



**DÖNER FIRINLARDA ÇİNKO GERİ
KAZANIMININ MAKİNE ÖĞRENMESİ
KULLANILARAK SINIFLANDIRILMASI VE
REGRESYON ANALİZİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Didem ÖZCAN

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Mehmet ÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Kürşat Mustafa KARAOĞLAN**

**DÖNER FIRINLARDA ÇİNKO GERİ KAZANIMININ MAKİNE
ÖĞRENMESİ KULLANILARAK SINIFLANDIRILMASI VE REGRESYON
ANALİZİ**

Didem ÖZCAN

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Mehmet ÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Kürşat Mustafa KARAOĞLAN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Nisan 2024**

Didem ÖZCAN tarafından hazırlanan “DÖNER FIRINLARDA ÇİNKO GERİ KAZANIMININ MAKİNE ÖĞRENMESİ KULLANILARAK SINIFLANDIRILMASI VE REGRESYON ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet ÇELİK

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi. Kürşat Mustafa KARAOĞLAN

2. Tez Danışmanı, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/04/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Emrah DENİZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Cihan BAYINDIRLI (OHU) ONLİNE

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sait DEMİR (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Didem ÖZCAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÖNER FIRINLARDA ÇİNKO GERİ KAZANIMININ MAKİNE ÖĞRENMESİ KULLANILARAK SINIFLANDIRILMASI VE REGRESYON ANALİZİ

Didem ÖZCAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Doç. Dr. Mehmet ÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi Kürşat Mustafa KARAOĞLAN

Nisan 2024, 73 sayfa

Demir ve çelik endüstrisi dünya çapında önemli bir sektördür ve Elektrik Ark Fırınları (EAF), bu endüstride en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu fırınlardan elde edilen tozdan çinko geri kazanımı, yaygın bir uygulamadır. Bu çalışmada, Waelz prosesi ile çinko geri kazanımı sağlanmış ve cüruftaki çinkonun kalitesi çeşitli denetimli makine öğrenimi teknikleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında ayrıntılı analizler gerçekleştirilmesine olanak sağlamak için çıktılar üzerinde regresyon analizleri yapılmıştır. Sınıflandırıcı ve regresyon modellerinin eğitiminde kullanılan veriler, Waelz prosesi hammaddelerinin ve cüruf örneklerinin kimyasal analizleri yoluyla elde edilmiştir.

Elde edilen veriler, cüruftaki çinko içeriğine göre uzmanlar tarafından etiketlenmiştir. Cürufta çinko geri kazanım kalitesini sınıflandırmak için yapılan deneysel çalışmalarda, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı, Naive Bayes ve Rastgele Orman gibi makine öğrenmesi teknikleri kullanılmıştır. Modellerin güvenilirliğini sağlamak için çapraz doğrulama tekniklerinden, k-kat çapraz doğrulama, kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, Karar Ağacı modeli kullanılarak geliştirilen yaklaşımda %99'dan daha yüksek sınıflandırma performansı elde edilmiştir. Ayrıca, diğer sınıflandırma yaklaşımları da yüksek ve rekabetçi sonuçlar üretmiştir. Regresyon analizi açısından, kullanılan hammadde miktarı, EAF'daki demir oranı ve üretilen cüruf miktarı arasında anlamlı bir ilişki gözlenmiştir. Cüruf miktarı üzerinde en etkili maddelerin EAF tozu miktarı, EAF tozundaki demir oranı, kömür ve kireç olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın bulguları, demir çelik endüstrisinde çevre dostu ve ekonomik olarak uygulanabilir çözümlerin geliştirilmesi için yol gösterici olacaktır. Sonuç olarak, endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi ve çevresel etkilerinin azaltılmasıyla sürdürülebilir bir endüstriyel üretim süreci oluşturulacaktır.

Anahtar Sözcükler: Elektrik ark fırınları, çinko geri kazanımı kalitesi, EAF tozu, endüstriyel atık geri dönüşümü, sınıflandırma, makine öğrenmesi, regresyon.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

CLASSIFICATION AND REGRESSION ANALYSIS OF ZINC RECOVERY IN ROTARY KILNS USING MACHINE LEARNING

Didem ÖZCAN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisors:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÇELİK

Assist. Prof. Dr. Kürşat Mustafa KARAOĞLAN

April 2024, 73 pages

The iron and steel industry is an important sector worldwide, and Electric Arc Furnaces (EAFs) are one of the most widely used methods in this industry. Zinc recovery from the dust obtained from these furnaces is a common practice. In this study, zinc recovery was achieved with the Waelz process and the quality of zinc in the slag was classified using various supervised machine learning techniques. In addition, regression analyses were performed on the outputs to enable detailed analyses within this thesis's scope. The data used in training of the classifier and regression models were obtained through chemical analyses of Waelz process feedstocks and slag samples. Experts labelled the data to the zinc content in the slag. Machine learning techniques such as Support Vector Machine, Decision Tree, Naive Bayes and Random Forest were used in the experimental studies to classify the zinc recovery quality. To ensure the reliability of the models, k-fold cross-validation technique has been employed. According to the

results of the experimental studies, the classification performance of the approach using the Decision Tree model is higher than 99%. Moreover, other classification approaches also produced high and competitive results. In regression analysis, a significant relationship was observed between the amount of raw material used, the iron content in the EAF, and the amount of slag produced. It was determined that the most effective substances in the amount of slag were the amount of EAF powder, iron content in EAF powder, coal, and lime. This study's findings will guide the development of environmentally friendly and economically viable solutions in the iron and steel industry. As a result, a sustainable industrial production process will be created by recycling industrial waste and reducing their environmental impact.

Keywords : Electric arc furnaces, zinc recovery quality, EAF dust, industrial waste recycling, classification, machine learning, regression.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bana değerli vaktini ayıran, bilgisini paylaşan ve her türlü yardımı sağlayan tez danışmanlarım değerli Doç. Dr. Mehmet ÇELİK ve Dr. Öğr. Üyesi Kürşat Mustafa KARAOĞLAN hocalarıma teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. KBÜBAP-23-YL-126 proje kodlu bu çalışmamda desteklerinden dolayı KBÜ BAP birimine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi, manevi desteğini ve güvenini esirgemeyen değerli ailem Sergül ve Hasan KÖFTER'e, eşim Eren ÖZCAN'a, Büşra KIZILTAŞ'a ve benim üzerimde emeği geçen herkese bütün içtenliğimle teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	8
LİTERATÜR TARAMASI.....	8
BÖLÜM 3	12
ÇİNKO	12
3.1. ÇİNKO CEVHERLERİ	12
3.1.1. Sfalerit.....	13
3.1.2. Smitsonit	13
3.1.3. Hemimorfit	14
3.1.4. Willemit	14
3.1.5. Zinkit.....	14
3.2. TÜRKİYE VE DÜNYA'DA ÇİNKO REZERVLERİ	14
BÖLÜM 4	17
ÇİNKO ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	17
4.1. PİROMETALURJİK YÖNTEMLER	17

	<u>Sayfa</u>
4.1.1. Kurutma	17
4.1.2. Kalsinasyon.....	18
4.1.3. Kavurma	19
4.1.4. İzabe.....	19
4.1.5. Rafinasyon	19
4.2. PİROMETALURJİK ÇİNKO ÜRETİMİ	20
4.2.1. Retort Prosesi.....	20
4.2.2. Şaft Fırını Prosesi	20
4.2.3. Waelz Prosesi.....	21
4.2.4. Laclade Prosesi	21
4.2.5. ZTT Ferrolime Prosesi.....	21
4.3. HİDROMETALURJİK YÖNTEMLER.....	22
4.4. HİDROMETALURJİK ÇİNKO ÜRETİMİ.....	23
4.4.1. Kostik Soda Liç Prosesi.....	24
4.4.2. Amonyum Klorür Liç Prosesi.....	24
4.4.3. Sülfürik Asit Liç Prosesi.....	25
4.4.4. Demir Nitrat Liç Prosesi.....	25
BÖLÜM 5	27
MATERYAL METOD	27
5.1. WAELZ PROSESİNDE KULLANILAN HAMMADDELER	28
5.1.1. EAF Tozu.....	29
5.1.2. Antrasit Kömürü	30
5.1.3. Kok Kömürü	31
5.1.4. Kireç	32
5.2. WAELZ PROSESİ ÇIKTILARI	35
5.2.1. Cüruf.....	35
5.2.2. Çinko Oksit.....	36
5.3. MAKİNE ÖĞRENMESİ.....	36
5.3.1. Sınıflandırma	38
5.3.1.1. Destek Vektör Makineleri (SVM)	38
5.3.1.2. Karar Ağacı (DT).....	39
5.3.1.3. Naive Bayes (NB).....	40

	<u>Sayfa</u>
5.3.1.4. Rastgele Orman (RF)	40
5.3.2. Regresyon	41
5.3.2.1. Doğrusal Regresyon	41
5.3.2.2. Doğrusal Olmayan Regresyon.....	42
5.4. DENEYSEL ORTAM	43
5.4.1. Veri Seti	49
5.4.2. Model Hiperparametreleri	50
5.4.3. Performans Metrikleri.....	50
BÖLÜM 6	54
SINIFLANDIRMA VE REGRESYON SONUÇLARI.....	54
6.1. SINIFLANDIRMA SONUÇLARI.....	54
6.2. REGRESYON SONUÇLARI	59
BÖLÜM 7	62
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	62
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Ülkeye veya bölgeye göre tarihsel çinko üretimi	2
Şekil 1.2. Gelecekteki çinko madeni üretim kaynakları	2
Şekil 1.3. 2019 yılı çinko kullanımı	3
Şekil 4.1. Kurutma yöntemi hava akış şeması.	18
Şekil 4.2. İzabe işlemine dair görsel	19
Şekil 4.3. Hidrometalurjik yöntemlerin detaylı uygulama şeması.....	23
Şekil 4.4. Basit sülfirik asit liç prosesi deneyi.	25
Şekil 5.1. Waelz prosesi döner fırını.....	28
Şekil 5.2. Döner fırın.....	28
Şekil 5.3. Peletlenmiş EAF tozu.	29
Şekil 5.4. EAF tozu.	30
Şekil 5.5. Antrasit kömürü.	31
Şekil 5.6. Kok kömürü.	31
Şekil 5.7. Sönmemiş kireç.....	32
Şekil 5.8. Waelz prosesi akış şeması.....	33
Şekil 5.9. Döner fırın içinde gerçekleşen kimyasal süreçler	33
Şekil 5.10. Döner fırın cüruf zonu ve dökülen cüruflar.	34
Şekil 5.11. Döner fırının içi.....	34
Şekil 5.12. Döner fırın cüruf çıktısı.	35
Şekil 5.13. Toz formda çinko oksit.	36
Şekil 5.14. Makine öğrenmesi yöntemleri	37
Şekil 5.15. SVM çalışma görseli.....	39
Şekil 5.16. DT çalışma şeması	40
Şekil 5.17. RF algoritması.....	41
Şekil 5.18. Döner fırın cüruf zonu dış sac sıcaklığı.	44
Şekil 5.19. EAF tozu numunesi alımı.	44
Şekil 5.20. Döner fırın besleme potası.....	45
Şekil 5.21. Waelz prosesi döner fırın bölgeleri.....	46
Şekil 5.22. Toz odası ünitesi.	46
Şekil 5.23. EAF tozu numunesi.	47

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.24. Cüruf numunesi alımı.	47
Şekil 5.25. Öğütme işlemleri.....	48
Şekil 5.26. Tartım işlemi.....	48
Şekil 5.27. Eritiş cihazı.	48
Şekil 5.28. ROC eğrisi	52
Şekil 5.29. AUC alanı	53
Şekil 6.1. K-fold 10 değeri için sınıflandırma performans karşılaştırması.....	54
Şekil 6.2. K-fold 2 değeri için sınıflandırma performans karşılaştırması.....	56
Şekil 6.3. ROC eğrisi DT modeli.....	57
Şekil 6.4. ROC eğrisi NB modeli.....	57
Şekil 6.5. ROC eğrisi RF modeli.	58
Şekil 6.6. ROC eğrisi SVM modeli.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. EAF tozunun kimyasal bileşimi.....	5
Çizelge 3.1. Çinko elementinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	13
Çizelge 3.3. Ülkelere göre çinko rezerv dağılımları	15
Çizelge 3.4. Türkiye’de bulunan kurşun-çinko yatakları.....	15
Çizelge 3.5. Çinko üretimi yapan bazı firmalar.....	16
Çizelge 4.1. Çinko kazanımında kullanılan hidrometalurjik prosesler.....	24
Çizelge 5.1. Avrupa ülkelerinde Waelz prosesi kullanan bazı firmalar.....	27
Çizelge 5.2. EAF tozu kimyasal analizi.....	30
Çizelge 5.3. Cüruf kimyasal analizi.....	35
Çizelge 5.4. Yapay zekâ teknolojileri.....	37
Çizelge 5.5. Doğrusal regresyon.....	42
Çizelge 5.6. Veri Seti.....	49
Çizelge 5.7. Hiperparametreler.....	50
Çizelge 5.8. Karmaşıklık matrisi.....	51
Çizelge 6.1. Sonuçlar.....	55
Çizelge 6.2. Regresyon veri seti.....	60
Çizelge 6.3. Çoklu regresyon analizi.....	61
Çizelge 6.4. Çoklu regresyon Anova analizi.....	61
Çizelge 6.5. Çoklu regresyon kesişim analizi.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- d : Yoğunluk (g/cm^3)
 k_f : Karın ısı iletim kat sayısı (W/mK)
Mr : Mol (g/mol)
T : Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

KISALTMALAR

- ABD : Amerika Birleşik Devletleri
 Al_2O_3 : Alümina
ANOVA : Analysis of Variance (varyans analizi)
AUC : Area Under the Curve (alıcı çalışma karakteristikleri)
C : Karbon
CaO : Kalsiyumoksit
CdO : Kadmiyumoksit
Cl : Klor
CoO : Kobaltoksit
CO : Karbonmonoksit
 CO_2 : Karbondioksit
 Cr_2O_3 : Kromyumtrioksit
Cu : Bakır
CuO : Bakıroksit
DT : Decision Tree (karar ağacı)
EAF : Elektrik Ark Fırını
F : Flor
Fe : Demir
FeO : Demiroksit

Fe ₂ O ₃	: Demiroksit
FN	: False Negative (yanlış negatif)
FP	: False Positive (yanlış pozitif)
FPR	: False Positive Rate (yanlış pozitif oran)
g	: Gram
GHG	: Greenhouse Gases (sera gazları)
H	: Entalpi
H ₂ O	: Su
kg	: Kilogram
kJ	: Kilojoule
K ₂ O	: Potasyumoksit
LME	: London Metal Exchange (Londra metal borsası)
LOI	: Limiting Oksijen Index (limit oksijen indeksi)
MgO	: Magnezyumoksit
MJ	: Megajoule
mm	: Milimetre
MnO	: Mangandioksit
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Na ₂ O	: Sodyumoksit
NaOH	: Sodyumhidroksit
NB	: Naive Bayes
PbO	: Kurşunoksit
PH	: Potentia Hydrogenii (potansiyel hidrojen)
RF	: Random Forest (rastgele orman)
ROC	: Receiver Operating Characteristic (alıcı işlem karakteristikleri)
rpm	: Revolutions per minute (devir sayısı)
S	: Kükürt
SiO ₂	: Silisyumdioksit
SO ₃	: Kükürttrioksit
SVM	: Support Vector Machine (destek vektör makineleri)
TN	: True Negative (doğru negatif)
TP	: True Positive (doğru pozitif)
TPR	: True Positive Rate (doğru pozitif oran)

Zn	: Çinko
ZnCO ₃	: Çinkokarbonat (smitsonit)
Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆	: Hidrozinkit
ZnO	: Çinkooksit (zinkit)
ZnS	: Çinkosülfür (sfalerit)
Zn ₂ [SiO ₄]	: Willemit
Zn ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ HO	: Hemimorfit
ZTT	: Zero Thermal Throttling (sıfır termal kısma)
XRF	: X-Işınları Floresans Spektrometresi

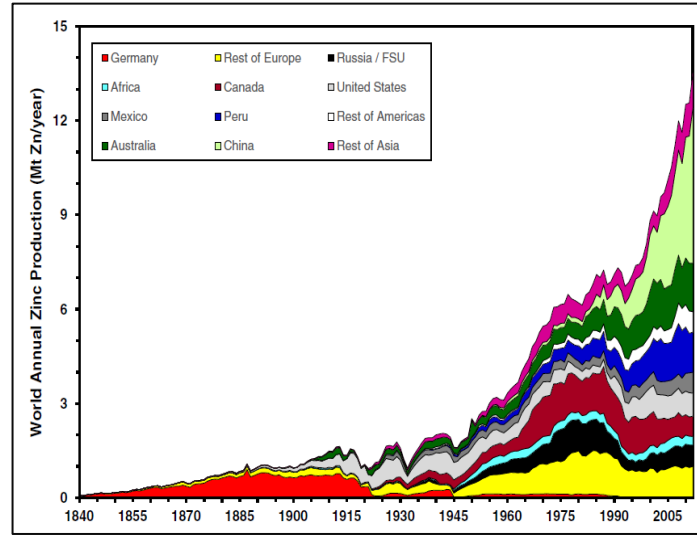
BÖLÜM 1

GİRİŞ

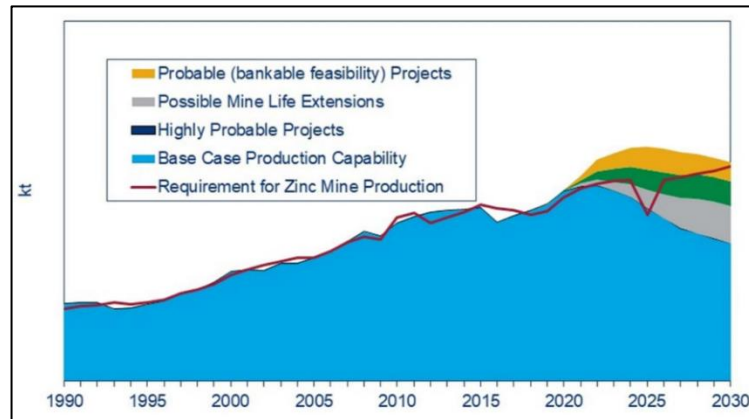
Metallerin dünya genelinde çıkarılması, modern toplumun temelini oluşturan bir dizi mal ve hizmetin üretimine hizmet etmektedir. Bu uygulama, Bronz Çağı'ndan günümüze kadar insanlığın hayatta kalması için kritik bir öneme sahiptir. Ancak, zaman içinde metallerin üretimi giderek genişleyen bir yelpazede, insanlığın gelişimi için temel bir unsur haline gelmiştir. 17. yüzyılda Asya'da saf çinkonun rafine edilmesine dair sırların keşfedilmesi, 18. yüzyılın ortalarından itibaren Avrupa'da çinko madenciliği ve üretiminde bir büyüme dönemini başlattı. Bu artışa takiben, ABD'de de çinko üretimi hızla artış gösterdi. 20. yüzyılın ilerleyen dönemlerinde, çinko daha yeni kullanım alanlarında ortaya çıktı. Bu gelişmeler, metallerin sadece temel yapı malzemeleri olmaktan çıkıp, modern endüstri ve teknolojinin birçok yönünü etkileyen çok yönlü bir kaynak haline gelmesini sağlamıştır. Çinkonun ülkeye ve bölgeye göre tarihsel üretimi Şekil 1.1'de görülmektedir [1]. Çinko, sırasıyla 420°C ve 907°C düşük ergime ve kaynama noktasına sahip gümüş mavimsi gri bir metaldir. Çinko normal sıcaklıkta kırılgan olmasına rağmen 100°C'de şekillendirilebilir ve kolaylıkla haddelenebilir. Normalde kırılgan formda bulunur, ısıtıldığında dövülebilir bir metale dönüşür. Çinko, küresel olarak demir, alüminyum ve bakırdan sonra en çok kullanılan demir dışı metallerde üçüncü metal, en çok kullanılan dördüncü metaldir. En yaygın çinko minerali, çinko blende (zinc blende) olarak da bilinen sfalerittir (sphalerite). Bu mineral, hidrotermal çözültiden saf çinko sülfür (zinc sulphide) olarak kristalleşir ve şu anda çıkarılan çinko yataklarının neredeyse tamamında bulunur. Çinko genellikle kurşun, bakır, gümüş ve diğer metallerle birlikte çıkarılır [2].

Çinkonun belirgin korozyon direnci özellikleri vardır, bu da onu çelik kaplamada (galvanizleme) paslanmayı önlemek için önemli bir unsur haline getirir. Ayrıca alaşım oluşturmak için diğer metallerle birleşebilir. Çinko, alüminyumun birleşimiyle basınçlı dökümde kullanılan alaşımı üretmek için kullanılabilir. Basınçlı döküm,

yüksek basınç uygulanarak erimiş metalin kalıp boşluğuna zorlanması işlemidir [3]. Küresel pazarlardaki çinko talebi, galvanizleme çelik ve demirin (%50), alaşımların (%17), pirinç ve bronzun (%17), yarı imalatçıların (%6), kimyasalların (%6) ve çeşitli sektörlerdeki diğer uygulamalarda (%4) kullanımını içermektedir [2]. Mevcut kullanım hızıyla 2050 yılına kadar çinkonun talebi bugünkü talebin 2,7 katına ulaşacağı tahmin edilmektedir [3]. Şekil 1.2’de gelecekteki çinko madeni üretim kaynakları görülmektedir.



