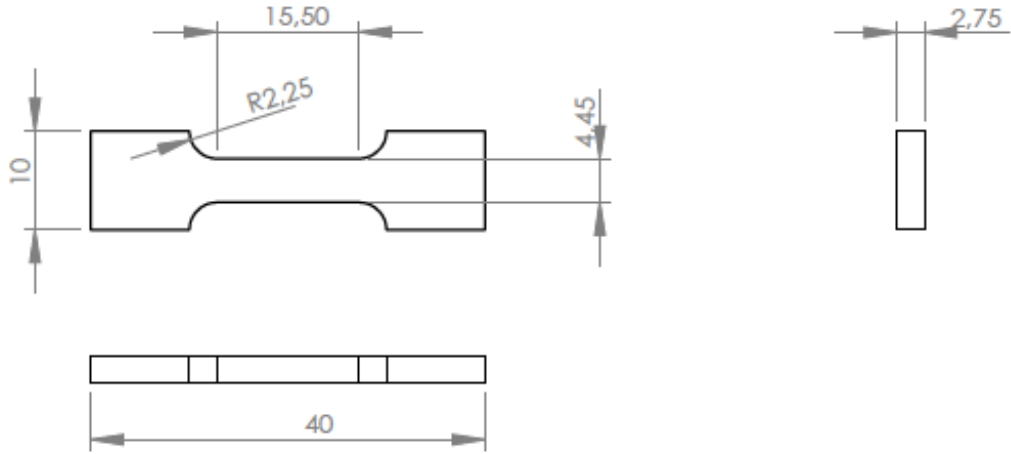
Bu çalışmanın amacı; DDCA atığının seramik ve/veya diğer sektörlerde kullanılabilirliğini araştırmak için elektrik alan destekli sinterleme yönteminin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte, aynı işlem GS işlemi sonrasında üretilen malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri test edilerek performansları karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada; DDCA'nın köpek kemiği şeklinde numune formu oluşturulmasıdır. İkinci aşamada; üretilen yeşil (ham) yoğunluklu numunelerin geleneksel ve FS işlemi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise; üretilen malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri test edilmiş ve değerlendirilmiştir.

DeneySEL süreç kapsamında kullanılan tüm malzeme ve ekipmanların detayları bir sonraki başlık altında belirtilmiştir.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar

DeneySEL çalışma sürecinin tamamında deiyonize su kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında MESA Makine A.Ş.'den temin edilen dökme demir cüruf atığını (DDCA) değerlendirmek üzere değirmende (Bilyeli gezegensel öğütücü, RETSCH / Model: PM200) öğütülmüştür. Öğütülen cüruf tozlarının ortalama tane boyutu (Dinamik Işık Saçılımı Spektroskopisi, DLS, Malvern/MPT2) belirlenmiştir. Toz halindeki YFCA (yüksek fırın cüruf atığı ) numuneleri bağlayıcı (%3 sulu çözelti ve ağ. %5 PEG, polietilen glikol, Merck) ile agat havanda özdeşleşene kadar harmanlanmıştır. Sonrasında ise köpek kemiği şeklindeki deney numunelerini 2,75 mm kalınlığa sahip olması için, her bir sinterleme (flaş ve geleneksel) yöntemi için toz tartımı hesaplanmıştır. Elde edilmesi hedeflenen köpek kemiği şekline sahip 4 cm uzunluğundaki yeşil yoğunluklu numuneler (ham numuneler) için tek eksenli hidrolik preste (Hidroliksan, 2013) 100 bar basınç altında sertleştirilmiş paslanmaz çelik kalıp yardımıyla preslenmiştir. Deneyler köpek kemiği (dog bone) şeklinde aynı koşulları sağlamak için eş özelliklere sahip olarak üretilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Köpek kemiği şeklindeki DDCA'nın teknik çizimi

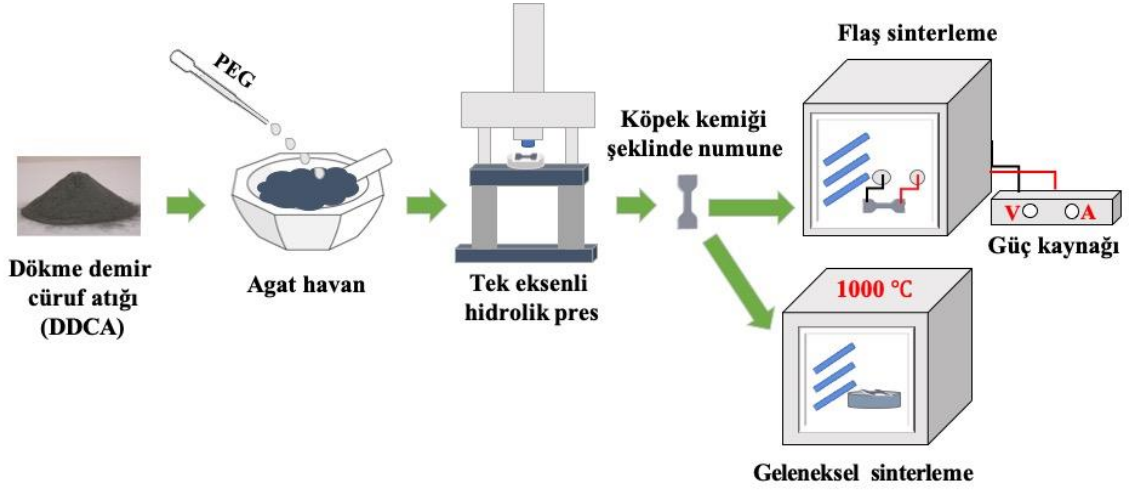
Köpek kemiği şeklindeki DDCA numunelerini 3 °C/dk. ısıtma hızında 600 °C'de 2 saat süre ile kamara tipi fırında (Protherm, PLF 130/10 model 3600 Watt, 220 V, 16 amper) ısıl işlem uygulanarak bağlayıcıyı uzaklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Polimeri uzaklaştırılmış yeşil yoğunluklu numuneler GS işlemi için 1000 °C de 4 sa. süre ile atmosfer ortamındaki fırında ısıl işleme tabi tutulmuştur. FS gerçekleştirilecek fırın içerisindeki numuneye temas halinde olacak teller paslanmaz çelik olarak tercih edilmiştir. Yine aynı fırında FS sırasında elektrik alan uygulamak için kullanılan elektrotların (paslanmaz çelik teller) girişini sağlayan yalıtımlı girişler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra ön tarafında sinterleme olayını kayıt altına almamızı sağlayacak kuvars cam bulunmaktadır. FS' de DC güç kaynağı (AMETEK marka XG600 – 2.6 model 1500 W, 2200 VA, 47 – 63 Hz) kullanılmıştır. Sıcaklığa maruz kaldıkça gevrek ve oksitli forma ulaşan tellerin iletkenliklerinin aynı olması için sistemden 5-6 deney kullanımından sonra değiştirilmiş ve deneylerin sürekliliği bu şekilde sağlanmıştır.

### 3.2. DDCA'dan Üretilen Yeşil Yoğunluklu (Ham Yoğunluk) Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan köpek kemiği şeklindeki yeşil yoğunluklu numunelerin hazırlık aşamaları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Toz halinde bulunan DDCA'nın köpek kemiği şeklindeki yeşil yoğunluklu numune formuna getirilmesi için gerekli olan toz miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır (Denklem 3.1). Elde edilen toz miktarına göre %3'lük PEG çözeltisi hazırlanmıştır. 100 ml beher içerisine 5 mg PEG ve 95 ml deiyonize su manyetik balık

yardımıyla 80 rpm karıştırma hızı ile karıştırıcıda sıcaklık kullanılmadan homojen hale gelmesi için 5 dk. süre ile karıştırılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Sinterleme deneyleri için numune hazırlama akış şeması

Toz halindeki numuneye bağlayıcı ilave edilmesi ile presleme aşamasında mikron altı parçacık boyutuna sahip tozları bir arada tutulmakta ve üretilecek formdaki numunenin kalıptan tek parça halinde çıkabilmesini sağlanmıştır.

Yapılan deneylerde yeşil yoğunluk kullanılmıştır. Yeşil yoğunluğu hesaplayabilmek için yoğunluğun yaklaşık olarak %55'i alınmıştır.

$$0,55 \times d = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Bu denklemde; d, tozun yoğunluğunu (g/ml),

m, tozun kütleini (g)

V, numune hacmi (cm<sup>3</sup>)'ü ifade etmektedir.

DDCA'nın yoğunluğu 2,268 g/cm<sup>3</sup>'tür. Ham toz yoğunluğu,  $0,55 \times 2,268 = 1,247$  g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Köpek kemiği şeklindeki DDCA numunesi kare ve dikdörtgenden oluştuğu için hacim hesaplamasında (Denklem 3.2) dikkate bu şekil formu alınmıştır (Şekil 3.1).

$$V = (a^3 \times 2) + b \times c \times h \text{ cm}^3 \quad (3.2)$$

Hacmi ve yoğunluğu bilinen numune için kütle hesabı yapabilmek için Denklem 3.3'ten faydalanılmıştır.

$$d = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

Burada, d, numune yoğunluğunu (g/cm<sup>3</sup>),

m, toz kütleini (g),

V, hesaplanan toz hacmini (cm<sup>3</sup>) ifade etmektedir.

$$z = \frac{m}{V} \rightarrow m = 3 \text{ g DDCA tozu hesaplanmıştır.}$$

Tüm numuneler için aynı prosedür uygulanmıştır. PEG bağlayıcı katısı deiyonize su ile bir beher içerisinde manyetik balık yardımı ile karıştırıcı üzerinde sıcaklık kullanılmadan çözülmüştür.

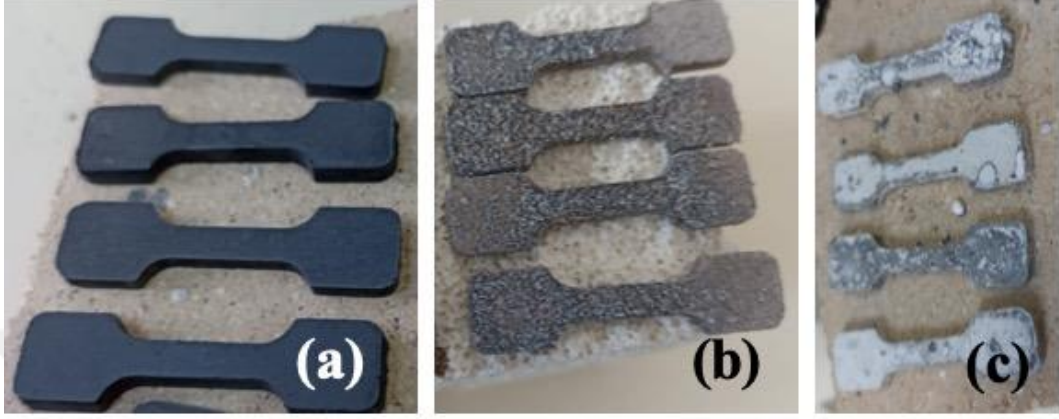
Toz agat havan içerisinde belirli bir miktar kullanılarak harmanlanmıştır. Karışım homojen bir forma ulaştıktan sonra literatürde sıklıkla kullanılan köpek kemiği formundaki paslanmaz çelik kalıba 3 g hesaplanarak tartılmış (Denklem 3.3) ve kalıp içerisine yerleştirilerek preslenmiştir. Presleme işleminde toz kalıba alındıktan sonra 50 bar basınçta 30 sn. bekletilmiş ve sonrasında 100 bar basınçta da 30 sn. süre ile bekletilerek işlem tamamlanmıştır (Şekil 3.3a). Presleme sonrasında elde edilen numunenin ölçüleri kumpas yardımıyla ölçülerek kontrol edilmiş ve Şekil 3.1'de verilen değerlerde olması sağlanmıştır.

Daha sonra nihai ürün içerisindeki bağlayıcıyı yok etmek için literatürde belirtilen buharlaşma sıcaklığı PEG için yaklaşık olarak 500 °C'de 1 sa. olduğu bilinmektedir (Cetinkaya 2022). Bu sebeple, hazırlanan numuneler içerisindeki PEG'in tamamen uzaklaşması için 3 °C/dk. ısıtma hızı ile 600 °C'ye çıkılmış bu sıcaklıkta 2 sa. beklenmiştir. Numune içerisinde hızlı soğutma ile çatlak oluşmaması için oda sıcaklığına kadar fırın içerisinde soğutulmuştur. Bu işlem sonrasında hem geleneksel hem de FS işlemi için numuneler hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b).

### 3.3. DDCA Numunelerin GS İşlemi

Şekil 3.1'deki şekil formunda bulunan numuneler kimyasal analizlerindeki (Çizelge 4.1) oksitler göz önüne alınarak 3 °C/dk. ısıtma hızı ile 1000 °C'de 4 sa. süre ile

kamara fırında sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin ardından yapılacak test sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak için 4 adet numune işleme tabi tutulmuştur. Bağlayıcının ortamdan giderilmesi için uygulanan fırında soğutma işlemi GS içinde uygulanmıştır (Şekil 3.3c).



