

**BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ ( $\mu$ CT) VE MLA (MİNERAL  
LİBERATION ANALYZER) VERİLERİNİN KORELASYONU  
VE MİNERAL KARAKTERİZASYONUNDA KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI**

**CORRELATION OF COMPUTED TOMOGRAPHY ( $\mu$ CT) AND  
MLA (MİNERAL LİBERATION ANALYZER) DATA AND  
INVESTIGATION OF ITS USE IN MİNERAL  
CHARACTERIZATION**

**ARDA TEMİZKALB**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ ERGİN GÜLCAN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Yüksek Lisans TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2023

# ÖZET

## BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ ( $\mu$ CT) VE MLA (MİNERAL LIBERATION ANALYZER) VERİLERİNİN KORELASYONU VE MİNERAL KARAKTERİZASYONUNDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

**Arda TEMİZKALB**

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ergin GÜLCAN**

**Haziran 2023, 155 sayfa**

Bu tez çalışması kapsamında  $\mu$ CT'nin (Bilgisayarlı Mikro Tomografi) mineral karakterizasyonunda kullanımının araştırılması ve elde edilen verilerin konvansiyonel MLA (Mineral Liberation Analyzer) bulguları ile kıyaslanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda endüstriyel uygulamaları bulunan feldispat, kurşun-çinko, bor ve nadir toprak cevheri numuneleri temin edilmiş, bu numunelerin kimyasal ve mineralojik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında aynı numune setleri ile  $\mu$ CT kullanılarak üç boyutlu görüntüleme çalışmaları gerçekleştirilmiş, elde edilen görüntülerin tez amacı doğrultusunda kullanılabilmesi amacıyla görüntü analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu  $\mu$ CT görüntülerinin MLA ile karşılaştırılmasının gerçekleştirilmesi öncesinde görüntülerde meydana gelen problemler x-ışını sertleşmesi (beam-hardening), halka etkisi (ring artifact) ve x-ışını yansımaları ve bunlara ilişkin çözümler ayrıca tartışılmıştır.  $\mu$ CT ile elde edilen görüntülerin işlenmesinde ImageJ ve CTan yazılımları kullanılmış, ham görüntüler üzerinde uygulanan görüntü iyileştirme ve görüntü analizi çalışmaları sonrasında üç boyutlu veri analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş ve MLA ile  $\mu$ CT

verileri arasında anlamlı bir korelasyonun varlığı tartışılmıştır. Sonuçlar kapsamında feldispat cevherinin kompleks olmayan yapısı sebebi ile MLA ve  $\mu$ CT verileri arasında anlamlı bir korelasyon gözlemlenmiş, diğer cevherlerin MLA ve  $\mu$ CT verileri arasında ise görüntü impüriteleri ve cevherlerin kompleks yapıları sebebi ile anlamlı bir korelasyon gözlemlenememiştir. MLA analizlerinde tanımlanan minerallerin yoğunlukları ile  $\mu$ CT verileri arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmüş ve regresyon yöntemi ile yüksek güven aralığında  $\mu$ CT verileri ile mineral yoğunluğunun tespitine dönük bulgular elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** mikro-tomografi, korelasyon, mineraloji,  $\mu$ CT, MLA,

# **ABSTRACT**

## **CORRELATION OF COMPUTED TOMOGRAPHY ( $\mu$ CT) AND MLA (MINERAL LIBERATION ANALYZER) DATA AND INVESTIGATION OF ITS USE IN MINERAL CHARACTERIZATION**

**Arda TEMİZKALB**

**Master of Science, Department of Mining Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ergin GÜLCAN**

**June 2023, 155 pages**

In this thesis, it is aimed to investigate the use of  $\mu$ CT (Computed Micro Tomography) in mineral characterization and to compare the data obtained with conventional MLA (Mineral Liberation Analyzer) findings. In this context, feldspar, boron, lead-zinc and rare earth ore samples with industrial applications were obtained and chemical and mineralogical analysis of these samples were carried out. In the continuation of the study, three-dimensional imaging studies were carried out using  $\mu$ CT with the same sample sets and image analysis studies were carried out in order to use the images obtained for the purpose of the thesis. Before the comparison of the three-dimensional  $\mu$ CT images with MLA, the problems occurring in the images such as x-ray beam-hardening, ring artifact and x-ray reflections and their solutions are also discussed. ImageJ and CTan software were used to process the images obtained with  $\mu$ CT, and three-dimensional data analysis was performed after the image analysis studies performed on the raw images. The obtained data were analyzed and the existence of a significant correlation between MLA and  $\mu$ CT data was discussed. Within the scope of the results, a significant correlation was observed between MLA and  $\mu$ CT data due to the non-complex structure

of feldspar ore, while no significant correlation was observed between MLA and  $\mu$ CT data of other ores due to image impurities and complex structures of ores. It was observed that there was a significant relationship between the densities of the minerals identified in the MLA analysis and the  $\mu$ CT data, and the regression method was used to determine the mineral density with  $\mu$ CT data at high confidence intervals.

**Keywords:** micro-tomography, correlation, mineralogy,  $\mu$ CT, MLA

## TEŞEKKÜR

BaŐta danıŐmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ergin Gülcan'a,

mikro tomografi ve SEM/EDS cihazlarında ve bu cihazlardan görüntü alımında yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Hüseyin Evren ÇUBUKÇU'ya,

lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olan Özgün Cem ÖZGÜR'e, lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olan Serra Nur ÇELİK'e, TENMAK/NATEN başkanı Sayın Belma SOYDAŐ SÖZER'e, TENMAK/NATEN Ar-Ge ve İnovasyon Koordinatörü Sayın Merve TANER CAMCI'ya ve tez sürecinde destek olan Sayın Prof. Dr. İlkay Bengü CAN'a; teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
EKLER DİZİNİ.....	xvii
EŞİTLİKLER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANALİZ YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>3</b>
2.1. X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction - XRD).....	3
2.2. X-Işını Floresanı (X-Ray Fluorescence - XRF).....	4
2.3. MLA (Mineral Liberation Analyser).....	5
2.4. Mikro-Tomografi (mikro-CT – $\mu$ CT).....	7
2.4.1 Mikro-CT Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantaj ve Dezavantajları .....	10
<b>3. MİKRO-TOMOĞRAFİNİN MİNERAL KARAKTERİZASYONUNDA KULLANIMI.....</b>	<b>18</b>
<b>4. <math>\mu</math>CT ANALİZİNDE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERİN KULLANILMASI .....</b>	<b>27</b>
<b>5. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>30</b>
5.1. Numune Alma ve Cevherin Genel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	31
5.1.1. Nadir Toprak Cevheri .....	31
5.1.2 Kurşun-Çinko Cevheri .....	32
5.1.3. Feldispat Cevheri .....	33
5.1.4. Bor Cevheri.....	34
5.2. $\mu$ CT ile Görüntü Alma Çalışmaları .....	35
5.2.1. Mikro-Tomografi Görüntülerinden Sanal Kesitlerin Oluşturulması .....	35

5.2.2. Sanal Kesitlerle Yapılan Görüntü İyileştirme Çalışmaları ve Sanal Kesitlerden veri- setlerinin elde edilmesi .....	36
5.3. SEM/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağılımlı Spektrometre) Görüntü Alma Çalışmaları.....	40
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	43
6.1. Numunelerin MLA Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	43
6.1.1. Nadir Toprak Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	43
6.1.2. Kurşun-Çinko Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	45
6.1.3. Feldispat Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	49
6.1.4. Bor Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	51
6.2. $\mu$ CT ile Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	53
6.2.1. Nadir Toprak Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi .....	56
6.2.2. Kurşun-Çinko Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi.....	64
6.2.3. Feldispat Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi .....	71
6.2.4. Bor Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi.....	78
6.3. SEM Görüntülerinin ve EDS Spektralarının Elde edilmesi .....	85
6.3.1. Nadir Toprak Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları .....	85
6.3.2. Kurşun-Çinko Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları .....	88
6.3.3. Feldispat Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları .....	90
6.3.4. Bor Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları .....	92
<b>7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ</b> .....	94
7.1. Nadir Toprak Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	97
7.2. Kurşun-Çinko Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	99
7.3. Feldispat Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	102
7.4. Bor Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	104
7.5. MLA Verileri ile $\mu$ CT'de Yoğunluk Tayini.....	106
7.5.1. Nadir Toprak Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini .....	107
7.5.2. Kurşun-Çinko Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini .....	113



7.5.3. Feldispat Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini .....	120
7.5.4. Bor Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini .....	125
<b>8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>132</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>136</b>
EKLER .....	148
ÖZGEÇMİŞ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. X-Işını Kırınımı Prensibi.....	4
Şekil 2. XRD Yönteminin Çalışma Prensibinin Şematik Gösterimi .....	4
Şekil 3. Farklı CT sistemlerinin verdikleri çözünürlükler ve çalışılabilir tane boyları .....	9
Şekil 4. CNN tabanlı segmentasyon ve geleneksel segmentasyon farkı [17].....	25
Şekil 5. Bruker skyscan 1272 mikro-tomografi cihazı .....	35
Şekil 6. 3D Trainable Weka Arayüzü.....	38
Şekil 7. Farklı fazların gözlem yolu ile işaretlenmesi .....	38
Şekil 8. Fazların belirlenmesi .....	39
Şekil 9. Feldispat cevherinde alt yansıtma değerlerinde gözlemlenen gürültü etkisi a) yansıtma değeri 44-255 b) 44 yansıtma değerinin altında gözlemlenen gürültü .....	40
Şekil 10. Epofix reçine ve sertleştirici .....	41
Şekil 11. Numunelerin epoksi ile karıştırılarak kaplara alınması.....	41
Şekil 12. Struers parlatma cihazı düzeneği.....	41
Şekil 13. Epoksinin sertleşmesi ile kaplardan çıkarılan kesitler.....	41
Şekil 14. Leica EM ACE600 yüksek vakumlu püskürtmeli kaplayıcı .....	42
Şekil 15. Tescan GAIA3 FIB/SEM cihazı.....	42
Şekil 16. Nadir toprak cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA) .....	45
Şekil 17. Kurşun-Çinko cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA).....	49
Şekil 18. a) Plajiyoklaz taneleri içerisinde kapanımlı apatit ve zirkon görünümü b) Plajiyoklaz taneleri içerisinde monazit, apatit ve zirkon kapanımları görünümü c) Plajiyoklaz taneleri içerisinde rutil görünümü.....	50
Şekil 19. Bor cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA).....	53
Şekil 20. a) Kurşun çinko cevheri $\mu$ CT görüntüsü b) Feldispat cevheri $\mu$ CT görüntüsü c) Nadir toprak cevheri $\mu$ CT görüntüsü d) Kolemanit cevheri $\mu$ CT görüntüsü.....	54
Şekil 21. a) Kurşun çinko cevheri $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti b) Feldispat cevheri $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti c) Nadir toprak cevheri $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti d) Kolemanit cevheri $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti.....	55
Şekil 22. Nadir toprak cevheri 3 boyutlu $\mu$ CT görüntüsü .....	56
Şekil 23. Nadir Toprak cevheri $\mu$ CT görüntüsü sanal kesitinde görülen x-ışını yansımaları .....	57

<b>Şekil 24.</b> Nadir toprak cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü .....	58
<b>Şekil 25.</b> Nadir toprak cevheri $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 79-111 b) 111-145 c) 145-176 d) 176-255 .....	59
<b>Şekil 26.</b> Nadir toprak cevherinin sanal kesitlerinden elde edilen fazlarda gözlenen x-ışını sertleşmesi ve x-ışını yansımaları etkileri.....	60
<b>Şekil 27.</b> Nadir toprak cevherinin sanal kesitlerinden elde edilen fazlara kapama ve aşındırma fonksiyonları uygulanması sonucu elde edilen kesitlerden örnekler a) 79-111 fazı b) 111-145 fazı c) 145-176 fazı d) 176-255 fazı .....	61
<b>Şekil 28.</b> Nadir toprak cevheri $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi .....	62
<b>Şekil 29.</b> Nadir toprak cevheri birikimli tane boyu dağılımı ( $\mu$ CT).....	63
<b>Şekil 30.</b> Kurşun-çinko cevheri 3 boyutlu $\mu$ CT görüntüsü.....	64
<b>Şekil 31.</b> Kurşun – çinko cevheri sanal kesitlerinde “ring artifact” etkileri .....	65
<b>Şekil 32.</b> Kurşun-çinko cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü .....	66
<b>Şekil 33.</b> Kurşun-çinko cevheri $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 26-33 b) 33-45 c) 45-85 d) 85-137 e) 137-255 .....	67
<b>Şekil 34.</b> Kurşun-çinko cevherinin $\mu$ CT görüntülerinde gözlemlenen ring-artifact ve x-ışını sertleşmesi etkileri .....	68
<b>Şekil 35.</b> Kurşun-çinko cevheri $\mu$ CT görüntüsünden kapama ve aşındırma eklentileri kullanıldıktan sonraki fazlardan örnek kesitler a) 26-33 b) 33-45 c) 45-85 d) 85-137 e) 137-255 .....	69
<b>Şekil 36.</b> Kurşun-çinko cevheri $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi .....	70
<b>Şekil 37.</b> Kurşun-Çinko cevheri birikimli tane boyu dağılımı .....	71
<b>Şekil 38.</b> Feldispat cevheri 3 boyutlu $\mu$ CT görüntüsü .....	72
<b>Şekil 39.</b> Feldispat cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü .....	73
<b>Şekil 40.</b> Feldispat cevheri $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 44 - 55 b) 55 - 71 c) 71 - 107 d) 107 - 163 e) 163 - 255 .....	74