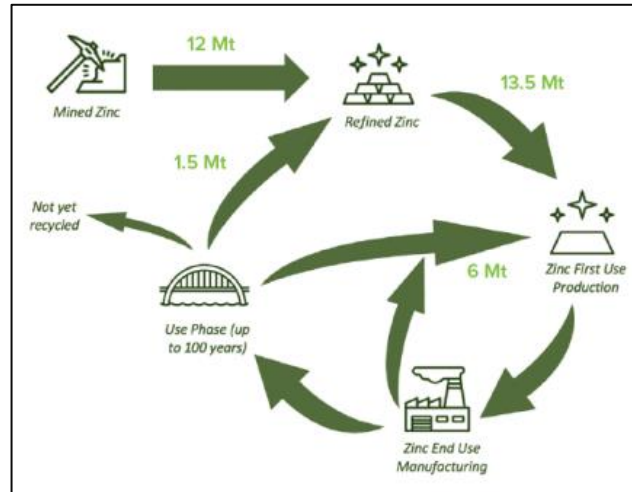
Şekil 1.1. Ülkeye veya bölgeye göre tarihsel çinko üretimi [1].



Şekil 1.2. Gelecekteki çinko madeni üretim kaynakları [4].

2016-2017 döneminde dünya genelinde genel çinko tüketimi yaklaşık %2 oranında bir artış göstermiştir. Ancak, bölgeden bölgeye önemli farklılıklar mevcuttur. Hindistan, bu dönemde en yüksek büyüme oranına sahip olup neredeyse %4'lük bir artış

göstermiştir. Çin'de bu oran yaklaşık %3, Avrupa, ABD ve Güney Kore'de ise %1,7 ila %2,5 aralığındadır [5]. 2020 yılında küresel rafine çinko üretimi 13,8 milyon tona çıkmıştır [6]. Çinko üretimi ağırlıklı olarak, birincil kaynak madenciliğine dayanmaktadır. %62 çinko içeren bakır-kurşun-çinko-gümüş-altın cevherinden birincil madencilik yoluyla 1 kg çinko üretimi, 23 MJ fosil kaynağı tüketmekte ve 0,8 kg CO₂ eşdeğeri kadar küresel ısınma potansiyeline (100 yıl) neden olmaktadır. Bu; yılda 10,64 milyon ton CO₂ emisyonuna veya küresel CO₂ emisyonlarının %0,03'üne eşdeğerdur [3]. Madencilik ve eritme aşamalarındaki elektrik tüketimi, sera gazı (GHG) emisyonlarının ana etkenidir [6]. Şekil 1.3'de görüldüğü gibi, 2019 yılında 6 milyon ton çinko alaşımının (pirinç, saç ve basınçlı döküm) ve endüstriyel atıkların rafine edilmeye (yeniden ergitmeye) gerek kalmadan geri dönüştürülmesiyle, toplam çinko kullanımı 19,5 milyon tona yükselmiştir. Bu, yıllık genel çinko talebini karşılamak için tek bir malzeme kaynağının kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bu dönüşüm ve geri kazanım süreçleri, sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Geri dönüştürme pratikleri, çinko talebinin büyük bir kısmını karşılayarak, ham çinko madenciliği ihtiyacını azaltabilir ve doğal kaynakların daha verimli kullanımına katkıda bulunabilir [7].



Şekil 1.3. 2019 yılı çinko kullanımı [7].

CO₂ emisyonlarını 2050 yılına kadar mevcut seviyesinden %80 oranında azaltmak (yani emisyonu 2,13 milyon ton CO₂ eşdeğerinin altına düşürmek) için artan talebin, çinkonun atıklardan yani ikincil kaynaklardan geri kazanılmasıyla karşılanması gerekir. İkincil kaynaklardan çinkonun geri kazanılması mevcut döngüsel ekonomi

bağlamında önemlidir. Küresel düzeyde çinko üretimi ve tüketimi artmakta ve cevherden elde edilen çinkonun birincil kaynakları hızla tükenmektedir. Bu nedenle, çinkonun ikincil kaynaklardan etkili bir şekilde çıkarılması, bir dizi avantajı beraberinde getirebilir. Bu avantajlar arasında, ham kaynaklarda ve birincil madencilik süreçlerinde enerji sağlamak için kullanılan fosil kaynaklarda tasarruf, kaynak verimliliğinde artış, depolama alanlarında ve çöplüklerde kaynak kaybının azaltılması, çinko veya herhangi bir metalin çöplüğe kaybedilmesinin önlenmesi, atık arıtma, çevresel ve sağlık etkilerinin hafifletilmesi ve mevcut altyapının ekonomik performansının artırılması bulunmaktadır. İkincil kaynak olan atıktan çinko kaynakları; bitmiş pillerdeki çinko, e-atıktaki çinko, atık sudaki çinko, inşaat ve yıkım atıklarındaki çinko, hurda çelik üretim tozundan elde edilen çinko, belediye atıklarından çinko olarak sıralanabilir [3].

Hurdaların geri dönüşümü için elektrikli ark fırını yöntemi (EAF) kullanılır. Ancak bu atıkların ve demir yan ürünlerinin EAF kullanılarak geri dönüştürülmesi, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Ajansı'na göre tehlikeli katı atık olarak nitelendirilen toz parçacıklarının emisyonuyla ilişkilidir [8]. Kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle EAF tozu, Avrupa Atık Kataloğuna göre, tehlikeli maddelerin eşik konsantrasyonunun üzerinde mevcut olduğu durumlarda tehlikeli atık olarak sınıflandırılmıştır [9]. EAF tozu, çelik hurdasının eritilmesi sırasında ağır metallerin ve silika parçacıklarının buharlaşmasından üretilir [8]. Hurdanın eritilmesi sırasında uçucu bileşenler dumanla uzaklaştırılır ve atık gaz temizleme sisteminde partikül madde ile birlikte toplanır. Metal eritme işlemi sırasında, EAF 1600°C veya daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilir ve demir, çinko, kurşun da dahil olmak üzere şarjın birçok bileşeni buharlaşarak gaz fazına girer. Buhar soğutulup toplandığında büyük miktarda toz oluşur [9]. Bu toz, çelik tonu başına 10-20 kg oranında üretilmekte olup, bu da dünya çapında her yıl 5-7 milyon ton kadar yüksek toz üretildiği anlamına gelebilir. Bununla birlikte, bu toz, ağırlıkça %20-30 oranında çinko oksit içeren çinko gibi makul miktarda ağır metal içerir. Bu nedenle çinkonun bu kadar yüksek bir yüzdeyle geri kazanılması, düşük üretim maliyeti göz önüne alındığında cazip bir seçenektir. EAF tozundan çinkonun çıkarılması için iki ana teknolojik süreç kullanılmaktadır; pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler. Pirometalurjik yöntem, büyük enerji tüketimi ve düşük ticari değeri olan çinko oksitler üretmek için indirgeyicilere ihtiyaç duyması nedeniyle

maliyetlidir. Hidrometalurjik yöntem ise proses ekonomisi ve çevre açısından pirometalurjik yöntemle göre daha avantajlıdır [8]. EAF tozunun kimyasal bileşimi esas olarak işlenen çelik hurdasının kalitesine ve üretilen çeliğin türüne bağlıdır. Çizelge 1.1’de, EAF tozunun kimyasal bileşimi görülmektedir.

Çizelge 1.1. EAF tozunun kimyasal bileşimi [9].

Oksitler	Kütlece (%)
SiO ₂	1,145
Al ₂ O ₃	0,519
Fe ₂ O ₃	24,780
CaO	18,600
MgO	3,949
K ₂ O	1,804
Na ₂ O	2,440
SO ₃	3,214
Cr ₂ O ₃	0,194
PbO	6,016
ZnO	25,290
MnO	2,452
CoO	0,240
CuO	0,454
Cl	3,622
LOI	6,450

Demir ve çelik endüstrisi, dünya çapında ekonomik ve endüstriyel açıdan hayati bir sektördür. Bu endüstrinin temel bileşenlerinden biri olan Elektrik Ark Fırınları (EAF), demir ve çelik üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu fırınlar, çelik üretiminde hurda metalin eritilmesi için kullanılır ve çinko gibi değerli metallerin geri kazanımı için potansiyel bir kaynak sunar.

Bu çalışma, döner (dönel) fırınlarda Waelz prosesi ile gerçekleşen çinko geri kazanım süreçlerinin derinlemesine incelenmesi; sınıflandırma ve regresyon analizi yöntemleri aracılığıyla bu süreçlerin iyileştirilmesine yönelik bilimsel bir katkı sağlama amacını taşımaktadır. Çalışma, iki farklı süreç üzerinden ilerlemiştir. İlk süreçte Waelz prosesi ile çinko geri kazanımı yapılmış ve denetimli makine öğrenmesi teknikleri kullanarak cürufta ki çinko kalitesini sınıflandırmak, doğru kalite tayini yapabilmek için Destek vektör makineleri (SVM), Karar ağacı (DT), Rastgele orman (RF) ve Naive Bayes

(NB) makine öğrenmesi modelleri değerlendirilmiştir. İkinci süreçte ise cüruf miktarına etki eden faktörleri belirlemek için çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, cürufta çinko geri kazanım kalitesinin belirlenmesinde etkili makine öğrenmesi modelleri geliştirildiğini ve çoklu doğrusal regresyon analizi ile cüruf miktarını etkileyen faktörlerin belirlendiğini göstermektedir.

Sınıflandırma ve regresyon analizleri için gerekli veriler, Waelz prosesi hammaddelerinin ve cüruf numunelerinin kimyasal analizleri yoluyla elde edilmiş ve veri seti haline getirilmiştir. Bu veriler sınıflandırma yapabilmek için uzman tarafından etiketlenmiştir. Cürufta çinko kalitesinin en doğru performansta sınıflandırılması için SVM, DT, RF ve NB modelleri kullanılmıştır. Modellerin doğru performansını sağlamak için çapraz doğrulama yöntemleri kullanılmış ve hiperparametre ayarları yeniden düzenlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde cürufta çinko kalitesini %99'dan daha yüksek sınıflandırma performansı ile DT modeli sağlamıştır. Diğer modeller de yakın sınıflandırma performansı göstermişlerdir.

Regresyon analizleri ile EAF tozu miktarı, EAF tozu içindeki demir oranı, kömür ve kireç miktarları ile cüruf miktarı arasında anlamlı bir ilişki gözlenmiştir. Cüruf miktarı üzerinde en etkili kalemin EAF tozu miktarı olduğu ortaya konmuştur.

Bu tez çalışması yedi ayrı bölümde incelenmiştir. İlk bölümde çinko elementinin kısaca tarihçesine değinilmiş, günümüzde kullanım oranı ve önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde ise çinko geri kazanımı ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak yapılan genel akademik çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, çinko elementi geniş kapsamlı ele alınmış, fiziksel ve kimyasal özellikleri, cevher formları, ülkemizde ve dünya genelinde rezerv miktarları ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde çinko üretim yöntemleri iki ana başlık halinde incelenmiş ve bu yöntemler detaylandırılmıştır. Çalışmanın beşinci bölümünde ilk etapta ikincil kaynaklardan çinko geri kazanımında en yaygın yöntemlerden biri olan Waelz prosesi, bu proseste kullanılan hammaddeler, proses çıktıları, kimyasal süreçleri incelenmiştir. İkinci etapta makine öğrenmesi yöntemleri, tarihçeleri ve yöntemlerde kullanılan

modellerin çalışma şekillerine değinilmiştir. Üçüncü etapta ise, Waelz prosesi ve makine öğrenmesi yöntemlerinin entegrasyonuna dair deneysel ortam ve süreçler irdelenmiştir. Bu incelemeler neticesinde veri setinin oluşması için gerekli numune, numunenin hazırlanması ve analizlerinin yapılmasına ek olarak sınıflandırma modellerinin doğru performansı sağlayabilmeleri için adımlar belirlenmiştir. Altıncı bölümde veri seti ve modellerin entegrasyonu neticesinde sınıflandırma performansları ve regresyon analizleri detaylandırılmış ve sonuçlandırılmıştır. Çalışmanın yedinci ve aynı zamanda son bölümünde elde edilen sonuçlara ve tavsiyelere yer verilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

EAF tozundan döner fırınlarda çinko geri kazanım yöntemi, Waelz prosesi adıyla bilinmektedir ve dünya genelinde kullanılan bir prosestir. Bu proses sonucunda EAF tozundan çinko geri kazanımı yapılır ve ek olarak cüruf çıktısı elde edilir. Elde edilen cüruf ve cüruf içindeki çinkonun analizlerinin sınıflandırılması, regresyon analizlerinin yapılması ile ilgili makine öğrenmesi yöntemine başvurulması gerekmektedir. Benzer çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Yurten, çalışmasında Waelz prosesinin günümüzde çinkonun ikincil kaynaklardan veya hammadde artıklarından, baca tozlarından ve çinko içeren her türlü atık malzemenin kazanılması amacıyla uygulandığını belirtmiştir. Ayrıca, Waelz prosesinin çinko liç artıklarından çinko kazanılması için yeni yöntemler geliştirilinceye kadar bir süre boyunca kullanıldığına da değinmiştir [10].

Özel, çalışmasında Waelz prosesi için kullanılan döner fırınların ortalama 70 metre uzunluğunda ve 4,5 metre çapında olduğunu belirtmiştir. Döner fırınlarda, şarj malzemesi ve indirgeyiciler olarak adlandırdığı kok ve kireç hammaddeleri arasında bir reaksiyon gerçekleşerek tüm çinko bileşiklerinin tamamen ayrıştığına da değinmiştir. Bu süreçte, şarjdaki metallerin uçucu hale geldiğini ve ortaya çıkan metal buharlarının fırının soğutucularında hava ile oksitlendiğini ifade etmiştir [11].

Mombelli ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, EAF tozlarının, yüksek oranda ağır metal içermeleri nedeniyle tehlikeli atık olarak kabul edildiğini belirtmişlerdir. Waelz prosesini ise, bu EAF tozlarının içinde bulunan çinkonun neredeyse %90'ının kazanılmasında kapasite ve kalite açısından en verimli yöntemlerden biri olarak tanımlamışlardır [12].

Katarina ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada çinko geri kazanım tekniklerinin çinko atıklarının metalik karakterine göre farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu geri kazanım tekniklerini; pirometalurjik, hidrometalurjik veya bunların kombinasyonu olarak üç sınıfa ayırmışlardır. Ayrıca, çinko artıklarındaki çinko içeriğinin düşük olduğu durumlarda, hidrometalurjik tekniklerin diğer yöntemlere göre daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir [13].

Strohmeier ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, EAF tozunun içeriğinde %20 oranından fazla bulunan ağır metallerin (örneğin çinko ve kurşun) çöpe atılmasının, birçok ülkede hem hukuki hem de ekonomik nedenlerle mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Bu ciddi nedenlerden dolayı, EAF tozunun Waelz prosesi yöntemi ile yaklaşık 1200°C'de ısıtılan bir döner fırında işlenebileceğini ifade etmişlerdir. Bu süreç sonucunda döner fırından çıkan cürufun ise yapı agregası olarak kullanılabilceği sonucuna varmışlardır [14].

Neto ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, EAF tozunun içeriğinde krom, kurşun, kadmiyum ve çinko gibi zararlı maddeler bulunduğunu belirtmişlerdir. EAF tozunun içindeki çinkonun geri kazanımının önemli olduğunu vurgulayarak, bu amaçla Waelz prosesi döner fırın modelini geliştirmeyi ve bir endüstriyel atık su arıtma tesisinden gelen çamurun, EAF tozuyla birlikte işlenmesinin etkisini değerlendirmişlerdir. Yaptıkları değerlendirme sonucunda, fırına doğrudan çamur şarjıyla maksimum %89 çinko geri kazanım oranı elde ettiklerini belirtmişlerdir [15].

Buitrago ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada dünya çapında üretilen toplam 7,5 milyon ton EAF tozunun yalnızca %45'inin geri dönüştürüldüğünün tahmin edildiğini belirtmişlerdir. EAF tozu içindeki çinkonun geri kazanımını optimize etmek için Waelz prosesinin termodinamiğini incelemişlerdir. Kinetik parametreler, kömür ve petrol koku türleri, süre (20 – 120 dakika) ve sıcaklık (450°C – 1150°C) gibi ana proses faktörlerini içeren on deneyden oluşan bir seri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, fırında indirgeyici olarak kullanılan odun kömürü içeren küçük peletlerin (10 mm), petrol koku ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir sıkıştırma ve uçucu maddelerin daha yüksek geri kazanımını sunduğu ortaya konmuştur [16].

Mahesh, çalışmasında makine öğrenimi kavramını, bilgisayar sistemlerinin bir işlemi gerçekleştirmek için kullandığı algoritmaların, incelenmesi ve bilimsel olarak açıklanması olarak tanımlamıştır. Çalışmasında makine öğrenimi kavramları ve uygulamaları üzerine incelemeler yapmıştır. Örneğin, web arama motorunun her kullanıldığında nasıl sıralandığını öğrenen bir öğrenme algoritması olduğunu belirtmiştir. Bu durumun avantajlarından birinin, benzer algoritmaların ne yapacağını öğrendikten sonra otomatik olarak öğrendikleri işi yapabilmesi olduğunu vurgulamıştır [17].

Kızılkaya ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada yapay zekâyı, bilgisayar sistemlerinin insanların düşünce yöntemlerini taklit ederek problemlere çözüm üretebilme yeteneği olarak tanımlamışlardır. Makine öğrenmesini ise yapay zekânın bir alt dalı olarak kategorize etmişler ve görevlerin öğrenilmesini, otomatik hesaplama yöntemlerini kapsayan bir süreç olarak ele almışlardır. Yaptıkları bu çalışmada, sınıflandırma amacıyla kullanılan çeşitli makine öğrenmesi modellerinin performanslarını karşılaştırmışlar ve elde edilen gerçek verileri makine öğrenmesi algoritmaları ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmada kesinlik, doğruluk, duyarlılık gibi kriterler baz alınmış ve çalışmalarının sonucunda en iyi sınıflandırmayı yapan algoritmanın lojistik regresyon olduğunu, ikinci en iyi algoritmanın ise NB olduğunu ortaya çıkarmışlardır [18].

Calayır ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada bakım kavramını irdelemiş ve bu kavramı şirketlerin kilit bir işletme fonksiyonu olarak tanımlamışlardır. Bakımla ilgili çalışma amaçlarını arızaların önceden tahmin edilebilmesi, üretimde kaybın engellenmesi, maliyetlerin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması gibi kalemlerle açıklamışlardır. Makine öğrenmesi yöntemlerinden biri olan denetimli öğrenme tekniğini kullanarak savunma sanayi firmasındaki kimyasal boya makinesinde bakım planlaması tahmini yapmışlardır [19].

Ceyhan ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada belirttikleri döküm fabrikasındaki makinede, kestirimci bakım uygulamasını gerçekleştirebilmek için veri toplamışlardır. Toplanan verilere, makine öğrenmesi yöntemlerinden temel bileşen ve rastgele orman

analizleri uygulanmıştır. Bu yöntemlerin uygulanması sonucunda bakım zamanı tahminleri için %85,17 oranında başarı elde edildiği ortaya konmuştur [20].

Köprü, yaptığı çalışmada, bir demir çelik tesisinden alınan titreşim, akım ve motor devir hızı verilerini kullanarak arıza tahmini yapmıştır. Dört farklı titreşim verisi, akım verisi ve devir verisi girdi parametreleri olarak kullanılmış, çıktı olarak ise sadece "arıza var" ve "arıza yok" değerleri verilmiştir. R yazılım dili kullanılarak geliştirilen modelde, DT algoritmasının SVM algoritmasına göre daha yüksek doğruluk oranı sağladığı belirtilmiştir [21].

Kırat ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ray yüzey kusurlarını içeren etiketsiz görüntü veri seti kullanılmış, Vgg16 ve MobileNetV3 Small ağları eğitilmiştir. Bu ağlar, denetimsiz öğrenme ile sağlam rayların özelliklerini öğrenmiş ve test verilerindeki kusurları tespit etmek için kullanılmıştır. Vgg16'nın sınıflandırma başarısı %98 iken, MobileNetV3 Small'ın başarısı %96 olarak belirlenmiştir [22].

Janiesch ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada yapay zekâ, makine öğrenimi ve derin öğrenme konularına genel bir bakış sağlamışlardır. Bu terimler arasında ayırım yapılmış; makine öğrenimi ve derin öğrenme ile otomatik model oluşturma sürecini açıklamışlardır [23].

