



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**DÖKÜM FABRİKASI ATIKLARINDAN ÇİNKONUN GERİ KAZANIMI İÇİN
YENİLİKÇİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIM ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ EMRE ZOBAROĞLU

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. FATİH APAYDIN

BİLECİK, 2026

REFERANS NUMARASI

10788518

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**DÖKÜM FABRİKASI ATIKLARINDAN ÇİNKONUN GERİ KAZANIMI İÇİN
YENİLİKÇİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIM ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ALİ EMRE ZOBAROĞLU

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. FATİH APAYDIN

BİLECİK, 2026
REFERANS NUMARASI

10788518

BEYAN

‘‘Döküm Fabrikası Atıklarından Çinkonun Geri Kazanımı için Yenilikçi ve Sürdürülebilir Yaklaşım Örneği’’ başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Ali Emre ZOBAROĞLU

.././20..

İmza:

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmamın yazılması esnasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Doç. Dr. Fatih Apaydın Bey'e çok değerli katkı ve emekleri için sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında fabrika laboratuvar, proses ve ekipmanlarını kullanmamı sağlayan, hammadde ve ürünlerin kullanılmasına müsaade eden, 7 yıldır çalıştığım şirket DEMİSAŞ Döküm Emaye Mamulleri Sanayi A.Ş. Fabrikası'na,

Tüm eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını bildiğim değerli babam Kâmil Zobaroglu ve değerli annem Sirel Zobaroglu'na tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Tez hazırlama sürecimde moralimi yüksek tutmaya çalışan, zor anlarımda yanımda olan, yardım ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen eşim Merve Zobaroglu'na ve çok sevdiğim oğlum Ege Zobaroglu'na çok teşekkür ederim.

Ali Emre ZOBAROĞLU

2026

ÖZET

Demir-çelik endüstrisinde metal eritme süreçleri sırasında önemli miktarda baca gazı tozu oluşmakta olup, bu tozlar çeşitli metal bileşikleri içermeleri nedeniyle ağır metal kapsamlı tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmektedir. Doğrudan bertaraf edilmeleri ciddi çevresel riskler oluşturmakla birlikte, içeriklerindeki değerli metaller dolayısıyla önemli bir geri kazanım potansiyeli barındırmaktadırlar. Eritme işleminde galvanizli hurdanın kullanılması, baca gazı tozlarında çinko oksit gibi bileşiklerin bulunmasına yol açmaktadır. Mevcut geri kazanım teknolojileri çoğunlukla elektrik ark ocağı tozlarına yönelik olarak geliştirilmiş olup, indüksiyon ocağı tozlarının geri kazanımı için çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından yeni veya optimize edilmiş proseslere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında, döküm sanayisi atıklarından biri olan indüksiyon ocağı baca gazı tozundan çinkonun hidrometalurjik yöntemle geri kazanımı araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında numunelerin kimyasal bileşimi ICP-OES yöntemiyle belirlenerek çinko ile diğer elementlerin dağılımı analiz edilmiş, sonrasında numuneler XRD, DTA/TG ve SEM analizlerine tabi tutularak faz yapıları, termal davranışları ve morfolojik özellikleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Ardından çinko çözündürme verimini artırmak amacıyla sülfürik asit konsantrasyonu, sıcaklık, katı/sıvı oranı ve süre gibi parametreleri içeren deney planları Taguchi yöntemiyle tasarlanmıştır. Deney numunelerindeki çinko oranı atomik absorpsiyon spektrometresi ile belirlenmiş ve deney parametrelerinin çinko çözünme verimine etkileri Taguchi yanıt tablosu kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, önerilen hidrometalurjik yaklaşımın çinko geri kazanımında etkili olduğu ve döküm endüstrisi atıklarının sürdürülebilir bir şekilde yeniden değerlendirilmesine önemli katkılar sunduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çinko, döküm, indüksiyon ocağı, hidrometalurji, baca tozu

ABSTRACT

Significant amounts of flue dust are generated during metal melting processes in the iron and steel industry. Due to the presence of various metal compounds, these dusts are classified as hazardous waste containing heavy metals. While their direct disposal poses serious environmental risks, they also offer substantial recovery potential because of their valuable metal content. The use of galvanized scrap in melting operations leads to the formation of zinc-based compounds, such as zinc oxide, in the flue dust. Existing recovery technologies have predominantly been developed for electric arc furnace dust, and there is a need for new or optimized processes for the recovery of induction furnace dusts in terms of environmental sustainability and economic efficiency. In this thesis, the recovery of zinc from induction furnace flue dust, one of the wastes generated in the foundry industry, was investigated using a hydrometallurgical method. In the first stage of the study, the chemical composition of the samples was determined by ICP-OES to analyze the distribution of zinc and other elements. Subsequently, the samples were subjected to XRD, DTA/TG, and SEM analyses to comprehensively examine their phase composition, thermal behavior, and morphological characteristics. Experimental designs incorporating parameters such as sulfuric acid concentration, temperature, solid-to-liquid ratio, and leaching time were developed using the Taguchi method to enhance zinc dissolution efficiency. The zinc content in the experimental solutions was determined by atomic absorption spectrometry, and the effects of the experimental parameters on zinc dissolution efficiency were evaluated using the Taguchi response table. The results demonstrated that the proposed hydrometallurgical approach is effective for zinc recovery and provides significant contributions to the sustainable reutilization of foundry industry wastes.

Keywords: Zinc, casting, induction furnace, hydrometallurgy, flue dust

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Arka Plan ve Motivasyon.....	1
1.2. Problem Tanımı.....	2
1.3. Araştırma Amaçları.....	3
1.4. Çalışmanın Kapsamı.....	3
1.5. Yöntem Özeti.....	4
1.6. Tezin Yapısı.....	5
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Endüstriyel Süreçlerde Çinkonun Önemi.....	6
2.2. Döküm Fabrikalarında Çinko Atıklarının Oluşumu.....	7
2.3. Mevcut Çinko Geri Kazanım Yöntemleri.....	7
2.4. Metal Geri Kazanımında Sürdürülebilirlik Yaklaşımları.....	8
2.5. Atık Geri Dönüşümünde Yenilikçi Yöntemler.....	9
3. METARYAL VE METOT.....	11
3.1. Döküm Fabrikası Atıklarının Karakterizasyonu.....	11
3.1.1. ICP-OES Elementel analizi.....	11
3.1.2. XRD: Faz analizi.....	11

3.1.3. SEM-EDS: Morfoloji ve mikroyapı.....	12
3.1.4. TGA/DTA: Termal davranış.....	12
3.2. Liç Çalışmaları.....	12
3.2.1. Taguchi yöntemi ile liç deneyi tasarımı	12
3.2.2. Ortogonal dizinler	15
3.3. Katı-Sıvı Ayırımı.....	16
3.4. Kinetik Modelleme ve Aktivasyon Enerjisi Analizi.....	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	19
4.1. İndüksiyon Ocağı Baca Tozu Atıklarının Karakterizasyonu	19
4.2. Çinko Geri Kazanım Verimliliği	22
4.3. Malzeme ve Süreç Optimizasyonu	25
4.4. Kinetik Çalışmalar	27
4.5. Çevresel Etki Değerlendirmesi.....	29
4.6. Ekonomik Fizibilite	31
4.7. Mevcut Yöntemlerle Karşılaştırma	32
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	34
5.1. Bulguların Özeti.....	34
5.2. Endüstri ve Araştırmaya Katkılar	35
5.3. Çalışmanın Sınırlamaları.....	35
5.4. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler.....	37
KAYNAKÇA.....	38

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Taguchi ortogonal dizin tablosu.....	15
Tablo 3.2. Kontrol ve faktör seviyeleri (yükleme aşaması).....	16
Tablo 3.3. L16 ortogonal dizisinin tasarım düzeni (sıyırma aşaması).....	16
Tablo 3.4. Deney etiketleme planı	17
Tablo 4.1. İndüksiyon ocağı baca tozunun kimyasal analizi	19
Tablo 4.2. Taguchi yanıt tablosu.....	27
Tablo 4.3. Regresyon analizi tablosu	28

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Tez çalışması akış diyagramı	11
Şekil 4.1. Cüruf numunesinin XRD analizi	20
Şekil 4.2. İndüksiyon ocağı baca tozu numunesinin SEM görüntüsü.....	21
Şekil 3.3. İndüksiyon ocağı baca tozunun DTA-TG analizi	22
Şekil 4.4. Asit derişiminin Zn'nin liçine etkisi (katı/sıvı oranı 1/10 ve 60°C sıcaklık).....	23
Şekil 4.5. Katı/sıvı oranının Zn'nin liçine etkisi (2 M derişim ve 45°C sıcaklık)	24
Şekil 4.6. Sıcaklığın Zn'nin liçine etkisi (2 M derişim ve katı/sıvı oranı 1/10).....	25
Şekil 4.7. Proses parametrelerine ait ana etkiler grafiğı	27
Şekil 4.8. Kinetik model uygulamaları	28
Şekil 4.9. C modeli için Arrhenius analizi ($\ln k - 1/T$ grafiğı)	29

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

θ: Teta

λ: Lambda

Å: Angstrom

°C: Santigrat derece

AAS: Atomik absorpsiyon spektrometresi

Al: Alüminyum

Au: Altın

Ca: Kalsiyum

Cd: Kadmiyum

Co: Kobalt

Cr: Krom

Cu: Bakır

Dk: Dakika

DTA: Diferansiyel termal analiz

EAF: Elektrik ark ocağı

EAFD: Elektrik ark ocağı tozu

EDS: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi

Fe: Demir

Fe₂O₃: Hematit

Fe₃O₄: Manyetit

HCl: Hidroklorik asit

HNO₃: Nitrik asit

H₂SO₄: Sülfürik asit

ICP-OES: İndüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi

ICSD: İnorganik Kristal Yapı Veritabanı

Kv: Kilovolt

M: Molar

mA: Miliamper

Mg: Magnezyum

mm: Milimetre

Mn: Manganez

Pb: Kurşun

Pd: Paladyum

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

Si: Silisyum

SiO₂: Kuvars

Sn: Kalay

TG: Termogravimetri

Ti: Titanyum

XRD: X-ışını difraktometresi

Zn: Çinko

ZnFe₂O₄: Çinko demir oksit

1. GİRİŞ

1.1. Arka Plan ve Motivasyon

Günümüzde demir dışı metallerin geri dönüşümü, doğal kaynakların ve çevrenin korunması için büyük önem taşımaktadır. Çinko, demir, alüminyum ve bakırdan sonra en önemli teknik metaller arasında dördüncü sıradadır (Palimaka vd., 2018).

Çinko, metalurji, kimya ve tekstil endüstrilerinde çeşitli uygulamalar için gerekli olan önemli bir baz metaldir. Esas olarak birincil sülfür konsantrelerinden geri kazanılır. Çinkonun bir kısmı ayrıca çinko külü, çinko cürufu, elektrik ark ocağı ve pirinç eritme baca tozları, otomobil parçalama hurdası, suni ipek endüstrisi çamuru vb. gibi farklı ikincil kaynaklardan da geri kazanılır ve bunlar kaynaklarına bağlı olarak farklı seviyelerde safsızlık içerir. Malzeme, metalik değerleri geri kazanmak için kullanılabilir veya bertaraf edilebilir. Ancak, giderek daha sıkı hale gelen çevre koruma düzenlemeleri nedeniyle bu tür malzemelerin bertarafı artık pahalı hale gelmektedir (Jha vd., 2001).

Elektrik ark ocağı (EAF) yöntemiyle çelik üretimi, çelik üretiminde artış göstermektedir. Bununla birlikte, çelik üretim süreci sırasında atmosfere salınan başlıca kirlilik, diğer kirleticilerin yanı sıra EAF tozlarını da içermektedir. Fiziksel ve kimyasal (ağır metal içeriği) özellikleri nedeniyle, bu EAF tozları, çoğu sanayileşmiş ülkede tehlikeli atık olarak kabul edilmekte ve özel depolama alanlarında depolanması gerekmektedir. Öte yandan, bu tozlar, içerdikleri çinko nedeniyle, bu metalin veya diğer ürünlerin üretiminde ikincil hammadde olarak kullanılabilir. Bu hususlar, bu tozların arıtılmasına ve böylece çevresel etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır (Ruiz vd., 2007).

Dünya genelinde oluşan elektrik ark ocağı (EAF) tozunun yarısından çoğu çöp sahalarına gönderilmektedir. Bu toz dünyadaki çinko üretiminin %7'sine karşılık gelmektedir. Elektrik ark ocağı tozunun kalan yarısı çinkonun geri kazanımı için pirometalurjik veya hidrometalurjik olarak işlenmektedir. Tozun işleme maliyeti yüksek oranda yapıdaki çinko oranına bağlıdır (Lanzerstorfer, 2018).

Pirometalurjik prosesler, yüksek enerji tüketimi ve değersiz kalıntı oluşumu sorunlarıyla karşı karşıyadır. Bu tesislerin çoğu döner fırınlara, plazma ve alev reaktörü proseslerine dayanmaktadır. Düşük ticari değere sahip ham çinko oksit üretmek için bazı indirgeyici maddeler ve nispeten yüksek sıcaklıklar gerektirirler. Öte yandan, hidrometalurjik prosesler

hala gelecek için umut vaat etmektedir ve demir çözünmesi kontrol altına alınırsa, çinko geri dönüşümü için ilginç bir alternatif sunabilirler (Oustadakis vd., 2010).

Yetersiz çinko verimi ve nihai ürünlerdeki çok sayıda safsızlık gibi diğer sorunlar, alternatif bir proses arayışının hala önemli olmasının nedenleridir. Son yıllarda birkaç farklı teknoloji geliştirilmiştir. Plazma prosesi, Contop, AllMet prosesi ve Ausmelt teknolojisi gibi pirometalurjik yöntemler genellikle pilot tesis aşamasına ulaşamadığı için, hidrometalurjik yöntemlere olan ilgi artmıştır. EAF tozunun doğrudan birincil hidrometalurjik çinko üretiminde işlenmesi, düşük enerji tüketimi avantajına sahiptir ve bu da çeşitli araştırmalara ve proses geliştirmelerine yol açmıştır. Sülfürik asit, hidroklorik asit ve kostik çözeltilerden asetik aside kadar farklı çözücüler incelenmiştir (Antrekowitsch J, 2021).