Şekil 3.3. a) Polimerli b) polimer giderim işlemi tamamlanmış ve c) geleneksel yöntemle sinterlenmiş DDCA numuneleri

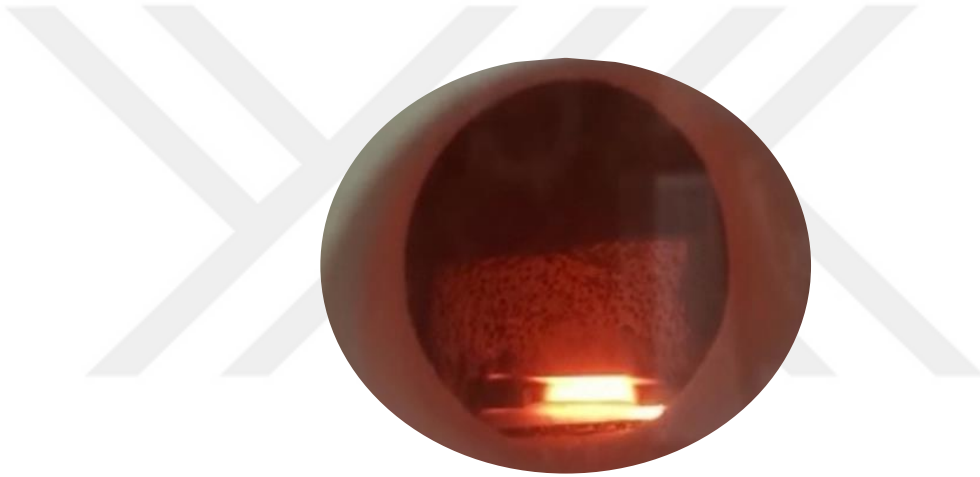
### 3.4. DDCA Numunelerin FS İşlemi

Yukarıdaki bölümlerde belirtilen şartlarda hazırlanan köpek kemiği şeklindeki numuneler FS işlemi için kamara tipi fırında ve DC güç kaynağına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Fırın içerisine güç kaynağı aracılığıyla numune üzerine elektrik akımını iletecek paslanmaz çelik teller yerleştirilmiştir. Bu teller numunenin kare şeklindeki uçlarına her bir deneyde aynı mesafede kalacak şekilde sarılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Flaş sinterleme deney düzeneği

Güç kaynağına bağlı tellere daha önce deney şartları belirlenmiş olan akım ve voltaj değerleri ayarlanmıştır. Tellere numune bağlanmadan evvel tellerden akım geçip geçmediği kontrol edilmiştir. Akım geçtiğinden emin olduktan sonra sistem kapatılmış ve sonrasında numune tellere Şekil 3.4'deki gibi bağlanmıştır. Fırın sıcaklığı 20 °C /dk. sıcaklık artışı ile 1000 °C'ye çıkacak şekilde programlanmıştır. Daha sonra ise güç kaynağı açılmış ve sisteme sıcaklıkla birlikte akım da verilmeye başlanmıştır. FS sıcaklığına ulaşan numune güç kaynağındaki voltaj ve akımın düşmesine sebep olarak fırın içerisindeki numunede ise parlama (flaş) görüntüsü oluşturmuştur. Sisteme verilen sıcaklık ve akım sinterleme işleminin tamamlandığı bilinen süre sonrasında (flaş işleminden yaklaşık olarak 1-2 dk. sonra) kapatılarak oda sıcaklığına ani soğuması engellenecek şekilde kapalı fırın içerisinde bekletilmiştir.



**Şekil 3.5.** Fırın içerisinde hazırlanmış deney düzeneğinde numunede gerçekleşen flaş (parlama) olayının görüntülenmesi

### 3.5. Karakterizasyon Çalışmaları

Öğütülmüş toz halindeki DDCA ile geleneksel ve FS yöntemleri ile üretilen DDCA numunelerin XRD, SEM-EDX, yoğunluk gibi karakterizasyon testlerinin yanı sıra, sertlik ve 3 nokta eğme gibi mekanik testler de uygulanmıştır. Böylece, iki farklı sinterleme yöntemi ile sinterlenerek üretilen malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiş ve kullanım alanı için fikir sahibi olunması hedeflenmiştir. Çizelge 3.1'de DDCA'nın toz ve sinterlenmiş numunelere uygulanan karakterizasyon ve mekanik testler özetlenmiştir.

**Çizelge 3.1.** DDCA'a uygulanan karakterizasyon işlemleri ve mekanik testler

		Sinterleme Yöntemi		
		Toz	Geleneksel	Flaş
Karakterizasyon	XRD	✓	✓	✓
	XRF	✓		
	SEM-EDX	✓	✓	✓
	Arşimet Yoğunluk	✓	✓	✓
	Tane boyutu ölçümü (DLS)	✓		
	Yüzey alanı ve porozite tayini (BET)	✓		
	DSC/TG	✓		
	FTIR	✓		
Mekanik Testler	Sertlik	✓	✓	✓
	Üç nokta eğme	✓	✓	✓

### 3.5.1. X-ışınları kırınımı (XRD)

Öğütülmüş DDCA'nın ve geleneksel/flaş sinterlenmiş köpek kemiği şeklindeki numunelerinin faz analizleri X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İncelenecek olan numuneler Europe marka difraktometre ile analiz edilmiştir. Ölçümler; Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ ) radyasyonu ile Bragg-Brentano modunda alınmıştır. XRD desenleri, tüm numuneler için  $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$  kırınım açısı aralığında ve oda sıcaklığında kaydedilmiştir.

### 3.5.2. X-ışınları floresans spektrometresi (XRF)

Öğütülmüş DDCA'nın içerisinde bulunan elementel içerikleri miktarları X-ışınları floresans spektrometresi (XRF) cihazı yardımıyla hesaplanmıştır. Bu numuneler, Bruker marka XRF cihazı ile Thermo ARL Advan'x marka XRF cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.

### 3.5.3. Diferansiyel termal ve termogravimetrik analizler (DSC/TG)

Sıcaklığın DDCA üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla toz numune DSC-TG analizleri yapılmıştır. TG analizinde, numunenin oda sıcaklığından  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar  $10^\circ\text{C/dk}$  ısıtma hızı ile ısıtılırken ağırlığında meydana gelen değişimler incelenmektedir. Ayrıca DSC/TG ile malzemenin saflığı, bozunma davranışı ve kimyasal kinetik davranışı



da belirlenebilmektedir. Analizler için, Mettler Toledo marka DSC-TG cihazı kullanılmıştır.

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

Bu çalışmada öğütülmüş toz DDCA ile geleneksel/flaş sinterlenmiş numunelerin tane yapıları incelenerek sinterleme işleminin ne kadar başarılı olduğu incelenmiştir. Tüm numuneler SM Zeiss LS-10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. İncelenecek numuneler altlık tutucu üzerine iletken karbon bant yardımıyla yerleştirilmiştir. ~5 mikron kalınlığında altın kaplama sonrası taramalı elektron mikroskobunda inceleme yapılmıştır. GS ve FS sonrası tane çaplarının ortalaması ile yapıları incelenmiştir. SEM görüntülerinden Image J programı kullanılarak seçilen 50 ayrı tane üzerinden hesaplanmıştır.

#### 3.5.5. Arşimet Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ölçümleri DDCA'nın toz, geleneksel ve flaş sinterlenmiş numuneleri için hassas terazi kullanılarak Arşimet metodu ile yapılmıştır. Bu metot, yoğunluğu ölçülecek olan numunenin porlarının bir sıvı yardımıyla doldurularak gerçekleştirilmektedir. Numunelerin kuru ağırlığı ( $m_1$ , g) alındıktan sonra 24 sa. süre ile deiyonize su içerisinde bekletilmiştir. Bu süre sonunda yaş numunenin ( $m_2$ , g) ve düzenek içerisinde iken askıda ağırlıkları ( $m_3$ , g) ölçülmüştür. Burada,  $\rho$ , numunenin yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ) ifade etmektedir (Denklem 3.4).

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times d \quad (3.4)$$

#### 3.5.6. Yüzey alanı ve porozite tayini (BET)

BET cihazı mikro, mezo veya makro boyutta gözenek içeren toz veya katı numunelerde fiziksel adsorbsiyon yöntemiyle gözenek boyutunu ve dağılımının yüksek ve düşük basınçlarda belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yöntem, numune yüzeyinin tek bir moleküler tabaka ile kaplanması için gerekli gaz miktarının hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Bu hesaplamada Brunauer Emmett ve Teller (BET) teorisi

kullanılmaktadır. Bu çalışmada da Micromeritics TriStar II Plus marka BET cihazı kullanılarak öğütülmüş DDCA'nın yüzey alanı ve mikro-gözenek ölçümleri yapılmıştır.

### **3.5.7. Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR)**

FTIR spektroskopi cihazı, moleküler ölçekte malzemelerin kimyasal bileşimi, bağlanma özellikleri ve atomik yapıları hakkında bilgi edinmek için kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında öğütülmüş DDCA tozlarının FTIR ile elde edilen spektrumunda gözlenen bandlar ile literatürde yer alan bilgilerden ve mineralojik analiz sonucu belirlenmiş olan bileşiklerle örtüşüp örtüşmediği belirlenmiştir. Bu analiz sonuçları ThermoScientific Nicolet IS20 marka cihaz ile elde edilmiştir.

## **3.6. Mekanik Testler**

### **3.6.1. Sertlik (MicroVickers) testi**

Sertlik testleri toz haldeki DDCA'nın köpek kemiği şeklinde basılması ve polimerin ortamdan uzaklaştırılmasından sonra MicroVickers (Bulut makine, 2013) cihazı ile 3 ayrı noktadan alınan sertliğin ortalaması ile belirlenmiştir. Benzer şekilde geleneksel ve flaş sinterlenmiş numunelerde de sertlik ölçümü de alınmıştır.

### **3.6.2. Üç nokta eğme testi**

Üç nokta eğme testi (SHIMADZU / Model: AGS-X 100 kN) Şekil 3.1'de belirtilen köpek kemiği şeklindeki numuneler üzerinde uygulanmıştır. Sinterlenmiş ve sinterlenmemiş DDCA numunelerin eğilme dayanım sonuçlarını tespit etmek amacıyla üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Sonuçlar cihazın bilgisayar programına aktarılması ile grafik şeklinde elde edilmiştir. Bu test sonuçları ile eğme dayanımı belirlenmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

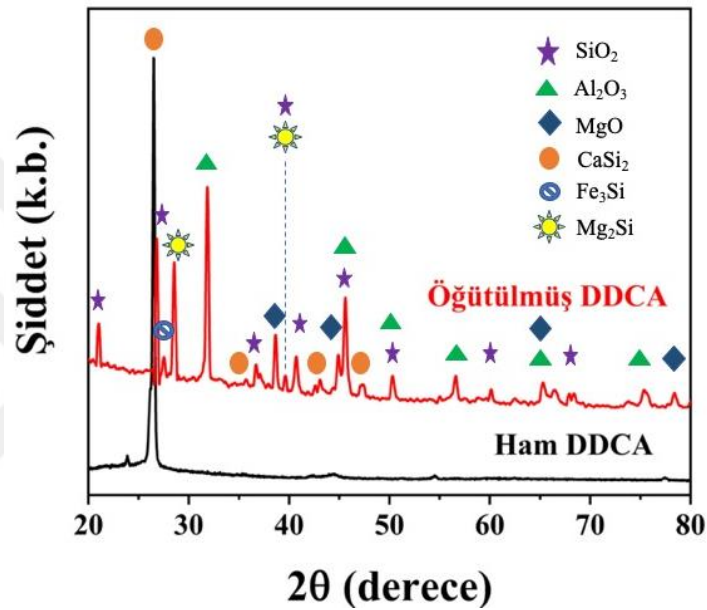
### 4.1. Öğütülmüş DDCA'nın Mineralojik ve Kimyasal Analizleri

Dökme demir ile ilgili olarak, çeşitli amaçlar için yaygın olarak birkaç metal oksit kullanılmaktadır. Bu metal oksitler tipik olarak dökme demir eriyiğine eklenmekte veya belirli etkiler veya özellikler elde etmek için döküm işlemine dahil edilmektedir. Dökme demir ile ilgili olarak kullanılan bazı metal oksitler:

1. Demir Oksit (FeO): Demir oksit genellikle eritme işleminin bir sonucu olarak dökme demirde bulunur. Dökme demirin mukavemeti ve sünekliği gibi mekanik özelliklerini etkileyebilir.
2. Silisyum Dioksit (SiO<sub>2</sub>): Silika olarak da bilinen silisyum dioksit, döküm işleminde kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadır. İyi boyutsal kararlılığa, ısı direncine ve geçirgenliğe sahip kalıplar oluşturmaya yardımcı olmaktadır.
3. Magnezyum Oksit (MgO): Sfero dökümde nodüler grafit oluşumunu desteklemek için dökme demire magnezyum oksit ilave edilmektedir. "Nodülerizasyon" adı verilen bu işlem, dökme demirin tokluğunu ve sünekliğini geliştirmektedir.
4. Alüminyum Oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): Mikro yapısını değiştirmek için bazen dökme demire alüminyum oksit eklenmektedir. Dökme demirde daha ince, daha düzgün bir tane yapısının üretilmesine yardımcı olan bir tane inceltici görevi görebilmektedir.
5. Titanyum Dioksit (TiO<sub>2</sub>): Titanyum dioksit, dökme demirde çekirdekleştirici bir madde olarak kullanılabilir ve kalın veya vermiküler grafit yerine ince grafit pullarının oluşumunu teşvik etmektedir. Bu, dökme demirin mekanik özelliklerini geliştirebilir.
6. Manganez Oksit (MnO): Manganez oksit yaygın olarak dökme demirde bulunur ve özelliklerini etkileyebilir. Döküm sırasında akışkanlığın iyileştirilmesine ve grafit morfolojisinin değiştirilmesine yardımcı olabilir.