BÖLÜM 3

ÇİNKO

Çinko elementi, demir dışı kullanım göz önüne alındığında bakır, demir ve alüminyumdan sonra en çok kullanılan dördüncü metaldir. Periyodik tabloda geçiş elementi olarak bilinmektedir. İlk olarak milattan önce 2000'li yıllarda Çinliler ve Romalılar tarafından alaşım malzemesi olarak kullanılan çinko, tarih boyunca farklı kültürlerde ve medeniyetlerde önemli bir rol oynamıştır. Bilinen en eski çinko arkeolojik kalıntısı, Romanya'nın Transilvanya bölgesindeki Doroseh şehrindeki prehistorik Dacian yerleşim merkezinde bulunmuştur. Bu buluntu, çinkonun insanlık tarihindeki önemini ve kullanımının eski dönemlere kadar uzandığını göstermektedir [24]. Antik çağlarda hem kullanım hem de üretim şekli bilinmediği, rengi mavimsi gri olduğu ve gümüşe benzediği için halk adı ile sahte gümüş olarak adlandırılmıştır. Önemli düşük kaynama sıcaklığı (907°C) dikkat çekicidir çünkü bu sıcaklık değeri özellikle pirometalurjik metal üretiminde çok belirleyici bir etkendir [25]. Çizelge 3.1'de, hayatımızda çok önemli bir yere sahip olan çinko elementinin bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

3.1. ÇİNKO CEVHERLERİ

Çinko elementi doğada genellikle oksitli, sülfürlü, karbonatlı ve silikatlı cevherleri ile bulunur. Sülfürlü cevherlerine sfalerit (ZnS), oksitli cevherlerine zinkit (ZnO), karbonatlı cevherlerine smitsonit (ZnCO_3) ile hidrozinkit ($\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$) ve silikatlı cevherlerine de willemit (Zn_2SiO_4) ve hemimorfit ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\text{HO}$) örnek olarak verilebilir. Çizelge 3.2'de, çok sayıda çinko cevheri olmasına rağmen bunlar arasında en bilinenleri ve ticari öneme sahip olanları verilmiştir [26].

Çizelge 3.1. Çinko elementinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Simgesi	Zn
Atom ağırlığı	65,4 g/mol
Atom numarası	30
Yoğunluğu	7,14 g/cm ³ ,
Sıvı haldeki yoğunluğu	6,57 g/cm ³
Ergime noktası	420°C
Kaynama noktası	907°C
Değerliği	2
Kristal yapısı	Heksagonal
Görünüş	Mavimsi gri
Isıl iletim katsayısı	116 W/mK

Çizelge 3.2. Çinko elementinin bazı mineralleri.

Çinko Minerali	Kimyasal Bileşimi
Sfalerit	ZnS
Smitsonit	ZnCO ₃
Hemimorfit	Zn ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ HO
Willemit	Zn ₂ SiO ₄
Zinkit	ZnO
Hidrozkinkit	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆

3.1.1. Sfalerit

Sfalerit, sülfür bakımından zengin bazı metal yataklarında çinkonun ana cevheridir. Basit formülü ZnS'dir. Sfalerit, üç ZnS polimorfu arasında açık ara en yaygın olanıdır ve elmasla eşyapılıdır. Tetrahedral olarak koordine edilmiş Zn ve S ile yüz merkezli kübik bir kafes olarak kristalleşmektedir [27].

3.1.2. Smitsonit

Smitsonit, doğal çinko karbonat, kimyasal formülü ZnCO₃ olarak bilinir ve bu mineral altıgendir. Orta büyüklükte iki değerlikli katyonlara sahip bu karbonatlar normalde kalsit yapısında kristalleşmektedir [28].

3.1.3. Hemimorfit

Kimyasal formülü $Zn_4Si_2O_7(OH)_2HO$ olan hemimorfit, çinkonun silikatlı cevherlerinden birisi olarak da bilinmektedir. %54 oranında çinko içerir [26]. Genellikle yuvarlağımsı yapıda cam cilalı, saydam veya yarı saydam bir yapıya sahiptir [29].

3.1.4. Willemite

Çinko silikat mineralidir. Heksagonal kristal sistemine sahiptir. %58,5 oranında çinko içerir [11]. Genellikle renksiz olmakla birlikte bazen yeşilimsi sarı renkler de gözlenebilir ve ultraviyole ışık altında floresan özellik göstermektedir [29].

3.1.5. Zinkit

Çinko elementinin oksitli formuna sahip olan zinkit, %20 oranında çinko içerir [26]. Genellikle toprağımsı görünüştedir ve metamorfik kalkerler içerisinde franklinite, willemite ve kalsit ile birlikte bulunmaktadır [29].

3.2. TÜRKİYE VE DÜNYA'DA ÇİNKO REZERVLERİ

MTA verilerine göre Türkiye'deki çinko metal içerik kaynakları 2,3 milyon ton seviyesindedir. Dünya genelinde ise, tanımlanmış toplam çinko kaynağı 1,9 milyar ton olarak hesaplanmıştır. Küresel ölçekte toplam rezerv miktarı 250 milyon ton seviyesinde olmakla birlikte Avustralya bu noktada %27'lik pay ile birinci sıradadır. 2021 ve 2022 yıllarında dünya genelinde yıllık yaklaşık 13 milyon ton çinko üretilmiş ve bu çinko üretiminde Çin Halk Cumhuriyeti %35'lik pay ile en büyük üretici konumunda yer almıştır [30]. Metalik çinko, diğer değerli metaller gibi LME borsasında işlem görmektedir. Çinko bu borsada beş tonluk işlem büyüklüğündedir [31]. Çizelge 3.3'de ülkelere göre çinko rezerv dağılımları verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ülkelere göre çinko rezerv dağılımları [30].

Ülke	Rezerv Dağılımı
ABD	%4
Avustralya	%27
Bolivya	%2
Kanada	%1
Çin	%17
Hindistan	%3
Kazakistan	%5
Meksika	%9
Peru	%8
Rusya	%9
İsveç	%1
Diğer ülkeler	%14

Türkiye’de çinko yatakları aynı zamanda kurşun da içermektedir. Ülkemizdeki en önemli kurşun-çinko yatağı rezervleri Karadeniz Bölgesi’nde bulunmaktadır. Karadeniz Bölgesini sırasıyla Doğu Anadolu Bölgesi (Zamanti, Keban oksitli cevherleri) ve Batı Anadolu Bölgesi takip etmektedir [25]. Türkiye’de, dünya standartlarına göre düşük kapasiteli ve yüksek maliyetli ocaklar mevcuttur. Bu sebeplerden dolayı Türkiye cevherden çinko üretiminde, diğer dünya ülkeleri kapasitesinde çinko üretememektedir. Türkiye de kurşun-çinko yatakları beş farklı gruba ayrılmaktadır. Çizelge 3.4’de beş farklı kurşun-çinko yatakları gösterilmiştir [29].

Çizelge 3.4. Türkiye’de bulunan kurşun-çinko yatakları.

Kurşun-Çinko Yatakları	
1	Kuzeybatı Anadolu kaontakt-metazomatik ve hidrotermal yataklar.
2	Menderes masifi stratiform yatakları ve masifin çevresindeki sokulumlara bağlı hidrotermal yataklar.
3	Doğu Karadeniz Bölgesi masif sülfid yataklarına bağlı hidrotermal yataklar.
4	Toros Kuşağında yer alan strata-bound damar tipi yataklar.
5	İç Anadolu metamorfik masiflerindeki kontakt-metazomatik yataklar.

Türkiye’de 2022 yılı itibari ile ocaktan doğal halde çıkarılmış çinko üretimi 452.192,45 ton olmuştur. Ülkemizde Balıkesir-Balya ve Rize-Çayeli’nde bulunan madenler çinko üretimi yapılan başlıca işletmelerdir. 2021 yılında Siirt’te kurulan tesis ile ülkemizde metalik çinko üretimine başlanmıştır [30]. Siirt’te kurulan tesis, Türkiye’nin ilk cevherden çinko izabe tesisi olma özelliğini taşımaktadır. Çizelge 3.5’de Dünya genelinde ve ülkemizde çinko üretimi yapan bazı firmalar belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. Çinko üretimi yapan bazı firmalar.

Dünya	Türkiye
Zinc Corp. Of America	Çinkom
Pasine Resources	Deha Tech
Boliden	Marzinc
Cominco Ltd.	Türkmex

Çinko, kolay işlenebilen ve şekillendirilebilen, talebi yüksek olan elementlerden biridir ve bu nedenle kullanım alanı oldukça geniştir. Korozyondan ve diğer etkilerden korunmak amacıyla çelik gibi diğer metallerin galvanizasyonunda, pirinç, nikel gümüş gibi alaşımlı malzemelerin üretiminde, çinko klorür formunda deodorant, ahşap koruyucu, vitamin ve mineral içerikli ilaç yapımında, genellikle otomotiv endüstrisi ve döküm kalıbı yapımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır [32]. Levha ve şerit halindeki çinko, çinko bileşiklerinin üretimi, kuru piller ve kimyasal işlemler için kullanılır. Çinko levha ve şeritleri, endüstriyel üretim süreçlerinde önemli bir rol oynar ve birçok farklı sektörde yaygın olarak tercih edilir [33].

BÖLÜM 4

ÇİNKO ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yerkabuğunda en bol bulunan yirmidördüncü element olan çinko, ana demir dışı metaller arasında yer alır ve son yıllarda kullanım oranı hızla artmıştır. Şu anda demir, alüminyum ve bakırdan sonra en çok tüketilen dördüncü metal konumundadır [34]. Çinko üretim ve geri kazanım prosesleri yönünden çok zengindir. Hem cevherden hem de geri kazanım olarak eldesinde farklı yöntemler mevcuttur ve çinko kırma, öğütme, flotasyon ve çeşitli yöntemlerle cevherlerden ayrılarak üretilebilmektedir. Genellikle ZnS formunda olduğu için öncelikle bu formu, çinkoya indirgemek gerekir. Bu yöntemlerin her ikisinde de ilk aşamada kavurma yapılmaktadır [35]. Çinko cevherleri ticari amaçla büyük üretimler için yeterli miktarda çinko içermeyebilirler. Bundan dolayı önce yoğunlaştırılıp saflıkları arttırılır daha sonra konsantre haline gelen zenginleştirilmiş çinko cevheri kavrulur [36]. Daha sonra kavrulan malzeme karbon vasıtası ile indirgenir ve bu tepkime sonucu metalik çinko elde edilir. Çinko üretimi iki farklı yöntem olan pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir [37].

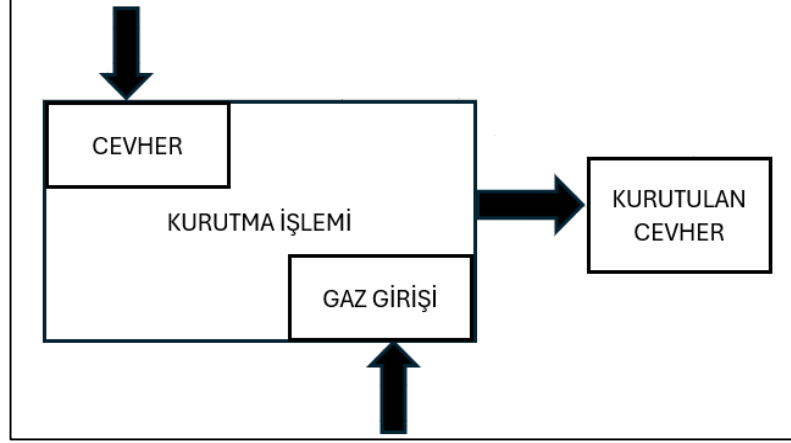
4.1. PİROMETALURJİK YÖNTEMLER

Pirometalurji, değerli metalleri kazanmak için cevhere ısı işlem uygulanmasıdır. Uygulanan ısı işlemlerle malzemenin fiziksel ve kimyasal değişime uğraması sağlanmaktadır. Pirometalurjik yöntemler beş yöntemle gerçekleştirilir; kurutma, kalsinasyon, kavurma, izabe ve rafinasyon.

4.1.1. Kurutma

Bu pirometalurjik yöntemde amaç, cevher içindeki nemi cevherden uzaklaştırmaktır. Bu işlemler genellikle soğuk katı maddeleri sıcak gazlarla veya sıcak havalarla temas

ettirme yöntemiyle yapılır ve nem uçurulur. Kurutma işlemi yapılacak ürünün yönüyle, kurutma gazının veya havanın akış yönü tam ters olmalıdır. Kurutma işlemi, suyun kaynama noktasından daha yüksek bir sıcaklıkta ve atmosfer basıncında gerçekleştirilir (Şekil 4.1) [38].



Şekil 4.1. Kurutma yöntemi hava akış şeması.

4.1.2. Kalsinasyon

Kalsinasyon (kalsine) işleminde cevherin içindeki bileşikler, yüksek sıcaklıklarda parçalanır. Karbonat ve hidratların kalsinasyonu yaygın karşılaşılan reaksiyonlardandır. Özellikle cüruf yapıcı ve refrakter malzeme olarak kullanılan, kireç taşı, magnezyum karbonat ve dolomit gibi toprak alkali karbonatlar işleme tabii tutulmadan kalsine edilirler. Kireç taşları boyutlarına göre farklı kalsinasyon fırınlarında işlem görmektedir. Kireç taşı iri parçaya sahipse düşey, ince taneli ise döner, düzgün ve homojen dağılıma sahip kireç taşları ise akışkan yatak tipi fırınlarda kalsine edilebilmektedir [38].

4.1.3. Kavurma

Kavurma işlemi, bir sonraki işleme uygun olması için cevherdeki veya konsantredeki sülfür bileşiklerinin ısıtılması işlemidir. Burada önemli olan nokta, kavurma işleminin sülfür bileşiklerinin kolayca erimeyeceği bir sıcaklıkta gerçekleştirilmesidir. Kavurma işlemi dört farklı şekilde yapılabilmektedir; oksit kavurması, redüksiyon kavurması, sülfatlaştırma kavurması ve klorlaştırma kavurması [38].

4.1.4. İzabe

Şekil 4.2’de görülen izabe işlemi, pirometalurjik kavurma işleminden sonra, istenen metalin elde edilmesi için gerekli olan reaksiyonların meydana gelmesini sağlar. Cevher, izabe fırınında ısıtılır ve ısının etkisiyle moleküller arası bağ kopar. En az bir metalin sıvı faza geçtiği aşamadır [39].



Şekil 4.2. İzabe işlemine dair görsel [40].

4.1.5. Rafinasyon

Rafinasyon işleminde, metalin safsızlaştırılması gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında önce istenmeyen metaller oksitlenir ve oksitleme sırasında nihai metal de oksitlendiyse redüksiyon işlemi gerçekleştirilir. Ham demirden çelik üretimi, rafinasyon (ateşle tasviye) işlemine örnek olarak gösterilebilir [38].

4.2. PİROMETALURJİK ÇİNKO ÜRETİMİ

Pirometalurjik olarak çinko üretimi, hem cevherden çinko üretimi hem de geri kazanım ile çinko üretimi olarak beş farklı yöntemle yapılmaktadır.

- Cevherden çinko üretimi
 - ◆ Retort prosesi
 - ◆ Şaft fırını prosesi
- Geri kazanım ile çinko üretimi
 - ◆ Waelz prosesi
 - ◆ Laclade prosesi
 - ◆ ZTT ferrolime prosesi

4.2.1. Retort Prosesi

Retort prosesiyle çinko üretimi yalnızca oksidin redüksiyonu değil, aynı zamanda da çinko buharının sıvı hale getirilmesini de içermektedir. Kavurma işlemiyle üretilen çinko oksit, karbonla redüklenir (Eşitlik 4.1). Bu reaksiyon endotermiktir ve yaklaşık 1100°C’de başlar ve 1300°C’de tamamlanır [41]. Sonuç olarak çinko buhar fazında elde edilir.



4.2.2. Şaft Fırını Prosesi

Şaft fırını prosesi, cevherden metal çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir ve özellikle çinko üretiminde yaygın olarak kullanılır. Şaft fırını, yüksek sıcaklıkları elde etmek için C'nin CO₂ ve CO'ya oksidasyonunu kullanır. Bu adımda cevher, fırının üst kısmına eklenir ve aşağı doğru yavaşça kaydırılırken yüksek sıcaklık altında redüklenir. Reaksiyon sırasında, kokun yanmasıyla yüksek miktarda azot oluşur ve metal cevherinin içindeki oksijenle tepkimeye girer. Bu, metalin kısmi basıncını düşürür. Redüksiyon sonucunda oluşan gazlar yoğunlaştırıcıya geçer. Bu aşamada, çinko ve diğer metaller yoğunlaşır ve sıvı halde toplanır. Yoğunlaştırıcıdan çıkan

Çinko, uygun bir sıcaklıkta soğutulur. Bu sıcaklıkta, kurşun gibi diğere metallerin ayrılması kolaylaşır. Çinko ve diğere metallerin ayrılması için yüzeyde yüzme veya metallerin farklı yoğunluklarından yararlanma gibi çeşitli yöntemler kullanılır. Son olarak, saf çinko toplanır ve işlenmek üzere hazırlanır. Bu genellikle bir setin üzerinde yüzme veya benzeri bir yöntemle gerçekleştirilir [41].

4.2.3. Waelz Prosesi

Bu proses günümüzde kullanılan en yaygın çinko geri kazanım proseslerindedir. Döner fırına EAF tozu, kok, antrasit ve kireç şarj edilmesi proses başlar. Yüksek sıcaklıklarda EAF tozu içindeki çinko, gaz fazına geçer. Waelz süreci, Bölüm 5'te daha ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

4.2.4. Laclade Prosesi

Bu proses, Alton, Illinois'te kurulan Elkem kapalı EAF sürecinin başarısız olmasına neden olan faktörlerin ortadan kaldırılarak yenilenmesiyle oluşmuştur [42]. Bu süreçte çinko ile kurşun tozları ve redükleyiciler kapalı bir elektrik fırınına doldurulur. Fırında oksitlerin redüksiyon reaksiyonları gerçekleşir ve gaz fazındaki çinko ile kurşun metalik halde elde edilir. Bu işlem sırasında çinko, püskürtmeli bir gaz tutucuda elde edilir [43].

4.2.5. ZTT Ferrolime Prosesi

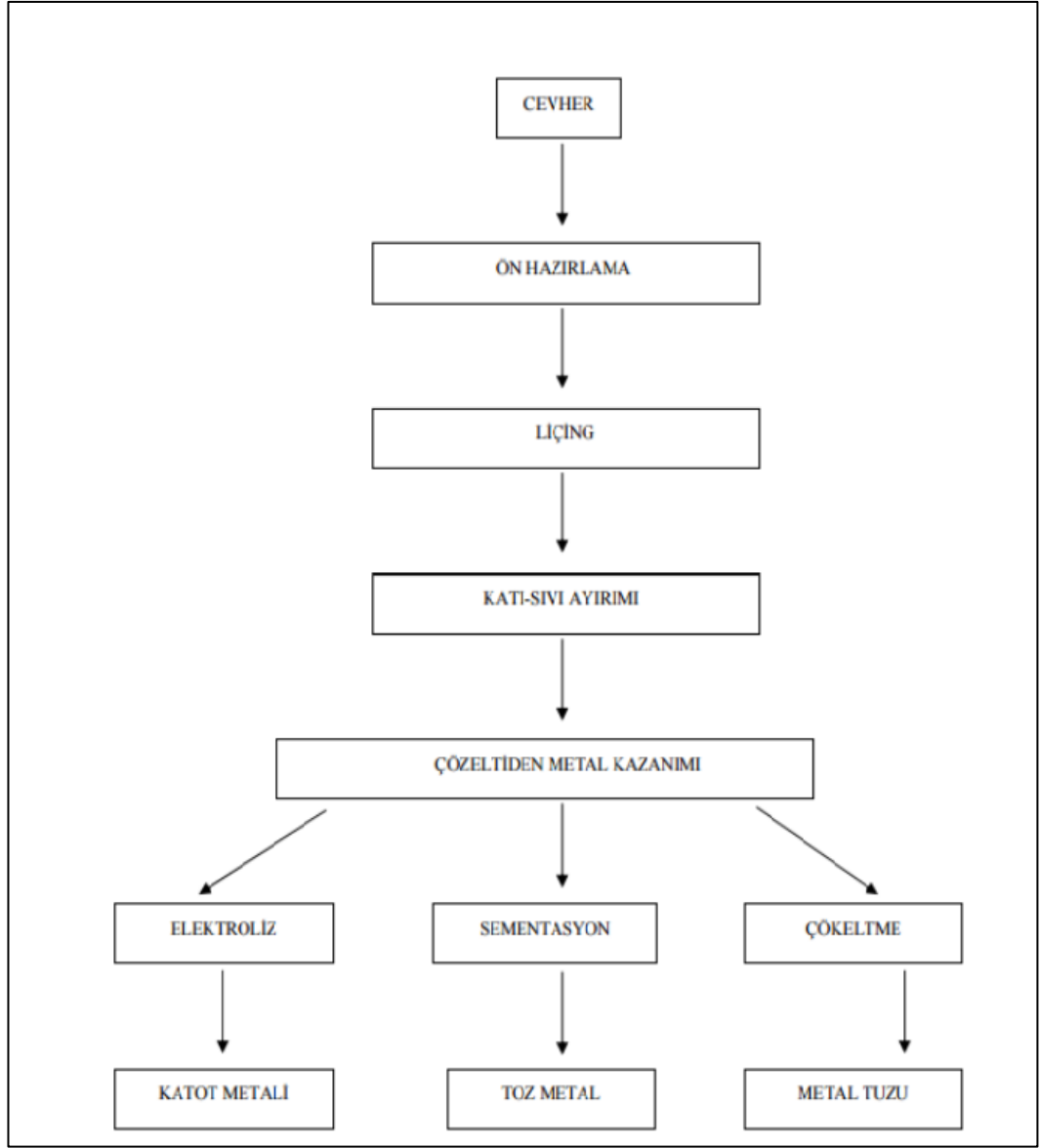
Bu proses, EAF tozlarının önce peletlenmesini ve daha sonra döner yatay bir fırında, içerisindeki çinkoyu redüklemek için kok ve kömürle birlikte reaksiyona sokulmasını içerir. Fırından çıkan duman çinko oksit, kurşun oksit, kadmiyum oksit gibi maddeler içerir ve bu duman, yakıtın daha ileriye taşınmasını engellemek için tutulur. Bu tozlar, çinko oksitin zenginleştirilmesi için yıkanır ve çinko oksit, çinko üreticilerine satılır [44].