<b>Şekil 41.</b> Feldispat cevherinin sanal kesitlerinden elde edilen fazlarda gözlenen x-ışını sertleşmesi etkileri .....	75
<b>Şekil 42.</b> Kapama ve aşındırma fonksiyonları uygulanan feldispat cevheri $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 44-55 b) 55-71 c) 71-107 d) 107-163 e) 163-255 .....	76
<b>Şekil 43.</b> Feldispat cevheri $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi	77
<b>Şekil 44.</b> Bor cevheri 3 boyutlu $\mu$ CT görüntüsü.....	79
<b>Şekil 45.</b> Kolemanit cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü .....	80
<b>Şekil 46.</b> Bor cevheri $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 35 - 47 b) 47 - 55 c) 55 - 64 d) 64 - 80 e) 80 - 134 f) 134 - 255.....	81
<b>Şekil 47.</b> Bor cevheri 80 – 134 fazındaki bir kesitteki x-ışını sertleşmesi etkisi.....	82
<b>Şekil 48.</b> Bor cevheri 80 – 134 fazındaki bir kesitin x-ışını sertleşmesi etkilerinin close- ile giderildikten sonraki görüntüsü .....	83
<b>Şekil 49.</b> Bor cevheri $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi.....	84
<b>Şekil 50.</b> Bor cevheri birikimli tane boyu dağılımı ( $\mu$ CT) .....	85
<b>Şekil 51.</b> Nadir toprak cevheri SEM görüntüsü.....	86
<b>Şekil 52.</b> Bastnazit tanesinin EDS spektrası.....	87
<b>Şekil 53.</b> Monazit tanesinin EDS spektrası.....	87
<b>Şekil 54.</b> Kurşun-çinko cevheri SEM görüntüsü .....	88
<b>Şekil 55.</b> Galenit tanesi EDS spektrası .....	89
<b>Şekil 56.</b> Kurşun-Çinko cevheri sfalerit tanesi EDS spektrası .....	89
<b>Şekil 57.</b> Feldispat cevheri SEM görüntüsü .....	90
<b>Şekil 58.</b> K-feldispat tanesinin EDS spektrası.....	91
<b>Şekil 59.</b> Na-feldispat tanesinin EDS spektrası .....	91
<b>Şekil 60.</b> Bor cevheri SEM görüntüsü .....	92
<b>Şekil 61.</b> Kolemanit tanesinin EDS spektrası .....	93
<b>Şekil 62.</b> Nadir toprak cevheri kümülatif tane boyu dağılımları (MLA ve $\mu$ CT) .....	99
<b>Şekil 63.</b> Kurşun-çinko cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA ve $\mu$ CT).....	102
<b>Şekil 64.</b> Bor cevheri tane boyu dağılımı (MLA ve $\mu$ CT).....	106
<b>Şekil 65.</b> Nadir Toprak Cevheri PCA analizi sonucu .....	108

<b>Şekil 66.</b> Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	109
<b>Şekil 67.</b> Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	110
<b>Şekil 68.</b> Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	110
<b>Şekil 69.</b> Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları.	111
<b>Şekil 70.</b> Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	112
<b>Şekil 71.</b> Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	113
<b>Şekil 72.</b> Kurşun-Çinko Cevheri PCA analizi sonucu .....	114
<b>Şekil 73.</b> Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	115
<b>Şekil 74.</b> Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	116
<b>Şekil 75.</b> Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	117
<b>Şekil 76.</b> Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları.	117
<b>Şekil 77.</b> Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	118
<b>Şekil 78.</b> Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	119
<b>Şekil 79.</b> Feldispat Cevheri PCA analizi sonucu .....	120
<b>Şekil 80.</b> Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	121
<b>Şekil 81.</b> Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	122
<b>Şekil 82.</b> Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	123
<b>Şekil 83.</b> Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları.	123
<b>Şekil 84.</b> Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	124
<b>Şekil 85.</b> Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	125
<b>Şekil 86.</b> Bor Cevheri PCA analizi sonucu .....	126
<b>Şekil 87.</b> Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	127
<b>Şekil 88.</b> Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	128
<b>Şekil 89.</b> Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları ..	129
<b>Şekil 90.</b> Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları.	129

<b>Şekil 91.</b> Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	130
<b>Şekil 92.</b> Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları .....	131
Şekil 93. Nadir toprak cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek) .....	133
Şekil 94. Kurşun-çinko cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek) .....	133
Şekil 95. Feldispat cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek).....	134
Şekil 96. Bor cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek) .....	134

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. $\mu$ CT’de görülen artefaktların kaynakları ve çözümleri [51].....	13
Çizelge 2. Numunelerin hazırlanma yöntemleri ve yapılan analizler.....	30
Çizelge 3. Nadir Toprak cevherinin kimyasal bileşenleri .....	31
Çizelge 4. Tüvenan cevherin tanımlamalı XRD sonuçları .....	32
Çizelge 5. Tüvenan cevherin kimyasal analizi .....	33
Çizelge 6. Feldispat cevherinin kimyasal bileşimi .....	33
Çizelge 7. Bor cevherinin kimyasal analizi .....	34
Çizelge 8. Mikro-tomografi görüntülerinde kullanılan parametreler .....	35
Çizelge 9. Nadir toprak cevherinin mineralojik bileşimi.....	43
Çizelge 10. Nadir toprak cevherinin bağlılık ve serbestleşme verileri.....	44
Çizelge 11. Nadir toprak cevherinin detaylı faz analizleri .....	45
Çizelge 12. Kurşun-çinko cevherinin modal mineralojisi .....	46
Çizelge 13. Kurşun-çinko cevherinde çinkonun dağılımı .....	46
Çizelge 14. Sferit serbestleşme verileri .....	47
Çizelge 15. Sferitin mineral ilişkileri.....	47
Çizelge 16. Kurşun-çinko cevherindeki galenitin serbestleşme durumları .....	47
Çizelge 17. Kurşun-çinko cevherindeki galenitin mineral ilişkileri.....	47
Çizelge 18. Kurşun-çinko cevherindeki Zn-Fe karbonatların serbestleşme verileri .....	48
Çizelge 19. Kurşun-çinko cevherindeki Zn-Fe karbonatların mineral ilişkileri.....	48
Çizelge 20. Feldispat cevherinin modal mineralojisi .....	51
Çizelge 21. Bor cevherinin modal mineralojisi .....	51
Çizelge 22. Kolemanit cevherinin bağlılık ve serbestleşme verileri .....	52
Çizelge 23. Kolemanit cevherinin detaylı faz analizleri .....	52
Çizelge 24. Kullanılan cevherlerin içindeki minerallerin yoğunlukları( $g/cm^3$ ) [122, 123].....	96
Çizelge 25. Nadir toprak cevheri $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri .....	97
Çizelge 26. Nadir toprak cevheri $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları .....	97
Çizelge 27. Nadir toprak cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin betimsel istatistik ile karşılaştırılması.....	98

<b>Çizelge 28.</b> Nadir toprak cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması .....	98
<b>Çizelge 29.</b> Kurşun-çinko cevheri $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri .....	100
<b>Çizelge 30.</b> Kurşun-çinko cevheri $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları.....	100
<b>Çizelge 31.</b> Kurşun-çinko cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin betimsel istatistik ile karşılaştırılması .....	100
<b>Çizelge 32.</b> Kurşun-çinko cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması .....	101
<b>Çizelge 33.</b> Feldispat cevheri $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri.....	102
<b>Çizelge 34.</b> Feldispat cevheri $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları .....	103
<b>Çizelge 35.</b> Feldispat cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin betimsel istatistik ile karşılaştırılması .....	103
<b>Çizelge 36.</b> Feldispat cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması .....	104
<b>Çizelge 37.</b> Bor cevheri $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri .....	104
<b>Çizelge 38.</b> Bor cevheri $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları .....	104
<b>Çizelge 39.</b> Bor cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin T testi ile karşılaştırılması.....	105
<b>Çizelge 40.</b> Bor cevheri MLA verileri ve $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması .....	105
<b>Çizelge 41.</b> Nadir Toprak Cevheri MLA’de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları .....	107
<b>Çizelge 42.</b> Nadir toprak cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin $R^2$ ’leri.....	108
<b>Çizelge 43.</b> Kurşun-Çinko Cevheri MLA’de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları.....	114
<b>Çizelge 44.</b> Kurşun-Çinko cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin $R^2$ ’leri.....	115
<b>Çizelge 45.</b> Feldispat Cevheri MLA’de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları .....	120
<b>Çizelge 46.</b> Feldispat cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin $R^2$ ’leri.....	121
<b>Çizelge 47.</b> Bor Cevheri MLA’de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları.....	126
<b>Çizelge 48.</b> Feldispat cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin $R^2$ ’leri.....	127



## EKLER DİZİNİ

Ek 1. Nadir Toprak cevheri $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri.....	148
Ek 2. Kurşun-çinko cevheri $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri .....	149
Ek 3. Feldispat cevheri $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri.....	150
Ek 4. Bor cevheri $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri .....	151
Ek 5. Nadir toprak cevheri barit tanesi EDS spektrası.....	151
Ek 6. Nadir toprak cevheri florit tanesi EDS spektrası.....	151
Ek 7. Nadir toprak cevheri kuvars tanesi EDS spektrası .....	152
Ek 8. Kurşun-Çinko cevheri pirit tanesi EDS spektrası.....	152
Ek 9. Kurşun-Çinko cevheri dolomit tanesi EDS spektrası.....	152
Ek 10. Kurşun-Çinko cevheri Si-Al killeri tanesi EDS spektrası .....	152
Ek 11. Feldispat cevheri rutil tanesi EDS spektrası.....	152
Ek 12. Feldispat cevheri zirkon tanesi EDS spektrası .....	152
Ek 13. Bor cevheri strontiyanit tanesi EDS spektrası.....	153
Ek 14. Bor cevheri dolomit tanesi EDS spektrası.....	153
Ek 15. Bor cevheri kalsit tanesi EDS spektrası.....	153

## EŞİTLİKLER DİZİNİ

Eşitlik 1. Beer Lambert yasası .....	8
Eşitlik 2. Nadir toprak cevheri 2’li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	109
Eşitlik 3. Nadir toprak cevheri 4’li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	109
Eşitlik 4. Nadir toprak cevheri 6’lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	110
Eşitlik 5. Nadir toprak cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	111
Eşitlik 6. Nadir toprak cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	112
Eşitlik 7. Nadir toprak cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayısı ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	112
Eşitlik 8. Kurşun-çinko cevheri 2’li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	115
Eşitlik 9. Kurşun-çinko cevheri 4’lü veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	116
Eşitlik 10. Kurşun-çinko cevheri 6’lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	116
Eşitlik 11. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	117
Eşitlik 12. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	118
Eşitlik 13. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayısı ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	119
Eşitlik 14. Feldispat cevheri 2’li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	121
Eşitlik 15. Feldispat cevheri 4’lü veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	122

Eşitlik 16. Feldispat cevheri 6'lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	122
Eşitlik 17. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	123
Eşitlik 18. Feldispat cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	124
Eşitlik 19. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayıları ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	125
Eşitlik 20. Bor cevheri 2'li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi	127
Eşitlik 21. Bor cevheri 4'lü veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi	128
Eşitlik 22. Bor cevheri 6'lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi	128
Eşitlik 23. Bor cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	129
Eşitlik 24. cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi.....	130
Eşitlik 25. Bor cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayıları ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi .....	131

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

Zn	Çinko
Pb	Kurşun
Fe	Demir
ZnS	Sfalerit
CuFeS <sub>2</sub>	Kalkopirit
FeS <sub>2</sub>	Pirit
SiO <sub>2</sub>	Kuvars

### Kısaltmalar

SEM	Scanning Electron Microscope - Taramalı Elektron Mikroskobu
MLA	Mineral Liberation Analyser- Mineral Serbestleşme Analizi
XRD	X-Ray Diffraction - X-Işını Kırınımı
XRF	X-Ray Fluorescence- X-Işını Floresanı
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optic Emission Spectrometry
µCT	Computed Micro-Tomography - Bilgisayarlı Mikro-Tomografi
KK	Lost on Ignition - Kızdırma Kaybı
TBD	Tane Boyu Dağılımı
EDS	Energy Dispersive Spectrometer - Enerji Dağılımlı Spektrometre
WDS	Wavelength Dispersive Spectrometer - Dalga boyu Dağılımlı Spektrometre
RV	Reflectance Value -Yansıtma Değeri
Y	Yoğunluk
nA	Nano Amper

# 1. GİRİŞ

Son yıllarda yüzeye yakın, yüksek tenörlü ve iri boyda serbestleşen cevherlerin azalması ve işletme maliyetlerine yönelik hesaplamaların düşen tenörler ve yükselen hammadde fiyatlarıyla ilişkili olarak güncellenmesiyle birlikte, cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinin daha düşük tenörlü rezervlerin işlenmesine ve daha ince boylarda zenginleştirme akım şemalarına yönelmesine sebep olduğu görülmektedir. Bu nedenle cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinde mineral karakterizasyonu, rezerv tespitinden tesislerdeki optimizasyon çalışmalarına kadar pek çok aşamada daha da önemli hale gelmiştir.