Bunlar, dökme demir ile ilgili olarak kullanılan metal oksitlerin sadece birkaç örneğidir. Spesifik oksitler ve oranları, istenen özelliklere ve üretilen dökme demirin tipine (gri demir, sfero döküm veya başka bir varyant) bağlı olarak değişebilmektedir. Bu metal oksitlerin eklenmesi, gerekli performans kriterlerini karşılamak için dökme demirin mikro yapısını ve özelliklerini kontrol etmeye yardımcı olmaktadır.

Mesa Makine A.Ş.'den temin edilen DDCA'nın mineralojik analizi X-ışınları kırınımı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ham ve öğütülmüş (toz) DDCA'ya ait kırınım desenleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Analiz sonucunda belirlenen mineraller; hem Çizelge 4.1'de verilen DDCA'na ait öğütülmüş tozda belirlenen oksitler ile örtüşmektedir. Bunun yanında döküm sırasında yüksek sıcaklıkla birlikte oksit metalleri arasında çeşitli bileşikler ( $\text{CaSi}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  gibi) meydana geldiği XRD deseninde de gözlenmektedir.



Şekil 4.1. Ham ve öğütülmüş DDCA'ya ait XRD deseni

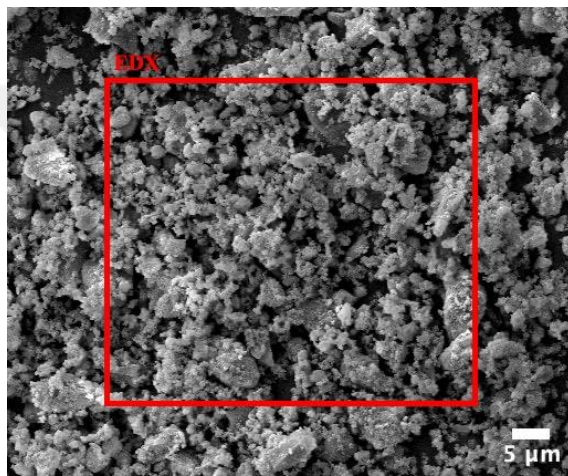
Ham ve öğütülmüş (toz) DDCA'ya ait başlıca oksit ve elementlere ait XRF sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede belirtilen oksitlerin toplam ağırlığı, DDCA numunesinin ağırlığının yaklaşık %95,28'ine denk gelmektedir.

Çizelge 4.1. Ham ve öğütülmüş DDCA'nın XRF analiz sonuçları

Ham Döküm Cürufu				Öğütülmüş Döküm Cürufu			
Element	%Ağırlıkça	Element	%Ağırlıkça	Oksit	%Ağırlıkça	Oksit	%Ağırlıkça
Si	35,025	Ti	0,388	$\text{SiO}_2$	70,9	$\text{TiO}_2$	0,162
Fe	10,623	Cl	0,306	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,55	$\text{CuO}$	0,0018
Al	4,955	Cr	0,184	$\text{Al}_2\text{O}_3$	10,4	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	-
Ca	3,375	V	0,1314	$\text{CaO}$	1,1	$\text{SrO}$	0,0112
Mg	6,96	Zr	0,116	$\text{MgO}$	0,106	$\text{ZrO}_2$	0,204
Mn	1,002	Zn	0,007	$\text{MnO}$	0,086	$\text{ZnO}$	0,0076
K	0,735	Sn	0,004	$\text{K}_2\text{O}$	5,36	$\text{SnO}_2$	0,002
Ba	0,5678	Diğer elementler	35,621	$\text{Na}_2\text{O}$	4,39	Diğer oksitler	4,72

#### 4.2. Toz DDCA'nın Mikro yapı karakterizasyonu (SEM) Analizi

Toz DDCA'nın sadece öğütülmüş halinin SEM mikrografı ve kırmızı alan içerisindeki bölgenin EDX analiz sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir. Toz, SEM incelemesi için karbon bant altlığı üzerine yerleştirilmiş fazla miktarı yüzeyden uzaklaştırılmış ve analiz öncesi yüzey altın ile kaplanmıştır. SEM analizi ile tane boyutlarının 200 nm ile 2 µm aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte EDX (enerji dağılım X ışını spektrometresi) analizi sonucunda elde edilen veriler ile bölgesel analiz farklılıklarının olduğu düşünülmektedir.

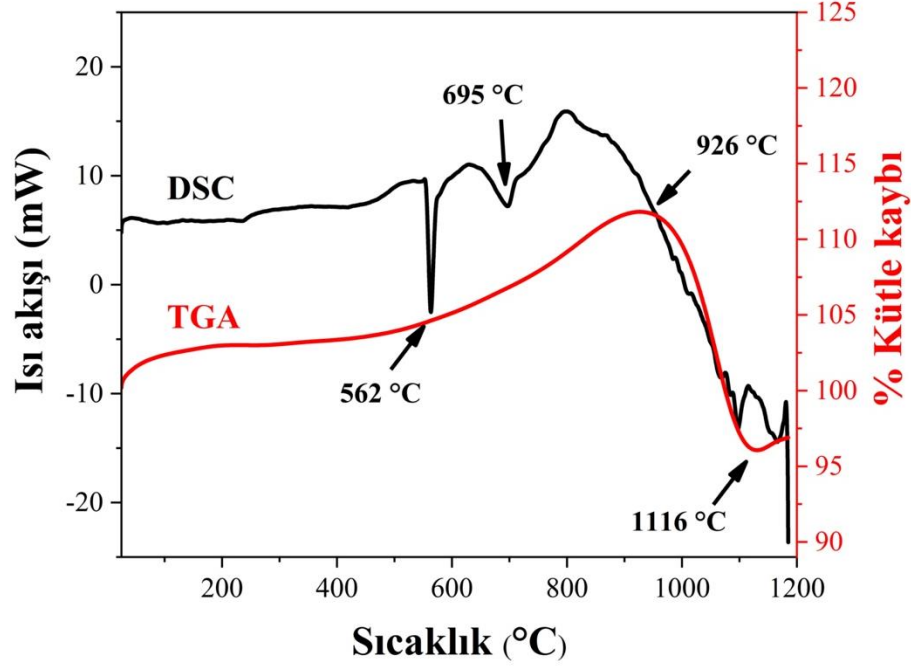


Şekil 4.2. Öğütülmüş (toz) DDCA'nın SEM mikrografı ve EDX analiz sonuçları

Element	% Ağırlıkça
O	26,99
Cl	22,69
Al	14,78
Na	12,86
Si	8,27
K	5,28
Mg	4,94
Ca	1,61
Fe	0,95
Mn	0,23
Cu	0,8
Ti	0,29
Co	0,29
Sn	0,01
Cr	0,01
<b>Toplam</b>	<b>100</b>

#### 4.3. Toz DDCA'nın DSC/TGA Cihazı ile Termal Davranışlarının İncelenmesi

Öğütülmüş haldeki DDCA'nın DSC/TG analizleri 100ml/dk. akış debisine sahip argon ortamında 10 °C/dk. ısıtma hızı ile 25-1200 °C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir. 553 ile 573 °C aralığında ekzotermik bir reaksiyon olduğu aynı zamanda ağırlık kaybının gözlenmektedir. 562°C ve 695°C'de denklem 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6 endotermik reaksiyonlar gözlemlenmiştir (Si-O ve Al-OH). Bunun yanında özellikle 562°C'den sonraki sıcaklıklarda malzemede kütle kazancı ile birlikte DSC eğrisinde artan eğilim gözlenmektedir. Bu genellikle malzemelerde oksidasyon reaksiyonlarında görülen durumdur. Yani DDCA içerisinde bulunan metal kalıntıların yüksek sıcaklıklarda oksidasyon olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte 975-1115 °C aralığında ise bozunma reaksiyonu gerçekleştiği belirlenmiştir.



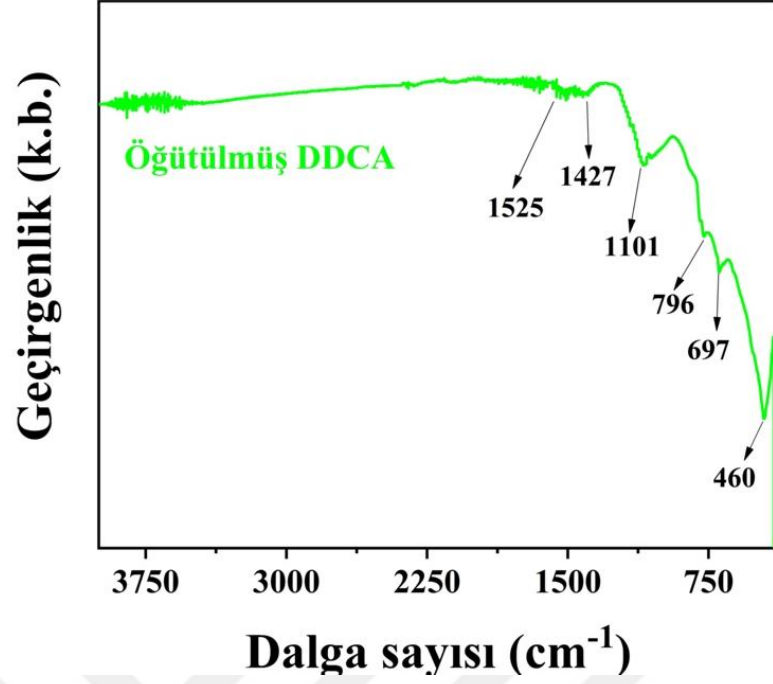
Şekil 4.3. DDCA'nın DSC ve TGA grafiği

#### 4.4. Toz DDCA'nın FTIR Analizi

FTIR analizi taneciklerdeki molekül yapılarını tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada öğütülmüş toz halindeki DDCA'nın FTIR spektrumu Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Spektrumda gözlenen pikler (band eğrileri) literatürdeki bilgilerden faydalanılarak 4 geniş band bölgesinde değerlendirilerek belirlenmiştir. Bunlar Si-Al, S, C ve OH bağındaki titreşim hareketine karşı gelen piklerden oluşmaktadır.

FTIR spektroskopisinde  $400-1600\text{ cm}^{-1}$  arası katı kafeslerini oluşturan atomların titreşim bölgesini,  $1600-4000\text{ cm}^{-1}$  bölgesi ise moleküler titreşimleri ifade etmektedir.  $400-1400\text{ cm}^{-1}$  arası ise parmak izi bölgesi olarak bilinmektedir.

$1101\text{ cm}^{-1}$ 'deki pik öğütme sırasında nemlenen  $\text{SiO}_2$ 'ye, hemen arkasındaki  $1055$  ve  $698\text{ cm}^{-1}$  civarı küçük pik ise Al-OH'a,  $460\text{ cm}^{-1}$ 'in ise  $\text{AlO}_6$ 'ya aittir (Kotova vd. 2022).  $796\text{ cm}^{-1}$  ise kristolabilit ( $\text{SiO}_2$ )'in Si-O bandına işaret etmektedir.  $697\text{ cm}^{-1}$  frekansında soğurum gösteren pik ise Al-Si bağının titreşimi ile ilişkilendirilmektedir.  $1427$  ve  $1525\text{ cm}^{-1}$ 'deki titreşim pikleri ise M=O (M; metal; Al, Si, Mg gibi) çift bağları ifade etmektedir.



Şekil 4.4. Toz DDCA'nın FTIR sonucu

#### 4.5. Toz DDCA'nın Yüzey Alanı (BET), Tane Boyutu (DLS) Analizi ve Özgül Ağırlığın Hesaplanması

Toz DDCA'nın BET yüzey alanı, tane boyut ve özgül ağırlığı Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelgede verilen fiziksel özellikler, Şekil 4.2'deki SEM görüntülerini doğrulamaktadır. Özgül ağırlık hesaplaması için Arşimet prensibinden faydalanılmıştır.