4.3. HİDROMETALURJİK YÖNTEMLER

Hidrometalurjik yöntemler, cevherde bulunan değerli mineral bileşiklerinin sulu ortam içinde cevhere uygun çözücü kullanarak içerdiği minerallerin çözeltilmeye alınması ve çeşitli arıtma yöntemleri ile saf metal elde edilmesine dayanır. Modern hidrometalurji, iki önemli prosesin keşfedildiği 1887 yılında doğmuştur. Birinci proses; cevherlerden altın kazanımında kullanılan siyanür liç (liçing) prosesi, ikincisi ise alümina eldesi için uygulanan Bayer Prosesi'dir [45]. Hidrometalurjik yöntemlerin kesin olarak ortaya konulmamış olan avantajlarına rağmen, enerji tüketimini azaltmak için etkili bir çözüm olabileceği düşünülmektedir. Bu yöntemler, düşük tenörlü cevherlerin madende yerinde işlenmesi sırasında az enerji tüketme özelliğine sahiptirler. Bu nedenle, hidrometalurjik yöntemler, enerji tasarrufu sağlamak ve çevresel etkileri azaltmak için tercih edilebilir bir seçenek olarak önerilmektedir [46]. Hidrometalurjik yöntemler genel olarak dört önemli aşamadan oluşmaktadır.

- Cevher numunesi öncelikle işlem görmesi için hazırlanır. Bu aşama genellikle kırma, öğütme ve kurutma gibi fiziksel işlemleri içerir. Ancak bazen kırma ve öğütme işlemine gerek duyulmayabilir.
- İstenilen metalin su, sulu bir çözeltili veya organik çözücüyle seçici olarak genellikle çözeltilmeye alınması olsa da nadiren çözünmez bir artık olarak da bırakılabilmemesi.
- Liç çözeltilisinin çözücü ekstraksiyonu veya sıvı membran yöntemleri ile temizlenip arındırılması ve zenginleştirilmesi.
- Çözeltilmeye alınmış metalin çöktürme veya elektronik kazanım yoluyla çözeltilmeden kazanılması [47].

Şekil 4.3'de hidrometalurjik yöntemlerin detaylı uygulama şeması verilmiştir.



Şekil 4.3. Hidrometalurjik yöntemlerin detaylı uygulama şeması [48].

4.4. HİDROMETALURJİK ÇİNKO ÜRETİMİ

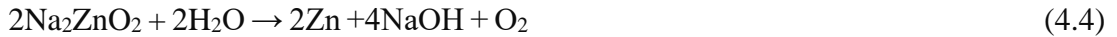
Son zamanlarda, yüksek tenörlü cevherlerin azalması ve elde edilmesinin zorlaşması nedeniyle hurda veya metallardan, metal geri kazanımı önem kazanmıştır. Özellikle EAF'dan elde edilen tozlar, hurda metallerin geri kazanımında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. EAF'dan çevresel olarak kabul edilebilir koşullarda, çinko kazanımı için çeşitli prosesler denenmiştir. Çizelge 4.1'de çinko kazanımında kullanılan hidrometalurjik prosesler belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Çinko kazanımında kullanılan hidrometalurjik prosesler.

Proses Tipi	
1	Kostik soda liç prosesi
2	Amonyum klorür liç prosesi
3	Sülfürik asit liç prosesi
4	Demir nitrat liç prosesi

4.4.1. Kostik Soda Liç Prosesi

Bu alkali süreç, çinko içeren ikincil kaynaklardan çinko geri kazanımı için basit, uygun maliyetli ve çevre dostu bir proses olarak kabul edilmektedir. Kostik soda liç prosesinde; çinko ve kurşun, sodyum hidroksitte ayrı olarak çözünmektedir. Çinko tozu arandıktan sonra liç çözeltisi, sodyum hidroksit üretmek üzere elektroliz edilmektedir [49]. Elektroliz sonucunda çinko, sodyum hidroksit ve oksijen açığa çıkmaktadır. Eşitlik 4.2, 4.3 ve 4.4’de reaksiyonlar belirtilmiştir.



4.4.2. Amonyum Klorür Liç Prosesi

Amonyum klorür çözeltisi kullanılarak çinkonun ikincil kaynaklardan geri kazanılması için Cenim-Lneti ve Ezinex gibi prosesler de geliştirilmiştir. Cenim-Lneti prosesi, sülfür konsantrasyonlarının ve/veya diğer ikincil hammaddelerin işlenmesi için geliştirilmiştir. Bu işlemde EAF tozu, ZnO’yu çözündürmek için suyla yıkandıktan sonra amonyum klorür ile liç edilmektedir. Ezinex prosesi ise İtalya’da yılda 500 ton EAF tozu işleyerek katot çinko üretmek üzere geliştirilmiştir. Bu işlemde 1 saat içinde ve 70-80°C’de çinko çözünmesi için amonyum-sodyum klorür çözeltisi kullanılmaktadır. EAF tozu içerisinde bulunan bakır, kadmiyum, nikel ve kurşun gibi metaller de benzer şekilde reaksiyona girer. Ancak demir oksitler, ferrit ve silika bu

aşamada çözünmez. Liç çözeltilisi saflaştırıldıktan sonra metalik çinko, açık bir hücrede elektrolizle üretilir [49].

4.4.3. Sülfürik Asit Liç Prosesi

EAF tozları ile çinko geri kazanımı için kullanılan bir diğer proses sülfürik asit kullanımını içermektedir. İngiltere'deki Warren Spring Laboratuvarı, %36 çinko içeren EAF tozlarının sülfürik asitle liç edilmesini gerçekleştirmiştir. Bu işlemde, pH 2 seviyesinde %85-90 çinko geri kazanımı elde edilirken, 90°C sıcaklıkta pH 3-4 aralığında %80 çinko geri kazanımı sağlanmıştır. Bu yöntem, çinko geri kazanımı için etkili ve verimli bir çözüm sunmaktadır [49]. Şekil 4.4'de bir çinko geri kazanım fabrikasında ar-ge amaçlı hazırlanan basit bir sülfürik asit liç prosesi deney çözeltilisi görülmektedir. Bu çözeltilide; geri kazanımı yapılan çinko, sülfürik asit ve su belirli oranlarda karıştırılmıştır. Bu deneyde sıcaklık 80°C ve pH 3-3,5 civarında tutulmuştur. Bu deney çözeltilisinde çinko elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.4. Basit sülfürik asit liç prosesi deneyi.

4.4.4. Demir Nitrat Liç Prosesi

Söz konusu proses ile, EAF tozlarındaki çinko ve kurşun gibi değerli metallere geri kazanımı yapılmaktadır. EAF tozları tartılarak ince öğütülmesi amaçlı değirmenlere alınmaktadır. Su ilave edilerek, EAF tozu çamur haline getirilmektedir. Değirmenden çıkan bu çamur, tanklarda su ilave edilerek yıkanmaktadır. Yıkaması yapılan çamur filtre preslerden geçirilmektedir. Filtrasyondan çıkan çamura belirli miktarda su ilave edilmekte ve yoğunluğu ayarlanmaktadır. Liç işlemine Demir III Nitrat ilave edilerek

karıştırılır. Reaksiyon bitiminde çamur tekrar filtre presten geçirilerek çamurun ve metal iyonları içeren sıvının birbirinden ayrılması sağlanır. Çöktürme tankında reaksiyon bittikten sonra çözelti üçüncü filtreye gönderilmektedir. Filtreden çıkan katı çinko hidroksit ve kurşun hidroksit nihai ürün olarak elde edilmektedir [43].

BÖLÜM 5

MATERYAL METOD

Waelz prosesi, düşük çinko tenörlü çelik veya hurda tozlarından çinko geri kazanımı amacıyla geliştirilen ve günümüzde halen kullanılmakta olan bir prosestir. Waelz ismi, Almanca yuvarlanmak (şarj malzemesinin döner fırın içinde) anlamına gelen "Walzen" fiilinden türetilmiştir [50]. 1200°C'de döner fırında gerçekleştirilen proseste, karbon ve silika ilavesi ile kurşun, kadmiyum, çinko gibi metaller gaz fazına geçirilir ve tekrar oksitlenerek filtrelerde tutulur [51]. Waelz prosesi Avrupa, ABD ve Asya ülkelerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Bu proses pirometalurjik yöntemlerle hurda tozundan çinko geri kazanımı olarak da bilinmektedir.

Çizelge 5.1. Avrupa ülkelerinde Waelz prosesi kullanan bazı firmalar.

Ülke	Fabrika
Fransa	Recytech S.A (Lens)
İspanya	Befesa Zinc Aser S.A. (Bilbao)
İtalya	Pontenossa S.p.A (Milano)

Waelz prosesinde, çinko geri kazanım işleminin gerçekleştirildiği Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görülen döner fırın 65 metre boyunda 4,4 metre çapında ve %2 eğimli bir fırındır. Bu fırının boyu, çapı ve eğimi firmadan firmaya göre değişiklik gösterebilmektedir. Waelz prosesi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği için döner fırın iç ve dış saclarının zarar görme ihtimali vardır. Bu durumun önüne geçebilmek için döner fırının iç çeperi, yüksek alüminalı refrakter özellikli tuğlalardan örülmüştür.



Şekil 5.1. Waelz prosesi döner fırını.

5.1. WAE LZ PROSESİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

Waelz prosesinde çinko geri kazanımı yapabilmek için kullanılan hammaddeler; EAF tozu, antrasit kömürü, kok kömürü ve kireçtir. EAF'dan elde edilen tozlar bantlar yardımıyla fırın ön ısıtma zonuna antrasit kömürü, kok kömürü ve kireçle birlikte şarj edilir.



Şekil 5.2. Döner fırın.

5.1.1. EAF Tozu

Elektrikli ark fırınları (EAF) yüksek sıcaklıklarda hurda metalleri işlemek için kullanılan fırınlardır. Hammadde olarak kullanılan hurda, çelikhane içinde oluşan artık malzemelerden, çeşitli yerlerden toplanan çelikten, otomotiv sanayiden, demir artıklarından ve kullanım ömrünü tamamlamış malzemelerden elde edilir. Bu malzemelerin tipi ve kalitesi fark etmez [52]. Bu fırınların temelde çalışma prensibi, elektrik enerjisi vasıtasıyla bir ark oluşturup metallerin ergimesini sağlamaktır. Hurda metaller, fırının içine vinç yardımıyla dökülür ve kapak kapatılır. Bu kapakta fırın içindeki elektrotlar için üç tane boşluk mevcuttur. Elektrotlara verilen akım vasıtasıyla elektrik arkı oluşturulur ve oluşan sıcaklık ile hurda metal ergimeye başlar, ergime işleminin kolay olması için oksijen kullanılır ve bu işlemler sonrasında erimiş metal potaya alınır. Metallerin ergimesi esnasında çinko ile kadmiyum buharlaşır ve toz filtrelerinde tutulur. Tutulan bu tozlar EAF tozu olarak Waelz prosesinin hammaddesini oluşturur (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4). Waelz prosesinde tamamen toz halinde değil kısmen peletlenmiş EAF tozu da kullanılmaktadır. Çizelge 5.2’de kimyasal analizi verilen EAF tozu, peletleme makinelerinde belirli oranda su eklenerek, belirli bir hızda ve sürede karışarak pelet haline getirilir. Peletleme işlemi ve süreci firmadan firmaya göre değişkenlik göstermektedir.



Şekil 5.3. Peletlenmiş EAF tozu.



Şekil 5.4. EAF tozu.

Çizelge 5.2. EAF tozu kimyasal analizi.

EAF Tozu kimyasal analizi (%)											
H₂O	Al₂O₃	CaO	Cu	Cl	F	Fe	MgO	Pb	S	SiO₂	Zn
0,35	1,45	8,59	0,33	7,96	0,13	15,44	1,88	2,49	1,41	4,55	29,79

5.1.2. Antrasit Kömürü

Şekil 5.5’de görülen antrasit kömürü, Amerika’da sert kömür ve Galler’de kaya kömürü şeklinde bilinmektedir. Demir siyahı rengi, yan metalik parlaklığı ile tanınır. Antrasit kömürünün ısı değeri taşkömüründen daha azdır. Çünkü yüksek sıcaklıklara çok hızlı çıkamaz [53]. Waelz prosesinde kullanılmasının sebebi, kimyasal reaksiyonların başlamasında gerekli olan sıcaklığı ve ısıyı sağlamasıdır. Antrasit kömürünün ortalama sabit karbon değeri %82,96 ve ortalama toplam rutubet değeri %7,4’tür. (Belirtilen ortalama sabit karbon ve toplam rutubet değerleri, antrasit kömürü için, akredite laboratuvarından elde edilen değerlerdir.)



Şekil 5.5. Antrasit kömürü.

5.1.3. Kok Kömürü

Kömür, genellikle doğal ortamında sıcaklık ve basınç gibi fiziksel etkiler nedeniyle değişime uğrayan, içeriğinde karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin farklı biçimlerde bulunabildiği fosil esaslı, organik madde içeren bir hammadde kaynağıdır [54]. Waelz prosesinde, piyasada hem antrasit kömürü fiyatında hem de tedarikinde zaman zaman sorunlar yaşanabilmesinden dolayı bazı firmalar antrasit kömürüne ek, kok kömürü de kullanmaktadır. Kok kömürünün ortalama sabit karbon değeri %81,95 ile %83 arasında değişmektedir ve antrasit kömürüne yakın ortalama sabit karbon değerine sahiptir. (Belirtilen ortalama sabit karbon değeri, kok kömürü için akredite laboratuvarından elde edilmiştir.) Şekil 5.6'da kok kömürüne ait görsel mevcuttur.



Şekil 5.6. Kok kömürü.

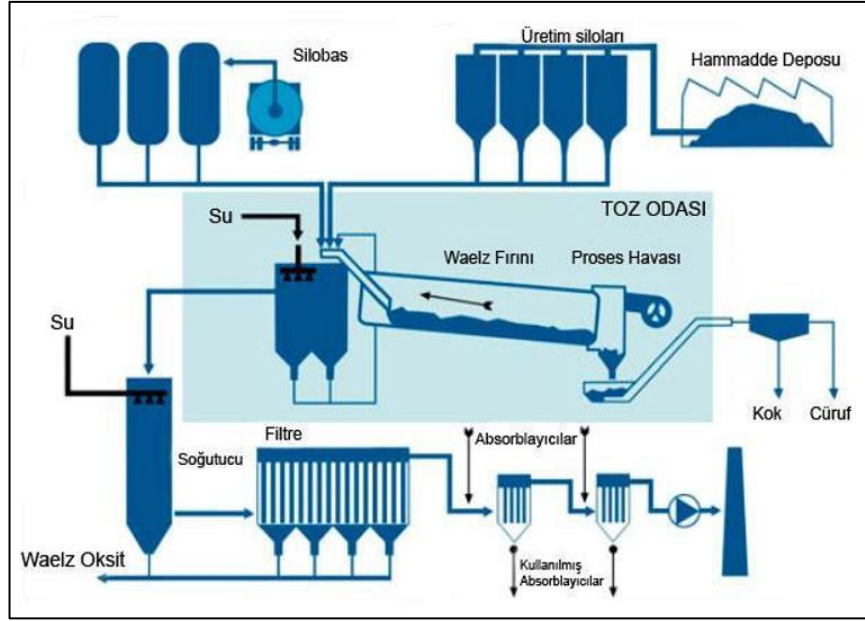
5.1.4. Kireç

Waelz prosesinde kullanılan bir diğer hammadde Şekil 5.7’de görülen ve kimyasal adı kalsiyum oksit olan sönmemiş kireçtir. Waelz prosesinde kireç kullanımının nedenlerinden biri kirecin kükürt, silisyum gibi tercih edilmeyen elementlerin oksidasyona uğrayarak sistemden cüruf ile atılmasını sağlamasıdır, aynı zamanda refrakter özellikli tuğlalar için koruyucu bir tabaka oluşturmakta, fırın sacında kullanılan refrakter özellikli tuğlaların uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [55]. Ortalama kalsiyum oksit değeri %90-95 aralığındadır. (Belirtilen kalsiyum oksit değeri, kireç için akredite laboratuvarından elde edilmiştir.)



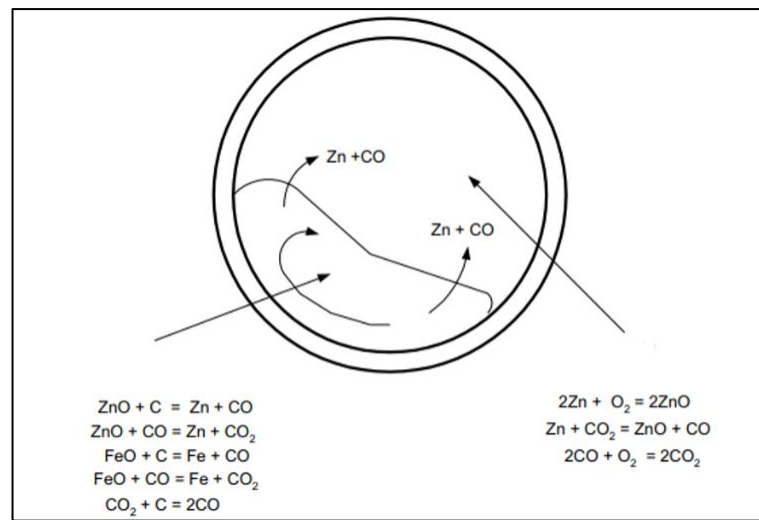
Şekil 5.7. Sönmemiş kireç.

Şekil 5.8’de görülen Waelz prosesi, silolarda biriktirilen EAF tozlarının bantlar ve konveyör sistemleri yardımıyla besleme potasına gönderilirken diğer hammaddelerinde (antrasit kömürü, kok kömürü, kireç) depolandıkları stok hollerden bantlar yardımıyla besleme potasına eş zamanlı gönderilmesi ile başlar. Hammaddeler döner fırın içine besleme potası vasıtasıyla şarj olur ve ön ısıtma zonunda birikir. Bu birikmeyle, döner fırın içinde bir yük oluştururlar.



Şekil 5.8. Waelz prosesi akış şeması [56].

Döner fırının eğimi ve dönme hızı, fırın içindeki biriken hammaddelerin hareketine yol açar. Döner fırındaki sıcaklıklar yaklaşık 1200°C ve hammaddelerin döner fırın içinde bulunma zamanı yaklaşık olarak 4 saattir. Kurşun, çinko ve kadmiyum oksitler indirgenir ve oksitlenir [57]. Şekil 5.9'da döner fırın içinde gerçekleşen kimyasal süreçler gösterilmiştir. Bu kimyasal süreçler şarj içindeki tepkimeler ve gaz alanındaki tepkimeler olarak iki şekilde ele alınmıştır.



Şekil 5.9. Döner fırın içinde gerçekleşen kimyasal süreçler [58].

Bu kimyasal süreçler sonucunda oluşan gaz fazındaki çinko oksit negatif emiş sistemi ile toz odası adlı üniteye gönderilir ve çinko oksit bazında döner fırın süreci bitmiş olur. Fırın redüksiyon zonunda kısmen redüklenmiş demir ile demir oksitler, kireç ve silis ile birleşerek, demir kalsiyum silikatları meydana getirerek, cüruf formunda fırını terk eder (Şekil 5.10 ve Şekil 5.11) [59].



Şekil 5.10. Döner fırın cüruf zonu ve dökülen cüruflar.



Şekil 5.11. Döner fırının içi.