1.2. Problem Tanımı

Demir-çelik endüstrisinde kullanılan indüksiyon ocakları, metal hurdanın eritilmesi sırasında önemli miktarda baca gazı tozu oluşumuna neden olmaktadır. Bu baca gazı tozu, üretim prosesi ve kullanılan hurda bileşimine bağlı olarak demir oksit, çinko oksit, kurşun oksit, silika ve çeşitli metal bileşiklerini içermektedir. Özellikle galvanizli çelik hurdalarının kullanımı, baca gazı tozundaki çinko içeriğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Bu tozlar, yüksek miktarda ağır metal içermeleri nedeniyle tehlikeli atık sınıfına girmekte ve doğrudan bertaraf edilmeleri çevresel riskler doğurmaktadır. Aynı zamanda, içerdiği çinko gibi değerli metaller ekonomik açıdan önemli bir geri kazanım potansiyeli sunmaktadır. Ancak, indüksiyon ocağı baca gazı tozlarının heterojen yapısı, ince partikül boyutu ve kompleks kimyasal bileşimi, çinkonun verimli ve ekonomik bir şekilde geri kazanımını güçleştirmektedir.

Mevcut geri kazanım yöntemleri çoğunlukla elektrik ark ocağı tozları için geliştirilmiş olup, indüksiyon ocağı tozlarının geri kazanımını açısından hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik kazanım amacıyla yeni veya optimize edilmiş proseslerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, indüksiyon ocağı baca gazı tozlarından çinkonun etkin biçimde geri kazanılmasını sağlayacak uygun proses parametrelerinin belirlenmesi ve uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesi, bu çalışmanın çözüm aradığı temel problemi oluşturmaktadır.

1.3. Araştırma Amaçları

Bu araştırmanın temel amacı, demir-çelik üretiminde kullanılan indüksiyon ocaklarından elde edilen baca gazı tozları içerisindeki çinkonun hidrometalurjik yöntem kullanılarak geri kazanılmasını sağlamaktır.

Araştırmanın özel amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- i. **Baca gazı tozunun karakterizasyonu:** Tozun kimyasal bileşiminin belirlenmesi
- ii. **Geri kazanım parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyonu:** Proses parametrelerinin (sıcaklık, konsantrasyon, süre, katı/sıvı oranı vb.) çinko çözünürlüğü ve geri kazanım verimi üzerindeki etkilerinin araştırılması ve en yüksek çinko geri kazanım verimini sağlayan optimum koşulların belirlenmesi.
- iii. **Çevresel ve ekonomik değerlendirme:** Geri kazanım sonucunda oluşan artıkların çevresel etkilerinin incelenmesi ve bertaraf uygunluklarının değerlendirilmesi.

Bu amaçlar doğrultusunda yürütülecek çalışma, hem çevresel açıdan sürdürülebilir bir atık yönetimi yaklaşımı geliştirmeyi hem de endüstriyel yan ürünlerden ekonomik değer yaratmayı hedeflemektedir. Böylece, indüksiyon ocağı tozlarının atık statüsünden çıkarılarak, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

1.4. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma, demir-çelik endüstrisinde indüksiyon ocaklarında gerçekteşirilen eritme işlemleri sonucunda oluşan baca gazı tozlarının değerlendirilmesine ve bu tozlardan çinkonun geri kazanılmasına yönelik deneysel ve analitik incelemeleri kapsamaktadır.

Çalışma kapsamında öncelikle, endüstriyel ölçekte temin edilen indüksiyon ocağı baca gazı tozlarının kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikleri incelenecektir. Bu amaçla ICP-OES spektro analizi, X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) gibi karakterizasyon yöntemlerinden yararlanılacaktır.

Elde edilen karakterizasyon verilerine dayanarak, baca gazı tozunda bulunan çinkonun bileşik formu değerlendirilecek; buna bağlı olarak hidrometalurjik liç yöntemi kapsamında deneysel çalışmalar yürütülerek farklı proses parametrelerinin (sıcaklık, süre, konsantrasyon, katı/sıvı oranı) çinko çözünürlüğü ve geri kazanım verimi üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Bu

deneysel çalışmalar sonucunda, en yüksek çinko geri kazanımını sağlayan optimum işlem koşulları belirlenecektir.

Ayrıca, geri kazanım işlemi sonrasında elde edilen katı ve sıvı ürünlerin çevresel uygunluğu ve yeniden kullanım olanakları değerlendirilecektir. Bu kapsamda, prosesin endüstriyel uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği açısından genel bir analiz yapılacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma hem endüstriyel bir yan ürün olan indüksiyon ocağı baca gazı tozunun çevreye zarar vermeden değerlendirilmesine yönelik bir yöntem geliştirmeyi hem de atık yönetimi ve döngüsel ekonomi perspektifinde çinko geri kazanımına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.5. Yöntem Özeti

Bu çalışmada, indüksiyon ocağı baca gazı tozu içerisindeki çinkonun geri kazanılmasına yönelik olarak deneysel ve analitik yöntemler birlikte uygulanmıştır. Çalışma, dört temel aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada, Demisaş Döküm Emaye Mamulleri Sanayi A.Ş. tesisinden temin edilen indüksiyon ocağı baca gazı tozu numunesi homojen hale getirilerek deneysel çalışmalara uygun şekilde hazırlanmıştır.

İkinci aşamada, numunenin kimyasal ve mineralojik özelliklerini belirlemek amacıyla ICP-OES analizi, X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve termogravimetrik analiz (TGA) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu analizlerle, toz içerisindeki çinko, demir, kurşun ve diğer metal bileşiklerinin türü, dağılımı ve oranları tespit edilmiştir.

Üçüncü aşamada, çinkonun geri kazanımına yönelik deneysel çalışmaların tasarımı için deney sayısını azaltmak amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, toz numuneleri üzerinde hidrometalurjik liç yöntemi uygulanmış ve asit konsantrasyonu, sıcaklık, katı/sıvı oranı, pH ve süre gibi proses parametrelerinin çinko çözünürlüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylelerden elde edilen çözeltilerdeki çinko derişimi, atomik absorpsiyon spektrometresi (AAS) cihazı ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak optimum liç koşulları belirlenmiş ve geri kazanım verimleri hesaplanmıştır.

Son aşamada, tüm deneysel sonuçlar değerlendirilmiş, farklı parametrelerin etkileri karşılaştırılmış ve prosesin hem çevresel hem de ekonomik açıdan uygulanabilirliği analiz edilmiştir.

1.6. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması, indüksiyon ocağı baca gazı tozu içerisindeki çinkonun geri kazanımına yönelik olarak yürütülen araştırmanın kapsamını, yöntemini, deneysel bulgularını ve sonuçlarını sistematik bir şekilde ortaya koymak amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma, beş ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, araştırma konusu ve amaçlar tanıtılmış; demir-çelik endüstrisinde indüksiyon ocaklarının önemi, baca gazı tozu oluşum mekanizması ve bu tozların çevresel etkileri açıklanmıştır. Ayrıca, çalışmanın problemi, amacı, kapsamı ve önemi ortaya konulmuş; literatürdeki çalışmalar kısaca özetlenmiştir.

İkinci bölümde, konuya ilişkin kapsamlı bir literatür araştırması sunulmuştur. Bu bölümde baca gazı tozlarının bileşimi, çinko ve diğer metal oksitlerin yapısı, pirometalurjik ve hidrometalurjik geri kazanım yöntemleri ile bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları detaylı biçimde ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, çalışmada izlenen yöntem açıklanmıştır. Numune temini, hazırlığı, karakterizasyon teknikleri (ICP-OES, XRD, SEM-EDS, TGA vb.) ve deneysel çalışmaların aşamaları ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Ayrıca, deneylerde kullanılan reaktifler, deneysel parametreler ve analiz yöntemleri tanımlanmıştır.

Dördüncü bölümde, yapılan deneysel çalışmaların bulguları ve değerlendirmeleri yer almaktadır. Çeşitli işlem parametrelerinin çinko çözünürlüğü ve geri kazanım verimi üzerindeki etkileri analiz edilmiş; elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar eşliğinde yorumlanmıştır.

Beşinci ve son bölümde, araştırmadan elde edilen bulgular özetlenmiş, sonuçlar tartışılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Ayrıca, geliştirilen yöntemin çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu yapı sayesinde tez hem bilimsel temelleri hem de deneysel sonuçlarıyla birlikte, indüksiyon ocağı baca gazı tozlarının çevreye duyarlı biçimde değerlendirilmesini ve çinko geri kazanımı konusundaki bilgi birikimine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Endüstriyel Süreçlerde Çinkonun Önemi

Çinko metali, çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bakır, alüminyum ve magnezyum metalleri ile alaşım yapabilir. Kaplama yapıldığı çelik yüzeylerin korozyon direncini artırır. Düşük erime noktasına sahip olması nedeniyle çinko ve alaşımlarının kalıp için dökümü uygundur. Şekillendirme ve haddeleme yapılabilecek kadar yumuşaktır. Bu özellikleri sebebiyle çinko, çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasına neden olmasına rağmen, çinkonun birincil nihai kullanımı inşaat ve altyapı olmuştur. II. Dünya Savaşı sonrasında çinkonun kullanımı, pirinç ve döküm parçalar şeklinde artmıştır (Turunç, 2021).

Çinko, dünyada yıllık tüketim miktarı bakımından demir dışı metalleri içinde, alüminyum ve bakırın ardından en önemli üçüncü metaldir. Çelik gibi metallerin korozyondan korunması amacıyla galvanizlemesinde, otomotiv endüstrisine yönelik olarak döküm kalıbı yapımında, pil üretiminde, pirinç, lehim gibi alaşımların yapımında, boya sanayisinde beyaz renk verici rolünde, kauçuk sanayisinde aktivatör olarak kullanımında, pek çok organik maddenin sentezinde ve ilaç sanayisi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Güler, 2008).

Güçlü korozyon önleyici özelliklere sahip oluşundan dolayı çinko metaline olan talep, birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılan galvanizli çelik üretiminden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, şu anda üretilen çinkonun yaklaşık %50'si sıcak daldırma galvanizleme yöntemiyle korozyon önleyici kaplamalar üretmek için kullanılmaktadır. Çinko üretiminin yaklaşık 1/3'ü alaşım üretimi için kullanılmaktadır. Bu uygulama hem çinko hem de alüminyum döküm alaşımlarını (yaklaşık %17) ve özellikle pirinç ve bronzlarda alaşım katkı maddesi olarak kullanılan çinkoyu (yaklaşık %17) kapsamaktadır. Çinkonun üçüncü önemli uygulama alanı, çinko oksit üretim hacmi açısından en önemlisi (%6) olmak üzere kimyasal bileşiklerin üretimidir. Benzer bir pay (%6) ise çinko yarı mamullerinin üretimidir; bunlar arasında elektrokimyasal korozyon korumasında kullanılan çinko anotlar ve Ti ilavesiyle haddelenmiş çinko levhalar en önemli üretim kalemleridir (Kania ve Saturnus, 2023).

2.2. Döküm Fabrikalarında Çinko Atıklarının Oluşumu

Çelik üretim tesislerinde hammadde, elektrik ark ocağı (EAF) kullanılarak ergitme işlemine tabi tutulur. Elektrik ark ocağının çalışması sırasında erimiş demirin demir dışı metallere buharlaşması, CO kabarcıklarının patlaması ve fırındaki metal banyosundan, cüruftan ve diğer malzemelerden parçacıkların atılması ve sürüklenmesi sonucunda elektrik ark ocağı tozu (EAFD) oluşur. EAF tozu ergitme işlemi sırasında meydana gelen gazlarla birlikte fırından taşınır. Boru hattının sonunda EAFD baghouse adıyla bilinen filtre sisteminde toplanır. Bu tozun ana bileşeni katı demir oksittir ve yüksek oranda çinko da bulunabilir (De Buzin vd., 2017).

Galvanizli hurda EAF'de kullanıldığında, çelik hurdasındaki çinkonun çoğu, erimiş çelik ve cüruftaki çok düşük çözünürlüğü ve özellikle de çelik üretim sıcaklığında çinko buhar basıncının demir buhar basıncından daha yüksek olması nedeniyle toz ve dumana karışır. Buhar çinko, çelik üretim reaksiyonları sırasında oluşan diğer gaz veya partikül bileşiklerle birlikte fırından taşınır ve ZnO ve ZnFe₂O₄ gibi bileşikler üretir. EAFD'nin en büyük metalik kısmı, kullanılan galvanizli hurda oranına bağlı olarak %7 ile %40 arasında değişen çinkodur (Oustadakis vd., 2010).

2.3. Mevcut Çinko Geri Kazanım Yöntemleri

Günümüzde çinko ve demir içeren elektrik ark fırınlarından elde edilen tozun geri dönüşümü için en popüler teknoloji, elektrik ark fırınından gelen tozun bir kok yüküyle döner bir fırına yerleştirildiği Waelz İşlemidir. Bu yöntem, elektrik ark fırınından üretilen global miktardaki çelik tozunun %75'ini geri dönüştürür. Redükleyici bölümün sıcaklığı 1200 °C'nin üzerindedir. Kok ve CO (karbonun kısmi oksidasyonundan), çinko oksiti ve çinko ferriti çinko metaline indirger. Çinko gaz fazına geçer ve gaz akışında ZnO'ya oksitlenir ve bu da torba filtrelerde toplanır. Waelz işleminden elde edilen cüruf, esas olarak inşaat ve yol yapımında kullanılır (Małecki vd., 2021).

Strobos ve Friend (2004) yaptıkları çalışmada ferrokrom tesisi elektrik ark ocağı baca tozundan çinkonun geri kazanımını incelemişler ve uygun koşulları belirlemek için deneyler yapmışlardır. İki aşamalı liç deneyi gerçekleştirmişler ve en uygun sülfürik asit konsantrasyonu ve optimum asit/toz oranını belirlemişlerdir. %71,2 oranında çinko geri kazanım yüzdesi elde etmişlerdir.

Zeybadadi ve arkadaşları (1997) yüksek fırın baca tozundan çinko metalinin geri kazanımını incelemişler ve ayrıştırıcı olarak sülfürik asit kullanarak yaklaşık %80 oranında çinko geri kazanımı elde etmişlerdir.