Cevherlerin mineralojik yapılarının ve kimyasal içeriklerinin belirlenmesinde x-ışınli analiz yöntemleri (XRD, XRF, SEM) yaygın olarak kullanılmaktadır. Cevher hazırlamada vazgeçilemez bir yöntem olarak baş vurulan cevher karakterizasyon çalışmaları, pek çok farklı ekipman ve yöntemlerin kullanıldığı, alanında uzmanlar tarafından gerçekleştirilen çok disiplinli çalışmalardır. Karakterizasyon çalışmaları laboratuvar ölçekli elek analizi, ağır sıvı testleri, yoğunluk ölçümleri, öğütülebilirlik testleri vb. pek çok çalışmayla birlikte; XRD (X-Ray Diffraction) ve XRF (X-Ray Fluorescence) gibi analitik kimya ve faz analizlerinin de dahil edildiği çok sayıda analiz ve veriyi kapsamaktadır. Bu veriler yüksek tenörlü ve yüksek verimli konsantre ürünlerin elde edilmesinde büyük rol oynamaktadır [1, 2]. Geçtiğimiz 20 yılda oldukça geliştirilen analiz teknikleri hemen hemen her endüstride hızlı ve hassas analiz çözümleri sunmaktadır [3]. Görüntüleme temelli serbestleşme analizi amacıyla en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi SEM (Scanning Electron Microscope-Taramalı Elektron Mikroskobu)'dir [4]. SEM ve mikro analiz yöntemlerinin beraber kullanımı ile SEM/EDS tabanlı analiz cihazları ortaya çıkmıştır. Bunlardan en yaygın olanı MLA (Mineral Liberation Analyzer)'dir. Konsantre ürünlerin tenörlerini belirleyen en önemli parametrelerden biri serbestleşmedir. MLA ile mineral ilişkileri ve serbestleşme boyları belirlenebilmektedir [5]. MLA ile elde edilen bulgular uzun yıllardır madencilikte cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerine yön vermektedir [6]. Ancak, MLA gibi SEM tabanlı sistemlerde 3 boyutlu veri elde edilememektedir. Bu durum stereolojik hatalara sebep olmaktadır. Parlak kesitlerden serbestleşme verisi elde edilmesine dayanan bu yöntemde, bağlı taneler serbest görünebilirken serbest ya da bağlılığı düşük taneler ise bağlı olarak görünebilmektedir. Bu sebeple 3 boyutlu karakterizasyon önem arz etmektedir. Bu bağlamda son yıllarda yaygın olarak araştırmaların konusu olan, 3 boyutlu bir görüntüleme yöntemi olan  $\mu$ CT (Bilgisayarlı Mikro Tomografi) öne çıkmaktadır [2, 7]. Bu cihazlarda otomasyon olmaması ve mineral tanımlamasının

henüz belirli standartlar çerçevesinde yapılamaması sebebiyle cevher karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmamaktadır. Ancak potansiyeli ve teknolojisi sebebiyle  $\mu$ CT, son yıllarda birçok çalışmaya konu olmuş ve bu çalışmalardan bazılarında tezin devamında detaylı olarak bahsedilmektedir. [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Bu tez çalışmasında, XRD (X-ışını kırınımı), XRF (X-ışını Floresans) vb. kimyasal analiz yöntemleri ile karakterize edilen cevher numunelerinden elde edilen iki boyutlu MLA veri setleri ile,  $\mu$ CT taramalarından elde edilen 3 boyutlu verilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda; feldispat, nadir toprak, bor ve kurşun-çinko cevherleri ile çalışılmıştır. Bu cevherler öncelikle MLA ile karakterize edilmiş ve mineral türleriyle bunların dağılımları incelenmiştir. Devamında eş numuneler ile kapsamlı  $\mu$ CT analizleri gerçekleştirilmiştir.  $\mu$ CT'den elde edilen görüntülere uygulanan görüntü iyileştirme yöntemleri ve 3 boyutlu görüntü analizlerinin ardından elde edilen veri setleri kendi içerisinde istatistiksel olarak ANOVA yöntemi ile değerlendirilmiş ve MLA verileri arasındaki ilişki istatistiksel yöntemler olan betimsel (descriptive) istatistik, iki değişkenli korelasyon testi, bağımsız bileşen analizi (Principal Component Analysis - PCA) ve regresyon testleri kullanılarak araştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. ANALİZ YÖNTEMLERİ

Malzeme bilimi ve mühendislikte kullanılan X-Işınli deneysel yöntemler üç kategoriye ayrılmaktadır [19].

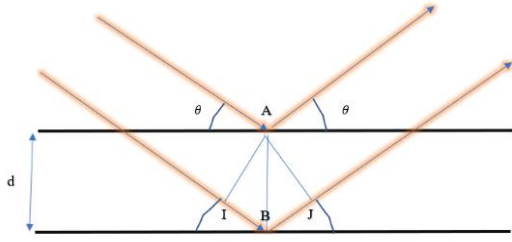
- XRF (X-Ray Fluorescence)
- XRD (X-Ray Diffraction)
- X-Ray Radyografi

XRF spektroskopisi, kalitatif ve kantitatif kimyasal analizde ve özellikle elektron mikroskoplarında kullanılmaktadır. XRD spektrometrisi kristallerin karakteristik x-ışınlarını kırmasını baz alan bir yöntemdir ve kristal yapıların incelenmesinde kullanılmaktadır. X-ışını radyografisi ise, bir nesnenin geçen yoğunluğunun film veya detektörler kullanılarak nesnenin iç yapısını görüntülemeye dayanan bir görüntüleme tekniğidir. X-ışını radyografisi yöntemleri arasında son yıllardaki en önemli gelişme X-Işınli bilgisayarlı tomografidir (CT) [20].

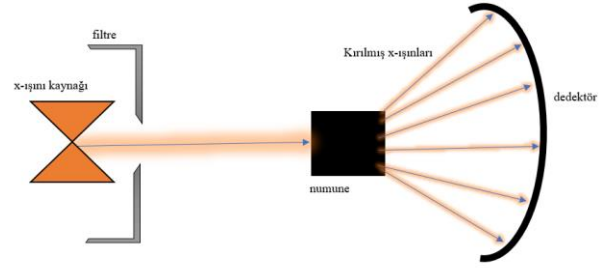
### 2.1. X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction - XRD)

X-Ray fotonları bir maddeye çarptığında emisyon ve saçılım etkileri gibi etkileşimler olmaktadır. Fotonlar ve atomdaki elektronlar arasında Rayleigh saçılması olarak da adlandırılan bir saçılım meydana gelir. Saçılan dalganın enerjisi bu durumda enerjisini değiştirmez ve faz ilişkisini korur, [21]. Ancak bir kristal yapısı sebebiyle, kırınımlı x-ray fotonları oluşturmakta ve bu kırınımların karakteristik olması sebebiyle kırınımlı fotonlar kristallerin yapısını araştırmada kullanılabilir. [22].

XRD'nin cevher hazırlamada kullanım alanı, bir numunede bulunan mineralleri tanımlamak ve bunların içeriklerini ölçmektir [22]. XRD prensibi, atomik düzlemler tarafından x-ray fotonlarının kırınımına ve karakteristik kırılma açısının bir sensör ile ölçülerek kristal yapının tanımlanmasına dayanmaktadır [19]. XRD yöntemi madencilikte uranyum cevherlerinin karakterizasyonu [23], bakır cevherlerindeki kalsitin belirlenmesi [24], boksit cevherlerinin karakterizasyonu [25, 26], demir cevherlerinin karakterizasyonu [27] ve altın cevherlerinin karakterizasyonu [28] ve gibi pek çok farklı çalışmada kullanılabilen bir yöntemdir. X-Işını kırınımı prensibi ve XRD yönteminin şematik gösterimi [29] Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmektedir.



**Şekil 1.** X-Işını Kırınımı Prensibi



**Şekil 2.** XRD Yönteminin Çalışma Prensibinin Şematik Gösterimi

XRD sistemlerinde yansıyan ışınların tespitinde iki tip X-Işını dedektörü kullanılmaktadır. Bunlar WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer-Dalgaboyu Dağılımlı Spektrometre) ve EDS (Energy Dispersive Spectrometer-Enerji Dağılımlı Spektrometre)'dir. EDS ile tüm elementler aynı anda analiz edilebilir. WDS'de ise tek bir element belli bir süre boyunca analiz edilmektedir. Bu da daha yavaş ancak daha tutarlı bir analiz sonucu elde edilmesini sağlamaktadır.

Bununla birlikte XRD ile elde edilen bilgiler çoğu zaman yeterli olmamakta ve özellikle bazı kritik elementler için elementel tayinin yapılması gerekmektedir. XRF yöntemi bu içeriklerin tayininde sıkça kullanılan bir kimyasal analiz yöntemidir.

## 2.2. X-Işını Floresanı (X-Ray Fluorescence - XRF)

XRF spektrometrisi, 1970'lerden günümüze kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. XRF spektrometreleri, atom numarası 4 (berilyum) ile 92 (uranyum) arasındaki elementlerin tayini için yaygın olarak kullanılmaktadır [30]. Kalitatif ve kantitatif olarak majör, minör ve eser miktardaki elementlerin analizleri XRF spektrometrisi ile gerçekleştirilebilmektedir [31]. XRF'in çalışma prensibi Moseley Yasası ile ilişkilendirilmektedir.

XRF yöntemi madencilikte demir atıklarının karakterizasyonu [32], nadir toprak elementleri-niyobyum cevherinin karakterizasyonu [33] ve bakır-çinko ve lityum cevherlerinin kuru öğütülmesinin flotasyona etkisinin belirlenmesi [34] gibi birbirinden oldukça farklı cevherlerin analizinde ve karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılabilen bir yöntemdir.

XRF'in çalışma prensibi cevherdeki atomların yüksek enerjili x-ışınları tarafından uyarılmasına ve uyarılan atomların fotonlarının emisyonlarına dayanmaktadır. Her bir atomun yaydığı foton karakteristiktir ve atom numaralarıyla doğrudan ilişkilidir [31].



XRF ve XRD yöntemi yaygın kullanılan yöntemler olup mineral ve elementel içerikler hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bununla birlikte bu yöntemlerle görüntüleme yapılamamakta ve bu sebeple cevherlerin yapısal özellikleri, minerallerin bağılıkları incelenememektedir. XRF ve XRD gibi yöntemlerden elde edilen verilerle  $\mu$ CT ve diğer görüntüleme yöntemlerinden elde edilen verilerle beraber değerlendirildiğinde mineral karakterizasyonu açısından tamamlayıcı olabilmektedirler.

### **2.3. MLA (Mineral Liberation Analyser)**

Element ve mineral içeriklerinin ve dağılımlarının belirlenmesinde görüntülü analiz yöntemleri büyük öneme sahiptir. Görüntülü analiz yöntemlerine örnek olarak mikroskop, Clemex, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) gibi cihazlar verilebilir. Bu yöntemlerden en yaygın kullanılanı SEM'dir. Bu cihazlarda otomasyon/yazılım bulunmadığı için analizler analizi yapan operatöre göre değişkenlik göstermektedir.

Mineral serbestleşme analizlerinin doğruluğu ve hassasiyeti proses tasarımı büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle teknoloji geliştikçe görüntülü analiz ve mikro analiz yöntemlerinin birlikte kullanıldığı özel yazılımlı EDS/SEM sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlere örnek olarak QEMSCAN [35] ve MLA verilebilir. Bu sistemlerden en son geliştirilmiş olanı MLA (Mineral Liberation Analyser)'dir. MLA analizinden elde edilebilen veriler tane boyu dağılımı, tenör, doku ve serbestleşme verileridir [36]. MLA analizinden elde edilebilecek serbestleşme verileri, özellikle öğütme ve liç prosesleri için vazgeçilmezdir [37, 38].

MLA sisteminin ilk ana kullanımı uygulamalı mineraloji ve metalürjik proseslerdir [39, 40]. Özellikle cevherlerdeki değerli minerallerin serbestleşme derecelerini belirleyerek gang minerallerinden ayrımını sağlama amacıyla bulunmuştur [41]. Ayrıca tortuların ve tortul kayalardaki ağır minerallerin vb. incelenmesinde [42], maden atıklarındaki mikro yapıların incelenmesinde [43] kullanılmaktadır. MLA sistemleri özetle kendine özel yazılımı olan ve enerji dağılımlı spektrometre içeren bir taramalı elektron mikroskobu olarak tanımlanabilir. Bu cihaz görüntü oluşturmak için minerallerin ortalama atom numaralarını kullanarak stabil geri saçınımlı elektron (Backscattered Electron - BSE) sinyallerini kullanmaktadır.

Düşük gürültülü ve yüksek çözünürlüklü görüntüler mineral tanımlaması için oldukça önemlidir. Günümüz SEM cihazlarının çözünürlüğü 0.1-0.2  $\mu$ m'ye kadar çıkabilmektedir. SEM ile oluşturulan görüntülerin, EDS spektralarının ve yazılımın birlikte kullanımıyla bu görüntülerden

mineral tanımlaması yapılabilmektedir. Ayrıca farklı minerallerin benzer parlaklıklarda BSE görüntülerine sahip olması durumunda X-Ray haritalandırması (X-Ray Mapping) uygulanabilmektedir [4]. MLA sistemi tarafından kullanılan görüntü analizi fonksiyonları faz segmentasyonu ve tane de-aglomerasyonudur [39, 44].

MLA'de numunenin görüntüsü alınmadan önce parlatılması ve parlatılan kesitin karbonla kaplanması gerekmektedir. Hazırlanan kesitteki bazı tanelerin birbiriyle teması kaçınılmazdır. Eğer bu taneler birbirinden ayrılmazsa hatalı serbestleşme verileri elde edilebilmektedir. Bu nedenle MLA sisteminde bu taneleri önceden belirlenmiş parametrelere göre ayıran de-aglomerasyon fonksiyonu mevcuttur [44].

Serbestleşme verilerinin elde edilmesinde en önemli aşamalardan biri mineral fazlarının ve bu fazların sınırlarının belirlenmesidir. Görüntü segmentasyonu bu aşama için en çok kullanılan yöntemdir [36]. MLA'de bulunan görüntü segmentasyonu fonksiyonu tanelerin içindeki fazları grilik değerlerine göre sınıflandırmaktadır. Bir tanedeki her bir ortalama grilik değeri minerallerin ortalama atom numaraları ile doğrudan ilişkilidir. Bazı mineraller aynı ortalama atom numarasına sahip olduğundan (pentlandit ve kalkopirit vb.), bu minerallerin BSE görüntülerindeki grilik değeri aynıdır. MLA sisteminde bu gibi minerallerin ayrımı x-ışını analizi ile yapılmaktadır. Ayrıca farklı minerallerin benzer parlaklıklarda BSE görüntülerine sahip olması durumunda x-ışını haritalandırması (X-Ray Mapping) kullanılabilir [4]. Bununla birlikte MLA sistemlerinde 7 farklı analiz metodu bulunmaktadır. Bunlar: Standart BSE serbestleşme analizi, gelişmiş BSE serbestleşme analizi (XBSE), seyrek faz serbestleşme analizi (SPL), tane x-ışını haritalandırması (PXMAP), seçimli tane x-ışını haritalandırması (SXMAP), x-ışını modal analizi (XMOD) ve nadir faz aramasıdır (RPS) [45].

Standart BSE serbestleşme analizi (BSE) en temel serbestleşme analizi yöntemidir. Mineral dağılımı BSE'den elde edilen grilik değerleri ile belirlenmekte ve serbestleşme verileri doğrudan BSE görüntüsünden elde edilmektedir. Bu yöntem kurşun-çinko ya da sülfürlü bakır cevherleri gibi grilik değerlerinde büyük farkların bulunduğu cevherlerde kullanılmaktadır. Diğer tüm yöntemler standart BSE yöntemi baz alınarak yapılmaktadır.