Çizelge 4.2. Toz DDCA'nın BET yüzey alanı, tane boyutu ve özgül ağırlık değerleri

	BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	Tane boyutu, d <sub>20</sub> (µm)	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )
Toz DDCA	2.6373	2051	2,018

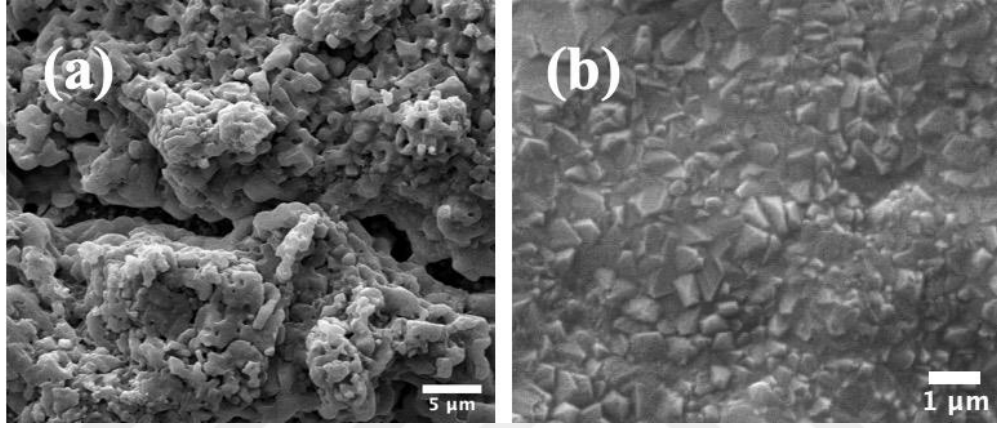
#### 4.6. GS İşlemi

Polimer uzaklaştırma işleminin başarı ile gerçekleştiğini öğrenebilmek için FTIR analizi yapılmıştır. Bu analiz ile Şekil 4.11'de PEG'e ait tüm karakteristik piklerin ortadan kalktığı görülmektedir. Bu işlem sonrası tüm numuneler geleneksel ve FS için uygun olduğu kanıtlanmıştır.

GS işlemi Bölüm 3.3'te belirtildiği gibi 1000 °C sıcaklıkta 4 saatte gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunenin XRD pateni (Şekil 4.10), SEM mikrografları

(Şekil 4.5) ve FTIR grafikleri (Şekil 4.11) incelenmiştir. Polimeri 600 °C’de uzaklaştırılmış olan numunede parçaların birbirlerine yakınlaştığı kısmen de olsa sinterlenme yüzeylerinin oluştuğu görülmektedir. Ancak bu sıcaklık numunenin tam anlamıyla sinterlenmesi için yeterli bir sıcaklık olmadığı tane temasları ve şekillerinden anlaşılmaktadır.

Polimer uzaklaştırma işlemi ile yapıda istenilmeyen PEG uzaklaştırılmış bir nevi kısmi sinterleme yapılarak tane sınırları ve sinterleme yüzeyleri kısmen de olsa belirgin görünüme geldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.5. a) Polimer uzaklaştırma işlemi sonrası, b) geleneksel sinterleme işlemi uygulanmış köpek kemiği şeklindeki numunenin SEM mikrografları

#### 4.7. FS İşlemi

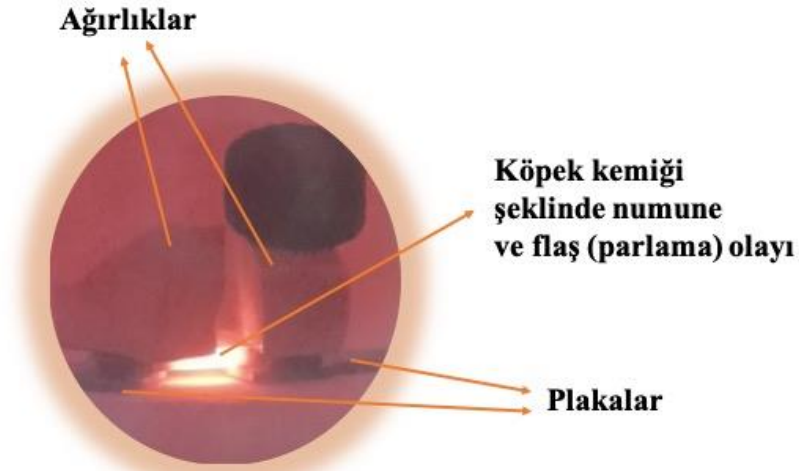
DC güç kaynağı kullanarak köpek kemiği formundaki malzemelere elektrik alan uygulanabilmesi için fırının arka kısmında bulunan yalıtımlı girişlere bağlı elektrotlar kullanılmıştır. Güç kaynağına bağlı olan bu tellerden akım geçip geçmediği her deney öncesinde kontrol edilmiştir. Daha sonra, numunenin sabitlenebilmesi için ilk aşamada paslanmaz çelik levhalar ve bu levhalar etrafına elektrotların sarılması ile elektrik geçişi sağlanması hedeflenmiştir (Şekil 4.6). Elektrot tellerin bağlı olduğu levhaları sabitlemek için levha üzerlerine ağırlık konularak sandviç şeklinde bir yapı oluşturularak kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra sisteme sıcaklık verilerek sabit akım altında güç kaynağından voltaj verilmeye başlanmıştır.

DC güç kaynağı, köpek kemiği şeklindeki numuneye 30V/mm elektrik alan uygulayabilmek için 600V ve 0,5A cihazda ayarlanmıştır. Akım değerinin sabitlenmesi ile birlikte yüksek akım ve voltaj değerinde numunenin Joule ısıtması ile aşırı ısınmasının



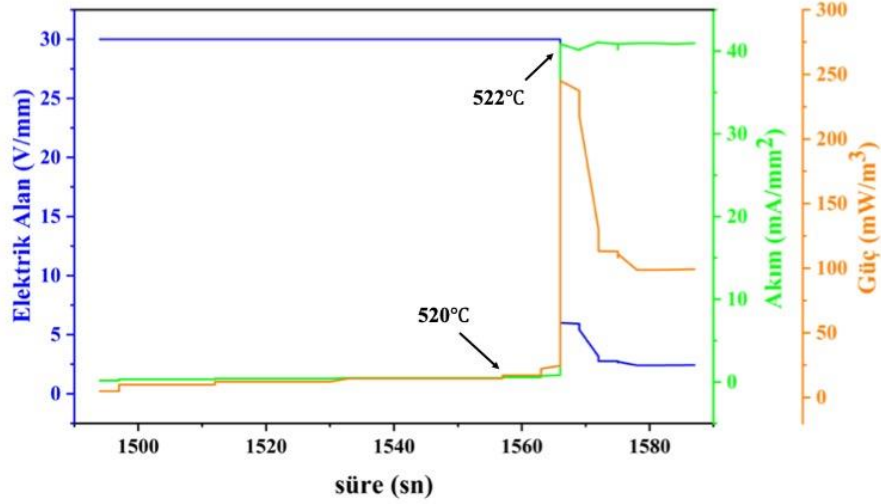
önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede numunenin partikül veya tane sınırında gerçekleşebilecek erimenin önüne geçilmiş olacaktır.

Bu aşamadan sonra bahsi geçen tüm elektrik alanlı deney sistemlerinde 3 aşamadan bahsedilmiştir. İlk aşamada numune yalıtkan özellik göstermektedir. Fırın sıcaklığı 20 °C/dk. ısıtma hızı ile 500 °C sıcaklık ve 30V/mm elektrik alan uygulanmasına rağmen köpek kemiği şeklindeki numune üzerinden akım geçmemiş bu nedenle de numune elektriksel olarak yalıtkan olarak tanımlanmıştır. Ham yoğunluktaki numunelerde partiküller arası temas anlarının ve bu sıcaklıklarda numunenin elektriksel iletkenliğinin düşük olması sebebiyle “yalıtkan” ifadesi kullanılmaktadır (Cetinkaya 2022). Fırın sıcaklığı 520 °C’ye ulaştığında ise, numune üzerinden 0,007 A gibi küçük bir değerde akım geçişi gözlenmiştir. Bu aşama Şekil 4.8’de gösterilen 2. Aşama yani sinterleme aşamasının başlangıcı olarak ifade edilmiştir. Bu sıcaklık itibari ile numunenin iletkenliği artmakta ve numune üzerinden geçen akımın ise 0,041 A’e kadar yükselmiştir. Fırın sıcaklığı 522 °C’ye ulaştığında FS gerçekleşirken numune üzerinden geçen akım yaklaşık 12 katına çıkmış 0,5 A’lik akım geçişi kaydedilmiştir (Şekil 4.7). Bu değer ilk aşamada DC güç kaynağında ayarlanan en yüksek akım değeridir. Tam bu sıcaklıkta fırın içerisindeki numune üzerinde flaş yani parlama olayı da gözlenmiştir.

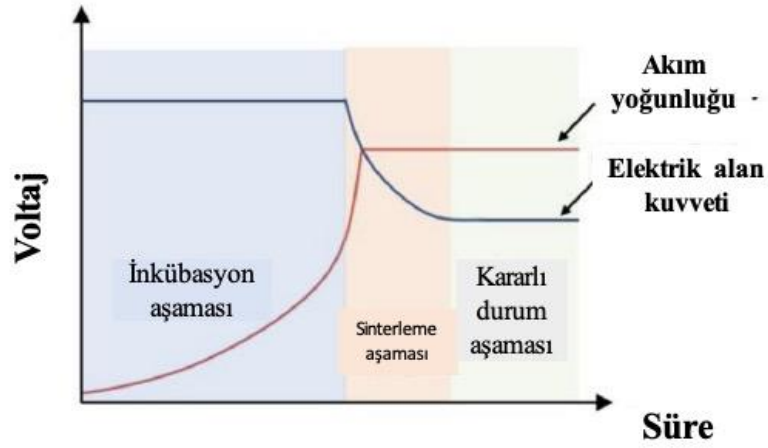


Şekil 4.6. Flaş sinterleme deney sisteminde plakalı (sandviç) düzenek

Plakaların yardımı ile elektrik alanın numuneye iletildiği bu sistemde FS işlemi 524 °C’de gerçekleşmiştir. Bölüm 4.6’da GS işleminde anlatıldığı gibi sinterleme 1000 °C’de 4 saatte uygulanmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere sinterleme sıcaklığı %47,6 oranında, sinterleme süresi de 4 saatten 20 saniyeye düşürülmüştür.



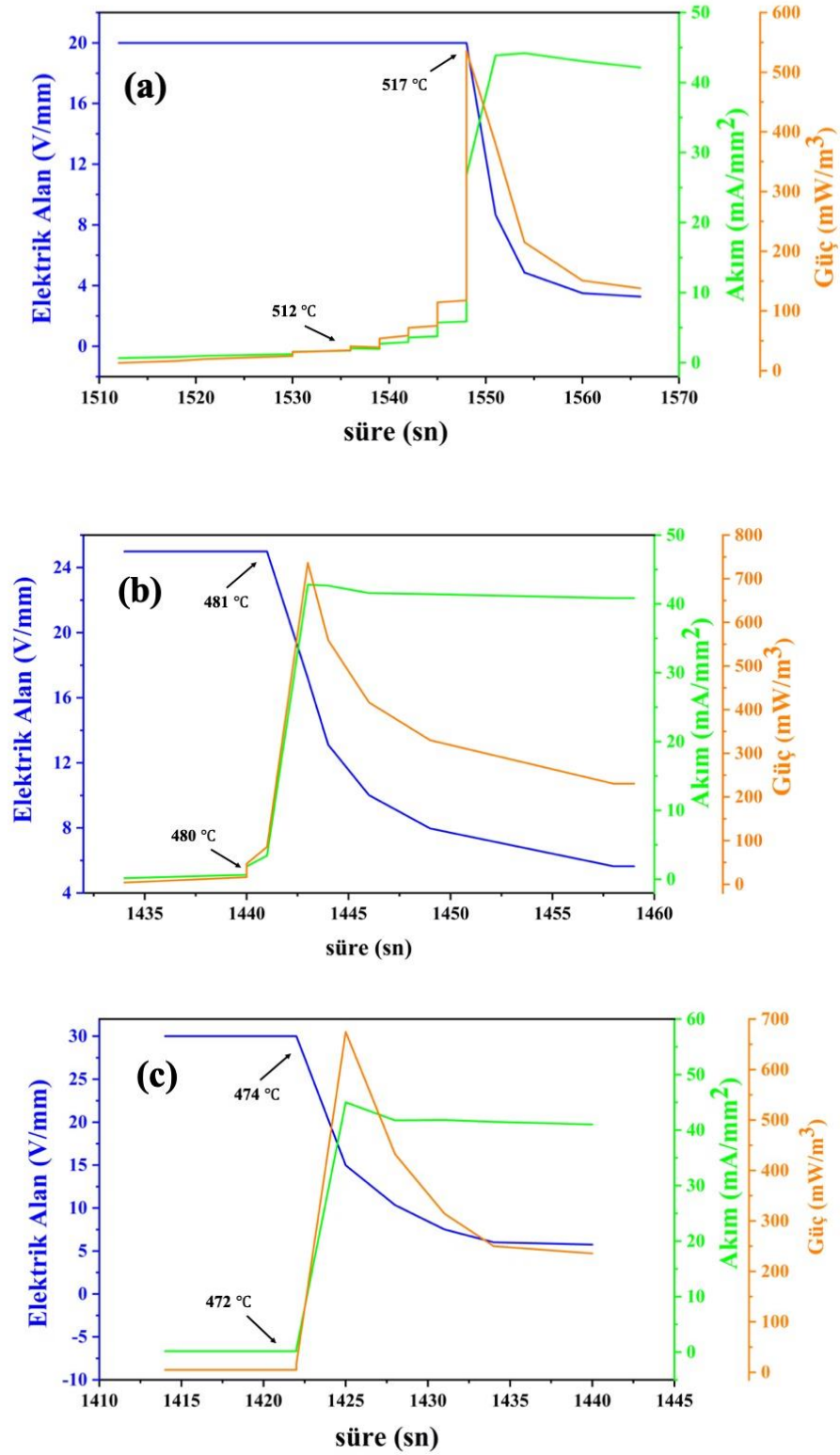
Şekil 4.7. 600V (30 V/mm) elektrik alan uygulanan plakalı sistemdeki numunenin flaş sinterleme grafiği



Şekil 4.8. Flaş sinterleme deneyinin aşamaları ve sinterleme parametrelerinin zamana karşı gösterimi ((Hongyang vd. 2022), düzenlenmiştir)

Ayrıca bu sistemde elektrik alanı iletme aracı olan plakaları ortadan kaldırmak istersek flaş sıcaklığında bir değişim gözlenebileceği düşüncesi ile bir sonraki deney sisteminde elektrotlar direk olarak numuneye bağlanmıştır (Şekil 3.4). Bundan sonraki denemeler için aynı şekilde akım değeri 0,5A'ye sabitlenmiş ve elektrik alan değerleri 30, 25 ve 20V/mm olacak şekilde numunelere tekrar FS işlemi uygulanmıştır.