Stubbe ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada indüksiyon ocağı içerisine çinko içerikli filtre tozunu enjekte ederek çinko oksit kazanımını incelemişlerdir. Yaptıkları denemelerde ortalama %61 çinko içeriğine sahip çinko oksit ürünü ile sonuçlanmıştır.

Dutra ve arkadaşları (2006) elektrik ark ocağı tozunda bulunan çinkonun geri kazanımı için farklı alkali liç yöntemlerini (çalkalama liçi, basınç liçi, mikrodalga ön işlemi sonrası genenekselle liç ve ultrasonik prob ile çalkalama liçi) denemişlerdir. %12 çinko içeren elektrik ark ocağı tozundan %74 oranında çinko geri kazanımı elde etmişlerdir.

Oustadakis ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada elektrik ark ocağı tozunun karakterizasyonunu ve çinko elde etmek üzere sülfürik asit ile liçini ele almışlardır. Asit normalliği, sıcaklık ve katı-sıvı oranı gibi liç işlemi faktörlerinin ana etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda %80 verimlilik oranında çinko geri kazanımına ulaşmışlardır.

2.4. Metal Geri Kazanımında Sürdürülebilirlik Yaklaşımları

Metal değerlerini geri kazanmak için çok sayıda toz işleme yöntemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Ancak, çeşitli nedenlerle geri dönüşüm süreçleri sınırlı bir başarıya ulaşmıştır. İlk olarak, uygulanabilir bir sürecin tozun değişken bileşimini karşılayabilmesi gerekir. İkinci olarak, çevresel açıdan bakıldığında, bakır ve nikel de dahil olmak üzere çok sayıda elementin hesaba katılması gerekir. Üçüncüsü, klor gibi halojenürler geri dönüşüm süreci üzerinde zararlı etkilere sahip olabilir ve uzaklaştırılmalıdır. Son olarak, herhangi bir geri dönüşüm sürecinin ekonomisi, nispeten kısıtlı yerel toz arzı, kısıtlı ürün pazarları ve ayrıca metal fiyatlarındaki değişikliklerle sınırlıdır (Pickles ve Marzoughi, 2019).

Jha ve arkadaşları (2001) yaptıkları çalışmada çevre dostu ve güvenli bir şekilde atılmaya uygun kalıntılar üreten hidrometalurjik işlemler üzerine deneyler yapmışlardır. Deneylerinde sülfürik asit, hidroklorik asit, amonyak çözeltisi, sodyum hidroksit ve hidrojen peroksit ayrıştırıcılarını kullanmışlardır. Sülfürik asit ve amonyak çözeltilerinin elektrik ark ocağı baca tozunun işlenmesi için etkili ayrıştırıcılar olduğunu belirtmişlerdir.

Li ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmada çinko, kurşun, demir ve cürufu elektrik ark ocağı baca tozundan etkili bir şekilde ayırmak için, indirgemeyi artırmak ve eritme sıcaklığını düşürmek için sodyum karbonat kullanımı ile yeni ve sürdürülebilir bir işlem önermişlerdir. Bu

yeni işlemin uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini belirlemek için termodinamik analiz ve laboratuvar deneyleri yapmışlar ve optimum koşulları belirlemişlerdir.

2.5. Atık Geri Dönüşümünde Yenilikçi Yöntemler

Geleneksel yöntemler (örneğin Waelz prosesi, sinterleme, metalurjik geri kazanım vb.) hâlâ yaygın olsa da literatürde bu yöntemlerin eksiklerini tamamlayacak yenilikçi teknikler üzerinde artan çalışmalar vardır.

Guo ve arkadaşları (2023) baca gazı tozu (örneğin yüksek fırın tozu) kullanılarak Fe–C bileşenli elektrot üretimi üzerinde çalışma yapmışlardır. Toz içerisindeki metal ve karbon aktif bileşenler elektrot işlevi gördüğü için bu elektrot, elektrokoagülasyon sisteminde atıksu arıtımında kullanılabilir. Bu sayede hem atık tozunun değerlendirilmesi hem de katı atığın azaltımı sağlanabilecektir. Ancak bu yöntemde elektrot stabilitesi, elektrot yüzeyi pasifleme, uzun süreli performans testleri gibi kısıtlamalar vardır.

Hamann ve arkadaşları (2021) termokimyasal işlem kullanarak yüksek fırın çamurundan klorlama-buharlaştırma reaksiyonları ile Zn, Pb ve Cd'nin seçici olarak uzaklaştırılmasını araştırmışlardır. Bu yöntemde toz / çamur içindeki uçucu elementler (Zn, Pb, Cd) klor bileşikleriyle tepkimeye sokularak buharlaştırılır, sonra kondenzasyon ile ayrıştırılmaktadır. Geriye metalik demir, karbon ve diğer ana bileşenler kalmaktadır. Uçucu ve toksik elementlerin ayrıştırılması, metalik bileşenlerin tutulması bu yöntemin avantajlarını oluştururken, klor gazı kullanımı, korozyon, işlem maliyeti ve enerji gereksinimi zorluklarını oluşturmaktadır.

Malecki ve arkadaşları (2021) yüksek fırın tozu ile indirgen (örneğin kömür) karışımının ark–rezistans fırında işlenmesi üzerine yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde katı atık üretilmediğini ve çinko geri kazanımının %99, demir geri kazanımının ise %98'in üzerinde olduğunu belirtmişlerdir.

Lanzerstorfer (2018) yaptığı çalışmada çinko konsantrasyonunun tane boyutu ile ilişkisini incelemek için elektrik ark fırını tozuyla hava sınıflandırma denemeleri gerçekleştirmiştir. Elektrik ark fırın tozundaki çinkonun geri kazanım maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla toz, kısmi olarak fırına geri beslenmekte ve bu uygulama ile fırından boşaltılan tozun çinko konsantrasyonu artırılmakta, aynı zamanda boşaltılması gerekli toz miktarını azaltılmaktadır. Çinko zenginleştirme işlemi için yeni bir yaklaşım ile toz atık gazdan ayrıştırılmış ve hava sınıflandırması sonrasında fırın tozu, çinko oranı düşük kaba taneli ve çinko oranı yüksek ince taneli olmak üzere iki ayrı grup elde edilmiştir. Çinko oranı düşük kaba

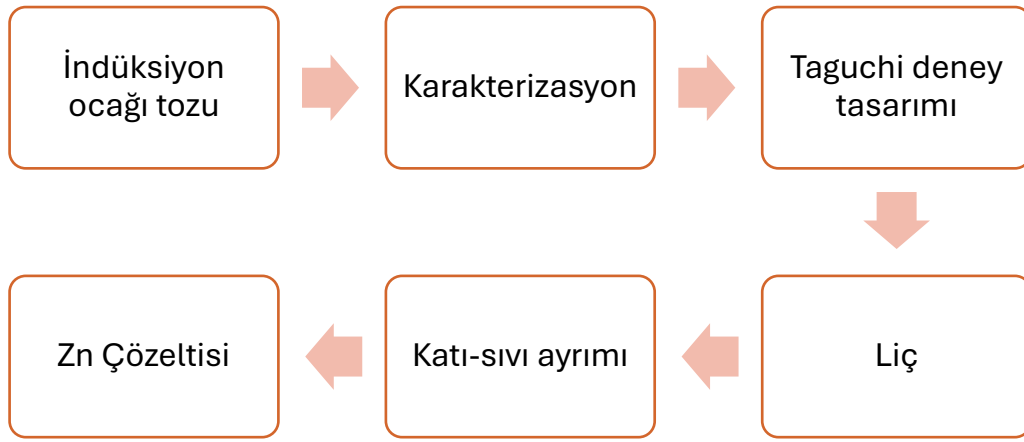
taneli toz fırın içerisinde geri dönüştürülmek üzere enjekte edilmiştir. Deşarj edilen tozdaki çinko kütlesinin sınıflandırma yapılmamış toza oranla daha fazla olduğunu ve çinko buharlaşması için enerji talebinin daha az olacağı belirtilmiştir.

Omran ve arkadaşları (2019) mikrodalga ısıtma fırını kullanarak elektrik ark ocağı tozundan çinkonun geri kazanımını araştırmışlardır. Farklı sıcaklıklarda denemeler yapmışlar ve geri kazanımın artan sıcaklıklar arttığını belirtmişlerdir. 950 °C'de mikrodalga ısıtma sonrasında %94 oranında çinko kazanımı sağlamışlardır.

3. METARYAL VE METOT

Bu çalışma, çelik üretiminin tehlikeli bir yan ürünü olan indüksiyon ocağı baca gazı tozundan çinko geri kazanımı için hidrometalurjik bir süreci sunmaktadır. Tezin deney planı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

İndüksiyon ocağı baca gazı tozu, çelik üretimi sırasında oluşan ince partiküllü bir yan üründür. Çinko, demir ve kurşun gibi önemli miktarda değerli metal içerir. Çevresel ve ekonomik önemi göz önünde bulundurulduğunda, hidrometalurjik yöntemler seçici metal geri kazanımı için umut verici bir yol sunar.



Şekil 3.1. Tez çalışması akış diyagramı

3.1. Döküm Fabrikası Atıklarının Karakterizasyonu

İndüksiyon ocağı toz numuneleri Demisaş A.Ş döküm üretim tesisinden temin edilmiştir. Toz numunelere aşağıda belirtilen karakterizasyon testleri uygulanmıştır.

3.1.1. ICP-OES Elementel analizi

DEMİSAŞ firmasından temin edilen indüksiyon ocağı baca tozunun faz bileşimleri Agilent marka 5800 VDV model spektrometre cihazı ile analiz edilmiştir.

3.1.2. XRD: Faz analizi

DEMİSAŞ firmasından temin edilen indüksiyon ocağı baca tozunun faz bileşimleri, Cu K α radyasyonu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) kullanan bir Panalytical/Empyrean model XRD cihazı ile belirlenmiştir. Ölçümler 10° – 80° 2θ aralığında, 0.02° adım genişliği ve 2° /dak tarama hızıyla, ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Cihaz çalışma şartları 30 kV ve 15 mA olarak

ayarlanmıştır. Ölçüm öncesi, numuneler homojenlik sağlamak amacıyla agat havanda ince toz haline getirilmiştir. Faz tanımlamaları, ICDD PDF-2 veritabanı ve HighScore Plus yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

3.1.3. SEM-EDS: Morfoloji ve mikroyapı

İndüksiyon ocağı baca gazı tozu yüzey morfolojisi, ZEISS / Supra 40 VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Görüntüleme öncesinde, toz halindeki numuneler karbon bant ile alüminyum pleytlere yerleştirilmiş ve elektriksel iletkenliği artırmak amacıyla ince bir altın-paladyum (Au-Pd) tabakası ile kaplanmıştır. SEM analizleri, yüksek vakum koşullarında, 15 kV hızlandırma voltajında gerçekleştirilmiş olup, büyütme oranı incelenen bölgeye bağlı olarak 500× ile 5000× arasında değiştirilmiştir.

3.1.4. TGA/DTA: Termal davranış

Bartın Üniversitesi Merkezi araştırma laboratuvarında bulunan Hitachi marka STA7300 TGA-DTA cihazında 1300 °C sıcaklığa kadar 1 °C/dk ısıtma hızında hava atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

3.2. Liç Çalışmaları

Deneyler farklı koşullar altında liç reaktifi olarak sülfürik asit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deneylerde kullanılan liç parametreleri belirtilmiştir.

- Asit Konsantrasyonu: 0.25 M, 0.5 M, 1 M, 2 M
- Katı/Sıvı Oranı: 1/10, 1/20, 1/30, 1/40 g/ml
- Sıcaklık: 25 °C, 30°C, 45°C, 60°C
- Süre: 5, 15, 30, 60 dakika
- Karıştırma hızı: 500 rpm

1/10 g/ml katı/sıvı oranına sahip çözelti numunesi 5 gram katı ve 50 ml çözüldüden, 1/20 g/ml katı/sıvı oranına sahip çözelti numunesi 5 gram katı ve 100 ml çözüldüden, 1/30 g/ml katı/sıvı oranına sahip çözelti numunesi 5 gram katı ve 150 ml çözüldüden, 1/40 g/ml katı/sıvı oranına sahip çözelti numunesi 5 gram katı ve 200 ml çözüldüden oluşturulmuştur.

3.2.1. Taguchi yöntemi ile liç deneyi tasarımı

Üretim süreçlerinin optimizasyon çalışmalarında, iyi planlanan ve analiz edilen prototip üretim deneyleri, üretilecek malzemelerin kalitesini arttırmada ve maliyeti düşürmede ve ayrıca daha sağlıklı bir analiz yapabilmek için ciddi bir fayda sağladığı için istatistiksel deney

tasarımları oluşturulmaktadır. Zaman alan ve nispeten daha yüksek maliyeti olan klasik deney tasarımında; bir parametrenin etkisi analiz ederken, analiz edilen parametre haricindeki bütün parametreler sabitlenip, sadece incelenen parametre değiştirilmektedir. İstatistiksel deney tasarımında ise, birçok parametre birlikte sistemli bir şekilde değiştirilebilmektedir. Parametrelerin etkileri sağlıklı bir şekilde analiz edildiğinde, süreci kontrol etmek amacıyla gerekli müdahaleler yapılabilir (Bozcu, 2022). İstatistiksel deney tasarımı metotlarından Taguchi Metodu, minimum deney gerçekleştirerek maliyeti en alt seviyede tutmak ilkesine dayanmakta olan bir yöntemdir (Kasap, 2022). Bu metodun başka istatistiksel deney tasarımı metotlarından ayıran fark; bir deneye etki eden koşulları, kontrol altında tutulabilen ve kontrol altında tutulamayan olarak iki kümede analiz etmesi ve birçok faktörü ikiden daha çok seviyede analiz etmeye olanak vermesidir.

Çoğunlukla ürünün ya da prosesin performansının karakteristiği nominal değer veya hedef değere sahip olmak zorundadır. Bunun amacı, hedef değer etrafındaki değişkenlikleri en aza indirmektir. Deney verileri aracılığıyla belirlenecek en uygun çalışma şartları, değişik yerlerde veya değişik zamanda, bire bir aynı ya da benzer performans ölçümlerinin elde edilmesini sağlayabilmelidir. Bu amaçla kullanılacak optimizasyon şartı, Taguchi metoduna göre performans istatistiğidir. Parametrelerin optimum şartlarının belirlenmesinde aşağıda verilen performans istatistiği denklemleri kullanılır (Elfarah, 2018).