MLA analizi son yıllarda arsenikli gümüş cevherinin karakterizasyonunda [46], nadir toprak cevherlerinin karakterizasyonunda [36], bakır atıklarının karakterizasyonu [47], molibden konsantrelerindeki impüritelerin belirlenmesi [48] gibi pek çok farklı çalışmaya konu olmuştur.

Birçok alanda kullanılmasına karşın MLA ile yapılan analizlerin bir kısmının yapan operatöre bağlı olması, numune hazırlık süresinin uzun olması ve bu hizmetin pahalı olması gibi dezavantajları mevcuttur. Ayrıca MLA ile farklı cevherler hakkında serbestleşme, mineral ilişkileri gibi önemli veriler elde edilebilse de bu sistemde 3 boyutlu görüntüleme yapılamamaktadır. Bu cihazlarda kesitle 2 boyutlu görüntüleme yapılabildiğinden veriler stereolojik modeller yardımıyla elde edilmekte ve bu modeller kompleks cevherler için her zaman hassas veya geçerli olamamaktadır. MLA sistemi sondaj karotları ya da bloklar gibi büyük numunelerin görüntülenmesi için uygun değildir [49]. Bu sebeplerle 3 boyutlu görüntüleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

#### **2.4. Mikro-Tomografi (mikro-CT – $\mu$ CT)**

Modern bilgisayar sistemlerinin 1960'larda geliştirilmesiyle birlikte, x-ışınlı bilgisayarlı tomografi sistemi ilk olarak Hounsfield tarafından 1972 yılında tıbbi görüntüleme amacıyla keşfedilmiştir [50]. CT tarayıcıları 1970'lerin sonuna doğru birkaç üretici tarafından üretilmeye başlanmıştır. CT'de yapılan geliştirmeler görüntü alma sürelerinin 300 saniyeden 1 saniyenin altına indirilmesiyle kalmayıp; ayrıca sabit rotasyon, daha yüksek görüntü kalitesi için yüksek enerjili x-ışınları ve 3D çözünürlükleri geliştirilmiştir. Endüstriyel CT 1980'lerde materyal analizlerinde tahribatsız bir teknik olarak kullanılabilmesiyle birlikte popülerleşmiştir. Tahribatsız bir görüntüleme sistemi olması objelerin iç yapılarının gözlemlenmesi ve materyallerin özelliklerinin anlaşılabilmesi anlamında yeni olanaklar sunmaktadır [51]. X-ışını kaynaklarında ve çözünürlüklerde yapılan geliştirmelerle birlikte tomografi sistemleri jeoloji, metalürji ve cevher hazırlama alanlarında tahribatsız bir yöntem olarak sıkça kullanılmaktadır. Kullanılan güncel tomografi sistemleri laboratuvar ölçekli mikro-CT, senkrotron mikro-CT, nano-CT ve faz-contrastlı mikro-CT'dir [52].

Mikron ve mikron-altı çözünürlükler hem laboratuvar hem de yüksek çözünürlüklü senkrotron x-ışını kaynakları için kullanılabilir. Uzamsal (Spatial) çözünürlük iki farklı nesnenin birbirinden ayırt edilebildiği en düşük çözünürlüktür. Odak-noktası boyutu ve detektör-elemanları (DEL) gibi sadece fiziksel parametreler değil ayrıca görüntü rekonstrüksiyonu gibi yöntemler uzamsal çözünürlüğü etkilemektedir [53].

CT sistemlerinde farklı materyallerin tanımlanması ya da fotonların materyallerden geçişine bağlı olarak fazların tanımlanması prensibi Beer-Lambert tarafından matematiksel olarak formüle edilmiştir [54]. Beer-Lambert yasası Eşitlik 1’de verilmektedir.

Eşitlik 1. Beer Lambert yasası

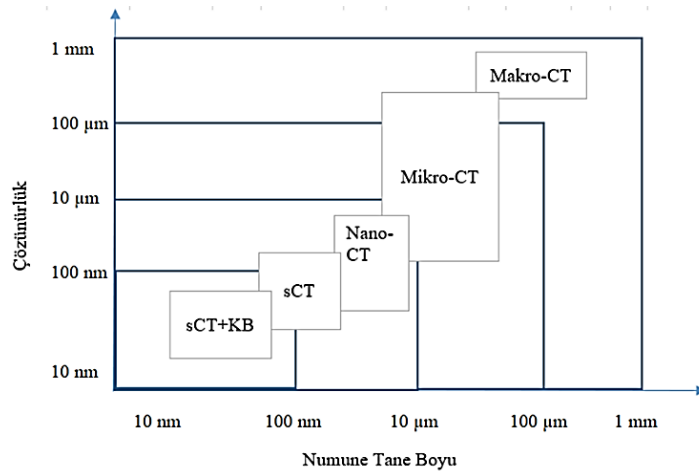
$$I = I_0 e^{-\int \mu(x) dx}$$

Formülde  $I_0$  x-ışınının yoğunluğunu,  $I$  x-ışınının bir  $x$  kalınlığındaki bir materyalden geçtikten sonraki yoğunluğunu,  $\mu(x)$  ise lineer attenüasyon (attenuation) katsayısını ifade etmektedir. Bu formülde objeden geçen x-ışınının monokromatik olduğu ve ortamın vakumlu olduğu kabul edilmektedir [54]. Endüstriyel CT uygulamalarında genel olarak heterojen yapılarla uğraşılması gerekmektedir. Bu yapılar farklı attenüasyon katsayılarına sahip farklı materyallerden oluşmaktadır. Heterojen yapıların attenüasyon karakteristikleri yapının voksel (voxel) matrikslerine ayrılmasıyla hesaplanabilmektedir. CT sistemlerinde farklı açısız pozisyonlarda projeksiyonlar elde edilmekte ve bu projeksiyonların sayısı, numune özelliklerine, tarama süresine ve görüntü kalitesine göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak filtre kalınlığı ve numunenin attenüasyonu x-ışını kaynağının akımını ve maruz kalma süresini belirlemektedir. Yüksek projeksiyon sayısı görüntü etkilerini bastırabilmekle birlikte, görüntülerde gürültü etkileri kalabilmektedir. Projeksiyonların elde edilmesiyle, rekonstrüksiyon (reconstruction) yöntemi kullanılarak 2 boyutlu sanal kesitler elde edilmektedir. Ancak sanal kesitlerde görüntü alma aşamasında (projeksiyonlarda) oluşan impüriteler bulunmakta ve bu etkiler görüntü kalitesini bozmaktadır. Bu etkilerden en yaygın olanı gürültü olup bu etkileri gidermek için görüntü iyileştirme filtreleri kullanılabilir ancak bu filtreler görüntü çözünürlüğünün düşmesine neden olmaktadır [51].

İmpüritelere/görüntü kusurlarına karşın 3D görüntü alımlarının hızlanması ve daha ince boyda çözünürlüklerin elde edilebilmesiyle birlikte x-ışınlı tomografi sistemleri kullanılarak diğer sistemlerle elde edilmesi zor veri setlerine ulaşılabilir [55]. Çözünürlüğü etkileyen faktörlerden biri odak noktasıdır. Odak-noktası bir x-ışını tüpünün elektronlarının ya da anotunun çarptığı ve çarpma sonucu ortaya çıkan x-ışınlarının yayıldığı alandır. İnce odak-noktası boyu uzamsal çözünürlüğü arttırmaktadır [56].

Yaygın kullanılan tomografi sistemleri uzamsal çözünürlüklerine bağlı olarak mili-CT, mikro-CT ve nano-CT olarak sınıflandırılmaktadır. Odak-noktası boyutu 0.1 mm'den yüksek olan cihazlar milli-CT, birkaç mikrona kadar olanlar mikro-CT ve 0.4 mikrona kadar olanlar nano-CT olarak tanımlanmaktadır. Laboratuvar ölçekli tomografi sistemlerinde farklı boylarda ekipman tasarımına bağlı olarak çalışılabilmektedir. Operatör geometri, detektör magnifikasyonunu ve kaynak-numune-detektör mesafelerini değiştirerek istenen çözünürlük değerini elde edebilir. Ayrıca operatör numuneye göre voltaj ve akımı da değiştirerek iyi bir veri seti elde edebilmektedir.

Laboratuvar ölçekli CT'lerde şu ana kadar elde edilebilmiş en yüksek çözünürlük 40-50 nm'dir [55, 57, 58]. X-ışınlı tomografi sistemlerinin uzamsal çözünürlük ve incelenebilir tane boyu **Şekil 3**'te özetlenmiştir.



**Şekil 3.** Farklı CT sistemlerinin verdikleri çözünürlükler ve çalışılabilir tane boyları

$\mu$ CT sistemleri üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler x-ışını kaynağı, numunenin rotasyonunu ve hareketini kontrol edebilmek için bir zemin ve bir detektörden oluşmaktadır. Tıbbi versiyonlarından farklı olarak endüstriyel CT sistemleri x-ışını kaynağı ve detektör sabitken görüntüsü alınacak objenin hareket etmesi şeklinde çalışmaktadır [59, 60, 61]. X-ışını tüplü  $\mu$ CT sistemlerinde, operatör tüp potansiyelini ve akımı değiştirebilmektedir. Tüp akımını değiştirmek x-ışını yoğunluğunda bir artış sağlamakta, fakat x-ışının enerji dağılımına bir etkisi olmamaktadır. Tüp voltajını değiştirmek yayılan x-ışını enerjilerinin spektrumunu değiştirmektedir ve bu rekonstrüksiyonlarda kontrastın optimizasyonunun yapılmasında da kullanılmaktadır.

Efektif bir tomografi taraması için sintilatör (scintillator) özellikleri önemlidir. Sintilatör bir x-ışını ile uyarıldığında floresan ışınları yayan taneler olarak tanımlanmaktadır. Bunlardan biri iletilen

dalga boylarının aralığıdır. Bu aralık detektörün algılayabildiği dalga boyu aralığı ile aynı olmalıdır. İkinci parametre ise sintilatörün emisyon gücüdür. Yüksek yoğunluklu, yüksek atom numaralı taneler için yüksek enerjili fotonlar gerekmektedir. Üçüncü parametre ise emisyon verimidir. X-ışınlarının yoğunluğunun bir objeden geçmesiyle birlikte düşmesi ve x-ışını yoğunluğundaki değişimlerin dedektör aracıyla algılanması sonrasında projeksiyonlar oluşmaktadır. 360 derecelik bir rotasyonla 1000'den fazla projeksiyon elde edilmektedir. Görüntü rekonstrüksiyonu yöntemi ile bu projeksiyonlardan 3 boyutlu görüntü oluşturulup bu görüntülerden sanal kesitler elde edilmektedir. Projeksiyon sayısının artması rekonstrüksiyon sonrası elde edilecek görüntülerin daha detaylı olmasını sağlamaktadır [62].

Görüntülerin oluşturulmasında temel olarak iki algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritmalar analitik ve tekrarlamalı algoritmalarıdır. Analitik yöntemler hızlı yöntemlerdir ancak saçılım gibi kompleks faktörlerin varlığında bu yöntemler işe yaramamaktadır. Filtrelenmiş geri projeksiyon (Filtered Back Projection-FBP) yöntemi çok efektif olmasa da hala en çok kullanılan analitik yöntemidir. Tekrarlamalı algoritmalar gürültü ve etkileri düşürmesi sebebiyle CT görüntülerinin görüntü kalitesini arttırmada daha etkilidir. FBP yöntemi geri projeksiyon yönteminin limitleri üstüne tasarlanmış bir algoritmadır. Bu yöntemle bir evrişim (convolution) filtresiyle görüntülerdeki bulanıklık giderilebilmektedir. Tekrarlamalı algoritmalar ölçülmüş ve hesaplanmış verilerin farklarını kullanan yöntemlerdir. İlk görüntü CT analizi sırasında elde edilen projeksiyonlarının ölçülmesiyle oluşturulmaktadır. Sonraki aşamada simüle edilmiş projeksiyonlar elde edilmektedir. Bu projeksiyonların karşılaştırılması sonrasında elde edilen veri algoritmada belirlenen koşullarla eşleşiyorsa son görüntü oluşturulmaktadır [63].

Birkaç tekrarlamalı rekonstrüksiyon yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler eşzamanlı tekrarlamalı rekonstrüksiyon yöntemi (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique – SIRT), eşzamanlı cebirsel rekonstrüksiyon yöntemi (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique – SART) ve cebirsel rekonstrüksiyon yöntemidir (Algebraic Reconstruction Technique – ART) [64, 65, 66].

#### **2.4.1 Mikro-CT Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantaj ve Dezavantajları**

3D tomografinin ( $\mu$ CT) önemli bir avantajı çoklu, kompleks ve kişisel etmenlerin önemli olduğu analizlerin yerini alabilme potansiyelidir.  $\mu$ CT ile süreksizlikler, girişimler ve her bir deformasyon sadece tek bir tarama ile incelenebilmektedir [51].

$\mu$ CT'nin, ince/parlak kesitli geleneksel analiz yöntemleri olan SEM, MLA ve QEMSCAN'e göre avantajları birkaç mikrona varan uzamsal çözünürlüklerle cevherlerin 3 boyutlu yapıları (gözenekler, çatlaklar, yapıları, faz tanımlaması vd.) hakkında bilgi elde edilebilmesidir. Tomografi tekniklerinin en önemli özelliklerinden biri tahribatsız bir analiz yöntemi olmasıdır. SEM ile görüntü analizi parlak kesitlerden görüntü alımıyla 2 boyutlu veri edilmesine dayanmaktadır. Parlak kesitlerin hazırlanması zaman alan bir yöntemdir ve SEM, MLA ve QEMSCAN gibi cihazlarda 2 boyutlu verilerden stereolojik düzeltmelerle 3 boyutlu veri edilmektedir. Bu işlem herhangi bir ekstra yöntem olmadan doğrudan mikro-CT ile elde edilebilmektedir.  $\mu$ CT görüntülerinden görüntü işleme yöntemlerinin kullanımıyla faz değişimi, fazların hacimsel dağılımı gibi veriler elde edilebilmektedir [67, 68]. Ancak  $\mu$ CT cihazlarından elde edilen görüntülerde x-ışını kaynağının kısıtlamalarından kaynaklı olarak gürültü ve etkiler bulunmaktadır. Gürültünün ve etkilerin giderilmesi için görüntü işleme tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Bu etkilerden aşağıda detaylı olarak bahsedilmektedir.