Literatür çalışmalarından edinilen bilgiye göre FS sıcaklığının, artan elektrik alanla birlikte daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşeceği çıkarımı yapılmıştır (Çetinkaya, Güneş, ve Şavkliyildiz 2023).

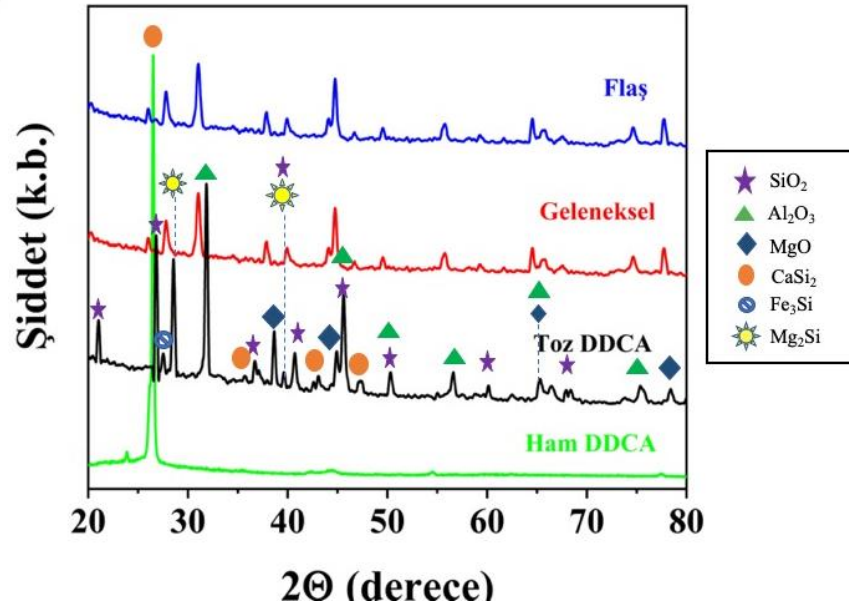


Şekil 4.9. Farklı elektrik alanlarda flaş sinterleme sıcaklığının zamana karşı grafiği a) 20, b) 25 ve c) 30 V/mm

İlk aşamada bahsi geçen tüm deney standartları (akım değeri, fırın ısıtma hızı, numune bağlama standardı vb.) diğer tüm denemeler içinde aynı tutulmuştur. Şekil 4.9a'daki grafikte plakasız sisteme ait 20V/mm elektrik alan uygulanmış köpek kemiği

şeklindeki DDCA numunesinin flaş sinterlenmesi gösterilmektedir. Şekil 4.8’de belirtilen 3 aşama tüm çalışmalar için aynı şekilde ifade edilmektedir. İnkübasyon aşaması olarak bilinen 1.aşama 30V/mm elektrik alanda numunenin 512 °C’ye kadar geçen süresini ifade etmektedir. Bu aşamada numune yalıtkan durumdadır. Fırın sıcaklığı bu sıcaklığa ulaştığında, numune üzerinden 0,021 A gibi küçük bir akım geçişi gözlenmiştir. 2. Aşama olarak bilinen sinterlenme aşaması ise bu sıcaklık değerinden sonra başlamaktadır. Artan sıcaklıkla beraber numune üzerinden geçen akım 0,07 A’ye kadar yükselmiştir. Fırın sıcaklığı 517 °C’ye yükseldiğinde ise numune üzerinden geçen akım 7,2 kat artmış ve 0,5A’ye kadar yükselmiştir. Sinterlenmenin gerçekleştiği flaş olayı 20V/mm elektrik alan altında numuneden 517 °C’de ve 15 sn. sürede geçmiştir. Kararlı durum aşaması olarak bilinen 3.aşama için ise 20 sn. daha beklenmiş ve sistem kapatılmıştır.

Benzer şekilde 25 ve 30 V/mm elektrik alan uygulanan numunelerde (Şekil 4.9b ve 4.9c) aynı sinterlenme aşamaları sırasıyla incelenmiştir. Sırasıyla, ilk aşama 480 °C ve 472 °C’lerde gözlenmiştir. 25V/mm elektrik alan için flaş sinterlenme sıcaklığı 481 iken 30V/mm elektrik alanda 471 °C olduğu belirlenmiştir. Tüm bu veriler ışığında, elektrik alan arttıkça FS sıcaklığı düştüğü gözlenmiştir.



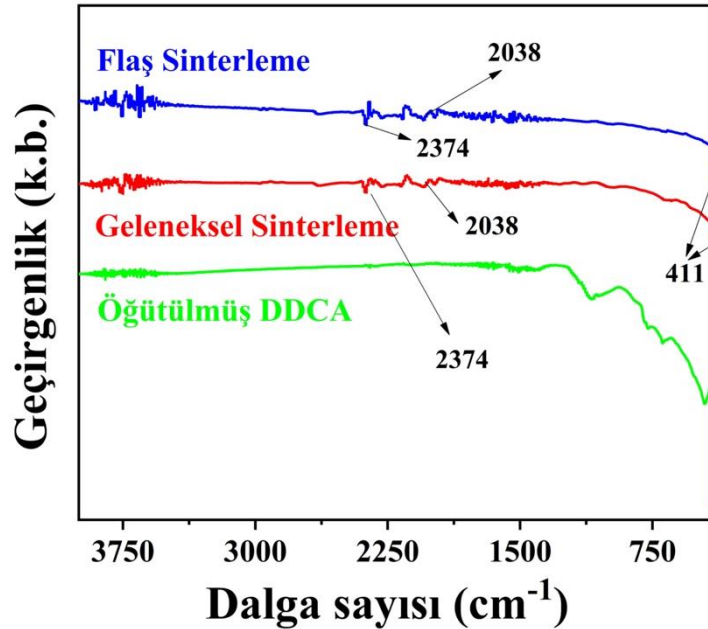
**Şekil 4.10.** Ham ve öğütülmüş DDCA ile geleneksel ve flaş sinterlenmiş köpek kemiği şeklindeki numunelerin XRD deseni

30 V/mm elektrik alan altında en düşük sıcaklıkta sinterlenen numune (Şekil 4.9c), geleneksel sinterlenmiş ve öğütülmüş DDCA numunelerinin XRD sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.10). XRD deseninde görüldüğü üzere sinterlenen

numunelerdeki pikler sola doğru kaymış ve şiddetleri de önemli derecede azalmıştır. Piklerin sola doğru kayması oksitler arası alaşımın gerçekleştiğini ifade etmektedir. Ayrıca GS ile FS pikleri arasında hiçbir fark bulunmamaktadır. Bu da yapılan sinterleme işleminin aynı sonuçları verdiğini kanıtlamaktadır. Böylece FS işlemi daha düşük sıcaklıklarda daha kısa sürelerde GS işleminin yerini alabileceğini bir kez daha kanıtlamaktadır.

Şekil 4.11’de sinterlenmiş numunelerin FTIR spektrumu verilmiştir. 2374 ve 2038  $\text{cm}^{-1}$  frekanslar moleküler arası titreşimleri ifade etmektedir. Ancak öğütülmüş DDCA FTIR spektrumunda bulunan 460  $\text{cm}^{-1}$  piki sinterlenme sonrası FTIR pikleri ile kıyaslandığında düşük frekans kayması olduğu ve bu pikin 411  $\text{cm}^{-1}$ ’ye kaydığı belirlenmiştir. Bu da M-O oksitlerinin etkileşimde olduğunu ifade etmektedir.

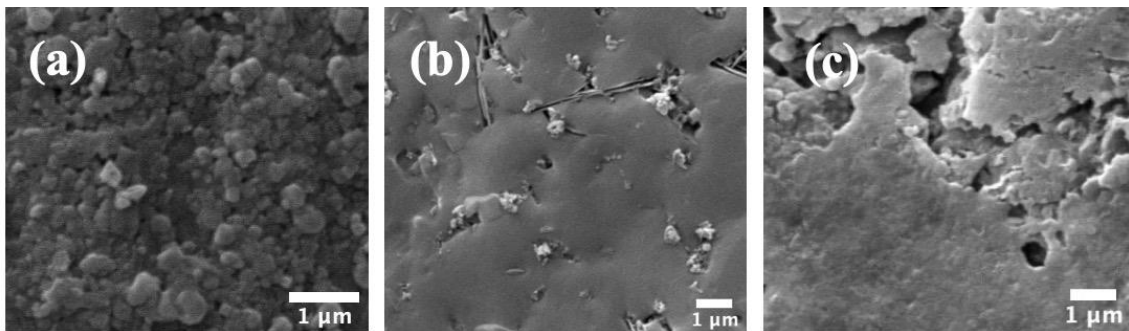
DDCA 20, 25 ve 30 V/mm elektrik alan altında flaş sinterlendikten sonra numunelerin yüzeylerinden alınan SEM mikrografları Şekil 4.12’de gösterilmektedir. 20V/mm elektrik alan uygulandığında numunenin tane sınırları net bir şekilde görülmektedir. Sinterleme işleminin kısmi bölgelerde tamamen gerçekleştiği ancak bazı bölgelerde ise tamamlanmadığı net bir şekilde belirlenmiştir (Şekil 4.12a).



Şekil 4.11 Sinterleme işlemleri sonrasında FTIR analizi ile bağ yapılarındaki değişikliklerin incelenmesi

Ayrıca, FS sıcaklık değeri diğer tüm elektrik alan değerlerinden daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. 25 V/mm elektrik alan uygulanan numunenin SEM mikrografında ise ince çubuk halinde gözlenen yapılar bulunmaktadır. Bu camsı yapıların

Müllit ( $2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) yapısı olabileceği düşünülmektedir. Sinterlenme işlemi sırasında oluşan bu yapıların tüm numune üzerinde hâkim bir yapı olmaması ise diğer intermetalik oksit bileşimlerinde oluşmuş olabileceği düşüncesini de beraberinde getirmektedir. Ayrıca, 20 V/mm elektrik alan uygulanmış numuneye oranla daha iyi sinterleme işlemi gerçekleşerek tane sınırlarının ortadan kalktığı görülmektedir (Şekil 4.12b). Son olarak, 30 V/mm elektrik alan uygulanan numunede yer yer çatlak bölgeler bulunmaktadır. Ancak bu yapıdaki taneler arası bütünleşmelerin çoğu bölgede tamamlanmış olduğu ve yapıların sıvı faza geçmiş olabileceği düşünülmektedir (Şekil 4.12c).