Daha büyük daha iyi;

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (D.1)$$

Daha küçük daha iyi;

$$SN_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2 \right) \quad (D.2)$$

Burada

n: deney tekrar sayısını,

y: parametrenin deneysel olarak bulunan değeridir.

Hedef en yüksek değeri elde etmek ise, SN_L değerinin en yüksek olduğu parametre seviyeleri optimumdur. Hedef en düşük değere ulaşmak ise SN_S değerinin en düşük olduğu parametre seviyeleri optimumdur. Taguchi metodunda belirlenen optimum çalışma koşullarını veren performans değeri

$$Y_{it} = \mu + X_i + e_i \quad (D.3)$$

Eşitliği yardımı ile tahmin edilir.

Burada;

Y_{it} : i. deneyin tahmin edilen performans değeri,

X_i : i. deneyde kullanılan parametre seviyelerinin toplam etkinlik boyutu,

μ : ortalama ve e_i : deneysel hatadır.

Denklem (3.3), ilave modelin uygunluğunu tespit etmek amacıyla deneysel çıktıların kullanılmasıyla elde edilen bir tahmin sonucudur. Bu sebeple tahmin edilen hata için güven sınırlarının belirlenmesi gerekir. Tahmin edilen hata, gözlemlenen Y_{it} ile tahmini edilmiş olan Y_{it} arasındaki farka tekabül eder. Tahmin edilen hatanın güven aralığı (S_e) aşağıda verilen eşitliklerin yardımıyla belirlenir (Bozcu, 2022).

$$S_e = \pm 2 \sqrt{\left(\frac{1}{n_0}\right) \sigma_e^2 + \left(\frac{1}{n_r}\right) \sigma_e^2} \quad (D.4)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{\text{Hata kareleri toplamı}}{\text{Hata için serbestlik derecesi}} \quad (D.5)$$

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left[\frac{1}{n_{A_i}} - \frac{1}{n}\right] + \left[\frac{1}{n_{B_i}} - \frac{1}{n}\right] + \left[\frac{1}{n_{C_i}} - \frac{1}{n}\right] + \dots \quad (D.6)$$

Burada;

S_e : güven aralığı

n : yapılan toplam deney sayısı

n_r : teyit deneyinin tekrar sayısı ve n_{A_i} , n_{B_i} , n_{C_i} ,A, B, C parametrelerinin i. Seviyelerinin sayısıdır.

Tahmin edilen hatanın bu sınırların dışında olması durumunda, bu modelin uygun olmadığı varsayılır (Gümüşkaşık, 2023).

Doğrulama deneyi, kontrol parametrelerinin aralarındaki etkileşimin tespiti için önemli bir araçtır. En uygun şartlarda tahmini yanıt, pratikte elde edilen yanıt ile eşleşmediğinde, etkileşimlerin önemli olduğu anlaşılmış olur. Tahmini yanıt, gözlemlenen yanıtla tutarlıysa, bu etkileşimler muhtemelen önemsizdir ve toplamsal modelin iyi bir yaklaşım olduğu anlaşılabilir (Gümüşkaşık, 2023).

3.2.2. Ortogonal dizinler

Ortogonal dizin ilk olarak 1897’de Fransız matematikçi Jacques Hadamard tarafından keşfedilmiştir. Ortogonal dizin, en az sayıda deneme ile birçok faktörü değerlendirebilir ve aynı anda faktörlerin seviyesini değiştirerek deney sayısını azaltma fırsatı sunmaktadır. Deneysel araştırmalarda birçok faktör ve düzeyin varlığı zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır. Taguchi’nin yöntemi, tüm deneysel kombinasyonları tam faktör yapısında denemez, ancak kesirli faktör yapısında ortogonal dizinler ve kombinasyonlar kullanır, bu sadece zaman ve maliyet tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda en iyi performans karakteristik değerini veren faktör seviyesini de belirlemektedir. L Latin kare tasarımını temsil eder çünkü La(bc) olarak gösterilen ortogonal dizinler Latin kare tasarımından türetilmiştir. "a" deney sayısını, "b" faktör seviyelerinin sayısını, "c" ise faktör sayısını göstermektedir. Taguchi tarafından belirlenen ortogonal dizinleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Taguchi ortogonal dizin tablosu (Atılgan, 2022)

		Seviye Sayısı											
		2		3		4		5					
Parametre Sayısı	P= 2 S=2	L4	P= 2 S=3	L9	P= 2 S=4	L16	P= 2 S=5	L25					
	P= 3 S=2		P= 3 S=3		P= 3 S=4		P= 3 S=5						
	P= 4 S=2	L8	P= 4 S=3	L18	P= 4 S=4	L32	P= 4 S=5	L50					
	P= 5 S=2		P= 5 S=3		P= 5 S=4		P= 5 S=5						
	P= 6 S=2	L11	P= 6 S=3	L27	P= 6 S=4	L36	P= 6 S=5	L45					
	P= 7 S=2		P= 7 S=3		P= 7 S=4		P= 7 S=5						
	P= 8 S=2	L16	P= 8 S=3	L32	P= 8 S=4	L45	P= 8 S=5	L54					
	P= 9 S=2		P= 9 S=3		P= 9 S=4		P= 9 S=5						
	P= 10 S=2	L27	P= 10 S=3	L36	P= 10 S=4	L45	P= 10 S=5	L54					
	P= 11 S=2		P= 11 S=3		P= 11 S=4		P= 11 S=5						
	P= 12 S=2	L32	P= 12 S=3	L45	P= 12 S=4	L54	P= 12 S=5	L63					
	P= 13 S=2		P= 13 S=3		P= 13 S=4		P= 13 S=5						
	P= 14 S=2	L45	P= 14 S=3	L54	P= 14 S=4	L63	P= 14 S=5	L72					
	P= 15 S=2		P= 15 S=3		P= 15 S=4		P= 15 S=5						
	P= 16 S=2	L54	P= 16 S=3	L63	P= 16 S=4	L72	P= 16 S=5	L81					
	P= 17 S=2		P= 17 S=3		P= 17 S=4		P= 17 S=5						
	P= 18 S=2	L63	P= 18 S=3	L72	P= 18 S=4	L81	P= 18 S=5	L90					
	P= 19 S=2		P= 19 S=3		P= 19 S=4		P= 19 S=5						
	P= 20 S=2	L72	P= 20 S=3	L81	P= 20 S=4	L90	P= 20 S=5	L99					
	P= 21 S=2		P= 21 S=3		P= 21 S=4		P= 21 S=5						
	P= 22 S=2	L81	P= 22 S=3	L90	P= 22 S=4	L99	P= 22 S=5	L108					
	P= 23 S=2		P= 23 S=3		P= 23 S=4		P= 23 S=5						
	P= 24 S=2	L90	P= 24 S=3	L99	P= 24 S=4	L108	P= 24 S=5	L117					
	P= 25 S=2		P= 25 S=3		P= 25 S=4		P= 25 S=5						
	P= 26 S=2	L99	P= 26 S=3	L108	P= 26 S=4	L117	P= 26 S=5	L126					
	P= 27 S=2		P= 27 S=3		P= 27 S=4		P= 27 S=5						
	P= 28 S=2	L108	P= 28 S=3	L117	P= 28 S=4	L126	P= 28 S=5	L135					
	P= 29 S=2		P= 29 S=3		P= 29 S=4		P= 29 S=5						
	P= 30 S=2	L117	P= 30 S=3	L126	P= 30 S=4	L135	P= 30 S=5	L144					
	P= 31 S=2		P= 31 S=3		P= 31 S=4		P= 31 S=5						

Optimal solvent ekstraksiyon parametre seviyelerini tespit etmek ve deneysel sonuçları optimize etmek için Tablo 2.1'den faydalanılarak seviye ve faktör sayısına uygun olan L16 ortogonal dizisi seçilmiştir. Deney tasarımı için kullanılan Taguchi yöntemine ait kodlanmış L16 ortogonal dizisi Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Kontrol ve faktör seviyeleri (yükleme aşaması)

Sembol	Değişken	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye3	Seviye 4
A	Çözelti derişimi	M	0,25	0,50	1.00	2.00
B	Sıvı/organik		1/10	1/20	1/30	1/40
C	Sıcaklık	°C	25	30	45	60
D	Süre	dk	5	15	30	60

Yükleme aşaması sonrasında gerçekleşecek sıyırma aşamasında kullanıla L16 ortogonal tasarım düzeni Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. L16 ortogonal dizisinin tasarım düzeni (sıyırma aşaması)

Deney no	Parametreler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

3.3. Katı-Sıvı Ayırımı

Liç deneyleri sonucu oluşan çözelti 3 numaralı filtre kâğıdı ile vakum ortamında filtre edilerek katı-sıvı ayırımı gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan etiketleme planı Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Deney etiketleme planı

Test No	H ₂ SO ₄ Derişimi (M)	Sıcaklık (°C)	Katı/Sıvı Oranı (g/ml)	Liç süresi (dk)
1	0,25	25	1/10	5
2	0,25	30	1/20	15
3	0,25	45	1/30	30
4	0,25	60	1/40	60
5	0,5	30	1/10	30
6	0,5	25	1/20	60
7	0,5	60	1/30	5
8	0,5	45	1/40	15
9	1	45	1/10	60
10	1	60	1/20	30
11	1	25	1/30	15
12	1	30	1/40	5
13	2	60	1/10	15
14	2	45	1/20	5
15	2	30	1/30	60
16	2	25	1/40	30

3.4. Kinetik Modelleme ve Aktivasyon Enerjisi Analizi

Bu çalışmada induksiyon ocağı baca gazı tozundan çinkonun sülfürik asit ortamında liçi sırasında gerçekleşen çözünme mekanizmasını belirlemek amacıyla kinetik analizler gerçekleştirilmiştir. Kinetik değerlendirmeler, farklı sıcaklıklarda (25, 40, 50 ve 60 °C) sabit deneysel koşullar altında (asit derişimi, katı/sıvı oranı ve karıştırma hızı sabit tutularak) elde edilen zamana bağlı çözünme verileri kullanılarak yapılmıştır. Çözünme derecesi X , deneysel olarak ölçülen çinko çözünme yüzdelerinden hesaplanmış ve küçülen çekirdek modeli

(Shrinking Core Model, SCM) kapsamında yaygın olarak kullanılan üç farklı kinetik model ile test edilmiştir.

Bu kapsamda aşağıdaki modeller değerlendirilmiştir:

$$\text{Film difüzyon kontrollü model: } X = kt \quad (\text{D.7})$$

$$\text{Yüzey kimyasal reaksiyon kontrollü model: } 1 - (1 - X)^{1/3} = kt \quad (\text{D.8})$$

$$\text{Ürün tabakası (katı içi difüzyon) kontrollü model: } 1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) = kt \quad (\text{D.9})$$

Her bir model için deneysel veriler lineerleştirilmiş ve kt -tilişikleri doğrusal regresyon analizi ile değerlendirilerek hız sabitleri (k) ve korelasyon katsayıları (R^2) hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda elde edilen sonuçların karşılaştırılması sonucunda, en yüksek R^2 değerlerinin ürün tabakası difüzyonu kontrollü modele ait olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çinko liçi sırasında hız sınırlayıcı adımın büyük ölçüde katı partikül yüzeyinde oluşan ürün tabakası içerisinden difüzyonla kütle transferi olduğunu göstermektedir.

Ürün tabakası difüzyonu kontrollü modele göre elde edilen hız sabitlerinin sıcaklıkla birlikte arttığı gözlemlenmiş ve bu durum reaksiyon kinetiğinin sıcaklığa duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Hız sabitlerinin sıcaklığa bağlı değişimi Arrhenius eşitliği yardımıyla değerlendirilmiştir:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{D.10})$$

Burada Afrekans faktörünü, E_a görünen aktivasyon enerjisini ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), R gaz sabitini ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ve T mutlak sıcaklığı (K) ifade etmektedir. Ürün tabakası difüzyonu kontrollü modele ait hız sabitleri kullanılarak çizilen $\ln(k) - 1/T$ Arrhenius grafiğinin doğrusal regresyonu sonucunda görünen aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

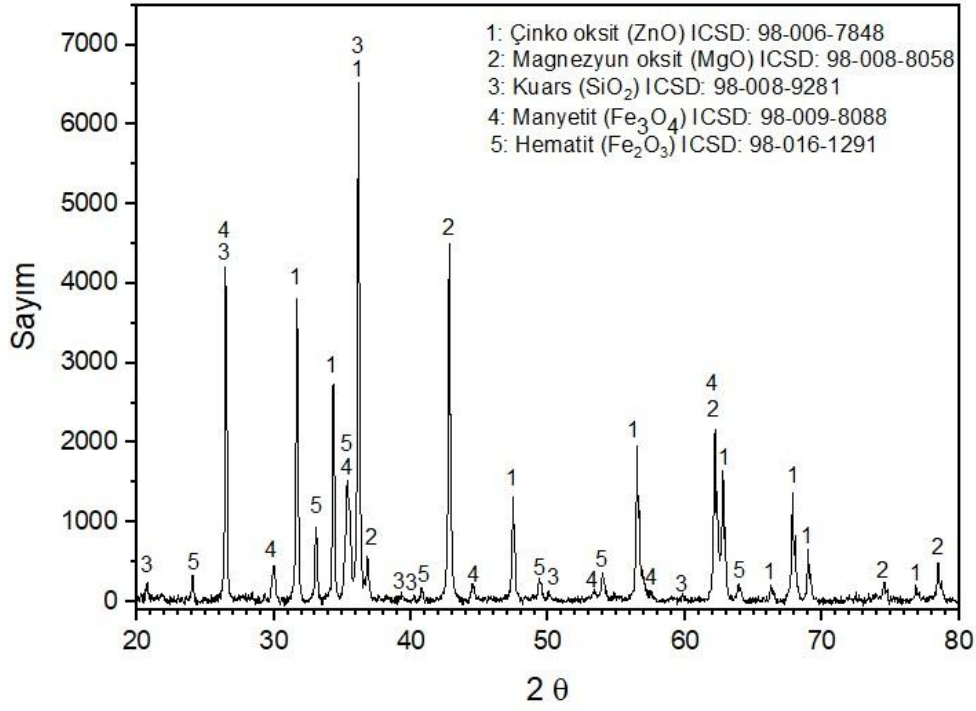
4.1. İndüksiyon Ocağı Baca Tozu Atıklarının Karakterizasyonu

Demisaş Döküm Emaye Mamulleri Sanayi A.Ş.'den temin edilen numunelerin ICP-OES spektrometre analiz cihazı ile yapılmış kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1'de belirtilmiştir.