Gürültü; bir artefakt değil, görüntü bozan bir faktördür.  $\mu$ CT'de oluşturulan görüntüler gerçek görüntü ve gürültüden dolayı oluşan görüntülerin birleşimi olarak tanımlanmaktadır. Gürültü azaltmada en çok kullanılan algoritmalarından biri tekrarlamalı (iterative) algoritmalar [69]. Gürültü azaltmada yaygın olarak kullanılan algoritmalarından bir diğeri ise görüntü-uzay algoritmalarıdır. Bu algoritmalar lineer (ortalama (mean), medyan (median), Gaussian filtresi (Gaussian Filter) vb.) ve lineer olmayan (non-local means (NLM)) fitredir. Bu algoritmalar doğrudan sanal kesitlere uygulanmaktadır.

Halka artefaktı; CT görüntülerinde, oluşturulmuş sanal kesitlerin üzerinde bir dizi halka görünümü halka olarak görünmektedir [70]. Halka artefaktlarına kusurlu detektör elemanları neden olmaktadır Buna örnek olarak detektör diziliminde bir hata halka artefaktının oluşmasına neden olmaktadır [71].

Halka artefaktlarının oluşmasında her zaman sıcaklıktaki değişimler, tarama sırasında piksel tepkisi ve sintilatörlerde oluşan radyasyon hasarı neden olmaktadır. Bazen fabrikasyon kaynaklı kusurlar da halka artefaktına sebep olmakla birlikte, modern tarayıcılarda bu çok yaygın değildir [72].

Halka artefaktları tüm sanal kesitlerde bulunmaktadır. Ancak kesitlerin döner eksenindeki konumuna bağlı olarak bu artefaktın yoğunluğu değişmektedir. Döner eksene yaklaştıkça halka

artefaktları daha net gözlemlenmektedir. Detektörlerdeki yanlış kalibrasyon ya da kalibrasyonsuzluk daha geniş ve hafif etkili artefaktlara neden olmakta, detektörlerdeki parçalardan kaynaklı ise daha net görünen daha dar artefaktlara neden olmaktadır. Sintilatördeki arızalarda ya da toz varlığında gözlemlenebilecek en geniş artefaktlar gözlemlenmektedir. Halka artefaktlarının ve gürültünün engellenememesi sebebiyle kantitatif analiz bu impüriteler giderilmeden yapılamamaktadır. Projeksiyon verilerine uygulanan bazı algoritmalar halka artefaktlarının şiddetine bağlı olarak artefaktların giderilmesini sağlamaktadır [73].

Bazı algoritmalar doğrudan oluşturulmuş sanal kesitlere uygulanmaktadır. Lineer ve lineer olmayan filtrelerin kullanımıyla bu etkiler giderilebilmekte ve bazı durumlarda etkili olmaktadır [74]. Bu artefaktları gidermenin en iyi yolu projeksiyon görüntülere ve sanal kesit görüntülerinin ikisine de algoritmaların uygulanmasıdır [75].

Objeler düşük enerjili x-ışınlarını yüksek enerjili x-ışınlarına kıyasla daha çok zayıflattığından, ortamdan geçen heterojen bir x-ışını demetinde yüksek enerjili ışınlar düşük enerjili ışınlara göre daha yoğun olarak bulunmaktadır. Bu ışının penetrasyon kabiliyeti objeye çarpan ilk ışına göre daha yüksektir [76]. Bu prensip, görüntüde var olmayan bir yoğunluğun ya da bileşimin oluşmasına neden olur. Bu etkiye X-ışını sertleşmesi (beam hardening) adı verilmektedir [77]. Bu etkileri gidermek için görüntü alma, sanal kesit oluşturma aşamalarında kullanabilecek metodolojiler mevcuttur [78].

Kısmi hacim etkisi kantitatif analizi büyük oranda etkileyen bir diğer etkidir. Kısmi hacim etkisi farklı görüntü bölgelerindeki nokta dağılım fonksiyonuna (Point Spread Function-PVF) bağlıdır. Başka bir tür kısmi hacim etkisi ise görüntülerin voksel boyuna bağlı olan örnekleme etkisidir [79].

Her bir voksel değeri voksel içerisindeki materyallerin ortalama attenüasyon değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir. Bir voksel iki ya da daha fazla faz içeriyorsa, veri elde edilirken her bir fazın attenüasyon katsayılarının kombinasyonu kullanılmaktadır ve voksel değeri bu fazların attenüasyon katsayılarının voksel içindeki hacimlerine bağlı olarak lineer kombinasyonunu temsil etmektedir. Bu şekilde var olmayan bir materyalin attenüasyon katsayısı elde edilmektedir. Bu aşamada hata voksellerin çözünürlüklerine ya da boylarına bağlı olarak değişmektedir. Kısmi hacim etkisini düzeltmede (Partial volume correction-PVC) kullanılan yöntemler ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemler yapılandırma (reconstruction) aşamasında ve yapılandırma sonrası uygulanan yöntemlerdir. Bu yöntemler lokal projeksiyon yöntemi gibi



projeksiyon bazlı yöntemleri de içermektedir [80]. Bazı yayımlarda tarayıcının tane dağılım fonksiyonu tartışılmıştır. Buna ters evrişim (deconvolution) adı verilmektedir [81]. Bu yöntem sadece gürültüyü değil ayrıca kısmi hacim etkisini de düzeltmektedir.

Saçılım tomografi sistemlerinde gözlemlenen sorunlardan bir diğeridir. Radyografik görüntüleme proseslerindeki temel konsept sadece doğrudan kaynaktan detektöre giden fotonların ölçülmesi şeklindedir. Saçılım ise fotonların obje ile etkileşimi sonrası kırılması ve orijinal rotasından sapması sonrasında oluşmaktadır. Saçılan x-ışınları ölçümlerde sapmalara neden olmakta ve kantitatif analizleri büyük oranda etkilemektedir. Sanal kesitler oluşturulduktan sonraki aşamada görüntüde bulunan saçılım miktarı obje ile doğrudan ilişkilidir [82].

Saçılımların önlenmesinde iki çeşit yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki saçınan ışınların detektöre ulaşmasını engellemektir. Buna örnek olarak saçılımsız sistem (anti-scatter grid) kullanılması verilebilir. İkinci yöntem ise posteriori düzeltimi ve saçılımın uzaklaştırılmasıdır. Birinci yöntem saçınımı azaltmakla beraber tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Bu sistemler kullanımı tarayıcı geometrisini kısıtlayan fiziksel parametrelerdir ve daha yüksek radyasyon maruziyeti anlamına gelmektedir [83]. **Çizelge 1**'de yukarıda detaylı olarak verilen artefaktların oluşma nedenleri ve bu artefaktların çözümleri özetle verilmektedir.

**Çizelge 1.**  $\mu$ CT'de görülen artefaktların kaynakları ve çözümleri [51]

Artefaktın Tipi	Kaynak	Çözüm
Gürültü	Fiziksel artefakt	Uzamsal çözünürlüğü düşürmek
	Süreksizlik	Tekrarlamalı görüntü oluşturma
		Filtre
Halka Artefaktı	Tarama artefaktı	Detektörlerin kalibrasyonu
	Detektör sapması	Dijital filtre
X-Işını Sertleşmesi	Fiziksel artefakt	Dijital filtre
	Fotonların farklı oranlarda emilimi	Kalibrasyon
		Operatör tecrübesi
X-ışını sertleşmesini düzeltmede yazılımların kullanılması		
Kısmi Hacim Etkisi	Fiziksel artefakt	İnterpolasyon, daha yüksek uzamsal çözünürlüğün kullanılması
	Farklı fazlarda voksel oluşumu	
Saçılım Artefaktı	Fiziksel artefakt	Saçılma önleyici sistem (Anti-scatter grid)
	Saçılmış fotonlar	Posteriori düzeltme/ Saçılımların çıkarılması

Tomografi sistemlerinde numune hazırlığında dikkat edilmesi gereken tek prensip numunenin sıkıca kapatılması ve görüntü alımı sırasında numunede herhangi bir oynama olmaması gerekmektedir. Numunenin ya da numunede bulunan tanelerin görüntü alımı sırasında hareketi görüntülerde bulanıklık olmasına neden olmaktadır. Bir  $\mu$ CT cihazından elde edilebilecek uzamsal çözünürlük doğrudan cihaza bağlıdır. Araştırma konusuna göre büyütme (magnification) derecesi belirlenmektedir. Eğer numunede kırıkların ya da küçük gözeneklerin araştırılması gerekiyorsa yüksek çözünürlük gereklidir. Düşük çözünürlük daha çok görüş alanı sağlamaktadır. Bu sayede bir taramada daha çok tane taranmaktadır. Uzamsal çözünürlük kaynağın numuneye olan mesafesi ve numunenin detektöre olan mesafelerinin ayarlanmasıyla değiştirilebilmektedir. Tarama parametreleri kullanılan tomografi cihazına ve numunenin karakteristiklerine göre değişmektedir [51].

Uzamsal çözünürlüğe ek olarak voltaj ve maruziyet süresi parametreleri de görüntü kalitesini arttırmak için kullanılmaktadır. X-ışını enerji spektrumunu ifade eden voltaj, bir cevher numunesinin attenüasyon katsayısına bağlıdır. Cevher içerisindeki tüm minerallerin zayıflama katsayılarına göre voltaj seçilmelidir. Attenüasyon katsayılarının belirlenmesinde birkaç veri tabanı ve program kullanılmaktadır. Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology-NIST) tarafından oluşturulan XCOM veri tabanı elementlerin, bileşiklerin ve karışımların kütle attenüasyonlarını ve kütle yoğunluğu verilerini sağlamaktadır [84].

Genel olarak, yüksek enerji x-ışınının penetrasyonunun yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Ancak yüksek enerji ile yapılan taramalarda mineral fazlarının tanımlanması zorlaşmaktadır. Düşük enerjili ışın kullanılarak bu durumun üstesinden gelinebilmektedir. Ancak bu durumda ışınların penetrasyon kabiliyeti düşmektedir. Kömürün metalik olmayan minerallerle (taş, kum, kireçtaşı, killer, kuvars vb.) attenüasyonları benzer olduğundan temsili numune olarak kullanılmaktadır. Demir, alüminyum, bakır, çinko, kurşun platinum vb. içerikli metallik minerallerin ve nadir toprak minerallerinin yüksek atom numaralarından dolayı genel olarak yüksek enerjili ışınlarla görüntülemelerinin yapılması gerekmektedir [55].

$\mu$ CT'de attenüasyon verilerindeki farkların kullanılmasıyla farklı fazlar belirlenebilse de bazı durumlarda farklı fazların belirlenmesi ve benzer attenüasyon katsayılarına sahip minerallerin birbirinden ayrılması zor olmaktadır [51]. Buna örnek olarak kompleks yapıları cevherler ve işlenmiş

cevherler (oksidlenmiş vb.) verilebilir. Benzer attenüasyon katsayılarına sahip mineraller  $\mu$ CT görüntülerinde birbirine yakın grilik değerlerine sahip olmaktadır. Kuvars, feldispat, kaolinit ve klorit bunlara örnek olarak verilebilir. SEM-EDS ve XRD gibi diğer tekniklerden elde edilen verilerin referans değeri olarak kullanılmasıyla bu sorunların üstesinden gelinebilmektedir. SEM-EDS verilerinin  $\mu$ CT verileriyle birlikte kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [7, 85]

Görüntüleri iyileştirmek ve sonrasında yapılacak kantitatif analizler için ham görüntülerde bir dizi görüntü işleme tekniğinin kullanılması gerekmektedir [86]. Araştırma konusuna bağlı olarak uygulanacak görüntü işleme teknikleri de farklılık göstermektedir. Bu yöntemler grilik değeri modifikasyonu (eşitleme, normalizasyon, parlaklık ve kontrast ayarlama vb.) ve filtreleme (arka planı çıkarmak ya da gürültüyü engelleme) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Görüntü segmentasyonu kantitatif analizleri etkileyen en önemli yöntemdir. Görüntü segmentasyonu görüntünün fazlara ayrıldığı morfolojik bir görünümü etkileme prosesidir [87]. Her ne kadar birkaç görüntü segmentasyonu yöntemi olsa da genel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar eşik belirleme (Thresholding) ve tane sınırlarının belirlenmesi (Watershed transformation) prosesleridir. Eşik belirleme en çok kullanılan ve en basit görüntü segmentasyonu yöntemidir. Eşik belirleme yöntemi bir eşik değeri ya da bir aralığın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem birincil segmentasyon yöntemi olarak ya da diğer segmentasyon yöntemleri için ön proses olarak uygulanmaktadır. Histogram eşik (Histogram thresholding) yöntemi en basit eşik belirleme yöntemidir ve taneleri arkaplandan ayırmak için kullanılmaktadır.

Segmentasyondan sonra mineral bileşiminin kantitatif analizi verileri istatistiksel hesaplarla elde edilebilmektedir. Bu hesapların tutarlılığı belirlenen eşik değeriyle doğrudan ilişkilidir [51]. Bazı durumlarda grilik değerine bağlı olarak faz dağılımları üst üste binmektedir. Bu durumda kantitatif analizin doğruluğu kesin olmamaktadır. Bazı  $\mu$ CT görüntülerinde PVE ya da x-ışınının polikromatikliğine bağlı olarak objede heterojen bir yapı görülebilmektedir. Bu durumda bazı tanelerin arka plan ya da ön plana ait olup olmadığı belli olmamaktadır. Bu durumda lokal eşik yöntemleri sıkça kullanılmaktadır [88].

‘Watershed’ in kullanım amacı çoklu tane içeren görüntülerde tanelerin sınırlarının belirlenmesi ve tanelerin tanımlanmasının yapılmasıdır. Watershed segmentasyonu tane boyu, şekli, porozite ya da herhangi bir tane karakteristiğinin belirlenmesinde önemli bir aşamadır. Eğer watershed prosesi doğru bir şekilde yapılmışsa tane hakkında kantitatif veri elde edilebilmektedir.