5.2. WAELZ PROSESİ ÇIKTILARI

5.2.1. Cüruf

Şekil 5.12’de görülen cüruf, Waelz prosesi döner fırın çıktı maddelerinden birisidir. İçeriğindeki demir oranı ise ortalama %28-37 oranında seyrederek. (Belirtilen demir oranı değeri cüruf için, akredite laboratuvarından elde edilmiştir.) Genel olarak Waelz prosesinden çıkan cüruf içerisindeki çinko yüzdesinin az olması beklenmektedir. Çünkü cüruf içeriğinde çinko yüzdesi ne kadar yüksek olursa döner fırın içerisinde o kadar verimli çinko geri kazanımı yapılamamış demektir ve geri kazanılamayan çinko, cürufuyla prosesden atılmış olur. Günümüzde, yüksek demir içerikli döner fırın cürufu düzenli atık depolama sahalarına veya çimento firmalarına geri kazanım amaçlı gönderilmektedir. Cürufun kimyasal analizi Çizelge 5.3’de görülmektedir. (Şekil 5.8’de proses çıktısı olarak cürufa ek kok gösterilmiştir fakat bu çalışmada böyle bir çıktı söz konusu değildir.)



Şekil 5.12. Döner fırın cüruf çıktısı.

Çizelge 5.3. Cüruf kimyasal analizi.

Cüruf kimyasal analizi (%)											
Ph	Al ₂ O ₃	C	CaO	Cu	Cl	Fe	MgO	Pb	S	SiO ₂	Zn
12,04	3,64	14,17	25,13	0,31	0,25	29,2	2,66	0,05	2,88	11,08	0,77

5.2.2. Çinko Oksit

Döner fırında, yüksek sıcaklıkta ve kimyasal süreçler neticesinde EAF tozu içindeki çinkonun gaz fazına geçmesi ile elde edilen çinko oksit, döner fırında kullanılan negatif emiş sistemi ile prosesin ikinci aşamasına geçer. Bu aşamada çinko oksit gazının içindeki safsızlıklar (örneğin kurşun) yoğunluk farkı ile toz odası adı verilen üniteye ayrılır ve çinko oksit gaz fazından katı faza geçerek, toza dönüşür. Çinko içeriği az olan tozlar (ortalama %44 ve altı), tekrar döner fırına şarj edilirken diğer çinko içeriği yüksek tozlar (ortalama %44 üzeri), prosesin diğer aşamalarına gönderilir. Şekil 5.13'de geri kazanımı yapılan çinkonun son hali mevcuttur.



Şekil 5.13. Toz formda çinko oksit.

5.3. MAKİNE ÖĞRENMESİ

Yapay zeka, belirli görevleri yerine getirebilmek için insan zekasını taklit eden sistemlerdir. Bu sistemler, kendilerini topladıkları veya tamamladıkları görevler üzerinden geliştirerek ilerleme kaydedebilirler. Günümüzde kullanılan sistemler arasındaki en ayırıcı özellikleri, insan zekasını neredeyse birebir taklit edebilmeleridir. "Yapay zeka" terimi ilk defa 1956'da Hannover, New Hampshire'da Dartmouth College'da yapılan bir konferansta ortaya atılmıştır [60]. Günümüzde yapay zekâ kullanımı, yüz tanıma, veri işleme, tanı koyma ve tedavi planlama süreçlerinde, çevrimiçi sohbet ve asistan, siber saldırı önleme gibi uygulamalarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu sistemde genellikle örnekler kullanılarak olaylar arasındaki ilişkiler öğrenilir. Yapay zekâ, belirli yöntemler ve algoritmalar vasıtasıyla çalışmaktadır.

Bu çalışma yöntemleri ve şekilleri farklılık göstermektedir. Yapay zekâ teknolojileri uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları, makine öğrenmesi ve genetik algoritmalarından oluşur [60]. Ama en genel haliyle yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme kavramlarını kapsamaktadır. Çizelge 5.4’de yapay zekâ teknolojileri görülmektedir.

Çizelge 5.4. Yapay zekâ teknolojileri.

Yapay Zeka	
1	Makine öğrenmesi
2	Derin öğrenme

Makine öğrenmesi algoritmaları, verileri kullanarak bir şekil ya da bir model oluşturup bu şekil veya modeli gelecekte karşılaşılabileceği yeni ihtimalleri tahmin etmede kullanabilen algoritmalarlardır. Örneğin, geçmişte veya anlık olarak piyasayı izleyen bir makinenin gelecek piyasa analizleri yapması bir makine öğrenmesi olarak kabul edilebilir [61]. Bu sistemler, günlük hayatta her alanda faydalı ürün ve çözümlerin oluşmasına katkıda bulunurlar. Sistemin öğrenme süreci eğitim verilerinin algoritmaya eklenmesi ile başlar ve algoritmanın doğruluğunu teyit etmek için algoritmaya eklenen verilerin kontrolü sağlanır. Makine öğrenmesi Şekil 5.14’de görüldüğü gibi üç farklı yöntemle ayrılır: denetimli öğrenme (gözetimli), denetimsiz öğrenme (gözetimsiz) ve yarı denetimli öğrenme (takviyeli).



Şekil 5.14. Makine öğrenmesi yöntemleri [62].

Denetimsiz öğrenme (gözetimsiz), makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir ve bilinmeyen veya etiketsiz veriler arasında tahmini modeller oluşturmayı sağlar. Denetimli öğrenmeden (gözetimli) farklı olarak, denetimsiz öğrenmede algoritmaya

bilinen veriler sağlanmaz. Bu nedenle sistem, etiketsiz veriler arasında gruplama, kümeleme veya benzerlikleri otomatik olarak belirler. Denetimsiz öğrenme, makinelerin kendi kendilerine öğrenme yeteneğine daha yakın olduğu için denetimli öğrenmeye göre daha esnek bir yapı sunar [63]. Elde az sayıda etiketlenmiş veri bulunurken çok daha fazla sayıda etiketlenmemiş veri varsa, denetimli öğrenme ve denetimsiz öğrenme yöntemleri yetersiz kalabilir. Bu durumda en sağlıklı yöntem, az sayıdaki etiketlenmiş veriden hareketle etiketlenmemiş veriler hakkında bilgi sahibi olmaya çalışmak ve onları sınıflandırmaktır. Bu yöntem ise yarı denetimli öğrenme (takviyeli) denir [18]. Denetimli öğrenme, kanıta dayalı tahminler yapan bir model oluşturmaktadır. Bu algoritma da bilinen bir girdi kümesi ve verilere bilinen bir yanıt alınmaktadır. Bu duruma göre de yeni verilere göre uygun tahminler yapabilmek için model eğitilmektedir. Sonucu tahmin edilmeye çalışılan, belirli bir hedefe ulaşılmaya çalışılan veriler için denetimli öğrenme kullanılmalıdır. Denetimsiz öğrenme yöntemine göre daha az karmaşıktır. Denetimli makine öğrenmesi konuları iki alt gruba ayrılmaktadır: Sınıflandırma ve regresyon [64].

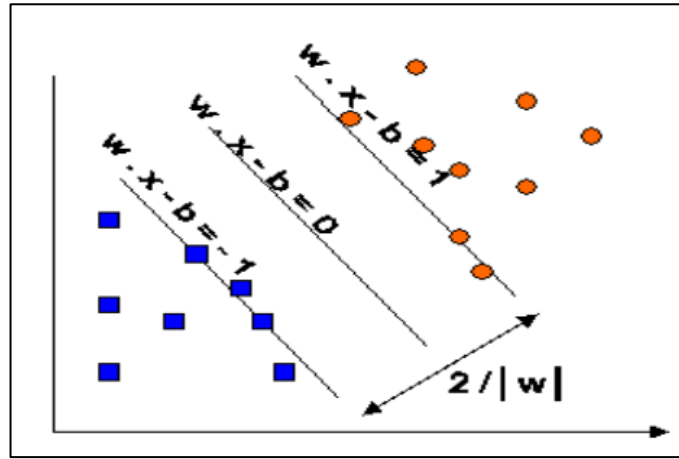
5.3.1. Sınıflandırma

Veriler etiketlenebilir, kategorilere veya sınıflara ayrılabilir, bu yöntem kullanılabilir. Verilerin sınıflandırılması için ilk aşamada veri tabanının bir kısmı eğitim amacıyla kullanılır ve sınıflandırmaya uygun kurallar oluşturulması sağlanır. Daha sonra oluşturulan kurallar yardımıyla algoritmanın yeni bir durumda nasıl karar vereceği belirlenir. Sınıflandırma yöntemlerinde, boosting, DT, RF, NB, SVM ve en yakın komşu en çok tercih edilen algoritmalarıdır [65]. Bu çalışmada denetimli makine öğrenmesi algoritmaları; DT, NB, RF ve SVM tercih edilmiştir.

5.3.1.1. Destek Vektör Makineleri (SVM)

SVM algoritmalarının günümüzde en etkili makine öğrenimi sınıflandırma algoritmalarından biri olduğu bilinmektedir [66]. Sınıflandırma problemleri için kullanılan denetimli bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. SVM, farklı kategorilere ait etiketli verileri birbirlerinden bir hiper düzlem aracılığıyla ayırmak için kullanılan bir yöntemdir. Sınıf etiketleri, veri seti içinde gösterildiği gibi en uygun ayırıcı yani hiper

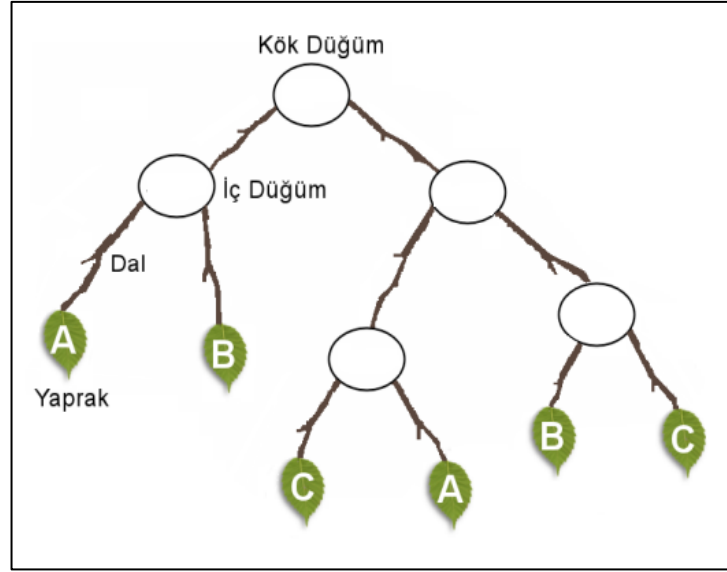
düzlemi bulmaktır bu veri seti ise genellikle pozitif ve negatif olarak adlandırılır [67]. Doğrusal ve çekirdek fonksiyonları olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğrusal SVM, verileri bir doğru veya düzlem üzerinde en iyi şekilde ayırmaya çalışır (Şekil 5.15). Veri noktalarını iki sınıfa bölmek için bir doğru veya düzlem belirlenir ve bu belirlenen doğru veya düzleme en yakın olan veri noktaları destek vektörleri olarak adlandırılır. Çekirdek fonksiyonları, regresyon ve sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu problemlerde özellikle benzerlik fonksiyonu olarak görev yapmaktadırlar [68]. Çekirdek fonksiyonları verileri, doğrusal sınırlardan daha karmaşık hiper yüzeylerle ayırmaya çalışır. Doğrusal olarak ayrılabilen verilerin yanında, doğrusal olarak ayrılamayan verileri de sınıflandırabilirler.



Şekil 5.15. SVM çalışma görseli [69].

5.3.1.2. Karar Ağacı (DT)

DT algoritmaları, istatistiksel olarak anlamlı grupları bulmak ve bu gruplara ait sonuçları açık bir şekilde, kolay okunabilir ağaç diyagramları ile sunar. Bu yöntem, gözlemleri sınıflandırmak veya tahmin etmek amacıyla kullanılır [70]. DT algoritmaları verileri yinelemeli olarak bölerek sınıflandırma yapar [71]. Belirlenen soruna yönelik bütün potansiyel çözümleri haritalandırmak şekli ile akış şemasına veya ağaç diyagramları haline getirir (Şekil 5.16). DT algoritmaları kolay anlaşılabilen ve hızlı çözümleme kabiliyetine sahip sınıflandırma yöntemi olarak kullanılan güçlü bir algoritmadır [72].



Şekil 5.16. DT çalışma şeması [72].

5.3.1.3. Naive Bayes (NB)

NB sınıflandırıcısı, Bayes teoremine dayanan kolay bir olasılıksal makine öğrenme algoritmasıdır [73]. Algoritma bütün verilerin veya kararların olasılığını hesaplar ve olasılık değerinin en yüksek olanına göre sınıflandırma yapar. Üretken ve ayırıcı olarak iki gruba ayrılır.

Bayes teoremi:

$$P(A/B) = \{P(B/A) P(A)\}/P(B).$$

$P(A/B)$: B olayı gerçekleştiğinde A olayının gerçekleşme olasılığı.

$P(B/A)$: A olayı gerçekleştiğinde B olayının gerçekleşme olasılığı.

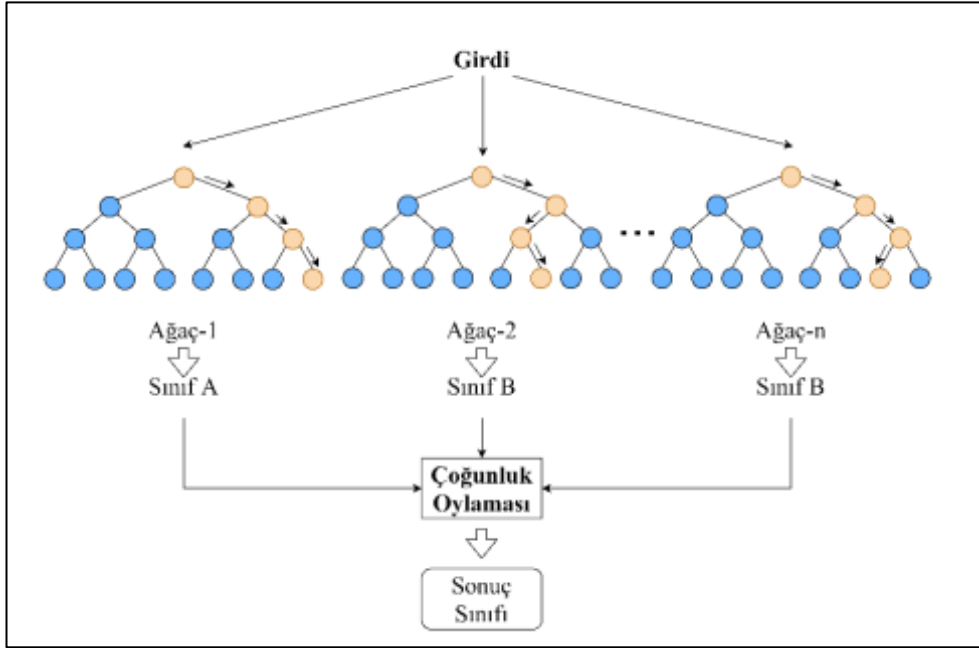
$P(A)$: A olayının gerçekleşme olasılığı.

$P(B)$: B olayının gerçekleşme olasılığı.

5.3.1.4. Rastgele Orman (RF)

RF algoritması, DT modellerinden oluşan bir makine öğrenme algoritmasıdır. Her ağaç, rastgele bir eğitim örnekleri alt kümesi üzerinde bağımsız olarak eğitilir [74]. Şekil 5.17'de görülen RF algoritması, örneklem boyutuyla aynı olan alt örnek

boyutunu kullanarak bir tahmin sınıflandırması yapar. Rastgele bir ormanda birçok karar ağacı bulunur ve bu ağaçlar bağlı oldukları veri setine ait rastgele seçilen alt kümelerdir. En yüksek doğruluğa sahip olan ağaçlar tercih edilir. DT algoritmasının en önemli dezavantajı küçük veri setlerinde yaşanan aşırı uyum durumudur [75]. RF algoritması bu aşırı uyum sorununu kontrol etmek ve doğruluk performansını artırmak için ortalamayı kullanır.



Şekil 5.17. RF algoritması [76].

5.3.2. Regresyon

Genellikle değişken sayısal veriler arasındaki sebep ve sonuç ilişkisi tahmin edilir ve bu tahmin öncesinde sayısal verilere göre bir fonksiyon oluşturulur. Temel amaç bir değişkenin diğeri üzerinde yaptığı etkinin olasılıksal modellenmesidir. Regresyon, doğrusal regresyon ve doğrusal olmayan regresyon olarak iki kategoriye ayrılmaktadır [77].

5.3.2.1. Doğrusal Regresyon

Doğrusal regresyon, iki değişken arasındaki ilişkinin bir doğru denklemi olarak tanımlanıp, bir değişkenin değerleri bilindiğinde diğeri değişken hakkında tahmin

yapılmasını sağlayan istatistiksel bir yöntemdir. Doğrusal regresyon, basit doğrusal regresyon ve çoklu doğrusal regresyon olmak üzere iki başlık altında incelenir. Basit doğrusal regresyonda bir bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasındaki ilişki modeli oluşturulurken, çoklu doğrusal regresyonda ise birden fazla bağımsız değişkenin bir bağımlı değişken üzerindeki etkisi incelenir [77]. Çizelge 5.5’de basit doğrusal ve çoklu doğrusal regresyon kategorilerine ait fonksiyon formülleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. Doğrusal regresyon.

Doğrusal Regresyon		
Yöntem	Basit Doğrusal Regresyon	Çoklu Doğrusal Regresyon
Formül	$Y = B_0 + B_1 * X + E$	$Y = B_0 + B_1 * X_1 + \dots + B_n * X_n + E$

Y: Bağımlı değişken.

B_0 : Bağımsız değişken sıfır olduğunda bağımlı değişkenin alacağı değer.

B_1 : Bağımsız değişkendeki değişimin, bağımlı değişken üzerinde yaratacağı ortalama değişim miktarı.

X: Bağımsız değişken.

E: Bağımlı değişkenin gerçek değeri ile modelin tahmin ettiği değer arasındaki fark.

5.3.2.2. Doğrusal Olmayan Regresyon

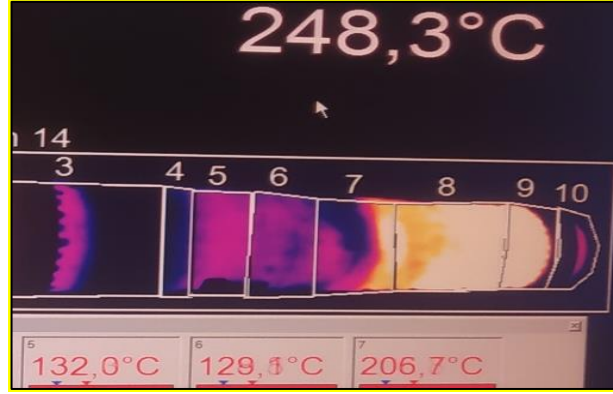
Doğrusal regresyon modelleri genellikle tatmin edici sonuçlar verse de, bazı durumlarda doğrusal olmayan regresyon modelleri daha uygun olabilmektedir. Örneğin, insanların büyüme süreci doğrusal olmayan bir şekilde gerçekleşir. Doğumdan yetişkinliğe kadar olan dönemde büyüme süreci farklı hızlarda gerçekleşir. Aynı şekilde, ilaç dozları ile ilaç etkisi arasındaki ilişki genellikle doğrusal olmayan bir yapıdadır. Bu tür durumlarda doğrusal olmayan regresyon modelleri kullanılabilir. Bu modeller genellikle üstel regresyon ve lojistik regresyon modelleri olarak sınıflandırılır. Üstel regresyon modeli, zamanla değişen büyüme hızını modellerken, lojistik regresyon modeli genellikle niteliksel yanıt değişkenlerini tahmin etmek için kullanılır. Örneğin, bir ailenin yıl içinde yeni bir araba satın alıp almayacağını tahmin

etmek için arabanın yaşını, hane halkının gelirini ve hane halkının büyüklüğünü içeren niteliksel değişkenlerle lojistik regresyon modeli kullanılabilir. Bu tür durumlarda doğrusal olmayan bu regresyon modelleri daha etkili ve doğru sonuçlar sağlayabilmektedir [78].

5.4. DENEYSEL ORTAM

Bu çalışmada etiketlenen verilerin eldesi için uygulanan proses, döner fırınlarda çinko geri kazanımı için kullanılan Waelz prosesidir. Waelz prosesi dünya genelinde kullanılan yaygın bir prostestir ve ülkemizde İzmir, Kayseri, Karabük ve Hatay illerinde kullanılmaktadır.