Tablo 4.1. İndüksiyon ocağı baca tozunun kimyasal analizi

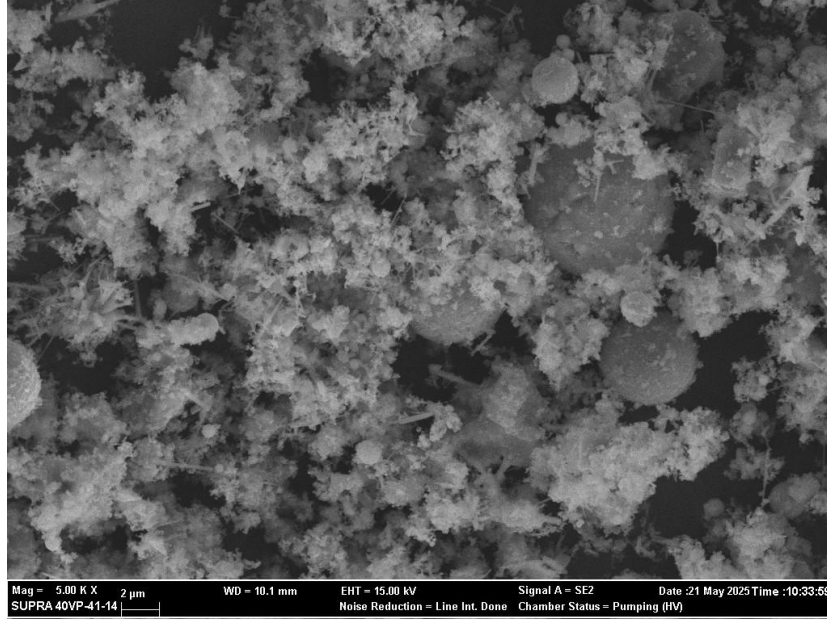
Bileşim	Zn	Fe	Mg	Si	Al	Ca	Cu	Sn	Pb	Mn	Cr
%	40,55	12,24	5,31	3,44	0,92	0,80	0,05	0,05	0,04	0,12	0,02

X-ışını kırınımı (XRD) analizi sonucunda elde edilen X-ışınları paterninde (Şekil 4.1), numunenin çok fazlı bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda tanımlanan fazlar arasında çinko oksit (ZnO, ICSD: 98-006-7848), magnezyum oksit (MgO, ICSD: 98-008-8058), kuvars (SiO₂, ICSD: 98-008-9281), manyetit (Fe₃O₄, ICSD: 98-009-8088) ve hematit (Fe₂O₃, ICSD: 98-016-1291) yer almaktadır. Her bir faza ait karakteristik pikler, ilgili ICSD veritabanı numaraları ile eşleştirilerek doğrulanmıştır. Piklerin keskinliği ve yüksekliği, numunedeki kristal yapıların belirginliğini ve kristal boyutlarının büyük olduğunu göstermektedir. Oksit fazların yoğunluğu, numunenin oksidatif koşullarda sentezlendiğine veya oksitlenmiş bir yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu fazların varlığı, malzemenin seramik, elektronik, katalitik veya manyetik uygulamalara uygun olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, piklerin konumları ve yoğunlukları sentez başarımı hakkında bilgi vermekte olup, ilerleyen çalışmalarda Scherrer denklemi kullanılarak kristal boyutu hesaplamaları yapılabilir.



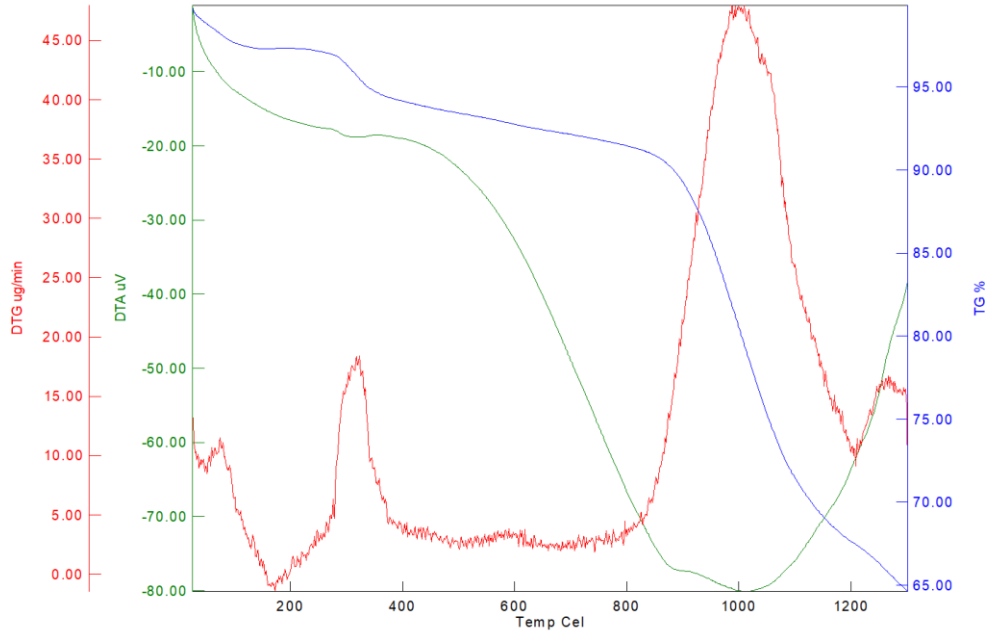
Şekil 4.1. Cüruf numunesinin XRD analizi

Şekil 4.2’de indüksiyon ocağı baca tozunun 5000x büyütmede elde edilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü sunulmaktadır. Görüntüde, yüzey morfolojisinin oldukça heterojen bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmektedir. Mikroyapı, düzensiz şekilli ince partiküller ile daha büyük, yarı küresel formda partiküller içermektedir. Bu dağılım, baca tozunun metalurjik işlem sırasında oluşan yoğun termal ve kimyasal reaksiyonlara maruz kaldığını göstermektedir. Özellikle ince partiküllerin yüksek yüzey alanı, tozun reaktivitesi ve çevresel etkileri açısından önem arz etmektedir. Görüntü, SE2 dedektörü ile 15 kV hızlandırma voltajında ve 10.1 mm çalışma mesafesinde elde edilmiştir.



Şekil 4.2. İndüksiyon ocağı baca tozu numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 4.3'te verilen DTA-TG analiz sonuçlarına göre, indüksiyon ocağı baca gazı tozunun sıcaklığa bağlı olarak birden fazla ısıl olay geçirdiği görülmektedir. TG eğrisi (mavi) yaklaşık 25–1200 °C aralığında toplamda %30 civarında bir kütle kaybı göstermekte olup, bu kaybın ilk kısmı 100–200 °C arasında meydana gelmiştir. Bu bölgedeki kütle azalması genellikle nemin ve yüzeye bağlı adsorbe suyun uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Yaklaşık 300–450 °C aralığında gözlenen ikinci belirgin endotermik olay (DTA eğrisinde yeşil eğri) organik kalıntıların veya karbonat bileşiklerinin bozunmasına, dolayısıyla CO₂ çıkışına işaret etmektedir. 900–1100 °C aralığında görülen keskin ekzotermik pik ise çinko içeren fazların (örneğin ZnO, ZnFe₂O₄ gibi spinel yapılarının) bozunması veya yeniden kristalleşmesi ile ilişkilendirilebilir. Bu sıcaklık aralığında belirgin kütle kaybı (TG eğrisinde %90'dan %75'e düşüş) çinkonun uçucu bileşikler oluşturup kısmen buhar fazına geçmesiyle açıklanabilir. 1200 °C civarında eğrinin kararlı hale gelmesi, malzemenin yüksek sıcaklıklarda termal olarak dengelendiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, baca tozu içerisindeki çinko bileşiklerinin yüksek sıcaklıklarda ayrışarak geri kazanım için uygun koşulların özellikle 900–1100 °C aralığında oluştuğunu ortaya koymaktadır.

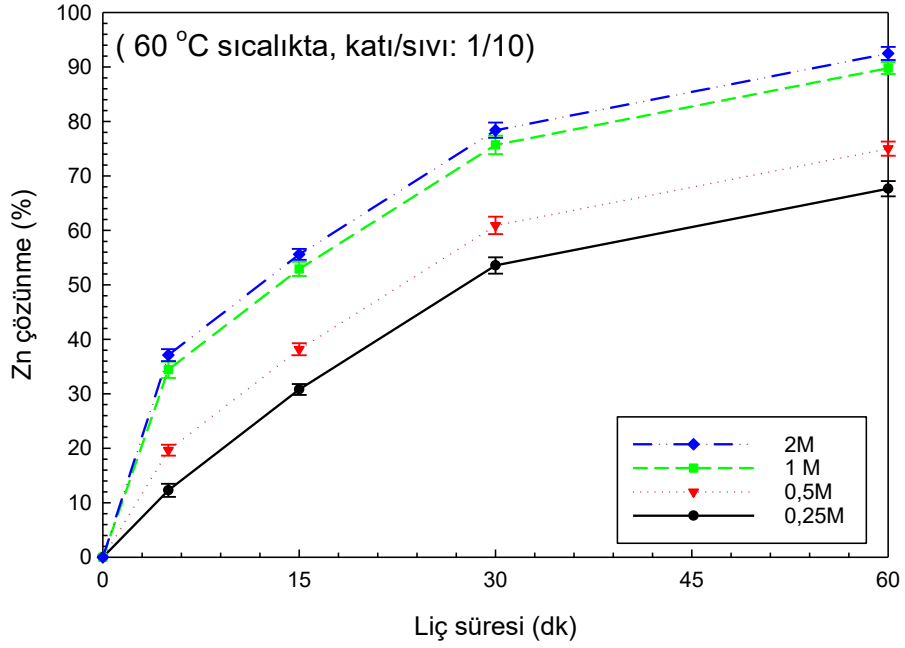


Şekil 3.3. İndüksiyon ocağı baca tozunun DTA-TG analizi

4.2. Çinko Geri Kazanım Verimliliği

Şekil 4.4'te, 60 °C sıcaklıkta ve 1/10 katı/sıvı oranında gerçekleştirilen deneyler sonucunda farklı H₂SO₄ derişimlerinin çinko (Zn) çözünme yüzdesine etkisi zaman bazında gösterilmektedir. Grafik verileri incelendiğinde, tüm asit konsantrasyonlarında liç süresinin artmasıyla birlikte Zn çözünme yüzdesinin arttığı görülmektedir. Özellikle liç işleminin ilk 0–15 dakikalık süresinde çözünme hızının yüksek olduğu, bu süreden sonra çözünme hızının azalarak daha yavaş bir artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, başlangıç aşamasında asidin katı yüzeyiyle doğrudan ve etkin temas etmesi sonucu hızlı bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Asit konsantrasyonunun Zn çözünmesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çözünme verimleri 2 M ve 1 M H₂SO₄ konsantrasyonlarında elde edilmiştir. 60 dakikalık liç süresi sonunda Zn çözünme verimi; 2 M asit konsantrasyonunda yaklaşık %92–94, 1 M konsantrasyonunda ise yaklaşık %88–90 seviyelerine ulaşmıştır. Buna karşılık, daha düşük asit konsantrasyonlarında çözünme verimlerinin belirgin şekilde azaldığı görülmüş olup, 0,5 M ve 0,25 M H₂SO₄ konsantrasyonlarında 60. dakika sonunda sırasıyla yaklaşık %75 ve %65–67 düzeylerinde kaldığı belirlenmiştir. Asit konsantrasyonunun artmasıyla Zn çözünme veriminin yükselmesi; çözeltideki H⁺ iyonu aktivitesinin artması, Zn içeren fazların daha hızlı çözünmesi ve reaksiyon hız sabitinin yükselmesiyle ilişkilendirilebilir. Düşük asit konsantrasyonlarında ise reaktif iyon miktarının sınırlı olması nedeniyle çözünme kinetiğinin yavaşladığı değerlendirilmektedir.