Alınan görüntülerin 3 boyutlu olarak görüntülenmesi, kantitatif analizler ve hesapların yapılmasında ImageJ ve Fiji gibi açık kaynaklı görüntü işleme ve analiz programları kullanılmaktadır [89]. Ayrıca bu programlara ek olarak tomografide kullanılan CTan, CTvox programları da verilebilir. Görüntülerin işlenmesinde programlama programları olan Matlab ve ITK da sıkça kullanılmaktadır.  $\mu$ CT taramasında elde edilen görüntülerin 3 boyutlu gösteriminde çoğunlukla hacimsel yapılandırma (volume rendering) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde hacimdeki her bir voksele kırmızı-yeşil-mavi renk ve opaklık atanmaktadır. Hacimsel yapılandırmada kullanılan programlardan bazıları Volume Graphics, Amira, Avizo gibi programlardır. Hacimsel yapılandırmada ayrıca yüzeysel yapılandırmada (surface rendering) kullanılan Solidworks ve Autodesk gibi programlar da kullanılabilir. Ayrıca açık kaynaklı yazılımlar (ImageJ/Fiji, Quant3D, Pore3D vb.) CT görüntülerinin iki boyutlu ya da üç boyutlu olarak incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [83].

Yapılan 3D analizler doğrultusunda  $\mu$ CT'den tane boyu, hacim ve yüzey alanı verileri ve ayrıca tane şekli parametreleri olan eşdeğer küresel çap (equivalent spherical diameter), uzunluk ve genişlik, küresellik ve ortalama tane piksel yoğunluğu verileri elde edilebilmektedir [90, 91, 92].

Literatürde tane boyu ve şekliyle ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur. Karşılaştırmada elek analizi verileri [93], SEM'den elde edilen tane karakteristikleri verileri [94] kullanılmıştır.  $\mu$ CT ayrıca kömür cevherlerinin karakterizasyonunda da kullanılmaktadır. Kömür cevherlerinde yüzme-batma testine alternatif olarak kullanılabilir.  $\mu$ CT yüzme-batma yöntemine göre daha güvenli, daha çevreci, düşük maliyetli ve toksik olmayan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [95].

Cevher hazırlamada bir cevherin mineral içeriklerinin ve minerallerin birbiriyle ilişkilerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu verilerle öğütme boyu belirlenerek aşırı öğünme gibi durumlarının önüne geçilebilmekte ve tesisler için uygun akım şemaları belirlenebilmektedir. Parlak kesit ile iki boyutlu görüntüleme yapılarak MLA, QEMSCAN vb. otomasyonlu görüntü analizi sistemleriyle mineral içerikleri ve minerallerin ilişkileri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu sistemlerde yapılan analizlerde numune hazırlama prosedürü vakit almaktadır ve parlatması yapılan kesitlerdeki taneler serbest gibi görünebilmekte ve bu durum serbestleşmenin normalden çok çıkmasına sebep olabilmektedir. Parlak kesitlerden hacimsel serbestleşmenin belirlenmesi için stereolojik modellerin uygulanması gerekmektedir. Uygulanan stereolojik modellerin parametreleri cevherin yapısına bağlıdır ve her cevherin yapısı

karakteristiktir. Bu sebeple modellerle her zaman tutarlı sonuç elde edilememektedir. Eğer ikiden fazla faz varsa uygulanacak stereolojik düzeltme çok etkili değildir [96, 97]. Bu yöntemlerle karşılaştırıldığında  $\mu$ CT, tahribatsız bir teknik olarak çoklu fazların üç boyutlu olarak incelenebildiği bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Minerallerin dağılımının ve bileşiminin belirlenmesinde kullanılan yöntemler literatürde tartışılmıştır [93, 98].

Liç ve flotasyon proseslerinin etkili bir şekilde yapılabilmesi için tanelerin kapanımlılığı (grain exposure) ve serbestleşme verileri önemlidir.  $\mu$ CT sistemlerinde çözünürlüğün gelişmesiyle birlikte üç boyutta bu veriler elde edilebilmektedir. Bu ölçümü yapabilmek için geliştirilmiş bir algoritma mevcuttur [99].

### 3. MİKRO-TOMOĞRAFİNİN MİNERAL KARAKTERİZASYONUNDA KULLANIMI

$\mu$ CT'nin mineral karakterizasyonunda kullanıldığı pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar ilk olarak 1990'lı yıllarda [95, 100, 101] başlamış olup ilk süreçlerde uzamsal çözünürlükteki kısıtlamalar sebebiyle çok detaylı bulgulara ulaşılamamıştır. Ancak bu çalışmalar  $\mu$ CT'nin çalışma prensibi ve kullanılma potansiyeli hakkında birçok fikir sunmuştur. Daha güncel çalışmalardan bazıları şu şekildedir;

- Howard vd. [102]  $\mu$ CT için standartların belirlenmesi ve sondaj karotu örneklerinden mineral karakterizasyonu ve altının tanımlanmasıyla ilgili,
- Reyes vd. [7]  $\mu$ CT görüntülerinin ve SEM görüntülerinin kombinasyonunun bir cevherin karakterizasyonunda kullanımı ve serbestleşme tayini ile ilgili,
- Wang vd. [99] altın içeren pirit cevherinin flotasyon yöntemiyle zenginleştirilebilirliğini belirleme amacıyla cevherin serbestleşmesinin tayini ile ilgili,
- Wang vd. [103] düşük tenörlü bir bakır cevherinde serbestleşme tayini ve bu verilerin SEM-tabanlı bir sistemden elde edilen verilerin karşılaştırılması ile ilgili,
- Reyes vd. [104] bir bakır cevherinin tenör ve yüzey serbestleşmesinin 3 boyutlu incelenmesiyle ilgili,
- Ueda vd. [105] ve Ueda [106] yapay tanelerin  $\mu$ CT taraması ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu verilere dayanan bir stereolojik etkilerin kaldırılması/azaltılması yaklaşımı ile ilgili,
- Wenz vd. [107] elmaslardaki mineral kapanımlarının gözlemlenmesi ile ilgili,
- Oliviera vd. [108] bir demir cevheri atığının  $\mu$ CT ve SEM görüntülerinden serbestleşmenin ve stereolojik eğilimin tayini ile ilgili,
- Oliviera vd. [109] bir boksit cevherinin  $\mu$ CT yöntemi görüntülemesinden elde edilen 3D verilerden serbestleşmenin belirlenmesi ile ilgili,
- Tung vd. [16]  $\mu$ CT ve  $\mu$ XRF kullanılarak mineral tanımlaması ve serbestleşme tayinine dair Deep-XFCT isimli bir yöntemin geliştirilmesi ile ilgili,
- Tang vd. [17] MLA'den 3 boyutlu tanımlama ve serbestleşme tayini amacıyla  $\mu$ CT,  $\mu$ XRF ve MLA verileri ile evrişimli bir sinir ağıının oluşturulması (convolutional neural network) ile ilgili,

- Ve Jin vd. [110] bir bakır cevherinin ön zenginleştirilmesinin gerekliliğinin belirlenmesinde  $\mu$ CT kullanımı ile ilgili,

çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Howard vd. [102] tarafından  $\mu$ CT için standartların belirlenmesiyle ilgili yapılmış çalışmada, Avustralya-Tazmanya Altın Madeni'nden alınan iki sondaj karotu incelenmiştir. Sondaj karotlarından biri önce ikiye kesilerek bir yarısı SEM (Scanning Electron Microscope) cihazında incelenmiştir. Altının sondaj karotunda kapladığı alanı tespit etmek için ise BSE (Backscattered Electron) görüntüsü ve SEM'den gelen veri kullanılmıştır. İlk aşamada  $\mu$ CT için kalibrasyon çalışması yapılmış ve farklı yoğunluklardaki 4 materyal (PTFE, alüminyum, titanyum ve çelik) ile standartlar belirlenmiştir [102]. Standartlar belirlendikten ve kalibrasyon yapıldıktan sonra karotlardan biri (A) kesilerek SEM ile görüntüsü alınmış ve içerisindeki altının element haritası çıkarılmış. SEM görüntülemesi yapılan kesitin ayrıca  $\mu$ CT görüntüsü alınmıştır.  $\mu$ CT için yapılan kalibrasyonun değerlendirilebilmesi amacıyla cihazın kalibrasyonsuz ve kalibrasyonlu halleriyle A ve B karotlarının görüntülenmesi yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu verileri doğru bir şekilde  $\mu$ CT ile karşılaştırabilmek için SEM datalarıyla 2 boyutlu olarak alanın %1'i başına düşen altın miktarı hesaplanmış ve bu çıkarımla bütün hacmin altın miktarı belirlenmiştir. Referans olarak küpelyasyondan (fire assay) elde edilen veri kullanılmış ve diğer analizlerden elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Bu bağlamda kalibrasyonsuz  $\mu$ CT ve SEM verilerinin küpelyasyona yakın olduğu gözlemlenmiş olup, kalibrasyonlu  $\mu$ CT verilerinin ise oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda fiziksel analize en yakın değer kalibrasyonsuz  $\mu$ CT verisine ait olduğu görülmektedir. Kalibrasyonlu  $\mu$ CT verisindeki fark ise standartların azlığından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma sonucunda ulaşılan aşağıdaki bulgular önem arz etmektedir [102];

- Sondaj karotlarının 3 boyutlu olması SEM cihazının kullanılmasını imkânsız kılmaktadır.
- $\mu$ CT ile mineral fazları, dağılımları ve yapısı görüntülenebilir.
- $\mu$ CT ile düzgün bir görüntüleme yapılabilsede de mineralojik fazlar belirlenemez.
- $\mu$ CT yoğunluğu  $7 \text{ g/cm}^3$ 'den düşük mineral fazlarının belirlenmesinde kullanılabilir
- Ancak altın vb. çok daha yoğun elementlerin fazlarının belirlenmesinde yeterli olmadığı görülmektedir.

$\mu$ CT taramalarında yüksek yoğunluktaki minerallerin içeriği arttıkça x-ışını sertleşmesi gibi etkiler arttığından ve bu minerallerin ortalama atom numaraları birbirine yakın olduğundan ortalama atom numarası yüksek mineral fazlarının birbirinden ayrılması mümkün değildir. Bu çalışmada yoğunluğu  $7 \text{ g/cm}^3$ 'ten yüksek mineral fazlarının belirlenmesinin mümkün olmadığı belirtilmiştir. Ancak yoğunluğu  $7 \text{ g/cm}^3$ 'ten düşük olan mineral fazlarının belirlenmesi de her zaman mümkün olmamaktadır. Bunun sebebi özellikle gang minerallerinin birbirine çok yakın ortalama atom numaralarına bu sebeple birbirlerine çok benzer attenüasyon katsayılarına sahip olmalarıdır.

Reyes vd. [7] yaptığı çalışmada SEM görüntülerini  $\mu$ CT görüntüleri ile tane bazında eşleştirmek için bir algoritma geliştirilmiştir.  $\mu$ CT'den kaynaklı hatalar en aza indirilmeye çalışılmış ve analizdeki hatanın sadece stereolojik etkilerden gelmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan cevher çoğunlukla kuvars (%41.93), muskovit (%39.81), pirit (%7) ve bakır minerallerinden (%2.6) oluşmaktadır. İki boyutlu  $\mu$ CT ve üç boyutlu  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen tane boylarının farklı olmasının sebebi stereolojik etkilerdir. Bu sebeple iki boyutlu  $\mu$ CT görüntüleri ve BSE görüntülerinin tane boyları açısından doğrusal modeli oluşturularak değerlendirilmiştir. Çalışmada piritin bakır olarak sınıflandırılması her boyda gözlemlenmiş, bakırın pirit olarak sınıflandırılması ise tane boyu inceldikçe artış göstermiştir. Piritin bakır olarak sınıflandırılması bu hatanın cihazın çözünürlüğünden kaynaklanmadığını göstermektedir. Bu hata  $\mu$ CT görüntülerindeki diğer etkilerden kaynaklanmaktadır. Yanlış negatifler boy inceldikçe arttığından bu hatanın varlığı çözünürlükle ilişkilendirilebilir. SEM, 2D  $\mu$ CT ve 3D  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen yüzde bileşimlerinde gang mineral miktarı sırasıyla %95.47, %95.69 ve %96.74 olarak, pirit miktarı sırasıyla %3.07, %3.17 ve %2.49 olarak, bakır mineralleri ise sırasıyla %1.46, %1.14 ve %0.77 olarak belirlenmiştir. Buna göre sadece 3 ana faz incelendiğinden içerikler birbirine yakın çıkmaktadır. Faz sayısı arttıkça tanımlama yapmak zorlaşmaktadır.

Bu çalışma sonucunda ulaşılan aşağıdaki bulgular önem arz etmektedir [7];

- Tane bazında ve SEM görüntülerinin birleştirilmesini sağlayan bir algoritma geliştirilmiştir.
- $\mu$ CT'nin düşük enerjili taramasıyla bazı mineraller x-ışınlarını benzer katsayılarla zayıflatmaktadır. Bu nedenle düşük enerjili görüntüleme ile bir ayırım yapılması güçtür.
- Bu yöntemle piriti bakır minerallerinden ayırmak mümkündür. Ancak bakır minerallerini birbirinden ayırmak mümkün değildir.



Bakır minerallerinin ortalama atom numaraları birbirine yakın olduğundan bu minerallerin birbirinden ayrılması mümkün değildir. Düşük enerjili görüntülemelerde x-ışınının enerjisi yüksek ortalama atom numaralı mineralleri geçmeye yeterli olmamaktadır. Yüksek enerjili x-ışınları ise gang mineralleri gibi ortalama atom numarası düşük mineral fazlarının tanımlanmasında efektif olmamaktadır. Tarama parametreleri buna göre belirlenmelidir.