Waelz prosesinde kullanılan asıl ekipmanlardan olan döner fırın 65 metre uzunluğunda, 4,4 metre çapındadır. Döner fırın %2 eğimlidir ve dönme hızı 1,1 rpm'dir. Döner fırındaki sıcaklıkların, 1200°C veya daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmesinden dolayı, fırının iç ve dış sacına hasar verme ihtimali vardır. Bu durumun önüne geçebilmek için döner fırın iç çeperi yüksek alüminalı refrakter özellikli tuğlalarla kaplanmaktadır. Fırının her bölgesi için kullanılan refrakter özellikli tuğlanın kimyasal içeriği değişkenlik gösterir. Çünkü her bölgede sıcaklık farklıdır. Fırının cüruf çıkış zonunda sıcaklık 1200°C'ye kadar çıkabildiği için bu bölgede ortalama %70 oranlarında yüksek alüminalı refrakter özellikli tuğla kullanılabilirken diğer bölgelerde bu oran hem tuğla miktarı olarak hem alümina içeriği olarak değişebilmektedir. Şekil 5.18'de cüruf zonu dış sac sıcaklıklarının değişimi görülmektedir ve 8, 9 ve 10 ile numaralandırılan bölge cüruf zonunu belirtmektedir.



Şekil 5.18. Döner fırın cüruf zonu dış sac sıcaklığı.

Waelz prosesi, döner fırına hammadde (EAF tozu, antrasit kömürü, kok kömürü, kireç) eklenmesiyle başlar fakat bu işlemden önce döner fırın sıcaklığının kimyasal tepkimeler için yeterli olması gerekmektedir. Planlı duruş (döner fırın periyodik bakım için belirlenen zaman dilimi) sonrası döner fırın sistemi devreye alınırken fırın içi yeterli sıcaklığa ulaşmak için ortalama 3 gün boyunca doğalgaz kullanılır. Fırın, yeterli sıcaklığa ulaştığında hammadde şarjı yapılır ve diğer duruşa kadar bu sıcaklığı sağlamak ve korumak için antrasit ve kok kömürleri kullanılır. Bu sıcaklık ve ısı dengesi için fırın sıcaklığının yaklaşık 1200°C olması gerekir. Gerekli olduğu durumlarda kömürlere ek olarak alev borusu Sistemi kullanılarak sıcaklık desteği verilir süreç yönetilir. Fırın sistemine hangi oranda ve hangi içerikte hammadde şarjı yapılacağını belirleyebilmek için bütün hammaddelerden düzenli olarak numuneler alınır (Şekil 5.19).



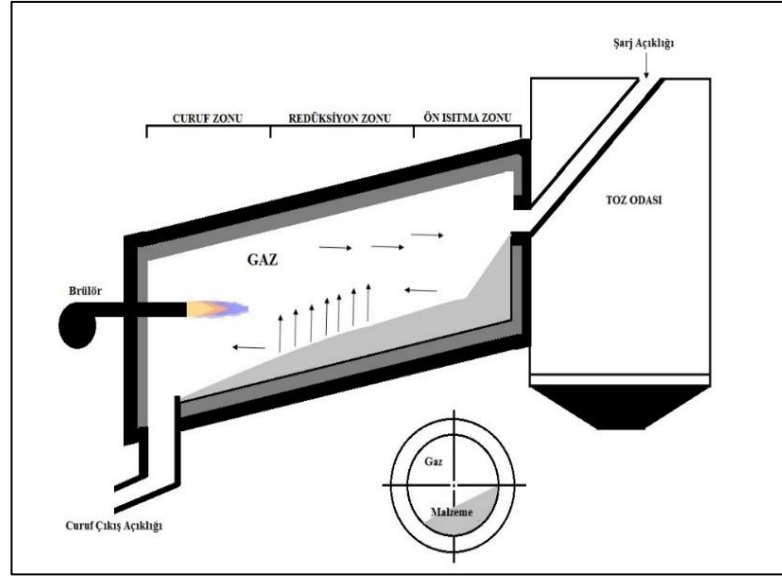
Şekil 5.19. EAF tozu numunesi alımı.

Bu numuneler bant dökülüşlerinden veya doğrudan depolanan hammaddelerden alınmaktadır. Bu hammaddeler son işlem olarak belirlenen miktarlarda, konveyörler yardımıyla, fırın ön ısıtma zonuna Şekil 5.20'deki besleme potası vasıtasıyla şarj edilir.



Şekil 5.20. Döner fırın besleme potası.

Bu aşamada fırının ön ısıtma zonu adı verilen bölgeden asıl beklenti, hammaddeleri kimyasal tepkimelerin yoğun gerçekleştiği redüksiyon zonuna hazırlamaktır. Şekil 5.21'de Waelz prosesi döner fırın bölgeleri şematik olarak ele alınmıştır. Fırın içinde oluşan kimyasal tepkimeler sonucu proses çıktılarında biri yüksek demir içerikli cüruf diğeri ise çinko oksittir. Buharlaştan çinko oksit, negatif emiş sistemi vasıtasıyla Şekil 5.22'de görülen toz odası ünitesine çekilir. Bu üniteye amaç, fırından çekilen çinko oksitin içindeki safsızlıkların yoğunluk farkı ile ayrılmasıdır. Çinko oksit bu üniteye toz formuna geçer. Çinko içeriği az olan tozlar (ortalama %44 ve altı), tekrar döner fırına şarj edilirken diğeri çinko içeriği yüksek tozlar (ortalama %44 üzeri), prosesin diğeri aşamalarına gönderilir.



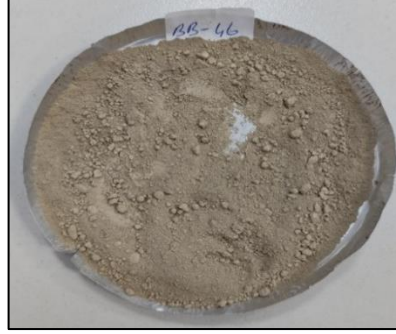
Şekil 5.21. Waelz prosesi döner fırın bölgeleri.



Şekil 5.22. Toz odası ünitesi.

Fırına şarj edilen hammaddelerin ve fırın çıktılarının kimyasal analizleri eş zamanlı olarak yapılmaktadır. Hammaddelerden ve çıktılardan alınan numuneler fabrikanın kendi akredite laboratuvarında belirli test ve analizlere tabi tutulur. Alınan tüm numuneler, ilk olarak karıştırılır (bu işleme paçallama da denmektedir). Homojen karışım elde edildikten sonra numuneler 200 g olarak ikiye bölünür (Şekil 5.23). Üzerinde çalışılan numunenin içindeki nem, etüv cihazında buharlaştırılır. Nemsiz numune, öğütme cihazında öğütülür ve tane boyutu yaklaşık 0,05 mm'nin altına düşürülür (Şekil 5.25). Bu aşamadan sonra Şekil 5.26'da tartılan 0,25 g ağırlığındaki numunenin Şekil 5.27'deki eritiş cihazı ile eritme işlemi başlar. Eritme işlemi

1050°C'de yapılmaktadır. EAF tozu numunesi için son işlem ise XRF cihazı ile gerçekleştirilir. Bu cihaza prosese uygun analiz metotları daha öncesinden tanımlandığı için numunenin kimyasal verileri, analiz işlemi sonucunda direkt olarak raporlanır.



Şekil 5.23. EAF tozu numunesi.

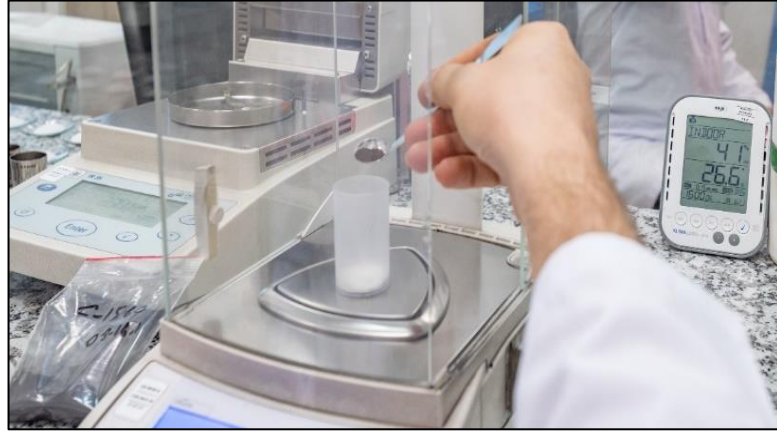
Çinko oksit numunesinin analizi ile EAF tozu analizi benzerdir. Cüruf numunesi ise farklı bir yöntemle analiz edilmektedir. Şekil 5.24'de olduğu gibi, alınan cüruf numuneleri homojen olarak karıştırılır. Karışan numuneler 200 g olarak ayrılır. Üzerinde çalışılacak cüruf numunesi çeneli kırıcı cihazında kırılır ve tane boyutu 1,5 mm'ye kadar düşürülür. Bu işlemden sonra numune, öğütme cihazında 0,05 mm'ye öğütülür. Eritiş cihazında eritme işlemi yapılır. Bu işlem sırasında cüruf numunesi 0,5 g ağırlığındadır ve sıcaklık 1050°C'dir. Son işlem XRF cihazı işlemidir. Cihazdaki numuneye ait kimyasal veriler direkt olarak raporlanır.



Şekil 5.24. Cüruf numunesi alımı.



Şekil 5.25. Öğütme işlemleri.



Şekil 5.26. Tartım işlemi.



Şekil 5.27. Eritiş cihazı.

Geri kazanım açısından döner fırın çıktısı olduğu ve üretime bir katkısı olmadığı için cüruf içindeki çinko miktarının %1'in altında olması ana hedeflerdendir. Çünkü cürufta çinko miktarı ne kadar fazla olursa, döner fırın içinde çinko geri kazanımı sağlıklı yapılamamış ve elde edilebilir olan çinko cürufta kaybedilmiş olur. Çinkonun sağlıklı geri kazanımının yapılamaması, fırına şarj edilen hammadde içindeki çinko tenörünün düşük olmasından da kaynaklanabileceği gibi, fırın içinde tepkimeler için yetersiz sıcaklık ve yeterli havanın sağlanamaması, fırın içinde ring oluşumları, malzemenin yetersiz oksitlenmesi gibi sebeplerden de kaynaklanabilmektedir.

5.4.1. Veri Seti

Bu çalışmada, bir çinko geri kazanım firmasının Waelz prosesi öncesinde kullanılan ve proses sonucunda elde edilen maddelerinin kimyasal analiz değerleri kullanılmış ve veri seti haline getirilmiştir. Bu analiz değerleri, akredite laboratuvara verilen numunelerin sonuçlarıdır. Dolayısı ile bu tez çalışması makine öğrenmesi yöntemi ile deneysel çalışmaların doğrulanmasıdır. Yapılan numerik doğrulamanın güvenilirliği konusuna tez içerisinde değinilmemiştir. Çizelge 5.6'da, döner fırına şarj edilen hammaddeler ve etiketli verilere ait bazı değerler gösterilmiştir. Döner fırın çıktısı olan cürufta, ortalama çinko değeri %1'in altında kalanlar A etiketi, %1 ve üzeri ortalama çinko değeri olan veriler B etiketi verilerek sınıflandırılmıştır. Çizelge 5.6'da gerçek veri seti özet halinde verilmiştir ve gerçek veri seti 29 sütundan oluşmaktadır.

Çizelge 5.6. Veri Seti.

Veri Seti	EAF tozu(ton)	Kireç(ton)	Kömür(ton) (antrasit+kok)	A etiketi	B etiketi
Ortalama	398,26	37,73	142,87	0,63	1,73
Maksimum	458	66	203	0,99	5,34
Minimum	71	4	102	0,23	1,01
Standard Sapma	40,59	10,57	10,41	0,18	0,77

5.4.2. Model Hiperparametreleri

Hiperparametreler, modelin öğrenme süreci başlamadan önce kullanıcı tarafından ayarlanabilen parametrelerdir. Sınıflandırıcı modellerin hiperparametreleri, modelin nasıl yapılandırıldığını belirtir. Yapılan bu çalışmada, sınıflandırma algoritmalarının doğruluk değerini ve performansını arttırmak amacıyla algoritmaların değişkenleri değiştirilmiş ve en verimli olan değişken değerini tespit etmek için hiperparametre optimizasyonu yapılmıştır. Çizelge 5.7’de SVM, DT, RF ve NB sınıflandırıcı modellerine ait hiperparametreler verilmiştir.

Çizelge 5.7. Hiperparametreler.

Sınıflandırıcı Modeller	Hiperparametreler
SVM	C=0,025, kernel='linear', degree=3, gamma='scale', coef0=0,0, shrinking=True, probability=False, tol=0,001, cache_size=200, class_weight=None, verbose=False, max_iter=-1, decision_function_shape='ovr', break_ties=False, random_state=42
DT	Number of hidden layers: 5, number of neurons: 10, activation function: “logistic”, learning rate: 0,001, number of epochs: 100, early stopping: true, 10.
RF	N estimators (the number of trees): 100, criterion: squared error, max. depth: < min. samples, split min. samples split: 2, min. samples leaf: 1, max features: 1,0, bootstrap: true.
NB	alpha=1.0, fit_prior=True, class_prior=None, binarize=0.0

5.4.3. Performans Metrikleri

Makine öğrenmesi modellerinin sınıflandırma başarı oranını ölçebilmek için birbirinden farklı performans metrikleri kullanılmaktadır. Çalışılan veriler için birden fazla makine öğrenmesi yöntemi kullanılabilir ve bu yöntemlerden en başarılı olan algoritmayı seçebilmek için her algoritmanın performansları ayrı ayrı ölçülür. Çizelge 5.8’de sınıflandırma performansını ölçebilmek için kullanılan karmaşıklık matrisi verilmiştir. Bu matristen elde edilen değerlere göre performans metrikleri belirlenmektedir. Bu çalışmada A ve B metrikleri kullanılmıştır. A değeri %1’in altı cürufta ortalama çinko değerini, B ise %1 ve üstü cürufta ortalama çinko değerini temsil etmektedir.

Çizelge 5.8. Karmaşıklık matrisi.

Karmaşıklık matrisi		GERÇEK	
		Pozitif (A)	Negatif (B)
TAHMİN	Pozitif (A)	TP	FP
	Negatif (B)	FN	TN

Bu matrise göre:

TP: Hem gerçek değerde pozitif hem de modelin pozitif tahmin ettiği değerdir.

TN: Hem gerçekte hem de modelin tahmininde negatif olan değerdir.

FP: Gerçekte negatif fakat modelin pozitif tahmin ettiği değerdir.

FN: Gerçekte pozitif ama makine değeri negatif olan değerdir.

Sınıflandırma için kullanılan performans metrikleri:

Doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skor'dur. Eşitlik 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4'de formülleri verilmiştir.

Doğruluk, doğru yapılan tahmin sayısının tüm yapılan tahmin sayısına bölünmesi ile elde edilir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FN+FP} \quad (5.1)$$

Kesinlik, pozitif tahmin edilen örneklerin kaçının doğru tahmin edildiğini belirtir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (5.2)$$

Duyarlılık, pozitif tahmin edilmesi gereken değerlerin oransal olarak kaçının doğru tahmin olduğunu belirtir.

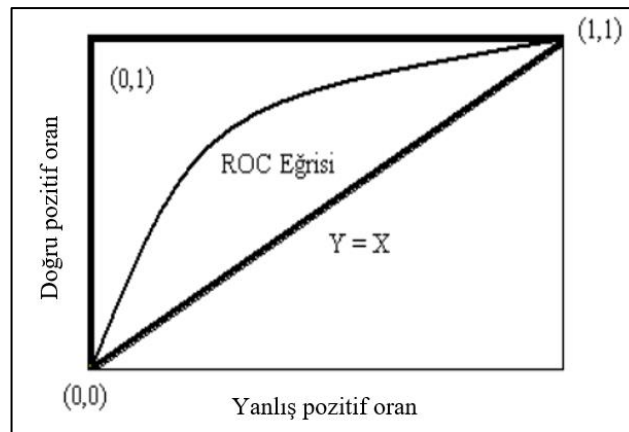
$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (5.3)$$

F1 skor, kesinlik ve duyarlılık değerlerinin birleşimidir ve sıklıkla sınıflandırma algoritmalarının performansını ölçmek için kullanılan bir metrik olarak kabul edilir [79].

$$F1 \text{ skor} = (2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlık}) / (\text{Kesinlik} + \text{Duyarlık}) \quad (5.4)$$

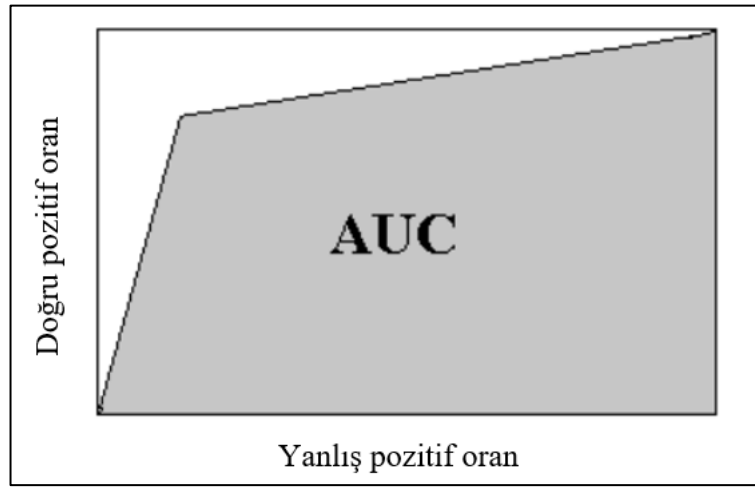
Modellerin performansını belirlemek için çapraz doğrulama yöntemi kullanılır. Bu yöntemlerden biri, k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemidir. Bu yöntemle tüm veri seti "k" eşit parçaya bölünür. K-katmanlı çapraz doğrulama yönteminde, ilk olarak eğitim sürecinde kullanılacak eğitim kümesi karıştırılır ve eşit büyüklükteki k adet alt kümelere bölünür. Bu işlemler k kez tekrarlanarak her bölünmedeki alt küme eğitim veri kümesinden çıkarılır ve test kümesi olarak kullanılır. Bu yöntem sayesinde modelin genelleştirme yeteneği test edilir ve aşırı uyum problemleri en aza indirilir [80]. Bölünen her parçaya tek tek veri eklenerek doğrulukları kontrol edilir. Bu yöntemle her veri noktası en az bir şekilde doğrulama verisi olarak kullanılır. Veri seti eğer 10 parçaya bölünmeye karar verirse, k değeri 10 olmuş olur. 10 adet doğrulama verisi oluşturulur ve işlemler 10 defa tekrar edilir. Her tekrarda elde edilen bu oranların ortalaması alınır. Buna istinaden, k değeri ne kadar yüksek olursa, modelin performansı o kadar fazla olur ve modelin hata payı azalır.

Sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek için Şekil 5.28’de görülen ROC eğrisi kullanılmaktadır. ROC eğrisi, yanlış pozitif oran ve doğru pozitif oran arasındaki ilişkiyi gösterir.



Şekil 5.28. ROC eğrisi [81].

Şekil 5.29'daki ROC eğrisi altında kalan AUC alanı, aynı veriler üzerinde geliştirilmiş modellerin performansını karşılaştırmada sağlam bir ölçektir. Bir modelin ROC eğrisi altında kalan alanı, modelin doğru tahmin olasılığını göstermektedir. Böylece, ROC altında kalan alan etkinlik düzeyine bağlı olarak 0,5 ile 1 arasında değerler alabilmektedir. Bu alan ne kadar büyükse, yapılan tahmin o kadar doğru tahmin kabul edilir [82]. ROC eğrisi için 0,5 değeri çalışılan sınıflandırma modelinin başarısız olduğu ve sınıflandırmanın rastgele yapıldığı anlamına gelmektedir [80].



Şekil 5.29. AUC alanı [81].

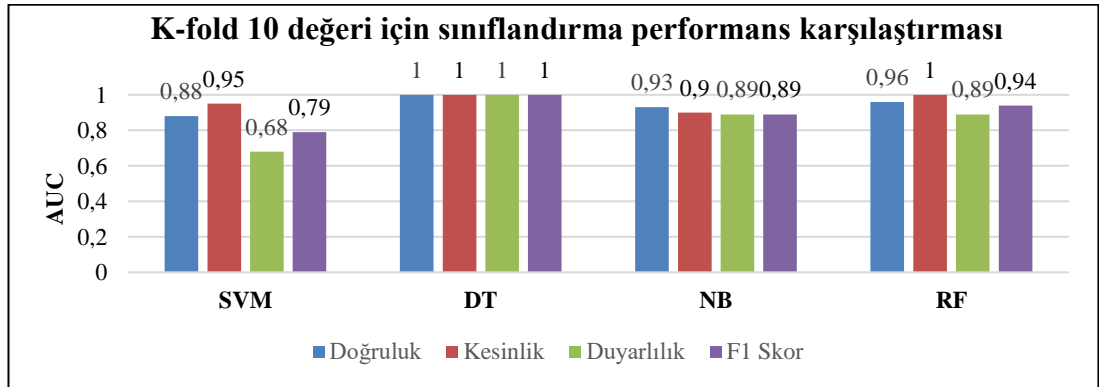
BÖLÜM 6

SINIFLANDIRMA VE REGRESYON SONUÇLARI

Bu tezde dört farklı sınıflandırma modeli ve dört farklı performans metrikleri kullanılarak etiketli veriler üzerinde çalışmalar yapılmış ve en iyi performans gösteren sınıflandırma modelleri belirlenmiştir. Modellerin performansını belirlemek için kullanılan k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemiyle veri seti 10 eşit parçaya bölünmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelge 6.1 ve modellerin ROC eğrileri incelendiğinde sınıflandırma performansı; DT modeli bütün K-fold değerlerinde %100, NB modeli K-fold 2 değerinde %97, RF modeli K-fold 10 değerinde %100 ve SVM modeli K-fold 2 değerinde %94 olarak belirlenmiştir. (%100 verilen performans değerleri %99’dan fazla olduğu için %100 kabul edilmiştir.)