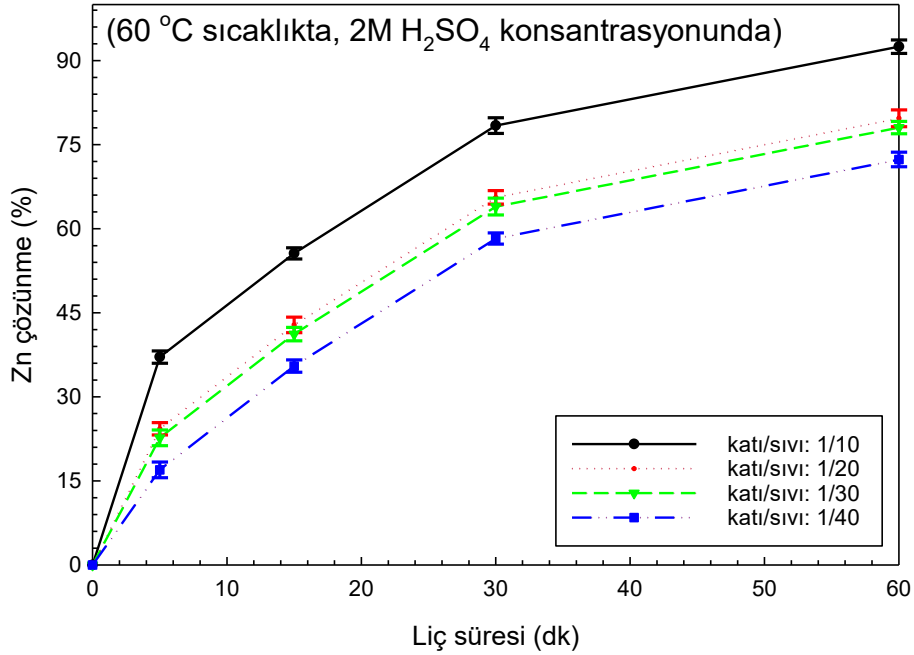
Bununla birlikte, 1 M ile 2 M H₂SO₄ konsantrasyonları arasında çözünme verimi açısından farkın sınırlı olduğu, özellikle 30. dakikadan sonra eğrilerin birbirine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek asit konsantrasyonlarında reaksiyonun kimyasal kinetikten ziyade kütle transferi veya difüzyon kontrollü bir rejime geçebileceğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, incelenen koşullar altında Zn çözünmesi açısından optimum asit konsantrasyonunun 2 M H₂SO₄ konsantrasyonunun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Asit derişiminin Zn'nin liçine etkisi (katı/sıvı oranı 1/10 ve 60°C sıcaklık)

Şekil 4.5'te 60 °C sıcaklıkta ve 2 M H₂SO₄ derişiminde gerçekleştirilen deneylerde farklı katı/sıvı oranlarının çinko (Zn) çözünme yüzdesine etkisi zaman bazında gösterilmektedir. Grafik verilerine göre, tüm katı/sıvı oranları için liç süresinin artmasıyla birlikte Zn çözünme yüzdesinin arttığı görülmektedir. Özellikle liç işleminin ilk 0–15 dakikalık süresinde çözünme hızının yüksek olduğu, daha sonraki sürelerde ise artış hızının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, başlangıçta reaktif yüzeylerin daha erişilebilir olması ve sülfürik asidin çinko içeren fazlarla hızlı reaksiyona girmesiyle açıklanabilir. İlerleyen sürelerde ise çözünen Zn²⁺ iyonlarının ortamda birikmesi, kütle transfer direncinin artması ve olası yüzey pasivasyonu nedeniyle çözünme hızının yavaşladığı değerlendirilmektedir. Katı/sıvı oranının Zn çözünmesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çözünme verimi, tüm liç süreleri boyunca 1/10 katı/sıvı oranında elde edilmiştir. Bu koşulda 60 dakikalık liç süresi sonunda Zn çözünme verimi yaklaşık %90–92 seviyesine ulaşmıştır. Daha düşük katı/sıvı

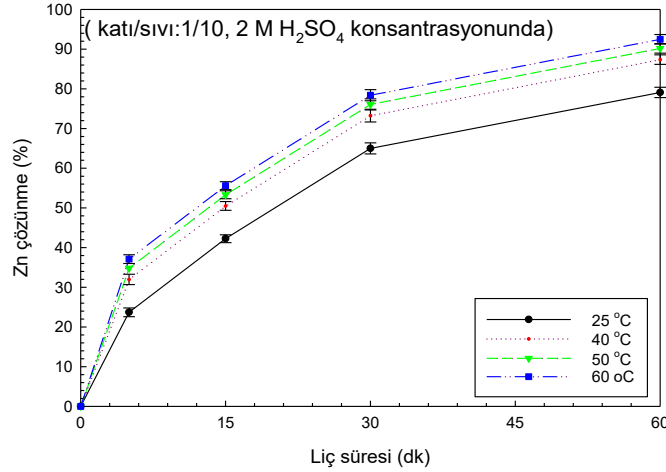
oranlarında ise çözünme verimlerinin azaldığı gözlemlenmiş olup, 60. dakika sonunda sırasıyla 1/20, 1/30 ve 1/40 katı/sıvı oranlarında yaklaşık %80, %77 ve %73 düzeylerinde kaldığı belirlenmiştir. Katı/sıvı oranının azalmasıyla Zn çözünme verimindeki düşüş; birim katı miktarı başına düşen asit miktarının azalması, çözeltideki metal iyonu konsantrasyonunun artmasıyla oluşan doygunluk etkisi ve katı-sıvı temasının sınırlanması ile ilişkilendirilebilir. Yüksek katı/sıvı oranlarında ise asidin katı yüzeyiyle daha etkin temas ettiği ve bu durumun liç kinetiğini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir. Sonuç olarak, incelenen deneysel koşullar altında Zn geri kazanımı açısından en uygun katı/sıvı oranının 1/10 olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, proses verimliliği ile asit tüketimi birlikte değerlendirildiğinde, 1/20 katı/sıvı oranının nispeten daha düşük kimyasal tüketimi ile kabul edilebilir çözünme verimi sunduğu ve endüstriyel uygulamalar açısından alternatif bir çalışma koşulu olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.5. Katı/sıvı oranının Zn'nin liçine etkisi (2 M derişim ve 45°C sıcaklık)

Şekil 4.6'da 2 M H₂SO₄ derişimi ve 1/10 katı/sıvı oranında gerçekleştirilen deneylerde farklı sıcaklıkların çinko (Zn) çözünme yüzdesine etkisi zaman bazında gösterilmektedir. Grafik verilerine göre, tüm sıcaklık değerlerinde liç süresinin artmasıyla Zn çözünme yüzdesinin düzenli bir şekilde arttığı görülmektedir. Özellikle liç işleminin ilk 0-15 dakikalık periyodunda çözünme hızının yüksek olduğu, bu süreden sonra çözünmenin devam etmekle birlikte artış hızının azaldığı tespit edilmiştir. Bu davranış, başlangıç aşamasında katı yüzeylerin

asit ile etkin temas etmesi sonucu hızlı bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesiyle ilişkilendirilebilir. Sıcaklığın Zn çözünmesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. En düşük çözünme verimleri 25 °C sıcaklıkta elde edilmiş olup, 60 dakikalık liç süresi sonunda Zn çözünme verimi yaklaşık %78–80 seviyelerinde kalmıştır. Sıcaklığın 40 °C'ye yükseltilmesiyle çözünme veriminin arttığı ve 60. dakika sonunda yaklaşık %85–87 düzeylerine ulaştığı belirlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda (50°C ve 60 °C) Zn çözünme verimlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu sıcaklıklarda 30. dakikadan itibaren çözünme verimlerinin %75–80 seviyelerinin üzerine çıktığı, 60. dakika sonunda ise sırasıyla yaklaşık %90 ve %92–93 düzeylerine ulaştığı tespit edilmiştir. 50 °C ile 60 °C sıcaklıkları arasındaki çözünme verimi farkının sınırlı olması, belirli bir sıcaklıktan sonra sistemin kinetik olarak doygunluğa ulaştığını ve çözünmenin kısmen kütle transferi veya difüzyon kontrollü bir rejime geçtiğini düşündürmektedir. Sıcaklığın artmasıyla Zn çözünme veriminin yükselmesi; Arrhenius bağıntısına uygun olarak reaksiyon hız sabitinin artması, asidin katı yüzeyine difüzyonunun hızlanması ve Zn içeren fazların daha kısa sürede çözünmesi ile açıklanabilir. Sonuç olarak, incelenen koşullar altında Zn çözünmesi açısından optimum sıcaklık değerinin 60 °C olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.6. Sıcaklığın Zn'nin liçine etkisi (2 M derişim ve katı/sıvı oranı 1/10)

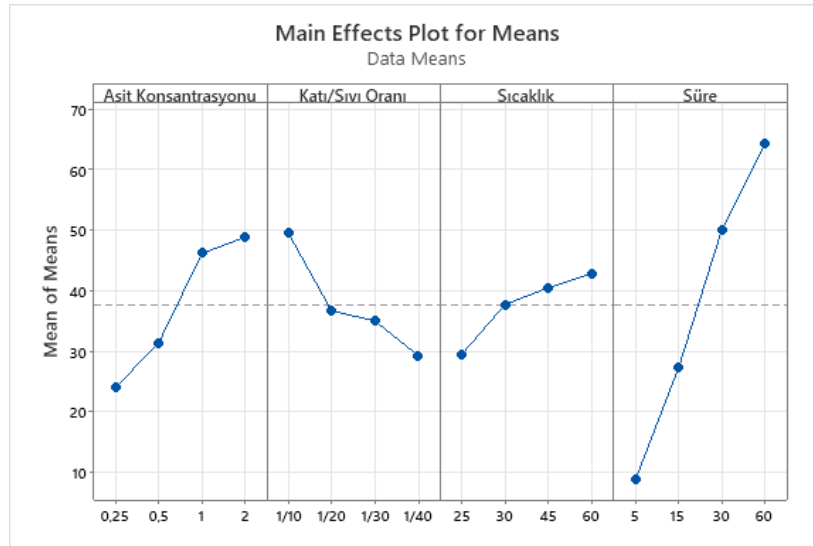
4.3. Malzeme ve Süreç Optimizasyonu

Zn çözünme verimi üzerindeki proses parametrelerinin göreceli etkilerini belirlemek amacıyla Taguchi deney tasarımı kullanılmış, proses parametrelerine ait ana etkiler grafiği oluşturulmuş (Şekil 4.7) ve elde edilen sonuçlara ait Taguchi yanıt tablosu (Tablo 4.2) oluşturulmuştur. Asit konsantrasyonu, katı/sıvı oranı, sıcaklık ve liç süresi parametrelerinin

farklı seviyelerdeki ortalama Zn çözünme değerleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Yanıt tablosu incelendiğinde, her bir parametre için hesaplanan Delta değerleri, ilgili parametrenin Zn çözünme verimi üzerindeki etki büyüklüğünü göstermektedir. Delta değeri ne kadar yüksek ise, parametrenin proses çıktısı üzerindeki etkisinin o derece belirgin olduğu kabul edilmektedir. Liç süresi parametresi, 55,412 ile en yüksek Delta değerine sahip olup, Zn çözünme verimi üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir (Rank 1). Bu sonuç, önceki grafiksel bulgularla da uyumlu olup, çözünme veriminin zamanla belirgin şekilde arttığını ve kinetik kontrolün önemli olduğunu göstermektedir. Asit konsantrasyonu, 24,825 Delta değeri ile ikinci sırada (Rank 2) yer almakta olup, Zn çözünmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Asit konsantrasyonunun artmasıyla Zn çözünme veriminin yükselmesi, ortamda bulunan H^+ iyonu miktarının artması ve metal oksitlerin daha hızlı çözünmesi ile açıklanabilir. Katı/sıvı oranı parametresi, 20,140 Delta değeri ile üçüncü sırada (Rank 3) yer almaktadır. Bu durum, katı yüklemesinin Zn çözünme verimini etkilediğini ancak liç süresi ve asit konsantrasyonuna kıyasla daha sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Uygun katı/sıvı oranının seçilmesi, asit tüketimi ve proses verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır. Sıcaklık parametresi ise 13,388 Delta değeri ile en düşük etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir (Rank 4). Bu sonuç, sıcaklığın Zn çözünmesini olumlu yönde etkilediğini ancak belirli bir sıcaklık değerinden sonra çözünme verimindeki artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda sistemin kütle transferi veya difüzyon kontrollü bir rejime geçmesiyle ilişkilendirilebilir. Yanıt tablosundaki seviye ortalamaları dikkate alındığında, Zn çözünmesi açısından optimum parametre seviyelerinin, ilgili faktörlerin en yüksek ortalama yanıt verdiği seviyelerde olduğu görülmektedir. Buna göre; yüksek asit konsantrasyonu, düşük katı/sıvı oranı, yüksek sıcaklık ve uzun liç süresi koşullarının Zn çözünmesini maksimize ettiği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, Taguchi yanıt tablosu sonuçları, deneysel grafiklerden elde edilen bulguları desteklemekte olup, Zn çözünme verimini en fazla etkileyen parametrenin sırasıyla liç süresi, asit konsantrasyonu, katı/sıvı oranı, sıcaklık olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, proses optimizasyonu ve endüstriyel ölçekli uygulamalar için önemli bir yol gösterici nitelik taşımaktadır.

Tablo 4.2. Taguchi yanıt tablosu

Seviye	Asit Konsantrasyonu (M)	Katı/Sıvı Oranı (g/ml)	Sıcaklık (°C)	Liç Süresi (dk)
1	24.040	49.463	29.438	8.810
2	31.407	36.677	37.707	27.343
3	46.185	35.035	40.528	50.123
4	48.865	29.322	42.825	64.222
Delta	24.825	20.140	13.388	55.412
Rank	2	3	4	1



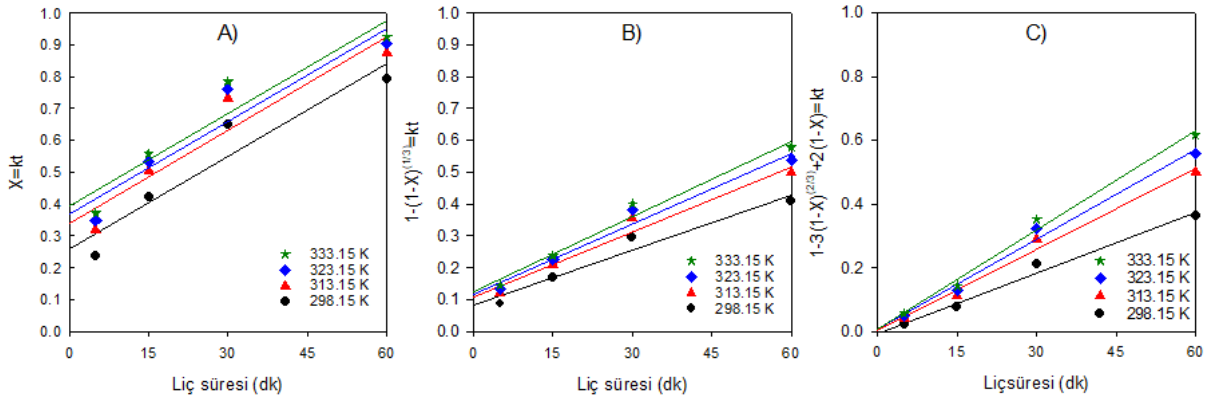
Şekil 4.7. Proses parametrelerine ait ana etkiler grafiği

4.4. Kinetik Çalışmalar

Bu çalışmada çinko liçi için uygulanan küçülen çekirdek modeli (SCM) kapsamında üç farklı hız kontrol mekanizması değerlendirilmiştir. Film difüzyonu kontrollü model (Model A: $X = kt$) için elde edilen doğrusal regresyon uyumlarının görece daha düşük kaldığı görülmüştür (Şekil 4.8a). Tablo 4.3'te bu eğrilerin sigmaplot programı ile hesaplanmış regresyon analizinden elde edilen k, R2 değerleri gösterilmiştir. Yüzey kimyasal reaksiyon kontrollü modelde (Model B: $1 - (1 - X)^{1/3} = kt$) uyumun belirgin şekilde arttığı, ancak en

yüksek korelasyon katsayısının ürün tabakası (katı içi difüzyon) kontrollü modele (Model C: $1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) = kt$) ait olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.8b-c). Bu bulgu, liç ilerledikçe partikül yüzeyinde oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle iç difüzyon direncinin baskın hale geldiğini göstermektedir. Benzer şekilde, metalurjik toz ve cürufların asidik liçi üzerine yapılan çalışmalarda, çözünmenin ileri aşamalarında ürün tabakası difüzyonunun hız sınırlayıcı mekanizma haline geldiği rapor edilmiştir (Levenspiel, 1999; Sohn, 2020).