Şekil 4.12. a) 20, b) 25 ve c) 30 V/mm ile flaş sinterleme işlemi uygulanmış köpek kemiği şeklindeki numunelerin yüzeyden alınmış SEM mikrografları

#### 4.8. DDCA ile GS ve FS Yöntemi ile Üretilen Malzemelerin Mekanik Özellikleri

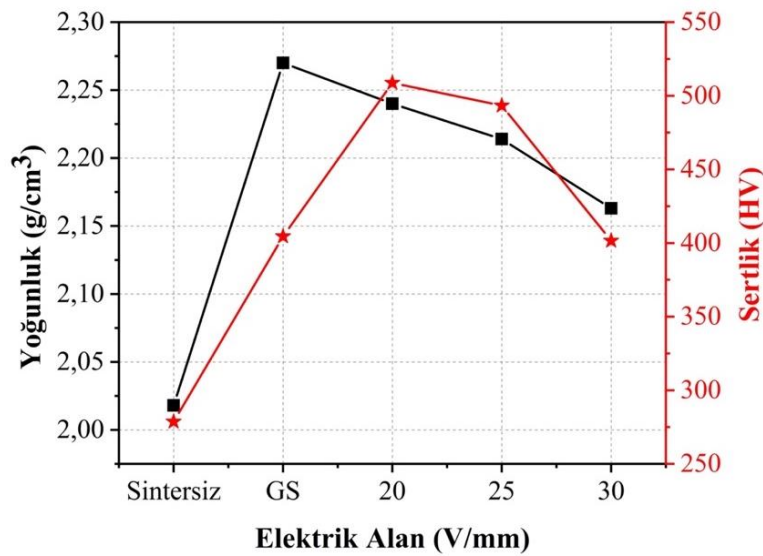
İşlemsiz, GS ve FS işlemleri uygulanmış numuneler için sertlik ve eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları aşağıdaki bölümlerde grafikler üzerinde ifade edilmiştir.

##### 4.8.1. Mikro Vickers sertlik testi ve yoğunluk ölçümleri

Sinterlenmemiş, GS ve FS işlemlerine tabi tutulmuş DDCA numuneleri Mikro Vickers sertlik sonuçları ile yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.13). Grafikten de anlaşılacağı üzere sinterlenmemiş DDCA numunesinin sertlik değeri 278,7 HV iken yoğunluk değeri  $2,018 \text{ g/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır (Denklem 3.1). GS işlemi sonrası ise numune SEM mikrografı ile sertlik ve yoğunluk değerleri uyum göstermiştir. GS' den sonra sertlik 404,5 HV, yoğunluk değeri ise  $2,27 \text{ g/cm}^3$  olduğu Şekil 4.13'te görülmektedir.

400V elektrik alan uygulanarak gerçekleştirilen FS işlemi sonrasında sertlik ve yoğunluk maksimum değere ulaşmış ve bunlar sırasıyla 508,76 HV ve 2,24 g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. FS' de elektrik alan arttıkça sertlik ve yoğunluk değeri kademeli olarak düşmüş ve düşüş SEM mikrograflarından da benzer gözlemi yapmamızı sağlamıştır. 500 V elektrik alan altında sertlik ve yoğunluk değerleri sırasıyla 2,214 g/cm<sup>3</sup> ve 493,3 HV iken 600V'da ise 2,163 g/cm<sup>3</sup> ve 401,16 HV olarak grafikte de belirtilmiştir.

GS işlemi uygulanan numunelerin yoğunluğu, FS numunelerinkine göre daha düşük çıkmıştır. Tane boyutu düştükçe mukavemet, sertlik değerleri yükselmektedir.



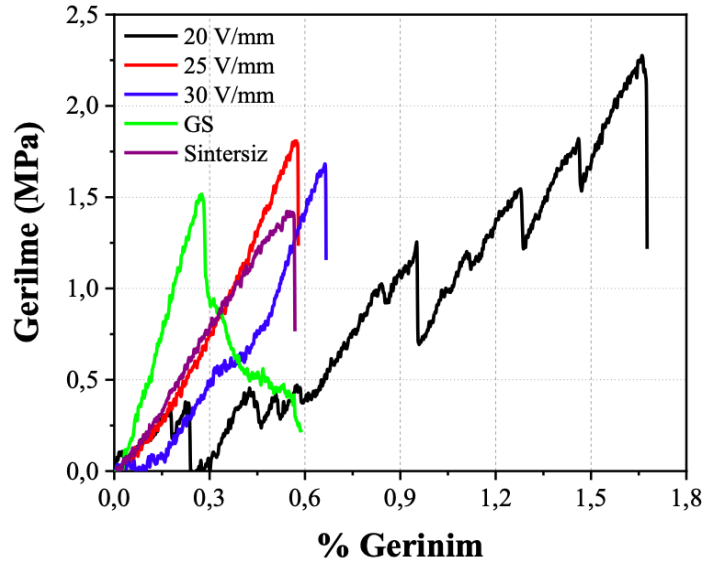
Şekil 4.13. Sinterlenmemiş, geleneksel ve flaş sinterleme ile sertlik ve yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması

#### 4.8.2. Üç nokta eğme dayanımı

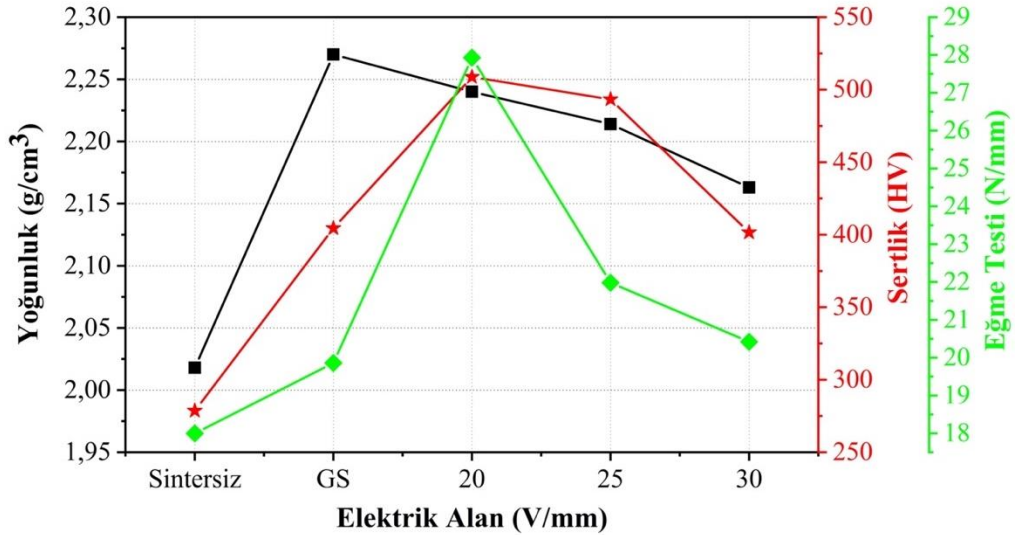
Şekil 4.14'te sinterlenmemiş, GS ve FS (400, 500 ve 600V) uygulanmış DDCA numunelerinin üç nokta eğme testi sonrası davranışlarının %gerinim-gerilim grafiği gösterilmektedir. Sinterleme işlemi uygulanmayan DDCA numunesi 1,35 MPa, GS sonrası 1,51 MPa ve 400, 500 ve 600 V elektrik alan altında FS işlemi sonrasında sırasıyla 2,25 , 1,8 ve 1,6 MPa gerilim direnci göstermiştir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere sertlik ve yoğunluk trendlerinin benzer eğilimi üç nokta eğme testinde de görülmektedir.

Sinterlenmemiş DDCA en düşük dayanımı gösterirken 400 V (20 V/mm) elektrik alan altında sinterleme işlemlerinden sonra numune en iyi dayanımı göstermiştir. Grafikte kademeli olarak uygulanan kuvvete karşılık uzama gözlenmiş bu da malzeme içerisindeki stresi taneler arasında absorblayarak dayanım gösterdiğini açıklamaktadır. Ancak 600 V (30V/mm) elektrik altında FS numune GS işlemi uygulanan göre kısmi olarak daha iyi

dayanım sağlamasına rağmen FS işleme tabi tutulan tüm elektrik alan değerlerinden daha düşük dayanım göstermiştir. Fakat grafikteki artan kuvvete karşılık sinterlenmemiş ve 500 V ile 600 V elektrik altında FS işleme tabi tutulan malzemelerle benzer stres emilim davranışını göstermiştir. 400 V ile sinterlenmiş malzemedeki gibi stresin taneler arasında absorblama olmadığı bu sebeple gevrek bir şekilde kırılma davranışını hızlı bir şekilde sergilediği anlaşılmıştır. Şekil 4.13 ve 4.14'te verilen tüm grafik verileri Şekil 4.15'te birleştirilerek karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.14. Sinterlenmemiş, geleneksel ve flaş sinterlenmiş numunelere üç nokta eğme testi sonuçları



Şekil 4.15. Sinterlenmemiş, geleneksel ve flaş sinterlenmiş numunelerin yoğunluk, sertlik ve eğme testi sonuçlarının karşılaştırılması



Her ne kadar bileşikler XRD deseninde yalnız olarak belirtilmiş olsa da tüm bileşiklerin farklı kompozisyonları oluşturabileceği ihtimali de düşünülmüş ve porselen ve duvar karosunda kullanılan hammaddelerin (kil mineralleri, feldspat, kalsit ve dolomit vb.) oluşabileceği ihtimali de göz önüne alınmıştır. Bu sebeple, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerin karşılaştırılması FS ve GS işlemlerine tabi tutulmuş DDCA'dan üretilen malzemeyle gerçekleştirilmiştir.

Monoporoz duvar karolarında gerçekleşen reaksiyonların temel pişirim aşamalarının sıcaklıkları ve sonrasında sinterlenme sıcaklıklarının 1150°C, porselen karolarında ise 1350°C'ye ulaşması beklenmektedir.

Porselen karoların mikro yapılarında camsı faz, Müllit ve kuvars kristallerinden oluşmaktadır. Bu üç kristalin porselenlerin yüksek mukavemet ve tokluk açısından dayanımlarını etkilemektedir. Özellikle Müllit fazının yüksek uzunluk/genişlik oranına sahip olması difüzyon mekanizmasının hızlı pişirim ile mikro yapılarda kristalleşmeyi ve kristal büyüme hızını etkilemektedir. Yüksek pişirim sıcaklığı daha akışkan bir sıvı faz yapısını oluşturmakta ve iğnemsiz kristal büyümesini engellemektedir. Düşük sıcaklıklarda ise Müllit kristallerinin yapısı yüksek sıcaklıklardakine nazaran düşük uzunluk/genişlik oranına sahiptir. Porselen karoların mikro yapı ve mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer faktör ise kuvarsın tane boyutudur. Yüksek tane boyutuna sahip kuvars taneleri ve camsı faz arasındaki gerilmelerden kırılmalar meydana gelmektedir.

Seramik ve porselen karoların mekanik mukavemetini etkileyen faktörler; gözenek sayısı ve boyutu ile ham yoğunluktur.

ISO 10545 standartlarına göre porselen karo bünyelerinin sahip olması gereken kırılma mukavemeti kalınlıkla orantılı olarak maksimum 700 N, duvar karolarında kırılma dayanımı maksimum 700 N ve eğilme dayanımı ise >20 N olduğu rapor edilmiştir.

Tüm bu veriler ışığında, sinterleme işlemine tabi tutulmamış olan DDCA'nın işletme sınırları içerisinde bulunduğu ancak sertlik değeri ile eğme testi sonucunda kırılma davranışının gevrek olduğu gözlenmiştir. GS işlemi uygulanan malzemedeki ise yüksek sıcaklık ve görece uzun sürelerde sinterleme işlemine tabi tutulmasının ardından elde edilen veriler porselen ve duvar karosu üretimi için istenilen sonuçları karşılamaktadır. Ancak 400 V (20 V/mm) elektrik alan uygulanarak 15 sn. süre ile FS işlemine tabi tutulan DDCA'nın yoğunluğu GS malzemesine nazaran daha düşük ve sertlik değeri ~ %25 daha sert ayrıca eğme testi sonucu %40 daha yüksek değere sahiptir. Bu değerler ile 400 V

elektrik altında FS işlemine tabi tutulan malzeme daha sert, daha hafif ve daha mukavemetli olduğu anlaşılmaktadır.

Benzer şekilde 500 V (25V/mm) elektrik alan uygulanarak FS işlemi uygulanan malzemenin sertlik, yoğunluk ve eğme dayanımı GS sonuçlarına göre oldukça mukavemetli olduğunu göstermektedir. Ancak 600 V (30 V/mm) elektrik alan uygulanan DDCA malzemesinin yoğunluğu tüm diğer sinterleme işlemleri uygulananlara nazaran daha düşük olmakla birlikte sertlik ve eğme dayanımı sonuçları GS işlemine uygulanan malzemeye oldukça yakın değerlerdedir. Bunun sebebi ise, mikro yapı analizi açıklamalarında da belirtildiği üzere malzeme sıvı faza geçtiği ve daha kırılğan bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır.



## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Sinterleme günümüz teknolojisinde seramik, porselen ve ileri teknoloji seramik çalışmalarında oldukça çok kullanılan bir tekniktir. Son 15 yılda geleneksel olarak sinterleme işlemi yerini daha farklı teknolojilere bırakmıştır. Bu teknolojilerin en önemli ve bu çalışmada kullanılanı FS' dir. FS ile sinterlenen malzemeler sıcaklık, süre, enerji, maliyet başta olmak üzere çevre kirliliği ve insan sağlığı göz önüne alınarak yapılmış çalışmalardır.