6.1. SINIFLANDIRMA SONUÇLARI

Şekil 6.1’e göre, K-fold 10 değerinde modeller, benzer sınıflandırma performansı göstermektedir. Ancak diğer ölçütler dikkate alındığında, DT modeli sınıflandırmada daha yüksek performans sergilemektedir. Diğer modellerde yüksek sınıflandırma performansı en yüksekten en aza sırasıyla RF, NB ve SVM olarak gözlenmiştir.

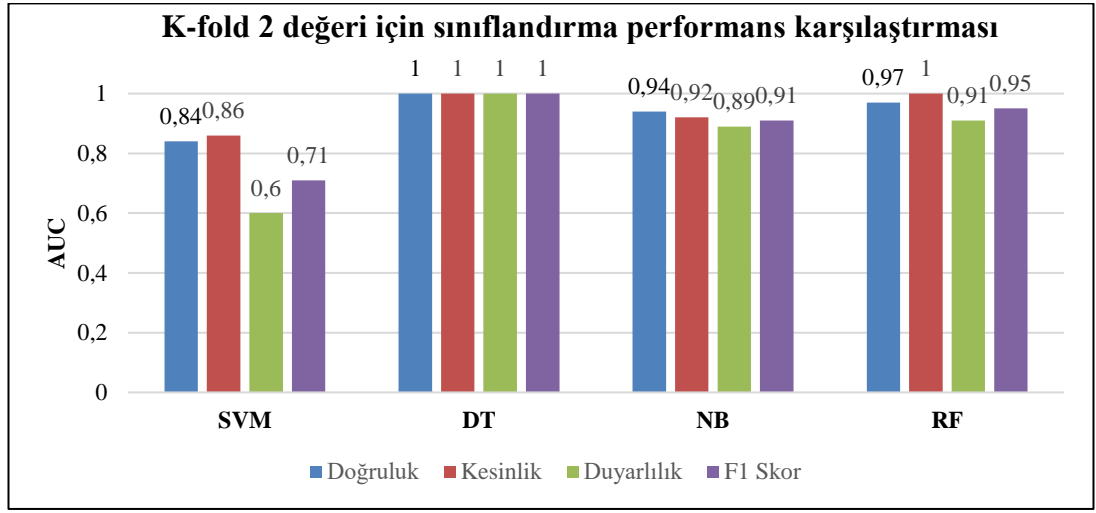


Şekil 6.1. K-fold 10 değeri için sınıflandırma performans karşılaştırması.

Çizelge 6.1. Sonuçlar.

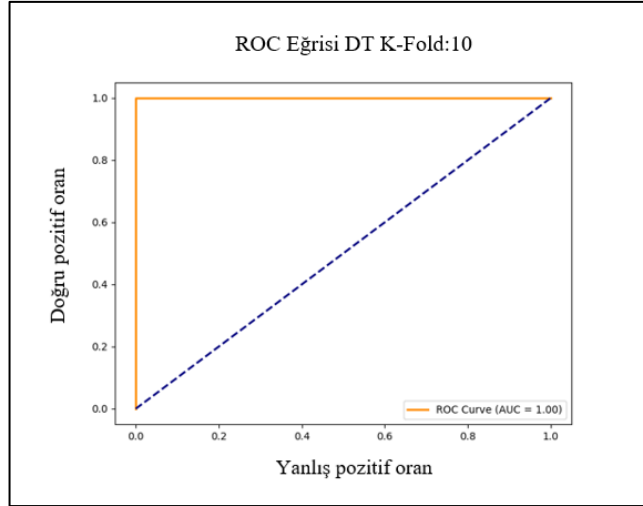
K-fold	Performans Metrikleri	Modeller			
		SVM	DT	NB	RF
K-fold 2	Doğruluk	0,84	1	0,94	0,97
	Kesinlik	0,86	1	0,92	1
	Duyarlılık	0,6	1	0,89	0,91
	F1 Skor	0,71	1	0,91	0,95
K-fold 3	Doğruluk	0,87	1	0,93	0,97
	Kesinlik	0,92	1	0,9	1
	Duyarlılık	0,67	1	0,89	0,91
	F1 Skor	0,77	1	0,89	0,95
K-fold 4	Doğruluk	0,88	1	0,94	0,96
	Kesinlik	0,94	1	0,90	1
	Duyarlılık	0,67	1	0,90	0,88
	F1 Skor	0,78	1	0,90	0,93
K-fold 5	Doğruluk	0,88	1	0,94	0,97
	Kesinlik	0,94	1	0,91	1
	Duyarlılık	0,68	1	0,90	0,90
	F1 Skor	0,79	1	0,90	0,95
K-fold 6	Doğruluk	0,88	1	0,92	0,98
	Kesinlik	0,95	1	0,89	1
	Duyarlılık	0,66	1	0,89	0,94
	F1 Skor	0,78	1	0,89	0,97
K-fold 7	Doğruluk	0,88	1	0,92	0,97
	Kesinlik	0,96	1	0,89	1
	Duyarlılık	0,67	1	0,89	0,91
	F1 Skor	0,79	1	0,89	0,95
K-fold 8	Doğruluk	0,87	1	0,91	0,96
	Kesinlik	0,93	1	0,87	1
	Duyarlılık	0,65	1	0,88	0,90
	F1 Skor	0,76	1	0,87	0,94
K-Fold 9	Doğruluk	0,88	1	0,92	0,96
	Kesinlik	0,95	1	0,88	1
	Duyarlılık	0,69	1	0,89	0,90
	F1 Skor	0,79	1	0,88	0,95
K-fold 10	Doğruluk	0,88	1	0,93	0,96
	Kesinlik	0,95	1	0,90	1
	Duyarlılık	0,68	1	0,89	0,89
	F1 Skor	0,79	1	0,89	0,94

Şekil 6.2. dikkate alındığında, K-fold 2 değerine göre sınıflandırma modelleri birbirine yakın performans göstermektedir. Fakat diğer ölçütler dikkate alındığında DT modeli diğerlerine göre daha yüksek sınıflandırma performansı ile öne çıkmaktadır. Diğer modellerde yüksek sınıflandırma performansı en yüksekten en aza sırasıyla RF, NB ve SVM olarak gözlenmiştir. Şekil 6.3, 6.4, 6.5 ve 6.6’da sınıflandırma modellerine ait ROC eğrileri verilmiştir.



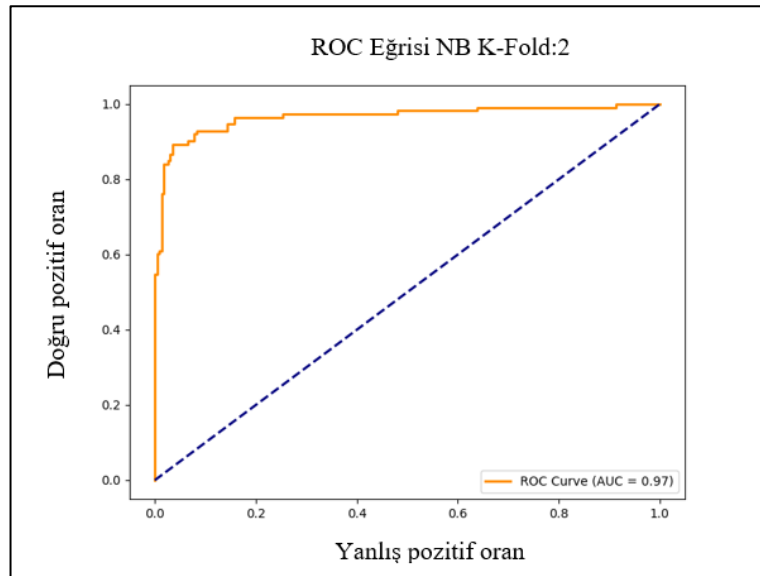
Şekil 6.2. K-fold 2 değeri için sınıflandırma performans karşılaştırması.

ROC eğrileri, sınıflandırma modellerinin performanslarının değerlendirilmesi ve kıyaslanması için en değerli yöntemlerdendir [81]. Şekil 6.3’de DT sınıflandırma modeli için ROC eğrisi ve eğrinin AUC alanı verilmiştir. Bu eğriye göre DT sınıflandırma modeli en iyi performansı K-fold 10 değerinde ve AUC değeri 1 olarak vermiştir. K-fold 10 değeri, veri setinin 10 eşit parçaya bölüdüğü anlamına gelmektedir. ROC eğrilerinde K-fold değerinin yüksek olması aşırı uyum gibi problemleri ortadan kaldırayabileceği için tercih edilmektedir. AUC değerinin 1 olması %100 performans olarak değerlendirilir. Bu model için verilen değerlerde %100 doğru sınıflandırma yapıldığı anlamına gelmektedir. Bu oran modelin oldukça iyi bir şekilde verileri ayırt edebildiği ve doğruluk oranının oldukça yüksek olduğu anlamına gelir.



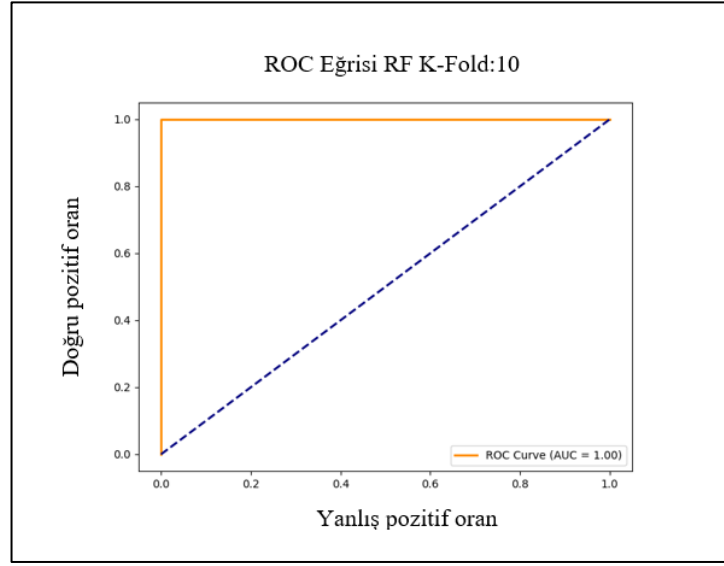
Şekil 6.3. ROC eğrisi DT modeli.

Şekil 6.4’de NB sınıflandırma modeli için ROC eğrisi ve eğrinin AUC alanı verilmiştir. Bu eğriye göre NB sınıflandırma modeli en iyi performansı K-fold 2 değerinde vermiştir. AUC değeri 0,97’dir. AUC değeri ne kadar yüksek ise modelin sınıflandırma başarısı o kadar artmaktadır [80]. Bu sebepten 10 eşit parçaya bölünmüş olan ROC eğrisinde, AUC değeri 1’e en yakın K-fold değeri baz alınmıştır. Bu durumda AUC 1 değerine yani %100’e yakın tek değer K-fold 2 değeridir. Bu eğri sonucunda NB modeli %97 doğru sınıflandırma yapmıştır.



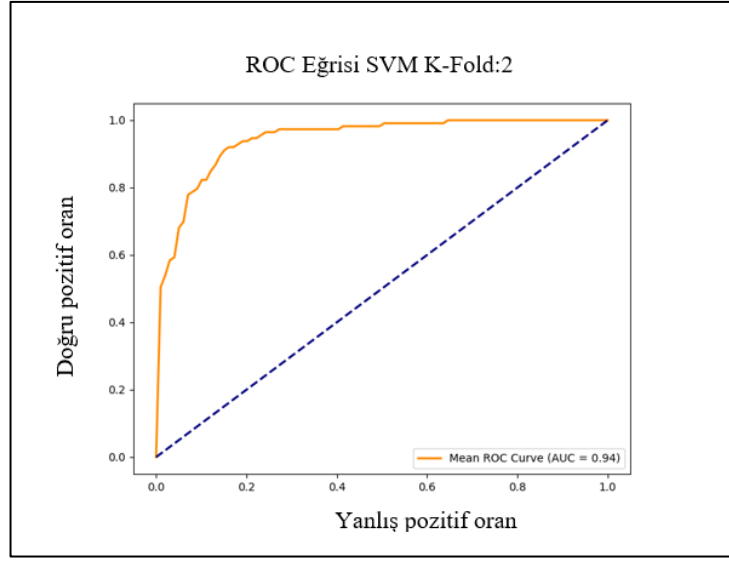
Şekil 6.4. ROC eğrisi NB modeli.

Şekil 6.5'de gösterilen ROC eğrisi, RF sınıflandırma modelinin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Eğrinin altında kalan alan AUC, 0 ile 1 arasında bir değer alır. 0,5 değeri rastgele tahmin yapmayla eşdeğerken, 1 değeri mükemmel tahmin yapmayı ifade eder [82]. Şekil 6.5'deki ROC eğrisine göre, RF sınıflandırma modeli en yüksek doğruluk değerini K-fold 10 değeri ile vermiştir. AUC değeri 1'dir. Bu durum %100 doğru sınıflandırma yapıldığını ve modelin çok iyi çalıştığını gösterir.



Şekil 6.5. ROC eğrisi RF modeli.

Şekil 6.6'da SVM sınıflandırma modeli için ROC eğrisi ve eğrinin AUC alanı verilmiştir. AUC alanı 0,5 ile 0,7 değeri arasındaysa düşük performans değeri, 0,7 ile 0,9 arasındaysa orta düzey performans değeri, 0,9 değerinin üzerindeyse modelin performansının iyi olduğunu göstermektedir [83]. SVM sınıflandırma modeli için en iyi performans, K-fold 2 değerinde elde edilmiştir ve AUC değeri 0,94 olarak belirlenmiştir. Bu değer, modelin %94 doğru sınıflandırma yaptığını göstermektedir. Bu durum, modelin veri kümesini etkili bir şekilde öğrendiğini ve doğru sınıflandırma yapabildiğini göstermektedir.



Şekil 6.6. ROC eğrisi SVM modeli.

6.2. REGRESYON SONUÇLARI

Regresyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren matematiksel modeli belirlemek ve bu modelin ne kadar iyi uyum sağladığını değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntem, birçok farklı kategoride yaygın olarak kullanılmaktadır [84]. Regresyon analizinde amaç, bağımlı değişkenin, bağımsız değişkene istatistiksel olarak bağlı olup olmadığını tahmin etmek veya açıklamaktır. Bağımlı değişken, tahmin edilmek veya açıklanmak istenen değerdir. Bağımsız değişken ise bu duruma yardımcı değişkendir. Eğer tek bağımsız değişken ve tek bağımlı değişken var ise basit doğrusal regresyon, iki ya da daha fazla bağımsız değişken ve tek bağımlı değişken var ise çoklu doğrusal regresyon adı verilmektedir. Bu regresyon analizi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi incelemek, modellemek ve tahmin yapmak için kullanılır [85]. Çoklu doğrusal regresyon analizi yöntemi ile çinko geri kazanım prosesinde kullanılan hammadde miktarlarının ve EAF tozundaki demir oranlarının çıkan cüruf miktarına etkisi olup olmadığını incelenmiştir. Çoklu doğrusal regresyon analizinde, Çizelge 6.2'deki veri setinde hammaddeler (EAF tozu, kireç ve kömür), EAF tozundaki demir oranı ve cüruf miktarları kullanılmıştır. (Cürufta çinko tenörü Bölüm 7'de sonuçların açıklanması amaçlı veri setine eklenmiştir.) EAF tozundaki demir oranının özellikle seçilme sebebi, elde edilen cürufta element yoğunluğunun en fazla demir olmasındandır.

Çizelge 6.2. Regresyon veri seti.

	EAF tozu (ton)	EAF tozunda demir oranı	Kireç (ton)	Kömür (antrasit +kok) (ton)	Cüruf (ton)	Cürufta çinko tenörü (%)
Ortalama	398,26	19,53	37,73	142,87	252,33	0,92
Maks.	458	24,16	66	203	460,55	5,34
Min.	71	15,92	4	102	31,65	0,21
Std.(σ)	40,59	1,49	10,74	10,41	60,34	0,69

Regresyon analizinde kullanılan çoklu R, bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi gösterir ve bu değer 1'e yaklaştıkça bağımlı ve bağımsız değerler arasındaki ilişkinin, güçlü olduğu anlaşılır. Korelasyon katsayısının karesine eşit olan ve bağımsız değişkenin, bağımlı değişkenin varyansının yüzde kaçını açıkladığının göstergesi, belirlilik katsayısı olan R kare değerinin 1'e yakın olması, bağımlı değişkendeki varyansın büyük bir kısmını bağımsız değişkenlerin açıkladığı anlamını verir [86]. Ayarlı R kare, 0 ile 1 arasında değer alır ve bu değer 1'e yaklaştıkça bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında ki ilişkinin açıklanma gücü artar. Standart hata, regresyondan beklenen hata miktarını belirtir. ANOVA, varyans analizi olarak bilinmektedir ve regresyon analizinin bir bütün olarak anlamlılığını test etmek için bu varyans analizinden yararlanılmaktadır [86]. F değeri, gruplar arasındaki değişkenlik ve grupların içindeki değişkenliğin oranını ifade eder. ANOVA analizine göre F değerinin, anlamlılık F değerine göre büyük olması, bağımsız değişkenler değiştiğinde bağımlı değişkenin değişimi anlamlıdır sonucunu vermektedir. Grup ortalamaları arasındaki farkın istatistiksel manada anlamlı olup olmadığını belirlemek için t-testi yapılmaktadır. T-testi sıfırdan farklı ve P-değeri 0,05'den küçük olmalıdır [87]. Kesişim analizi, kesişim değeri ise bağımsız değişkenler 0 olduğunda bağımlı değişkenin tahmin edildiği değerdir.

Çizelge 6.3'de, çoklu R değerinin 1'e yakın olduğunu ve bundan dolayı bağımlı bağımsız değişkenler arasında istatistiksel olarak güçlü bir ilişki olduğundan söz edilebilir. R kare değerimiz 0,438'dir ve bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkenin varyansının %43,8'ini açıkladığı sonucuna ulaşılmaktadır. Çizelge 6.4'de ANOVA analizine göre F değerinin, anlamlılık F değerine göre büyük olduğu için tablodaki değerler istatistiksel olarak anlamlıdır. Çizelge 6.5'deki T-testi sonucuna göre grup ortalamaları arasındaki fark anlamlıdır. Çizelge 6.5'de 0,05'ten büyük P-değeri sadece

kireç miktarıdır. Kireç miktarının P-değerine göre cüruf miktarı üzerinde diğerlerine oranla etkisi az denebilir. Çoklu doğrusal regresyon analizinde hammadde miktarları ve EAF tozundaki demir oranının cüruf miktarı üzerinde anlam teşkil ettiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.3. Çoklu regresyon analizi.

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0,661876
R Kare	0,43808
Ayarlı R Kare	0,43141
Standart Hata	46,65061

Çizelge 6.4. Çoklu regresyon Anova analizi.

ANOVA		
	F	Anlamlılık F
Regresyon	65,6822559	4,94546E-41

Çizelge 6.5. Çoklu regresyon kesişim analizi.

Kesişim analizi	Katsayılar	T testi	P-değeri
Kesişim	-136,1628584	-3,880237256	0,00013
EAF tozu	0,560250621	10,60812331	7,100E-23
Kireç	0,355345395	1,217578925	0,22424
Kömür	0,464561692	2,658249926	0,00823
EAF tozundaki demir oranı	4,958411486	2,668553965	0,00799

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Çinko geri kazanımı, atık veya kullanılmış çinko içerikli malzemelerin işlenerek yeniden kullanılabilir hale getirilmesini ifade eder. Bu çalışmada, farklı çinko geri kazanım yöntemleri incelenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada incelenen çinko geri kazanım yöntemlerinden biri Waelz prosesidir. Waelz prosesi, pirometalurjik çinko geri kazanım yöntemlerinden olup temelde EAF tozlarının ve diğer hammaddelerin döner fırında ısıtılarak çinko buharı elde edilmesi ve daha sonra çinkonun yeniden kullanılmasını içerir.

Waelz prosesi kullanılan bir fabrikada yapılan deneyler sonucunda hazırlanan bu çalışmanın ilk üç aşamasında, çinko tarihçesine değinilmiş, çinko elementi derinlemesine incelenmiş ve konu ile ilgili yapılan akademik çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın dördüncü ve beşinci aşamalarında Waelz prosesi, hammaddeler, döner fırın çıktısı olarak adlandırılan cüruf ve cüruf içindeki çinko oranı incelenmiş ve analizleri yapılmıştır. Bu analiz verileri etiketlenmiş ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak veriler sınıflandırılmıştır. Çalışmanın altıncı bölümünde, sınıflandırma modellerinin performansları ve regresyon analizleri detaylandırılmış, sonuçlandırılmıştır.