Şekil 4.8. Kinetik model uygulamaları

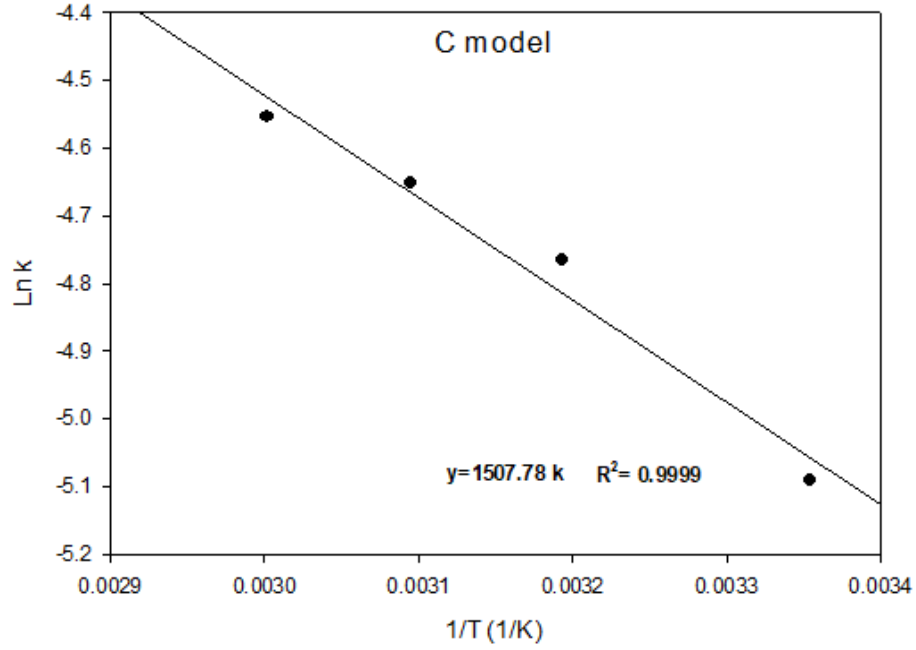


Tablo 4.3. Regresyon analizi tablosu

Sıcaklık			k			R2			Ln k
°C	K	1/T	1	2	3	1	2	3	3
25	298.15	0.003354	0.01568	7.62E-03	6.15E-03	0.910472	0.95792	0.993791	-5.091
40	313.15	0.0031934	0.0176	9.33E-03	8.51E-03	0.887254	0.95439	0.995401	-4.766
50	323.15	0.0030945	0.01825	0.01005	9.55E-03	0.879862	0.95542	0.995987	-4.6516
60	333.15	0.0030017	0.01878	0.01073	0.01052	0.874053	0.9576	0.996592	-4.5548

En uygun kinetik modelden (Model C) elde edilen hız sabitlerinin sıcaklıkla birlikte artması, liç reaksiyonunun Arrhenius davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.8c). Model C'ye ait hız sabitleri kullanılarak çizilen $\ln(k)-1/T$ grafiğinin doğrusal regresyonu sonucunda (Şekil 4.9) görünen aktivasyon enerjisi $12,53 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır ($R^2 = 0,9999$). Bu düşük aktivasyon enerjisi değeri, sürecin kimyasal reaksiyon basamağından ziyade kütle transferi difüzyon tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir. Literatürde çinko içeren endüstriyel toz ve cürufların asidik liçinde rapor edilen aktivasyon enerjilerinin $8-20 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ aralığında olduğu bildirilmektedir (Baláz, 2003; Guo et al., 2019; Habashi, 2007) . Bu

çalışmada elde edilen E_a değerinin söz konusu aralıkla uyumlu olması, önerilen kinetik mekanizmanın geçerliliğini desteklemektedir.



Şekil 4.9. C modeli için Arrhenius analizi (ln k – 1/T grafiği)

Başlangıç aşamasında çözünme hızını artırdığı, ancak reaksiyon ilerledikçe yüzeyde oluşan ürün tabakasının difüzyon direncini artırarak hız sınırlayıcı adım haline geldiği düşünülmektedir (Baláz, 2008; Sohn, 2020). Bu durum, özellikle yüksek dönüşüm derecelerinde ($X > 0,7$) liç hızında gözlenen yavaşlamayı açıklamaktadır (Şekil 4.8a–c). Dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda karıştırma şiddetinin artırılması, tane boyutunun küçültülmesi ve katı/sıvı oranının optimize edilmesi, difüzyon direncini azaltarak metal kazanım verimini yükseltebilir.

4.5. Çevresel Etki Değerlendirmesi

Bu çalışmada, Zn içeren indüksiyon ocağı baca gazı tozundan sülfürik asit kullanılarak hidrometalurjik yöntemle geri kazanımı incelenmiş ve prosesin çevresel etkileri, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi perspektifinde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin çevresel açıdan hem avantajlar sunduğunu hem de dikkat edilmesi gereken bazı potansiyel etkiler barındırdığını göstermektedir.

Öncelikle, çalışmada uygulanan hidrometalurjik liç prosesi, pirometalurjik yöntemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda (50–60 °C) ve atmosferik basınç altında gerçekleştirilmiştir. Bu durum, yüksek enerji gereksiniminin ve buna bağlı karbon ayak izinin önemli ölçüde

azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle Zn geri kazanımının enerji yoğun proseslerden uzaklaştırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından çevresel bir kazanım olarak değerlendirilmektedir.

Çalışma kapsamında, Zn içeren atıkların geri kazanıma tabi tutulması, tehlikeli veya yarı tehlikeli atıkların bertaraf edilmeden önce değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, düzenli depolama alanlarına giden atık miktarının azaltılmasına katkı sunmakta ve doğal Zn kaynakları üzerindeki madencilik baskısını dolaylı olarak azaltmaktadır. Bu yönüyle çalışma, döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği ilkeleriyle uyumludur.

Bununla birlikte, sülfürik asit kullanımına bağlı olarak proses sırasında asidik atık çözelti oluşumu söz konusudur. Çalışma kapsamında atık asitlerin nötralizasyonu, geri kazanımı veya yeniden kullanımı detaylı olarak ele alınmamış olup, bu durum çevresel etki açısından bir sınırlama oluşturmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, liç sonrası çözeltilerin uygun arıtma yöntemleriyle (nötralizasyon, metal geri kazanımı, kapalı devre sistemler) yönetilmesi gerekliliği açıktır.

Liç işlemi sırasında Zn dışında çözünmesi muhtemel diğer metal iyonlarının çevresel etkileri bu çalışma kapsamında detaylı olarak değerlendirilmemiştir. Bu durum, özellikle çok bileşenli atık sistemlerinde oluşabilecek ikincil metal kirliliği riskinin tam olarak ortaya konamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, ileri çalışmalarda çok elementli çözelti analizlerinin yapılması çevresel açıdan önem arz etmektedir.

Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, sıcaklığın belirli bir değerin üzerinde çözünme verimine sınırlı katkı sağlaması, prosesin enerji açısından optimize edilebilir olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, gereksiz enerji kullanımının önlenmesi ve çevresel etkinin minimize edilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada önerilen sülfürik asitli Zn liç yöntemi; atık azaltımı, kaynak geri kazanımı ve düşük enerji gereksinimi bakımından çevresel açıdan olumlu bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak, asit tüketimi, atık çözelti yönetimi ve çok bileşenli metal çözeltilerinin çevresel etkileri gibi konuların ileri çalışmalarda detaylandırılması, yöntemin çevresel sürdürülebilirliğinin bütüncül olarak ortaya konması açısından gereklidir.

Sonuç olarak, çalışma, Zn içeren indüksiyon ocağı baca gazı tozu atıklarının çevreye zarar vermeden değerlendirilmesine yönelik önemli bir adım niteliğinde olup, uygun atık yönetimi ve proses entegrasyonu ile çevresel etkileri minimize edilmiş bir geri kazanım sürecine dönüştürülebileceğini göstermektedir.

4.6. Ekonomik Fizibilite

Bu çalışmada incelenen indüksiyon ocağı baca gazı tozundan çinkonun geri kazanım prosesi, sülfürik asitli hidrometalurjik liç yöntemi temelinde değerlendirilmiş olup, ekonomik fizibilitesi başlıca kimyasal tüketimi, enerji gereksinimi, proses süresi ve ölçeklenebilirlik kriterleri çerçevesinde ele alınmıştır.

Çalışma sonuçları, yüksek Zn çözünme verimlerinin orta düzey asit konsantrasyonlarında (≈ 1 M) ve 50–60 °C sıcaklık aralığında elde edilebildiğini göstermektedir. Bu durum, daha yüksek asit konsantrasyonları veya sıcaklıkların zorunlu olmaması sayesinde kimyasal tüketimi ve enerji maliyetlerinin sınırlandırılabilceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, yüksek sıcaklıkların çözünme verimine sınırlı katkı sağlaması, prosesin enerji açısından optimize edilebileceğine işaret etmektedir.

Katı/sıvı oranı açısından değerlendirildiğinde, yüksek katı yüklemelerinde (1/10) yüksek Zn çözünme verimlerinin elde edilmesi, birim hacim başına daha fazla hammadde işlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, reaktör hacminin küçültülmesi, ekipman yatırım maliyetlerinin azaltılması ve işletme kapasitesinin artırılması açısından ekonomik bir avantaj sunmaktadır.

Liç süresinin Zn çözünmesi üzerindeki baskın etkisi, ekonomik açıdan iki yönlü bir değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır. Uzun liç süreleri çözünme verimini artırmakla birlikte, işletme süresinin uzaması enerji, işçilik ve ekipman kullanım maliyetlerini artırabilir. Bu nedenle, çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda, verim–zaman dengesi gözetilerek optimum bir liç süresinin seçilmesi, ekonomik fizibilite açısından kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Sülfürik asidin endüstride yaygın olarak bulunması, nispeten düşük maliyetli olması ve mevcut Zn geri kazanım süreçleriyle uyumlu olması, kullanılan liç ajanının ekonomik açıdan önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, liç sonrası çözeltilerden Zn'nin elektrokimyasal veya kimyasal yöntemlerle geri kazanılabilmesi, prosesin entegre bir üretim hattına dönüştürülebilme potansiyelini artırmaktadır.

Bununla birlikte, atık asitlerin arıtımı, nötralizasyonu veya geri kazanımı gibi ek işlemler, toplam proses maliyetini etkileyebilecek unsurlar arasında yer almaktadır. Bu çalışmada detaylı bir maliyet analizi yapılmamış olmakla birlikte, asit geri kazanımının veya kapalı devre liç sistemlerinin uygulanması hâlinde, işletme maliyetlerinin önemli ölçüde düşürülebileceği öngörülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada önerilen Zn liç prosesi; orta düzey kimyasal tüketimi, düşük–orta enerji gereksinimi, yüksek çözünme verimi ve ölçeklenebilir proses koşulları özellikleri bakımından ekonomik açıdan uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Prosesin detaylı bir maliyet-fayda analizi ve pilot ölçek çalışmaları ile desteklenmesi durumunda, endüstriyel uygulamalar için ekonomik olarak rekabetçi bir alternatif hâline gelebileceği değerlendirilmektedir.

4.7. Mevcut Yöntemlerle Karşılaştırma

Zn içeren katı malzemelerin geri kazanımında literatürde ve endüstriyel uygulamalarda başlıca pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada uygulanan sülfürik asitli liç yöntemi, mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında hem proses koşulları hem de elde edilen çözünme verimleri açısından belirgin avantajlar ve bazı sınırlılıklar sunmaktadır.

Pirometalurjik yöntemler, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen indirgeme ve ergitme işlemlerine dayanmakta olup, Zn geri kazanımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler; yüksek enerji tüketimi, sera gazı ve toz emisyonları, ayrıca yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gibi önemli dezavantajlar içermektedir.

Bu çalışmada uygulanan hidrometalurjik liç prosesi, 50–60 °C gibi görece düşük sıcaklıklarda ve atmosferik basınç altında yüksek Zn çözünme verimlerine ulaşılabilirdiğini göstermiştir. Bu yönüyle, enerji tüketimi ve çevresel etki bakımından pirometalurjik yöntemlere kıyasla daha sürdürülebilir bir alternatif sunduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, pirometalurjik yöntemlerin kısa işlem süreleri ve yüksek kapasite avantajı bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır.

Literatürde Zn liçi için farklı asit türleri (HCl, HNO₃, organik asitler) ve farklı proses koşulları rapor edilmiştir. HCl gibi güçlü asitlerle gerçekleştirilen liç işlemleri yüksek çözünme verimleri sağlayabilmekle birlikte, yüksek korozyon riski, gaz oluşumu ve ekipman malzemesi seçimi açısından dezavantajlar içermektedir.

Bu çalışmada kullanılan H₂SO₄, endüstride yaygın olarak temin edilebilen, maliyeti görece düşük ve Zn geri kazanım süreçleriyle uyumlu bir asit olması nedeniyle önemli bir avantaj sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, literatürde rapor edilen benzer sülfürik asitli liç çalışmalarındaki çözünme verimleriyle uyumlu olup, orta seviyedeki asit konsantrasyonlarında (≈1 M) dahi yüksek Zn çözünme verimlerine ulaşılabilirdiğini göstermektedir.