Konya bölgesinde 2023 yılı ikinci çeyreğinde bulunan dökümhanelerin sayısının 300 olduğu ancak her geçen gün arttığı bilinmektedir. Dökümhanelerden çıkan atıklar üretilen malzemelerin içeriğine göre çeşitlilik göstermektedir. Konya sanayisinin özellikle demir-çelik ve alüminyum sektörüne hitap eden ürünler üretmektedir. Bu üretimlerden artık kalan oldukça çok miktarda metal oksit içerikli metal atıkları dökümhanelerde yığın halinde biriktirmekte ancak değerlendirilme kapsamı ise oldukça kısıtlıdır. Bu sebeple, bu tez çalışmasında, çevreye zarar verecek olan döküm atıklarının değerlendirilmesi ile çevreye bir kazanım ve bir ürün geliştirme potansiyeli araştırılmıştır.

Çalışmada dökme demir cüruf atıkları (DDCA) toz formunda kullanılarak köpek kemiği şeklindeki kalıplarda, yeni sinterleme yöntemi olan FS ile sinterlenmiştir. Bu yöntem ile geleneksel olarak yapılan sinterleme işlemi sonuçları fiziksel, kimyasal ve mekanik dayanımı açısından değerlendirilmiştir. FS yöntemi ile üretilen malzemelerin daha düşük sıcaklıklarda ve kısa sürede gerçekleştirilerek enerji tasarrufu da sağlanmıştır. Kullanılan bu metotta numune üzerine uygulanan elektrik alan ve sıcaklık sayesinde atomlar arası boşlukların daraldığı gözlenmiştir.

FS deneyleri, 20, 25 ve 30 V/mm elektrik alan altında gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik testleri (3-nokta eğme ve sertlik) yapılmıştır. Bu verilerden elde edilen deneysel sonuçlar ise 1000 °C'de sinterlenen DDCA'nın 30 V/mm elektrik alan içerisinde FS ile en düşük 474 °C'de 30 s içerisinde gerçekleşebildiğini ve en iyi mekanik dayanımları da gösterdiği kanıtlanmıştır. 400 V ve 500 V elektrik alan altında ise sırasıyla 517 ve 481 °C'lerde sinterlendiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada DDCA ile çevresel problem teşkil eden bu malzemenin yeniden kullanımı üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. DDCA'nın seramik bir malzeme olarak

kullanımı üzerine yapılan bu çalışmada sinterleme teknolojisinin değişimi ile malzemeye mekanik ve kimyasal açıdan gerçekleşen değişim gözlenmiştir.

Yapılan tüm testler sonrasında DDCA 400 V (20V/mm) elektrik alan altında flaş sinterlendiğinde diğer tüm FS elektrik alanları altında (500 ve 600 V) daha yoğun ve daha iyi mekanik dayanım özelliğine sahip olmuştur. GS işlemine tabi tutulan aynı numuneler ise en kötü mekanik dayanıma sahip olan (600 V) elektrik alan altındaki FS' ye nazaran daha düşük değerlerde dayanım etkisi göstermiştir. Bu sonuçlar SEM mikrografları ile uyum içerisinde olduğu kanıtlanmıştır.

GS işlemi ile üretilen porselen ve duvar karolarının kimyasal ve mekanik özellikleri ile FS altında üretilen DDCA malzemeleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, 400 V (20 V/mm) elektrik alan altında FS işlemi ile üretilen malzeme GS ile üretilen porselen ve duvar karolarından daha iyi dayanım gösterdiği bu tez çalışmasının tartışma kısmında detaylıca anlatılmıştır. 500 V (25 V/mm) elektrik alanda görülen Müllit (iğnemsî) yapılar porselen karoların mikro yapısında bulunan yapı gereği uygun testler genişletilerek olarak yer ve duvar karosu kullanım alanı için tercih edilebilir.

## 5.2. Öneriler

Bu tez çalışması için yapılan tüm testlerin yanında duvar ve yer karosunun diğer mekanik özellikleri test edilerek ISO standartları ile karşılaştırma yapılarak kullanımı raporlandırılabilir. Standartlara uygunluğu belirlenir ise biyolojik testleri gerçekleştirilerek insan ve çevre sağlığı açısından uyumu araştırılması da uygun olacaktır. Ayrıca bir başka çalışmada DDCA tozlarının geopolimer beton üretiminde kullanımının araştırılması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akın Altun, İ., ve İsmail Yılmaz. 2002. "Study on Steel Furnace Slags with High MgO as Additive in Portland Cement". *Cement and Concrete Research* 32(8): 1247-49.
- Akın, Umut. 2014. "Kobiler Ve Mikro İşletmelerde Demir Döküm Sanayi Sektör Analizi". Fen Bilimleri Enstitüsü. <http://hdl.handle.net/11527/15697> (24 Haziran 2023).
- Aran, Ahmet. 2007. *Döküm Teknolojisi İmal Usülleri Ders Notları*. İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- Aytaçoğlu, Lütfü Cihan. 2012. "Dökme demirlerde termal analiz ve matematiksel yaklaşım". <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/80058> (24 Haziran 2023).
- Balamurugan, J. vd. 2021. "Recycling of Steel Slag Aggregates for the Development of High Density Concrete: Alternative & Environment-Friendly Radiation Shielding Composite". *Composites Part B: Engineering* 216: 108885.
- Barišić, Ivana, Sanja Dimter, ve Ivanka Netinger. 2010. "Possibilities of application of slag in road construction". *Tehnički vijesnik-Technical Gazette* 17: 523.
- Bartın Üniversitesi. *Dökme Demirler*. . Ders Notu.
- Başar, Hatice Merve, ve Nuran Deveci Aksoy. 2012. "Atık Döküm Kumunun Geri Kazanım Uygulamaları". *Sigma : Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* 30(2): 205-24.
- Beshr, H, A. A Almusallam, ve M Maslehuddin. 2003. "Effect of Coarse Aggregate Quality on the Mechanical Properties of High Strength Concrete". *Construction and Building Materials* 17(2): 97-103.
- Biesuz, Mattia, ve Vincenzo M. Sglavo. 2019. "Flash Sintering of Ceramics". *Journal of the European Ceramic Society* 39(2): 115-43.
- Binici, Hanifi, Mustafa Eken, ve Aytaç Dinçer. 2016. "Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 28(1): 11-21.
- Bosurgi, Gaetano vd. 2023. "Mechanical and Environmental Performance Comparisons of Improved Asphalt Pavement Wearing Courses with High Quality Aggregates, Steel Slags, and Polymeric Compound". *Construction and Building Materials* 382: 131252.
- Bradl, Heike B. 2004. "Adsorption of Heavy Metal Ions on Soils and Soils Constituents". *Journal of Colloid and Interface Science* 277(1): 1-18.

- Branca, Teresa Annunziata vd. 2020. “Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe”. *Metals* 10(3): 345.
- Bulut, Erkan. 2021. “Vermiküler Grafitli Dökme Demir (Cgı) İle Üretilen Motor Blokların Özelliklerini Etkileyen Faktörlerin Alternatif Dökme Demirler İle Karşılaştırmalı Analizi”. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı.
- Carvalho, S. Z. vd. 2017. “The Recycling Effect of BOF Slag in the Portland Cement Properties”. *Resources, Conservation and Recycling* 127: 216-20.
- Cetinkaya, Zeynep. 2022. “Flash sintering effect on fly ash microstructure”. <https://grcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/1694> (02 Haziran 2023).
- Chaim, Rachman, ve Claude Estournès. 2019. “Effects of the Fundamental Oxide Properties on the Electric Field-Flash Temperature during Flash Sintering”. *Scripta Materialia* 163: 130-32.
- Chamling, Pawan, Sumanta Haldar, ve Shantanu Patra. 2020. “Physico-Chemical and Mechanical Characterization of Steel Slag as Railway Ballast”. *Indian Geotechnical Journal* 50.
- Çamdali, Ünal, ve Murat Tunç. 2016. “Elektrik Ark Fırınında Fiziksel Ekserji Potansiyelinin ve Veriminin Elde Edilmesi”. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 5(1): 53-61.
- Çelik, Eyup Sabri. 2007. “Alüminyum Döküm Atık Maddelerinin Çevresel Etkilerinin FMEA Sistemi ile İncelenmesi”. <http://dSPACE.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/8168> (25 Mayıs 2023).
- Çetinkaya, Zeynep, Eda Güneş, ve İlyas Şavklıyıldız. 2023. “Investigation of Biochemical Properties of Flash Sintered ZrO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> Nanofibers”. *Materials Chemistry and Physics* 293: 126900.
- Çivi, Can, ve Enver Atik. 2017. “Bakır ve Grafit İçeren Demir Esaslı Malzemelerin İndüksiyon ile Sinterlenmesinde Sinterleme Sıcaklığının Malzeme Dayanımına Etkisi”. *Celal Bayar University Journal of Science* 13(2): 467-73.
- Demir, Aysel. 2021. “B4C Ve PMN-PT Seramiklerin Flash Sinterleme ile Üretimi ve Karakterizasyonu”. Yüksek Lisans Tezi. T.C.Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Demirbaş, Arife Kübra, ve Sinem Çevik. 2017. “Demir ve Demir Dışı Metal Döküm Endüstrisi İçin Atık Yönetimi”. <https://aperta.ulakbim.gov.tr/record/228132> (01 Haziran 2023).
- Develioğlu, İnci, ve Hasan Fırat Pulat. 2018. “Yüksek fırın cürufunun geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesi performansının incelenmesi”. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 24(3): 433-38.
- Dpt. 2000. *Devlet Planlama Teşkilatı sekizinci beş yıllık kalkınma planı*. DPT.

- Dpt, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. 2023. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Steel Slag*,  
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssa1.cfm>.
- Ducman, V., ve A. Mladenovič. 2011. "The Potential Use of Steel Slag in Refractory Concrete". *Materials Characterization* 62(7): 716-23.
- Erdenebold, Urtnasan. 2020. "A Study on The Recovery of Foundry Cast Iron and Reutilizing By-Product from Copper Smelting Slag".  
<https://repository.pknu.ac.kr:8443/handle/2021.oak/2441> (05 Haziran 2023).
- Fisher, Lucy V., ve Andrew R. Barron. 2019. "The Recycling and Reuse of Steelmaking Slags — A Review". *Resources, Conservation and Recycling* 146: 244-55.
- Francis, John S. C., Marco Cologna, ve Rishi Raj. 2012. "Particle Size Effects in Flash Sintering". *Journal of the European Ceramic Society* 32(12): 3129-36.
- Fronek, Brad. 2012. "Feasibility of Expanding the Use of Steel Slag as a Concrete Pavement Aggregate". *ETD Archive*.  
<https://engagedscholarship.csuohio.edu/etdarchive/372>.
- Gao, Jie vd. 2017. "Utilization of Steel Slag as Aggregate in Asphalt Mixtures for Microwave Deicing". *Journal of Cleaner Production* 152: 429-42.
- Gedikli, Miraç. 2019. "Dökümhanelerde oluşan atık döküm kumunun geri kullanım yöntemlerinin incelenmesi". masterThesis. Sakarya Üniversitesi.  
<https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/79649> (25 Mayıs 2023).
- Geiseler, J. 1996. "Use of Steelworks Slag in Europe". *Waste Management* 16(1): 59-63.
- Han, Yi, Runsheng Lin, ve Xiao-Yong Wang. 2022. "Carbon Conversion Technology for Performance Improvement and Environmental Benefits of Ultra-High-Performance Concrete Containing Slag". *Journal of Materials Research and Technology* 21: 2571-83.
- Hawaman. 2009. "Türkiye’de sanayiden kaynaklanan tehlikeli atıkların yönetiminin iyileştirilmesi".
- Hongyang, Zhou vd. 2022. "Review of flash sintering with strong electric field". *High Voltage* 7: 1-11.
- Jiang, Yi, Tung-Chai Ling, Caijun Shi, ve Shu-Yuan Pan. 2018. "Characteristics of Steel Slags and Their Use in Cement and Concrete—A Review". *Resources, Conservation and Recycling* 136: 187-97.
- Karalar, Memduh, ve Selin Konak. 2019. "Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Taban Külü İnce Agregaları ile Üretilmiş Betonun Gerilme Şekil Değişirme Davranışının İncelenmesi". *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 8: 1119-41.