Çalışmada kullanılan makine öğrenmesi sınıflandırma yönteminde tüm veriler ön işlem aşamalarından geçmiş, bölünmüştür. Bununla birlikte model eğitilmiş, model değerlendirilmiş, modelin hiperparametre ayarları tamamlanmış ve model sonuçları çıkarılmıştır. Verilerin ön işlemleri: eksik verilerin doldurulması veya çıkarılması, yeni veri özelliklerinin oluşması ve gereksiz özelliklerin çıkarılması olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra veriler; eğitim, test ve doğrulama setleri olarak bölünmüştür. Eğitim seti modelin eğitiminde kullanılırken, test seti modelin performansının ölçülmesi için kullanılmıştır.

Eğitilen model test seti üzerinde performans olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme yapılırken performans metrikleri kullanılmıştır. Modelin performansını arttırmak ve aşırı uyumdan kaynaklı yanlış sonuçları önlemek için çapraz doğrulama yapılmıştır. Model başarılı olarak test edilmiş ve yapılan deneysel ve teorik çalışmaların neticesinde elde edilen bazı önemli sonuçlar ve tavsiyeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Bu çalışma ile endüstride cüruftaki çinko oranının hızlı ve doğru bir şekilde sınıflandırılmasında kullanılabilecek etkili makine öğrenmesi sınıflandırma yöntemleri belirlenmiştir.
- Belirtilen A ve B etiketli cüruftaki çinko değerleri makine öğrenmesi sınıflandırma yöntemleri ile ayrılmış ve cürufun içindeki çinko oranının hızlı ve doğru bir şekilde sınıflandırılması sağlanmıştır. Bu sınıflandırma kullanılarak geri kazanım süreçlerinde verimlilik artırılabilir, kalite kontrolü yapılabilir ve maliyet düşürülebilir.
- Verimlilik ve kalitenin artırılması, döner fırına beslenen hammaddelerin içeriklerinin ve fırına şarj edilen miktarlarının kontrolü ile sağlanabilir. Döner fırına şarj yapılacak hammadde miktarı ve hammaddelerin kimyasal içerikleri makine öğrenmesi yöntemi yüksek performanslı model ile sınıflandırılırsa A etiketli ve B etiketli çinko oranları bulunabilir. Böylece istenen kalite ve verimlilik için süreç en kısa hali ile önceden bilinecek ve maliyet azalacaktır.
- Cüruftaki çinkonun, makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılması dört farklı model ve metrikte yapılmış ve bunun sonucunda en iyi makine öğrenmesi sınıflandırma yöntemleri DT modeli ve RF modeli olmuştur.
- DT modeli ile en iyi sınıflandırma performansı K-fold 10'da elde edilmiştir. AUC değeri 1'e eşittir.
- Çoklu doğrusal regresyon analizi sonuçlarına göre, cüruf miktarının değişiminin, hammadde miktarı ve EAF tozundaki demir oranındaki değişime bağlı olduğu belirlenmiştir.
- Hammadde miktarı ve EAF tozundaki demir oranının artmasıyla cüruf miktarı artmaktadır. Bu durumda artan cüruf miktarının içindeki çinko oranı %1'den fazla ise cürufta çinko kaybı yaşandığı ve Waelz prosesinin sağlıklı

yapılamamakta, çinkonun verimli şekilde geri kazanılamamakta olduğu söylenebilir.

- Artan cüruf miktarının içindeki çinko oranı %1'den az ise cürufta çinko kaybı yaşanmadığı bu durumda Waelz prosesinin sağlıklı yapılmakta ve çinkonun verimli şekilde geri kazanılmakta olduğu söylenebilir. Cüruf miktarı ile cüruf içindeki çinko oranının ters orantılı olduğu söylenebilir.
- Prosesin iyileştirilmesi için cüruf miktarının artan ve cüruf içindeki çinko oranının azalan periyotta olması gerekmektedir. Bu durumun sağlanması için gerekli şartlar, döner fırın içi yeterli sıcaklığın olması, döner fırın içi yeterli havanın olması, döner fırın içi ring oluşumlarının engellenmesi ve cüruf çıkış zonundaki yeterli oksitlenmenin sağlanması olarak açıklanabilir.
- Hammadde miktarlarının ve EAF tozundaki demir oranının artması ile cürufta çinko oranının değişkenliği arasında bağlantı söylenemez.
- Kireç miktarının P-değeri 0,05'ten büyük olduğu için, kireç miktarının cüruf miktarı üzerinde diğer değişkenlere göre daha az etkisi olduğu sonucuna varılabilir.
- P-değerine göre cüruf miktarı üzerinde en anlam teşkil eden değişkenler sırayla EAF tozu, EAF tozundaki demir oranı, kömür ve kireçtir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, çinko geri kazanımı alanında yapılan araştırmalara ve uygulamalara katkı sağlamaktadır. Sonuçlar, çinko geri kazanımının önemi ve etkinliği konusunda bilimsel bir temel oluşturarak çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Ayrıca, makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımının geri dönüşüm süreçlerini hızlandırabileceği ve verimliliği artırabileceği açıktır. Bu tez çalışması, çinko geri kazanımı alanında yapılan araştırmaların ve uygulamaların devamı niteliğindedir. Çalışmanın sonuçları üzerine yapılan ek çalışmalar, çinko geri kazanımı yöntemlerinin geliştirilmesine, makine öğrenmesi yöntemi ile sınıflandırma yapılmasına ve uygulanmasına daha fazla katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Mudd, G. M., Jowitt, S.M. and Werner, T. T., "The world's lead-zinc mineral resources: Scarcity, data, issues and opportunities", *Ore Geology Reviews*, 80: 1160–1190 (2017).
2. Avachat, H., Sabnavis, M. and Jagasheth, U. H., "Zinc industry: the unsung metal of the economy-industry research report", *CARE Ratings Ltd.*, (2018).
3. Ng, K. S., Head, I., Premier, G. C., Scott, K., Yu, E., Lloyd, J. and Sadhukhan, J., "A multilevel sustainability analysis of zinc recovery from wastes", *Resources, Conservation and Recycling*, 113: 88–105 (2016).
4. İnternet: Woodmac, "Global Zinc Long-term Outlook Q2 2019-Commodity Market Report", <https://www.woodmac.com/reports/metals-global-zinc-long-term-outlook-q2-2019-319195/>. (20 Ocak, 2024).
5. Goodwin, F.E., "Current status and future expectations for the zinc market", *International Zinc Association for Presentation at InterZAC 2017*, Toronto, (2017).
6. Jia, Y., Zhang, T., Zhai, Y., Bai, Y., Ren, K., Shen, X., Cheng, Z., Zhou, X. and Hong, J., "Exploring the potential health and ecological damage of lead–zinc production activities in China: A life cycle assessment perspective", *Journal of Cleaner Production*, 381 (1): 135–218 (2022).
7. Leeuwen, M., "Current status and future expectations for the zinc market", *International Zinc Association for Presentation at InterZAC 2022*, USA, (2022).
8. Shawabkeh, R. A., "Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust", *Hydrometallurgy*, 104 (1): 61–65 (2010).
9. Oustadakis, P., Tsakiridis, P. E., Katsiapi, A. and Agatzini-Leonardou, S., "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 (1–3): 1–7 (2010).
10. Yurten, M., "Çinko ekstraksiyon atığı döner filtre kekinden NaOH liçi ile çinko-kurşun kazanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ (2011).
11. Özel, F., "Çinkur atıklarından metal kazanımında kolin klorür-üre derin ötektik çözücüsünün kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karaman (2022).

12. Mombelli, D., Mapelli, C., Barella, S., Gruttadauria, A. and Di Landro, U., "Laboratory investigation of Waelz slag stabilization", *Process Safety and Environmental Protection*, 94: 227–238 (2015).
13. Pauerová, K. B., Jarmila, T., Jaroslav, B. and Beatrice, P., "Theoretical and practical evaluation of the feasibility of zinc evaporation from the bottom zinc dross as a valuable secondary material", *Materials*, 15 (24): (2022).
14. Strohmeier, G. and Bonestell, J. E., "Steelworks residues and the Waelz kiln treatment of electric arc furnace dust", *Iron and Steel Engineer*, 73 (4): 87–90 (1996).
15. Neto, A. P., Sales, F. A., Ramos, W. B. and Brito, R. P., "Thermo-environmental evaluation of a modified Waelz process for hazardous waste treatment", *Process Safety and Environmental Protection*, 149: 442–450 (2021).
16. Buitrago, L. J. H., Prada, I. D., Amaral-Labat, G., Beneduce Neto, F. and Silva, G. F. B. L., "Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process", *Revista Materia*, 23 (2): (2018).
17. Mahesh, B., "Machine learning algorithms - A review", *International Journal of Science and Research*, 9 (1): 381–386 (2020).
18. Kızılkaya, Y. M. ve Oğuzlar, A., "Bazı denetimli öğrenme algoritmalarının r programlama dili ile kıyaslanması", *Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergisi*, 37 (37): 90–98 (2018).
19. Calayır, G. N. ve Kabak, M., "Bakım için makine öğrenme tekniklerinin analizi ve bir uygulama", *Journal of Turkish Operations Management*, 5 (1): 662–675 (2021).
20. Ceyhan, H. ve Kasapbaşı, M. C., "Üretim sistemlerinde makine öğrenmesi ile kestirimci bakım uygulaması ve modellemesi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 33: 167-175 (2022).
21. Köprü, T., "Kestirimci bakım zamanlarının makine öğrenmesi yöntemleriyle tahminlenmesi: Demir çelik sektöründe bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük (2022).
22. Kırat, S. S. ve Aydın, İ., "Açıklanabilir yapay zekâ tabanlı denetimsiz öğrenme ile ray kusur tespiti", *Demiryolu Mühendisliği*, 18: 1–13 (2023).
23. Janiesch, C., Zschech, P. and Heinrich, K., "Machine learning and deep learning", *Electronic Markets*, 31: 685–695 (2021).
24. İnternet: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, "Çinko", <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/cinko> (15 Kasım, 2023).

25. İnternet: İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, "Çinko Yataklarının Durumu, İşletmeciliği ve Geleceği", <https://imib.org.tr/wp-content/uploads/cinko.pdf>. (15 Kasım, 2023).
26. Şenel, M., "Atık çinko karbon pillerdeki metalik çinkonun hidrometalurjik yöntemlerle kazanılması", *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya (2019).
27. Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B. and Melcher, F., "Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (16): 4761–4791 (2009).
28. Wu, D., Wen, S., Deng, J., Liu, J. and Mao, Y., "Study on the sulfidation behavior of smithsonite", *Applied Surface Science*, 329: 315–320 (2015).
29. Özpek, E., "Oksitli çinko cevherlerinin değerlendirilme olanaklarının araştırılması", *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2010).
30. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Çinko", <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-cinko> (18 Aralık, 2023).
31. Ulutürk, A., "İşletmelerde döviz kuru ve metal fiyatları yönetimi ve Denizli' de bir işletme uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Denizli (2009).
32. İnternet: Tuncel Metal, "Çinko Külçe", http://tuncelmetal.com.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=201 (22 Aralık, 2023).
33. Turan, M.D., "Çinko ekstraksiyon atığından çinko ve kurşunun geri kazanılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ (2002).
34. Ahmadi, M.I., "Düşük tenörlü çinko cevherlerinin hidrometalurji yöntemleri ile değerlendirilmesinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana (2001).
35. Demir, F., Algül, H., Gül, H., Akçıl, M. ve Alp, A., "Mekanik aktivasyon yapılmış çinko konsantrelerinde kavurma sıcaklığının redüksiyonuna etkisinin termal analiz yöntemleri ile incelenmesi", *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9 (2): 324–334 (2001).
36. Akçalı, S.G., "Zenginleştirilmiş çinko cevherinden çinko oksit üretimi için yeni bir metodun tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1999).

37. Alkan, M.S., "Endüstriyel çinko liç atıklarından metal geri kazanımında çevreye duyarlı çözücü kullanılabilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karaman (2021).
38. Kartun, A., "Atık Fe-Mo-Co ferro alaşımının liç kinetiği ve ürün kazanımı", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2016).
39. Özdemir, G.D.T., "Atık pil tozlarından iki kademeli liç yönteminin uygulanmasıyla çinko ve manganın kazanılmasının araştırılması", Doktora Tezi, **İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Malatya (2020).
40. İnternet: Eti Bakır, "Samsun İzabe ve Elektroliz Tesisi", <https://etibakir.com.tr/tesisler/samsun-izabe-elektroliz-tesisi/> (22 Ocak, 2024).
41. Cengiç, S., "Çinkolu atıkların hidrometalurjik yöntemlerle kazanılması", Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2007).
42. Arısoy, C.F., "Eaf baca tozlarının pirometalurjik olarak değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (1997).
43. Sargın, M., "Baca tozundan çinko elde edilmesinin uygulanabilirliği (Kayseri Çinkom A.Ş. Örneği)", Yüksek Lisans Tezi, **Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü**, Kayseri (2016).
44. Kahvecioğlu, Ö., "Pirinç küllerinin pirometalurjik değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2002).
45. Baş, A. D., Yazıcı, E. Y. ve Celep, O., "Geçmişten günümüze hidrometalurji", **Yer Altı Kaynakları Dergisi**, 3 (5): 39–50 (2014).
46. Habashi, F. ve Canbazoğlu, M., "Hydrometallurgy", **Scientific Mining Journal**, 25 (1): 39–52 (1986).
47. Canpolat, G., "Oksitli bakır cevherlerinden bakırın değerlendirilmesi", Doktora Tezi, **Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Diyarbakır (2016).
48. Kaya, G.G., "Sfalerit cevherinin basınç altında çözündürülmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum (2017).
49. Kalpaklı, A., Ayaz, Ş., İlhan, S. ve Zorağa, M., "Tehlikeli atık sınıfında olan elektrik ark fırını baca tozlarından hidrometalurjik yöntemler kullanılarak çinkonun geri kazanılması: Güncel değerlendirmeler", **Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences**, 5 (3): 274–282 (2020).

50. Xia, D.K., "Recovery of zinc from zinc ferrite and electric arc furnace dust", *Queen's University*, Canada (1997).
51. Yeşiltepe, S., "Atık alkali pillerden pirometalurjik yöntem ile ferrromangan ve çinko üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2015).
52. Akın, S., "Bir elektrikli ark ocağında yanmanın hesaplamalı akışkan dinamiği ile modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2021).
53. Gülsuna, G., "Linyit kömürü ara ürününün flotasyon ile zenginleştirilmesinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana (2007).
54. Ergül, M., "Kok fırınlarında enerji analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük (2020).
55. Özdeş, E.O., "Demir çelik endüstrisindeki elektrik ark ocaklarının kimyasal bileşimine dayalı kütle ve enerji analizi", Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay (2018).
56. Soykan, H.Ş., "Elektrik ark ocaklı tesislerde açığa çıkan baca tozlarının katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülerek değerlendirilmesi", *IV. Demir-Çelik Kongresi*, Zonguldak (2008).
57. Kurşunoğlu, S., "Atık/Kullanılmış çinko-karbon ve alkali pillerden çinko ve manganın geri kazanılması", Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir (2010).
58. Sinclair, R.J., "The extractive metallurgy of zinc", *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 13: 216 (2005).
59. Kanbur, İ., "Elektrikli ark ocağı baca tozu geri dönüşüm tesislerinde kurşun maruziyetinin değerlendirilmesi", İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, *Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü*, Ankara (2016).
60. Öztürk, K. ve Şahin, M. E., "Yapay sinir ağları ve yapay zekâ'ya genel bir bakış", *Takvim-i Vekayi*, 6 (2): 25–36 (2018).
61. Arslan, K., "Eğitimde yapay zeka ve uygulamaları", *Batı Anadolu Eğitim Bilimleri Dergisi*, 11 (1): 71–78 (2020).
62. Çevik, K. K. ve Kayakuş, M., "Bilişim teknolojileri departmanında kullanıcıların taleplerine cevap verme süresinin makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (3): 728–739 (2020).

63. Aytekin, H. T., "Makine öğreniminin araştırmacıların veri analizi bağlamında potansiyel önemi", *Ufuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitü Dergisi*, 10 (19): 85–106 (2021).
64. Yeryök, D. ve Acı, M., "Toplu yemek üretiminde günlük talep tahmini için alternatif bir yaklaşım: öğrenci regresyon", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 64–73 (2019).
65. Tütüncü, T.E., "Makine öğrenmesi algoritmaları ile kredi temerrüt riskini tahmin etme", Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Bursa (2022).
66. Karavitha S. S. and Kaulgud N., "Quantum machine learning for support vector machine classification", *Evolutionary Intelligence*, 17: 819–828 (2024).
67. Harman, G., "Destek vektör makineleri ve Naive Bayes sınıflandırma algoritmalarını kullanarak diabetes mellitus tahmini", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32: 7–13 (2021).
68. Ercan, S., "Destek vektör makinelerini kullanan teknik seçmeli öneri sistemi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2020).
69. Bhavsar, H. and Panchal, M. H., "A review on support vector machine for data classification", *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 1 (10): (2012).
70. Altaş, D. ve Gülpınar, V., "Karar ağaçları ve yapay sinir ağlarının sınıflandırma performanslarının karşılaştırılması: Avrupa birliği örneği", *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14 (1): 1–22 (2012).
71. Çiftçi B.T. ve Aşantoğrol F., "Utilization of machine learning models in predicting caries risk groups and oral health-related risk factors in adults", *BMC Oral Health*, 24: 430 (2024).
72. Kavzoğlu, T. ve Çölkesen, İ., "Karar ağaçları ile uydu görüntülerinin sınıflandırılması: Kocaeli örneği", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 (1): 36–45 (2010).
73. Dian Sano, A. V., Stefanus, A. A., Madyatmadja, E. D., Nindito H., Purnomo, A. and Sianipar, C. P. M., "Proposing a visualized comparative review analysis model on tourism domain using Naive Bayer classifier", *Procedia Computer Science*, 227: 482-489 (2023).
74. Shamalov, V., Efimova, V. and Filcenkov, A., "Faster hyperparameter optimization via finding minimal regions in random forest regressor", *Procedia Computer Science*, 212: 378-386 (2022).

75. Uslu, O. ve Akyol, S., "Türkçe haber metinlerinin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak sınıflandırılması", *ESTUDAM Bilişim Dergisi*, 2 (1): 15–20 (2021).
76. Seyrek, E. C. ve Uysal, M., "Farklı platformlardan elde edilen hiperspektral görüntülerin sınıflandırılmasında evrişimli sinir ağları, destek vektör makineleri ve rastgele orman algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22: 1368–1379 (2022).
77. Baydemir, M.B., "Lojistik regresyon analizi üzerine bir inceleme", Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Malatya (2014).
78. Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J. and Li, W., "Introduction to Nonlinear Regression and Neural Networks", Applied Linear Statistical Models, *McGraw-Hill/Irwin*, New York, 511–513 (2005).
79. Polatgil, M., "Veri ölçekleme ve eksik veri tamamlama yöntemlerinin makine öğrenmesi yöntemlerinin başarısına etkisinin incelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11: 78–88 (2023).
80. Başer, B. Ö., Yangın, M. ve Sarıdaş, E. S., "Makine öğrenmesi teknikleriyle diyabet hastalığının sınıflandırılması", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25 (1): 112–120 (2021).
81. Tomak, L. ve Bek, Y., "İşlem karakteristik eğrisi analizi ve eğri altında kalan alanların karşılaştırılması", *Journal of Experimental and Clinical Medicine Deneysel ve Klinik Tıp Dergisi*, 27 (2): 58–65 (2010).
82. Yiğit, P., "Yapay sinir ağları ve kredi taleplerinin değerlendirilmesi üzerine bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul (2011).
83. Pinteá, S. and Moldovan, R., "The receiver-operating characteristic(roc) analysis: Fundamentals and applications in clinical psychology", *Journal of Cognitive and Behavioral Psychotherapies*, 9 (1): 49–66 (2009).
84. Günel, A., "Regresyon denkleminin başarısını ölçmede kullanılan belirleme katsayısı ve kritiği", *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 4 (2): 133–140 (2003).
85. Tabar, M. E., Başara, A. C. ve Şişman, Y., "Çoklu regresyon ve yapay sinir ağları ile Tokat ilinde konut değerlendirme çalışması", *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 3 (1): 1–7 (2021).
86. Yavuz, S., "Regresyon analizinde doğrusala dönüştürme yöntemleri ve bir uygulama", *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23 (1): 165–179 (2010).

87. Akış, B., "İstatistiki yöntemlerle değer belirleme ve değer haritası üretimi-Selçuklu örneği", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Didem ÖZCAN, ilk, orta ve lise eğitimini Gebze’de tamamlamıştır. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başlamış ve 2020 yılında mezun olmuştur. Didem ÖZCAN, çinko geri kazanım fabrikasında çalışma hayatına devam etmektedir.