Organik asitlerle gerçekleştirilen liç yöntemleri çevresel açıdan daha genel olarak değerlendirilse de genellikle daha uzun liç süreleri ve daha düşük çözünme kinetiği gerektirmektedir. Bu çalışmada ise nispeten kısa sürelerde yüksek çözünme verimlerinin elde edilmesi, prosesin kinetik açıdan daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Mevcut çalışmanın literatürdeki birçok çalışmadan ayrılan önemli bir yönü, proses parametrelerinin etkilerinin sistematik ve karşılaştırmalı bir Şekilde incelenmiş olmasıdır. Taguchi yaklaşımı kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, liç süresinin Zn çözünmesi üzerinde en baskın parametre olduğu belirlenmiş; bu bulgu, literatürde sıklıkla sıcaklık veya asit konsantrasyonunun ön plana çıkarıldığı çalışmalara kıyasla farklı bir bakış açısı sunmaktadır.

Pirometalurjik yöntemlere kıyasla daha çevreci ve enerji verimli bir alternatif sunarken, literatürde rapor edilen bazı hidrometalurjik yaklaşımlara göre ise daha kısa liç sürelerinde benzer veya daha yüksek çözünme verimlerine ulaşılması bu çalışmanın özgün katkılarında biri olarak değerlendirilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Bulguların Özeti

Bu çalışmada, döküm fabrikası atıklarından biri olan indüksiyon ocağı baca gazı tozu içerisinde yer alan çinkonun çözünme verimi üzerine katı/sıvı oranı, asit konsantrasyonu, sıcaklık ve liç süresi parametrelerinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, tüm parametreler için liç süresinin artmasıyla Zn çözünme veriminin arttığı açıkça görülmektedir. Özellikle liç işleminin ilk 10–15 dakikalık süresinde çözünmenin hızlı gerçekleştiği, daha sonraki sürelerde ise artış hızının azaldığı ve çözünmenin kademeli olarak plato eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

Katı/sıvı oranının Zn çözünmesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Daha yüksek katı/sıvı oranlarında (1/10), tüm liç süreleri boyunca daha yüksek Zn çözünme verimleri elde edilmiştir. Katı/sıvı oranının azalmasıyla çözünme veriminin düştüğü gözlemlenmiş olup, bu durum birim katı miktarı başına düşen reaktif asit miktarının azalması ve kütle transfer sınırlamaları ile ilişkilendirilmiştir. En yüksek Zn çözünme verimleri, uzun liç sürelerinde ve yüksek katı/sıvı oranlarında elde edilmiştir.

Asit konsantrasyonunun artması, Zn çözünme verimini belirgin şekilde artırmıştır. Düşük asit konsantrasyonlarında çözünme sınırlı kalırken, 1 M ve üzerindeki H₂SO₄ konsantrasyonlarında çözünme verimlerinin önemli ölçüde yükseldiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, yüksek asit konsantrasyonlarında (1–2 M) çözünme eğrilerinin zamanla birbirine yaklaştığı ve artışın sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, belirli bir konsantrasyondan sonra çözünmenin kimyasal reaksiyon kontrollü rejimden kütle transfer kontrollü rejime geçebileceğini göstermektedir.

Sıcaklığın Zn çözünmesi üzerinde olumlu bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık arttıkça Zn çözünme verimi yükselmiş, özellikle 45–60 °C aralığında yüksek çözünme değerlerine ulaşılmıştır. Ancak yüksek sıcaklıklarda çözünme verimindeki artışın sınırlı olması, reaksiyon hızının sıcaklığa olan duyarlılığının belirli bir noktadan sonra azaldığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, prosesin enerji verimliliği açısından optimum bir sıcaklık aralığının seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Zn çözünmesini en fazla etkileyen parametrenin liç süresi olduğu, bunu sırasıyla asit konsantrasyonu, katı/sıvı oranı ve sıcaklığın izlediği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, grafiksel bulgular ve Taguchi yanıt tablosu sonuçlarıyla uyumlu olup, Zn liçi için optimum proses koşullarının belirlenmesine önemli katkı sağlamaktadır.

5.2. Endüstri ve Araştırmaya Katkılar

Bu çalışma kapsamında, Zn içeren indüksiyon ocağı baca gazı tozunun sülfürik asit kullanılarak hidrometalurjik yöntemle geri kazanımında; katı/sıvı oranı, asit konsantrasyonu, sıcaklık ve liç süresi parametrelerinin Zn çözünme verimi üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar hem endüstriyel uygulamalar hem de akademik araştırmalar açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Çalışma sonuçları, Zn liç prosesinde en baskın parametrenin liç süresi olduğunu, bunu sırasıyla asit konsantrasyonu, katı/sıvı oranı ve sıcaklığın izlediğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, endüstriyel ölçekte proses tasarımında hangi parametrelerin öncelikli olarak kontrol edilmesi gerektiğine dair net bir yol haritası sunmaktadır.

Yüksek Zn çözünme verimlerinin orta–yüksek asit konsantrasyonlarında (≈ 1 M) ve 50–60 °C sıcaklık aralığında elde edilebilmesi, aşırı kimyasal tüketimi ve yüksek enerji gereksinimini zorunlu kılmadan etkin bir geri kazanımın mümkün olduğunu göstermektedir. Bu durum, asit tüketimi, enerji maliyetleri ve ekipman korozyonu gibi endüstriyel açıdan kritik faktörlerin optimize edilmesine olanak sağlamaktadır.

Ayrıca, 1/10 katı/sıvı oranında yüksek çözünme verimlerinin elde edilmesi, prosesin daha yüksek katı yüklemeleriyle çalıştırılabileceğini ve böylece reaktör hacminin küçültülmesi, işletme kapasitesinin artırılması ve birim ürün başına maliyetlerin düşürülmesi açısından avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, Zn içeren endüstriyel atıkların geri kazanımına yönelik ölçeklenebilir ve uygulanabilir bir proses çerçevesi sunmaktadır.

Bu çalışma, Zn liçi üzerine yapılan önceki çalışmalara kıyasla, proses parametrelerinin etkilerini grafiksel, istatistiksel (Taguchi yanıt tablosu) ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla ele alarak literatüre bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır. Parametrelerin göreceli etkilerinin nicel olarak ortaya konması, Zn liçi kinetiğinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Özellikle, yüksek sıcaklık ve yüksek asit konsantrasyonlarında çözünme verimindeki artışın sınırlı kalması, sistemin belirli koşullardan sonra difüzyon veya kütle transfer kontrollü bir rejime geçebileceğini göstermekte ve ileri kinetik modelleme çalışmaları için güçlü bir temel oluşturmaktadır.

5.3. Çalışmanın Sınırlamaları

Bu çalışma kapsamında, Zn içeren indüksiyon ocağı baca gazı tozunun sülfürik asit kullanılarak hidrometalurjik yöntemle çözündürülmesi incelenmiş ve proses parametrelerinin

Zn çözümlenme verimi üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Ancak çalışmanın kapsamı ve deneysel tasarımı doğrultusunda bazı sınırlamalar bulunmaktadır.

Öncelikle, deneyler belirli ve sınırlı parametre aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Katı/sıvı oranı, asit konsantrasyonu, sıcaklık ve liç süresi belirli seviyelerde incelenmiş olup, bu parametrelerin daha geniş veya sürekli aralıklardaki etkileri değerlendirilmemiştir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, yalnızca çalışmada seçilen deneysel koşullar için geçerli olup, tüm olası proses koşullarına genellenemez.

Çalışmada liç işlemi yalnızca H₂SO₄ kullanılarak gerçekleştirilmiş, farklı asit türlerinin (örneğin HCl, HNO₃ veya organik asitler) Zn çözümlenmesine etkisi araştırılmamıştır. Bu durum, farklı liç ajanlarının karşılaştırmalı performanslarının değerlendirilmesine olanak vermemektedir.

Deneysel değerlendirmeler ağırlıklı olarak Zn çözümlenme verimi üzerinden yapılmış olup, liç çözeltisindeki eş zamanlı çözünen diğer metal iyonlarının (Fe, Pb, Cd vb.) davranışları ve bunların seçicilik üzerindeki etkileri kapsam dışında bırakılmıştır. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar çok bileşenli sistemler için sınırlı bir perspektif sunmaktadır.

Ayrıca, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar kinetik modelleme ile nicel olarak desteklenmemiş, aktivasyon enerjisi hesaplamaları veya ayrıntılı reaksiyon mekanizması analizleri yapılmamıştır. Bu durum, prosesin kontrol mekanizmasının (kimyasal reaksiyon, difüzyon veya kütle transferi kontrollü) kesin olarak tanımlanmasını sınırlandırmaktadır.

Deneyler laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen bulguların pilot veya endüstriyel ölçeğe doğrudan aktarımı sırasında karşılaşılabilecek karıştırma, ısı transferi, kütle transferi ve ekipman korozyonu gibi faktörler bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.

Bununla birlikte, asit tüketimi, enerji ihtiyacı ve atık asit geri kazanımı gibi ekonomik ve çevresel analizler çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu nedenle, prosesin endüstriyel uygulanabilirliği açısından ayrıntılı bir maliyet-fayda değerlendirmesi yapılmamıştır.

Son olarak, numune özelliklerinin (tane boyutu dağılımı, mineralojik yapı, faz bileşimi) Zn çözümlenmesine etkisi detaylı olarak ele alınmamış, bu parametrelerin etkisi sabit kabul edilmiştir. Bu durum, farklı özelliklere sahip Zn içeren atıkların liç davranışlarının değerlendirilmesini sınırlandırmaktadır.

Özetle, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar Zn liç prosesinin anlaşılmasına önemli katkılar sunmakla birlikte, yukarıda belirtilen sınırlamalar göz önünde bulundurularak

yorumlanmalı ve ileri çalışmalarda bu eksikliklerin giderilmesine yönelik daha kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

5.4. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Çalışmada elde edilen bulgular, gelecekte yapılacak araştırmalarda:

- Aktivasyon enerjisi hesaplamaları,
- Kinetik model uyarlamaları (Shrinking Core Model),
- Asit geri kazanımı ve proses entegrasyonu,
- Atık bazlı Zn kaynaklarının karşılaştırılmalı liç davranışı gibi konular için referans niteliği taşımaktadır.

Sonuç olarak, bu alışma; Zn içeren atıkların hidrometalurjik yöntemle geri kazanımında teknik olarak uygulanabilir, ekonomik olarak optimize edilebilir ve bilimsel olarak temellendirilmiş bir proses yaklaşımı ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir metal geri kazanımı ve döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda hem endüstriyel uygulamalara hem de akademik araştırmalara önemli katkılar sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Antrekowitsch, J., & Antrekowitsch, H. (2021). Hydrometallurgically recovering inc from electric arc furnace dusts. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 26–28.
- Atılkan, R. (2022). *Inconel 718 Nikel Esaslı Süper Alaşımın Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Gri İlişkisel Analiz ile Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Baláz, P. (2003). Mechanical activation in hydrometallurgy. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1–4), 341–354.
- Baláz, P. (2008). Mechanochemistry in nanoscience and minerals engineering. *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering*, 1–413.
- Bozcu, H. (2022). *Sır Atığı ve Farklı Ergiticilerin Yumuşak Porselen Massede Kullanımının Mekanik-Görsel Özelliklere Etkisinin İncelenmesi ve Taguchi Yöntemi Kullanılarak Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik.
- De Buzin, P. J. W. K., Heck, N. C., & Vilela, A. C. F. (2017). EAF dust: an overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. In *Journal of Materials Research and Technology* 6(2), 194–202.
- Elfarah, T. T. K. (2018). *Magnezyum Matrisli Karbür Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimine Taguchi Metodu ile Optimizasyonu* (Doktora Tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Güler, E. (2008). *Çinko Tesisi Liç Atıklarından Metal Kazanım Yöntemlerinin Araştırılması* (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Gümüşkaşık, M. (2023). *Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özelliklerinin Taguchi Metoduyla Analizinin Yapılması* (Yüksek Lisans Tezi). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Guo, P., Wang, S., & Zhang, L. (2019). Selective removal of antimony from refractory gold ores by ultrasound. *Hydrometallurgy*, 190.
- Habashi, F. (2007). A generalized kinetic model for hydrometallurgical processes. *Chemical Product and Process Modeling*, 2(1).
- Jha, M. K., Kumar, V., & Singh, R. J. (2001). Review of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes. In *Resources, Conservation and Recycling* 33(2001), 1-22.
- Kania, H., & Saternus, M. (2023). Evaluation and current state of primary and secondary zinc production. In *Applied Sciences (Switzerland)* 13(3), 1-22.
- Kasap, S. S. (2022). *Taguchi Deney Tasarımı ve YSA ile Tetrakloretilen Kaynak Zonlarının Kopleks Şeker ile İslah Optimizasyonunun Modellenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Lanzerstorfer, C. (2018). Electric arc furnace (EAF) dust: application of air classification for improved zinc enrichment in in-plant recycling. *Journal of Cleaner Production*, 174(2018), 1–6.
- Levenspiel, O. (1999). Solid Catalyzed Reactions. *Chemical Reaction Engineering (3rd Edition)*, 376–655.
- Małeckı, S., Gargul, K., Warzecha, M., Stradomski, G., Hutny, A., Madej, M., Dobrzyński, M., Prajsnar, R., & Krawiec, G. (2021). High-performance method of recovery of metals from eaf dust—processing without solid waste. *Materials*, 14(6061), 1-12.
- Oustadakis, P., Tsakiridis, P. E., Katsiapi, A., & Agatzini-Leonardou, S. (2010). Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part I: characterization and leaching by diluted sulphuric acid. *Journal of Hazardous Materials*, 179(2010), 1–7.

- Palimaka, P., Pietrzyk, S., Stępień, M., Ciecćko, K., & Nejman, I. (2018). Zinc recovery from steelmaking dust by hydrometallurgical methods. *Metals*, 8(7), 1-13.
- Pickles, C. A., & Marzoughi, O. (2019). Thermodynamic investigation of the sulphation roasting of electric arc furnace dust. *Minerals*, 9(1), 1-15.
- Ruiz, O., Clemente, C., Alonso, M., & Alguacil, F. J. (2007). Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 33–36.
- Sohn, H. Y. (2020). Fluid-Solid Reactions, Second Edition. *Fluid-Solid Reactions, Second Edition*, 1–518.
- Turunç, U. D. (2021). *Çinko Madenciliği ve Metalurji Endüstrisi: Türkiye’de Çinko İzabe Tesisi Fizibilitesi ve Planlaması* (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.