- Kavasoğlu, Burak. 2022. “Çelik Cüruflarının Alternatif Kullanım Alanlarının Değerlendirilmesi”. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Kaya, Ahmet Ozan. 2014. “Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”. Fen Bilimleri Enstitüsü. <http://hdl.handle.net/11527/4929> (30 Mayıs 2023).
- Kaya, Gülay, ve Servet Turan. 2004. “Yüksek fırın curufunun seramik sektöründe katma değeri yüksek ürünlerin eldesinde değerlendirilmesi”. *Mühendis ve Makina* 45(536): 48-60.
- Konstam, Nigel, ve J. Gerin Sylvia. 1975. “Cast Metals Technology”. İçinde *Leonardo*, , 264. <https://www.jstor.org/stable/1573272?origin=crossref> (30 Mayıs 2023).
- Kotova, Olga B., Vladimir A. Ustyugov, Shiyong Sun, ve Alexey V. Ponaryadov. 2022. “Mullite production: phase transformations of kaolinite, thermodynamics of the process”. *Записки Горного института* 254 (eng): 129-35.
- Kovacs, T. vd. 2017. “6 - From Raw Materials to Norm by-Products”. İçinde *Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction*, ed. Wouter Schroeyers. Woodhead Publishing, 135-82. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020098000062> (06 Haziran 2023).
- Kurt, Bünyamin. 2019. “Lamel grafitli dökme demirlerde termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerliğinin tayini, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”. masterThesis. Sakarya Üniversitesi. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/79493> (24 Haziran 2023).
- Labrincha, J. vd. 2017. “7 - From Norm by-Products to Building Materials”. İçinde *Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction*, ed. Wouter Schroeyers. Woodhead Publishing, 183-252. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020098000074> (06 Haziran 2023).
- Li, Haibin vd. 2023. “Application of Composite Steel Slag as Subgrade Filler: Performance Evaluation and Enhancement”. *Construction and Building Materials* 370: 130448.
- Lin, Yong, Baijun Yan, Qifeng Shu, ve Timo Fabritius. 2021. “Synergetic Valorization of Basic Oxygen Furnace Slag and Stone Coal: Metal Recovery and Preparation of Glass-Ceramics”. *Waste Management* 135: 158-66.
- Liu, Wenhuan, Hui Li, Huimei Zhu, ve Pinjing Xu. 2019. “Properties of a Steel Slag-Permeable Asphalt Mixture and the Reaction of the Steel Slag-Asphalt Interface”. *Materials (Basel, Switzerland)* 12(21): 3603.
- Luxán, M. P., R. Sotolongo, F. Dorrego, ve E. Herrero. 2000. “Characteristics of the Slags Produced in the Fusion of Scrap Steel by Electric Arc Furnace”. *Cement and Concrete Research* 30(4): 517-19.



- Mahieux, P. -Y., J. -E. Aubert, ve G. Escadeillas. 2009. "Utilization of Weathered Basic Oxygen Furnace Slag in the Production of Hydraulic Road Binders". *Construction and Building Materials* 23(2): 742-47.
- Manso, Juan M., Javier J. Gonzalez, ve Juan A. Polanco. 2004. "Electric Arc Furnace Slag in Concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering* 16(6): 639-45.
- Manso, Juan M., Juan A. Polanco, Milagros Losañez, ve Javier J. González. 2006. "Durability of Concrete Made with EAF Slag as Aggregate". *Cement and Concrete Composites* 28(6): 528-34.
- Maslehuddin, M vd. 2003. "Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes". *Construction and Building Materials* 17(2): 105-12.
- Mihok, L., K. Seilerová, ve Dana Baricová. 2004. "Recycling of steelmaking slag from electric arc furnace". <https://www.semanticscholar.org/paper/Recycling-of-steelmaking-slag-from-electric-arc-Mihok-Seilerov%C3%A1/4c63c40801ff1c9909a905a69b5c8ec5f93a1be6> (01 Haziran 2023).
- Motz, H, ve J Geiseler. 2001. "Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources". *Waste Management* 21(3): 285-93.
- Netinger, Ivanka, Ivana Barišić, Aleksandra Fučić, ve Samtinjay Bansode. 2016. Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction*.
- Nunes, Vitor A., ve Paulo H. R. Borges. 2021. "Recent Advances in the Reuse of Steel Slags and Future Perspectives as Binder and Aggregate for Alkali-Activated Materials". *Construction and Building Materials* 281: 122605.
- Okur, Çiğdem. 2020. "Piezoelektrik malzemelerin flash sinterleme ile üretimi ve karakterizasyonu". <https://gcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/1049> (21 Nisan 2022).
- Önkibar, Gültekin. 2006. "Entegre demir-çelik tesisi tufalinden doğrudan redüklenme yöntemi ile ham demir üretimi". masterThesis. Sakarya Üniversitesi. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/81992> (31 Mayıs 2023).
- Özdemir, Uğur. "Graphite Structures in Cast Irons - ELKEM". [https://www.academia.edu/6686608/Graphite\\_Structures\\_in\\_Cast\\_Irons\\_ELKE](https://www.academia.edu/6686608/Graphite_Structures_in_Cast_Irons_ELKE) M (24 Haziran 2023).
- Özdeş, Enver Onur. 2018. "Demir çelik endüstrisindeki elektrik ark ocaklarının kimyasal bileşimine dayalı kütle ve enerji analizi". masterThesis. İskenderun Teknik Üniversitesi / Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. <http://openaccess.iste.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12508/431> (30 Mayıs 2023).

- Özkan, Behiye. 2019. "Türkiye demir çelik sektöründe ulaştırma modeli ile maliyet optimizasyonu ve uygulaması". Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi / Sosyal Bilimler Enstitüsü / İşletme Ana Bilim Dalı.
- Öztürk, Sultan. *Dökme Demirler*. KTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. Ders Notu.
- Pasetto, Marco, ve Nicola Baldo. 2010. "Experimental Evaluation of High Performance Base Course and Road Base Asphalt Concrete with Electric Arc Furnace Steel Slags". *Journal of Hazardous Materials* 181(1): 938-48.
- Poh, HY, Gurmel Ghataora, ve Nizar Ghazireh. 2006. "Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines". *Journal of Materials in Civil Engineering - J Mater Civil Eng* 18.
- Proctor, Deborah. 2000. "Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags". *Environmental Science & Technology - Environ Sci Technol* 34.
- Pürçek, Genççağa. *Döküm*. . Ders Notu.
- Raj, Rishi. 2016. "Analysis of the Power Density at the Onset of Flash Sintering". *Journal of the American Ceramic Society* 99.
- Ramonich, E. Vázquez, ve M. Barra. 2001. "Reactivity and Expansion of Electric Arc Furnace Slag in Their Application in Construction". *Materiales de Construcción* 51(263-264): 137-48.
- Rashad, Alaa M. 2019. "A Synopsis Manual about Recycling Steel Slag as a Cementitious Material". *Journal of Materials Research and Technology* 8(5): 4940-55.
- Reddy, A. Srinivasa, R. K. Pradhan, ve Sanjay Chandra. 2006. "Utilization of Basic Oxygen Furnace (BOF) Slag in the Production of a Hydraulic Cement Binder". *International Journal of Mineral Processing* 79(2): 98-105.
- Reuter, Markus, Yanping Xiao, ve U. Boin. 2004. "Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes". *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*: 349-56.
- Revilla-Cuesta, Víctor vd. 2023. "Chapter 10 - Recovery of Steel Slag as a Raw Material in Cement-Based Mixes: Usefulness as Aggregate and Binder". İçinde *Managing Mining and Minerals Processing Wastes*, ed. Chongchong Qi ve CRAIG H Benson. Elsevier, 209-33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323912839000109> (05 Haziran 2023).
- Rohde, Luciana, Washington Núñez, ve Jorge Ceratti. 2003. "Electric Arc Furnace Steel Slag: Base Material for Low-Volume Roads". *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 2: 201.

- San-José, José T., Iñigo Vegas, Idoia Arribas, ve Ignacio Marcos. 2014. "The Performance of Steel-Making Slag Concretes in the Hardened State". *Materials & Design* 60: 612-19.
- Sarfo, Prince, Avimanyu Das, Gary Wyss, ve Courtney Young. 2017. "Recovery of Metal Values from Copper Slag and Reuse of Residual Secondary Slag". *Waste Management* 70: 272-81.
- Shen, Huiting, E Forssberg, ve Ulf Nordström. 2004. "Physicochemical and Mineralogical Properties of Stainless Steel Slags Oriented to Metal Recovery". *Resources, Conservation and Recycling* 40(3): 245-71.
- Shu, Kaiqian, ve Keiko Sasaki. 2022. "Occurrence of Steel Converter Slag and Its High Value-Added Conversion for Environmental Restoration in China: A Review". *Journal of Cleaner Production* 373: 133876.
- Souter, Laura, ve Shaun Watmough. 2017. "Geochemistry and toxicity of a large slag pile and its drainage complex in Sudbury, Ontario". *Science of The Total Environment* 605-606: 461-70.
- Soyhan, Hümeyra. 2007. "Seramiklerin Sinterleme Prosesi Süresince Şekil Değişikliklerinin İncelenmesi". Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Proses Ve Reaktör Tasarımı Programı.
- Su, Xinghua vd. 2019. "Flash Sintering of Lead Zirconate Titanate Ceramics under an Alternating Current Electrical Field". *Ceramics International* 45(4): 5168-73.
- Su, Zijian vd. 2022. "A Novel Route to Denitrify, Recover Chlorines and Prepare Pre-Melted Refine Slag of  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (C12A7) From Secondary Aluminum Dross (SAD)". *Journal of Materials Research and Technology* 19: 1203-16.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. 2012. *Sektörel Atık Kılavuzları, Döküm Sektörü*.
- . 2015. *Demir Çelik Cüruf Raporu*. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği.
- . 2017. *Faaliyet 1.2.3 Çevresel Etkiler ve Alınacak Önlemler Kılavuzu – Metal Üretimi*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sanayi Genel Müdürlüğü. 2021. *Demir Çelik Sektör Raporu, Sektörel Raporlar*.
- Tokay, Mustafa, ve Korhan Erdoğan. 2011. *Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Tozsın, Gülşen, ve Taşkın Öztaş. 2023. "Çelik Cüruflarının Tarımsal Amaçlı Kullanılması". *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 54(1): 36-41.
- Tsakiridis, P. E., G. D. Papadimitriou, S. Tsivilis, ve C. Koroneos. 2008. "Utilization of Steel Slag for Portland Cement Clinker Production". *Journal of Hazardous Materials* 152(2): 805-11.

- Türen, Yunus. 1998. “Kupol ocağında kullanılan flakslardan kireçtaşı ve mermerin alternatif olarak gri dökme demirin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi”. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı.
- Türkiye Çelik Üreticileri, 2023. 2023. “Türkiye Çelik Üreticileri Derneği Basın Bülteni”. *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği*. <https://celik.org.tr/turkiye-celik-ureticileri-dernegi-basin-bulteni-64/> (25 Mayıs 2023).
- Uysal, Fatma Füsün, ve Selin Bahar. 2018. “Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları”. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 19(1): 37-52.
- Uzun, Ümit. 2014. “Demir Çelik Sanayisi Yüksek Fırın Cürufundan Gübre Eldesi”. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Ünal, Aslan. 2017. “Atık’tan Ürün’e Demir Çelik Cürufu”. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Varvara, Dana - Adriana Iluțiu - vd. 2014. “Assessment of the Metallic Iron Content from Steelmaking Slags in Order to Conserve Natural Resources”. *Procedia Technology* 12: 615-20.
- Wang, George. 1992. “Properties and utilization of steel slag in engineering applications”. *University of Wollongong Thesis Collection 1954-2016*. <https://ro.uow.edu.au/theses/1258>.
- Wang, George C. 2016a. “3 - Nonferrous Metal Extraction and Nonferrous Slags”. İçinde *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, ed. George C. Wang. Woodhead Publishing, 35-61. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081003817000033> (06 Haziran 2023).
- . 2016b. “5 - Slag Processing”. İçinde *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, ed. George C. Wang. Woodhead Publishing, 87-113. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081003817000057> (31 Mayıs 2023).
- Xue, Yongjie, Shaopeng Wu, Haobo Hou, ve Jin Zha. 2006. “Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture”. *Journal of Hazardous Materials* 138(2): 261-68.
- Yaşar, Okan. 2013. “Türk İmalat Sanayinde Lokomotif Bir Sektör: Demir Çelik Sanayi”. *Marmara Coğrafya Dergisi* (20): 42-78.
- Yıldız, Sadık. 2019. “Dökme demir cürufunun harç içinde mineral katkı olarak kullanımının araştırılması”. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Yi, Huang vd. 2012. “An Overview of Utilization of Steel Slag”. *Procedia Environmental Sciences* 16: 791-801.

- Yildirim, Irem Zeynep, ve Monica Prezzi. 2011. "Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag". *Advances in Civil Engineering* 2011: e463638.
- Yonar, Fatih. 2017. "Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının ve Karışım Performansının Araştırılması". Fen Bilimleri Enstitüsü. <http://hdl.handle.net/11527/16043> (01 Haziran 2023).
- Yu, M. vd. 2017. "Review of Flash Sintering: Materials, Mechanisms and Modelling". <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/37783> (02 Haziran 2023).
- Yu, Min vd. 2017. "Review of flash sintering: materials, mechanisms and modelling". *Advances in Applied Ceramics* 116(1): 24-60.
- Yun, Sining vd. 2018. "Use of Bio-Based Carbon Materials for Improving Biogas Yield and Digestate Stability". *Energy* 164: 898-909.
- Yüksel, İsa. 2017. "A Review Of Steel Slag Usage In Construction Industry For Sustainable Development". *Environment, Development and Sustainability* 19: 369-84.
- Zhang, Hanquan, Chaojie Hu, Wangjie Gao, ve Manman Lu. 2020. "Recovery of Iron from Copper Slag Using Coal-Based Direct Reduction: Reduction Characteristics and Kinetics". *Minerals* 10(11): 973.