Ueda vd. [105] ve Ueda [106] tarafından yapay tanelerin  $\mu$ CT taraması ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu verilere dayanan bir stereolojik etkilerin kaldırılması/azaltılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda farklı içerikli yapay numuneler hazırlanmış ve  $\mu$ CT taramaları gerçekleştirilmiştir. Taramada kullanılan parametrelerden çözünürlük/piksel boyu 17.00  $\mu$ m ve Enerji/Akım değerleri ise 60 kV/40  $\mu$ A olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında reçine-cam içerikli ve çimento içerikli yapay numuneler kullanılmıştır. Stereolojik eğilimin belirlenmesinde görüntü işleme yöntemleri kullanılmış ve ilk aşamada eşik belirleme ile taneler arkaplandan ayrılmış ve watershed yöntemi ile tanelerin sınırları belirlenmiştir. Eşik belirleme yöntemi ile fazlar birbirinden ayrılmış ve fazların kesişimleri belirlenmiştir. Elde edilen fazların 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntülerinden serbestleşme dereceleri ve tane sayıları belirlenmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntülerden elde edilen verilerin birbirinden oldukça farklı olduğu görülmüştür. Bu farklılığın sebebi stereolojik etkilerdir. Bu etkilerin azaltılması için stereolojik düzeltme yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen serbestleşme verilerininin istatistiksel yöntemlerle doğrulaması yapılmıştır.

Çalışma [105] sonucunda;

- Stereolojik eğilimin %60'ı stereolojik düzeltme ile azaltılmıştır.
- Farklı yapıdaki 16 numunenin serbestleşme dereceleri ve tane sayıları belirlenmiştir.
- Cam parçaları, silika kumu ve çimento içeren yapay numuneler oluşturularak bu numunelerden elde edilen serbestleşme verileri %95 güven aralığında doğrulanmıştır.

İncelenen yapay numunelerin kompleks yapıda olmaması sebebi ile numuneler doğru bir şekilde incelenebilmiş ve içeriği bilinen numunelerin serbestleşme dereceleri belirlenebilmiştir.

Wenz vd. [107] tarafından yapılan çalışmada Juína-Brezilya bölgesinden temin edilen 61 adet elmas senkrotron  $\mu$ CT ile incelenmiş ve elmaslar içindeki mineral kapanımları gözlemlenmiştir. 61 adet elmasın görüntüsü 24 saatten kısa bir sürede alınmış olup,  $\mu$ CT taramalarında kullanılan parametrelerden çözünürlük/piksel boyu 4.50  $\mu$ m, maruziyet süresi 1 saniye ve projeksiyon sayısı ise 900 olarak belirlenmiştir.

XRD ve  $\mu$ CT'nin birlikte kullanıldığı bu çalışma sonucunda [107];

- Elmaslar içinde kapanım gösteren mineraller ferropeliklaz, magnezyovüstit, manyetit, hematite ve bazı demir ve titanyum içeren mineraller olarak belirlenmiştir.
- XRD ve  $\mu$ CT'den elde edilen veriler kapanımların oluşumu hakkında bilgi elde edilmesini sağlamıştır. Bu kapanımlar, yer kürenin oluşumu ve dünyanın mantosu hakkında da fikir vermektedir.

Aralarında yüksek yoğunluk farkı bulunan elmas ve diğer minerallerin ayrımı  $\mu$ CT ile mümkün olmakta ve bu sayede elmas içindeki kapanımlar rahatça incelenebilmektedir.

Oliviera vd. [108] tarafından yapılan çalışmada bir demir cevheri atığının  $\mu$ CT ve SEM görüntülerinden serbestleşmenin ve stereolojik eğilimin tayini ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan numune Brezilya'da Minas Gerais eyaletinde bulunan bir demir cevherinin flotasyon atığıdır. Numunenin tane boyu malzemenin %90'ı 120  $\mu$ m altında olacak şekilde belirlenmiş olup, numune kimyasal (XRF) ve mineralojik karakterizasyona (XRD), yüksek çözünürlük  $\mu$ CT'ye ve TIMA (SEM-tabanlı sistem) tabi tutulmuştur.  $\mu$ CT tarama parametrelerinden çözünürlük/piksel boyu 5  $\mu$ m olarak, maruziyet süresi 2 saniye olarak, enerji/akım 90 kV/100  $\mu$ A olarak belirlenmiştir.  $\mu$ CT ile görüntü işleme ve serbestleşme tayini kapsamında görüntü iyileştirme aşamasında gürültüleri azaltmak ve kaliteyi iyileştirme amacıyla NLM gürültü azaltma yöntemi kullanılmış ve eşik belirleme ile fazlar belirlenmiştir. Her iki yöntem de ImageJ programı ile, kantitatif analizler ise Bruker firmasının geliştirmiş olduğu *CTan* uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Flotasyon atığında çoğunlukla silikat bulunduğundan serbestleşme tayini silikat ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kuvars hacmi tüm tanenin hacmine bölünerek her bir tanenin kuvars derecesi hesaplanmıştır. Bu hesaplama ile flotasyon verimliliği ölçülebilmektedir. Stereolojik etkilerin büyüklüğünü belirlemek için  $\mu$ CT'den elde edilen sanal kesitten hesaplanan serbestleşme verisi,  $\mu$ CT'den elde edilen 3 boyutlu serbestleşme verisi ve SEM-tabanlı sistemden elde edilen veri kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda %80'in üstünde serbestleşme gösteren tanelerin oranının SEM-tabanlı sistemde  $\mu$ CT'ye oranla oldukça fazla olduğu görülmüş ve bununla birlikte bağlı taneler SEM-tabanlı sistemde düşük miktarlarda saptanmış olup  $\mu$ CT'den elde edilen verilerde daha yüksektir.

Çalışma sonucunda ulaşılan bazı önemli bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir [108];

- Yüksek çözünürlükle gerçekleştirilen  $\mu$ CT taramaları serbestleşmenin değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.
- Tenör ile yüzey serbestleşmesi arasında ve tane çapı ile serbestleşme arasında lineer bir ilişki bulunmuştur ( $R^2 = 0.9219$ ,  $R^2 = 0.8797$ ).
- Sonuçlar 3 boyutlu  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen verilerin daha gerçekçi olduğunu göstermektedir.
- SEM-tabanlı sistemler stereolojik modellerle 3 boyutlu serbestleşme verileri verdiğiinden ve bu modeller kompleks yapılı cevherlerde çok verimli olmadığından  $\mu$ CT sistemi cevher hazırlama alanında bir yenilik ve gelişme olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tung vd. [16] tarafından gerçekleştirilen çalışmada  $\mu$ CT ve  $\mu$ XRF (mikron uzamsal çözünürlüklü XRF - XRF'de mm) yöntemlerinin beraber kullanımıyla ilgili bir yöntem geliştirilmiştir. Bu kapsamda magmatik bir kayaktan elde edilen bir karotun üstünden ve altından yapılan 2 boyutlu  $\mu$ XRF'ten elde edilen mineral haritası ile karotun  $\mu$ CT'den elde edilen hacim verileri kullanılarak derin öğrenme segmentasyonu (deep learning segmentation) ile bu karot üzerinde yarı otomasyonlu bir modal analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda [16];

- Bu yöntemle birlikte geleneksel segmentasyon yöntemleri ile yapılamayan benzer yoğunluklara sahip minerallerin ayrımı da sağlanmıştır.
- $\mu$ CT ve  $\mu$ XRF yöntemlerinin kombinasyonunun 3 boyutlu serbestleşme verilerini sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Geleneksel segmentasyon yöntemlerinde benzer yoğunluklu minerallerin ayırt edilemediği ilgili alan literatüründe değerlendirilmiştir [7]. Bu minerallerin birbirinden ayırt edilebilmesi bu tür mineralleri içeren cevherlerin karakterizasyonunun  $\mu$ CT ile yapılabileceğini ortaya koyan bir gelişmedir.

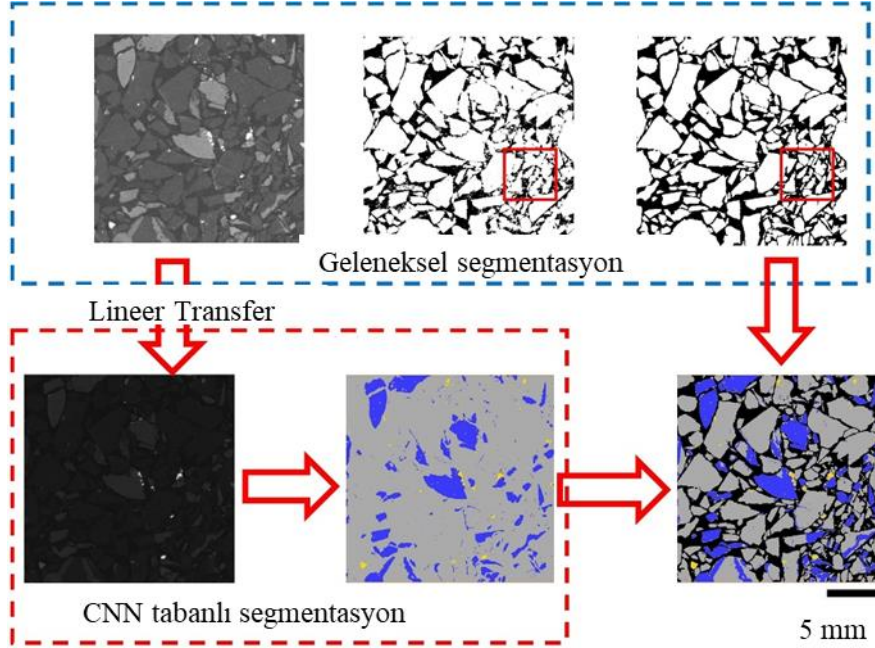
Oliviera vd. [109] bir boksit cevherinin  $\mu$ CT yöntemi görüntülemesinden elde edilen 3D verilerden serbestleşmenin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Bu kapsamda bir boksit cevherine mineralojik analiz yapılmış, cevherin ana bileşenleri jipsit, kaolinit ile hematit olarak belirlenmiş ve içerikleri sırasıyla 54.5%, 39.8% ve 5.7% olarak tayin edilmiştir. Serbestleşme analizleri hem 2 boyutlu hem 3 boyutlu olarak incelenmiş ve stereolojik sapma belirlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda [16];

- $\mu$ CT görüntülemelerinden oluşturulan sanal kesitlerle ve SEM’de görüntülenen kesit karşılaştırıldığında verilerin tutarlı olduğu.
- ve  $\mu$ CT görüntüleri bir bütün olarak SEM görüntüsü ile karşılaştırıldığında tutarlılık olmadığı görülmüştür.

Bunun temel sebebi SEM’den elde edilen serbestleşme verilerinin stereolojik modellere dayanmasından kaynaklanmaktadır. Cevherin kompleks yapıda olmaması sebebiyle sanal kesitlerden elde edilen veriler SEM tabanlı sistemden elde edilen veriyle tutarlıdır.

Tang vd. [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada MLA’den 3 boyutlu tanımlama ve serbestleşme tayini elde edilebilmesi amacıyla  $\mu$ CT,  $\mu$ XRF ve MLA verileri ile evrişimli bir sinir ağı oluşturulmuş (convolutional neural network-CNN) ve bu bağlamda öğütülmüş ve öğütülmemiş bir demir cevheri ile  $\mu$ CT’den elde edilen görüntüler, 2 boyutlu olarak elde edilmiş element haritaları ve *EfficientU-Net-b3* olarak isimlendirilen evrişimli sinir ağı kullanılarak mineral segmentasyonu amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Geleneksel segmentasyon yöntemlerinden farklı olarak, CNN tabanlı segmentasyon  $\mu$ XRF’ten elde edilen verileri kullanarak sadece grilik değerlerindeki farklılıkları kullanmamakta, ayrıca tanelerin doku farklılıklarını da kullanmaktadır. CNN tabanlı segmentasyon ve geleneksel segmentasyon arasındaki fark **Şekil 4**’te verilmektedir.



**Şekil 4.** CNN tabanlı segmentasyon ve geleneksel segmentasyon farkı [17]

Elde edilen 3 boyutlu  $\mu$ CT görüntülerinin segmentasyonundan sonra 3 boyutlu olarak serbestleşme analizleri gerçekleştirilmiş ve sanal kesitlerden bazıları seçilerek bunlara da serbestleşme analizi uygulanmıştır.

Bu çalışma sonucunda [17];

- MLA'den elde edilen 2 ve 3 boyutlu analizlerin büyük ölçüde (yaklaşık %14) farklı olduğu görülmüştür.
- 2 boyutlu görüntülerden elde edilen veriler stereolojik modellere dayandığından doğruluğu kesin değildir bu sebeple bu verilerle tasarlanacak proseslerin tutarlılığı da kesin olmayacaktır.
- Numune almadaki hatalar ve stereolojik hatalar bu çalışmadaki ana 2 boyutlu ve 3 boyutlu MLA verilerindeki ana farklılık olarak belirtilmiştir.

Jin vd. [110] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Arizona'dan alınmış iki bakır cevherinin bakır sülfat derecesini belirlemek için  $\mu$ CT kullanılmıştır. İki farklı öğütülmüş bakır cevheri numunesi  $\mu$ CT ile 40 ve 125  $\mu$ m piksel boylarında karakterize edilmiştir. Her bir tanenin bakır içeriği hesaplanarak cevherlerin histogramları çıkartılmıştır. Elde edilen sonuçlar düşük bakır tenörlü tanelerin yüksek bakır tenörlü tanelerden ayrılabilirliğini göstermiştir. Bu bağlamda,  $\mu$ CT ile farklı miktarlarda bakır içeren minerallerin tanımlanarak farklı akım şemalarının geliştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Yüksek bakır içerikli ve düşük bakır içerikli bakır minerallerinin

yoğunluk/ortalama atom numaralarının farklı olması, bu minerallerin  $\mu$ CT ile tespitini mümkün kılmıştır.

Yukarıda tartışılan çalışmalar,  $\mu$ CT yönteminin avantajlarını ve bazı kısıtlılıklarını göz önüne sermektedir. Teknolojinin özellikle son yıllarda hızla ilerlemesi ve yazılıma dayalı çözümlerin elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılmasıyla birlikte kat edilen yol,  $\mu$ CT'yi dünya genelinde pek çok araştırmacının ilgi odağı haline getirmiştir. Cevher yapısındaki değişkenlikler ve kullanılan teknolojinin sınırlarına bağlı olarak oldukça farklı bulguların elde edildiği bu yöneme ilişkin, çeşitliliği oldukça yüksek olan ülkemiz cevherlerine ilişkin gerçekleştirilmiş kapsamlı bir çalışma mevcut değildir. Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında ülkemizin farklı bölgelerinde farklı tipteki dört adet cevher ile eş numuneler kullanılarak MLA ve  $\mu$ CT çalışmaları gerçekleştirilerek bu analizler arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı incelenmiş ve sonuçlar istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir.

## 4. $\mu$ CT ANALİZİNDE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERİN KULLANILMASI

İstatistiksel yöntemler, tarım, astronomi, biyoloji, işletme, iletişim, ekonomi, eğitim, elektronik, jeoloji, sağlık bilimleri ve diğer birçok bilim ve mühendislik alanı dahil olmak üzere hemen hemen her disiplinde kullanılmaktadır. Madencilikte ise kömür lavvarlarının aylık, dönemlik ya da yıllık ortalama kül ve kalori değerlerinin belirlenmesi, cevher zenginleştirme tesislerinde aylık, dönemlik ya da yıllık verimlerin, tenörlerin ve üretim verilerinin değerlendirilmesi, laboratuvarlardan elde edilen analizlerin tutarlılığının incelenmesi gibi pek çok alanda ve  $\mu$ CT analizlerinin değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır [7, 102, 106, 108, 109]. Bu verilerin değerlendirildiği yöntemlerden en çok kullanılanları regresyon yöntemleri olup; ortalama, standart sapma testleri de verilerin ilişkileri hakkında fikir vermektedir [111]. Ancak ortalama ve standart sapma yöntemleri verilerin ilişkileri hakkında çok detaylı bilgi vermemekte, kapsamlı testlerin uygulanmasından önce izlenecek yol haritasına ilişkin bir ön fikir vermektedir.

Ortalama yöntemi veri setinin genel eğilimini vermekle birlikte, verilerin hızlı bir şekilde analiz edilmesini de sağlamaktadır [112]. Bu yöntemde veri seti hakkında hızlı bir şekilde veri elde edilebilse de tek başına kullanımı veri analizi için yeterli değildir. Bunun sebebi bazı veri setlerinde mod ve medyanın da ortalama ile ilişkili olmasıdır. Eğer veri seti içinde diğerlerinden büyük ölçüde farklı bir veri varsa ya da normal dağılım göstermeyen bir veri seti varsa ortalama yöntemi verimli sonuç vermemektedir [113].

Bağımsız bileşen T-testi birbirinden bağımsız iki veri setini karşılaştırmada, bir örnekli T-testi bir veri seti ile belirli bir sabit arasındaki ortalamayı karşılaştırmada, eşli örneklem T-testi iki farklı zamanda oluşturulan bir veri seti varsa kullanılmaktadır. ANOVA testi gerçek anlamda ortalama ile karşılaştırma amaçlı bir yöntem olmasa da ikiden fazla bağımsız değişken olduğunda kullanılmaktadır [114]. Tez kapsamında testlerden bir örnekli T-testi, eşli örneklem T-testi veri setlerinin buna uygun olmaması sebebiyle kullanılmamış, bu sebeple ilk olarak bağımsız bileşen T-testi kullanılmış ve  $\mu$ CT veri setleri ile MLA verileri ortalama bakımından kıyaslanmıştır. ANOVA testi ise  $\mu$ CT verilerini birbiri ile kıyaslamada kullanılmıştır.

Standart sapma, verilerin ortalama etrafındaki dağılımını ölçen bir istatistiksel analiz yöntemidir. Yüksek standart sapma, verilerin ortalamaya olan uzaklığını belirtmektedir. Düşük standart sapma

ise verilerin birbiriyle uyumlu olduğunu ve ortalamaya yakın olduğunu göstermektedir. Standart sapma, veri setlerindeki noktaların dağılımını belirlemede kullanılmaktadır. Ortalama ile analize benzer olarak, standart sapmanın veri analizinde tek başına kullanılması verilerin değerlendirilmesi adına yeterli olmamaktadır [115].

İki değişkenin standart sapmaları üzerinden karşılaştırılmasında en yaygın kullanılan yöntem F-testidir.  $\mu$ CT ile yapılan çalışmalarda ise standart sapma yönteminin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. F. Reyes vd. [7] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 2D- $\mu$ CT verileri ile BSE görüntülerinin standart sapması belirlenerek verilerin dağılımları incelenmiş ve Oliviera vd. [108] tarafından gerçekleştirilen çalışmada elde edilen tenör ve yüzey serbestleşme verilerinin standart sapmaları hesaplanmıştır.

Regresyon bağımlı bir değişken (ölçülmesi istenen veriler) ile bağımsız bir değişken (bağımlı değişkeni tahmin etmek için kullanılan veriler) arasındaki ilişkidir. Regresyon analizi grafiklerinde kullanılan çizgi, sadece eğilimleri değil değişkenler arasındaki ilişkilerin güçlü ya da zayıf olduğunu belirlemede de kullanılmaktadır. Lineer regresyon ve çoklu lineer regresyon sık kullanılan regresyon yöntemlerinden ikisidir. Lineer olmayan regresyon yöntemleri de olmakla birlikte bu yöntemler daha karmaşık verilerde ve bu verilerin analizinde kullanılmaktadır. Lineer regresyonda bağımlı değişkeni tahmin etmek için bir bağımsız değişken kullanılırken, çoklu lineer regresyon yönteminde iki ya da daha fazla bağımsız değişken kullanılmaktadır [116, 117]. Regresyon analizlerinde çizgiye oturmayan “aykırı” veriler yüksek tenörlü ürünler olmak üzere birçok farklı şeyi temsil edebilmektedir. Ancak regresyon çizgileri sebebiyle bu aykırı gözükten değerler göz ardı edilebilmektedir.

Korelasyon yöntemiyle iki ya da daha fazla bağımsız bileşenin ilişkisi incelenebilmektedir. Korelasyon için temelde iki tip test bulunmaktadır. Bunlar Pearson ve Spearman yöntemleridir. Eğer veri seti normal dağılım gösteriyorsa Pearson yöntemi, normal dağılım göstermiyorsa Spearman yöntemi kullanılmaktadır [118]. Veri setlerinin normalitesinin belirlenmesinde basıklık ve çarpıklık değerleri kullanılmaktadır. George ve Mallary [119], verilerin normal sayılabilmesi için basıklık ve çarpıklık değerlerinin -1+1 arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir.

$\mu$ CT ile yapılan çalışmalarda ise regresyon yönteminin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Howard vd. [102] tarafından gerçekleştirilen çalışmada  $\mu$ CT için belirlenen standartlar lineer regresyon ile incelenmiştir. F. Reyes vd. [7] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 2D- $\mu$ CT verileri ile BSE



görüntülerinin doğrusal modeli oluşturularak ilişkileri incelenmiştir. Ueda [106] tarafından gerçekleştirilen çalışmada serbestleşme dağılımını inceleme amacıyla korelasyon yöntemi kullanılmıştır. Oliviera vd. [108] tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüzey serbestleşmesi ve tane boyunun ilişkisini gözleme amacı ile korelasyon yöntemi kullanılmış ve bu parametrelerin ilişkisi değerlendirilmiştir.

$\mu$ CT veri setleri ile MLA verilerini kıyaslama amacıyla çoklu lineer regresyon ve iki değişkenli korelasyon yöntemi kullanılmıştır. Korelasyon yöntemiyle iki ya da ya daha fazla bağımsız bileşenin ilişkisi incelenebilirken, regresyon ile ise bağımlı bir değişken ile bağımsız bir değişken arasındaki ilişki incelenmektedir. Bu bağlamda veri setlerinin birbiriyle bağımlı olup olmadığı gözlemlenmiştir.

PCA analizi temelde bir X matrisinin iki küçük matrise bölüdüğü bir veri analizi yöntemidir. PCA analizi sayesinde veri içerisinde varyansın en büyük olduğu noktalar bulunarak verinin boyutu azaltılmaktadır. PCA çıktıları ile  $\mu$ CT'den farklı aralıklarda elde edilen hacim, tane sayısı ve yansıtma değeri (reflectance value - RV) verileri ile MLA'de tanımlanan minerallerin yoğunlukları arasında bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir [120].

Veri analizlerinde bazen veri sayısı çok fazla olmakta birlikte, veri sayısının fazlalığı doğru veri elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu gibi durumlarda, örneklem sayısı ya da boyutu belirleme adı verilen daha küçük bir veri setini analiz etme yoluna gidilebilmektedir. Bu yöntemle analiz sayısı azalmakta ve analizler daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde yapılacak bir hata veri setini tamamen olumsuz etkilemektedir [121]. Veri setlerinde belirlenen aralığın etkisini gözleme amacı ile ise 2'li, 4'lü ve 6'lı yansıtma değerleri aralıkları belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.  $\mu$ CT veri setleri ile MLA verilerinin doğru bir şekilde kıyaslanabilmesi için örneklem sayılarının birbirine yakın olması gerekmektedir. Bu sebeple her bir veri setindeki örneklem sayısı MLA'de elde edilen örneklem sayısına (mineral sayısı) denk olacak şekilde veriler daraltılmıştır. Bu sayede modal mineralojik analizden elde edilen mineral sayısı ile aynı sayıda grilik değeri aralığı elde edilmiş ve sonuçlar tutarlı bir şekilde karşılaştırılabilmiştir.  $\mu$ CT veri setlerini kendi içinde karşılaştırmada ANOVA testi kullanılmış,  $\mu$ CT veri setleri ile MLA verilerini birbirleri ile kıyaslamada betimsel istatistik, bağımsız bileşen analizi kullanılmış, MLA'de tanımlanmış minerallerin yoğunlukları için ise regresyon yöntemi ile  $\mu$ CT veri setleri kullanılarak bir denklem oluşturulmuştur.

## 5. MALZEME VE YÖNTEM

Tez kapsamındaki çalışmalarda kullanılmak üzere cevher çeşitliliğini sağlamak açısından bir metalik cevher, iki endüstriyel hammadde ve bir nadir toprak minerali cevheri olmak üzere dört farklı sahadan numuneler temin edilmiştir. Bu kapsamda laboratuvara teslim edilen bir bor cevheri numunesi, bir kurşun-çinko cevheri numunesi, bir feldispat cevheri numunesi ve bir nadir toprak cevheri numunesi ile numune hazırlama, kimyasal analiz çalışmaları, MLA analizleri ve  $\mu$ CT analizleri gerçekleştirilmiştir. MLA analiz hizmetleri bir dış laboratuvardan alınmış, elde edilen veriler çalışmanın hedefi doğrultusunda yorumlanmıştır.  $\mu$ CT ve SEM analizleri ise Hacettepe Üniversitesi HÜNİTEK laboratuvarı bünyesindeki ekipmanlarla gerçekleştirilmiştir.

Numunelerle gerçekleştirilen numune alma, numune hazırlama ve karakterizasyon çalışmaları ilerleyen kısımlarda detaylı olarak tartışılmıştır. **Çizelge 2**'de ise deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan numunelere ve analiz yöntemlerine ilişkin bir özet sunulmaktadır.

**Çizelge 2.** Numunelerin hazırlanma yöntemleri ve yapılan analizler

Numune adı	Numune hazırlama	Kimyasal analiz yöntemi	MLA	CT	SEM/EDS
Kurşun-Çinko cevheri	Kırma, öğütme ve eleme ile - 212+106 mikron fraksiyonunun hazırlanması	Temel oksit analizi (XRF), mineralojik analiz (XRD)	Modal Mineralojik analiz serbestleşme tayini ve tane boyu dağılımı	133 amperde 58 dakikalık tarama, 3 boyutlu hacim, alan, tane sayılarının Ve tane boyu dağılımının belirlenmesi	BSE Görüntüleri, majör bileşenlerin EDS spektraları
Bor cevheri	Kırma, öğütme ve eleme ile - 300+150 mikron fraksiyonunun hazırlanması	Temel oksit ve elementel analizler (XRF ve ICP)	Modal Mineralojik analiz, serbestleşme tayini, tane boyu dağılımı	110 amperde 2 saat 6 dakikalık tarama, 3 boyutlu hacim, alan, tane sayılarının ve tane boyu dağılımının belirlenmesi	BSE Görüntüleri, majör bileşenlerin EDS spektraları
Nadir Toprak cevheri	Kırma, öğütme ve eleme ile - 150+25 mikron fraksiyonunun hazırlanması	Temel oksit ve NTE analizleri (XRF)	Modal Mineralojik analiz, serbestleşme tayini, tane boyu dağılımı	125 amperde 3 saat 30 dakikalık tarama, 3 boyutlu hacim, alan, tane sayılarının ve tane boyu dağılımının belirlenmesi	BSE Görüntüleri, majör bileşenlerin EDS spektraları
Feldispat cevheri	Kırma, öğütme ve eleme ile - 300+38 mikron fraksiyonunun hazırlanması	Temel oksit ve elementel analizleri (XRF ve ICP)	Modal mineralojik analiz	110 amperde 1 saat 57 dakikalık tarama, 3 boyutlu hacim, alan ve tane sayılarının belirlenmesi	BSE Görüntüleri, majör bileşenlerin EDS spektraları

## 5.1. Numune Alma ve Cevherin Genel Özelliklerinin Belirlenmesi

### 5.1.1. Nadir Toprak Cevheri

Eskişehir Beylikova’da bulunan florit, barit ve nadir toprak mineralleri içeren cevher ile yıllar boyunca pek çok çalışmaya konu olmuştur. Florit, barit ve nadir toprak minerallerinin zenginleştirilebilmesi amacıyla uygulanacak proseslerin ve proseslerin uygulanacağı tane boyunun belirlenebilmesi amacıyla detaylı cevhere detaylı mineralojik analiz yapılması ön görülmüştür. Bu kapsamda, sahadan 8 ton kadar numune alınmış ve sahada konileme-dörtleme işlemleriyle numune yaklaşık 2 tona indirilerek Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarı’na getirilmiştir. Alınan numune laboratuvarında konileme-dörtleme işlemi ile temsiliyeti bozulmadan bölünerek numuneye kimyasal analiz ve MLA analizine gönderilmiş, ayrıca HÜNİTEK (Hacettepe Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Merkezi)’te SEM/EDS ve  $\mu$ CT görüntülemeleri yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında cevherin bileşenlerini belirlemek ve içeriğindeki nadir toprak elementlerini saptamak amacıyla cevherden numune alınarak halkalı değirmende öğütülmüş ve öğütülen numuneye kimyasal analiz gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları **Çizelge 3**’te verilmektedir.

**Çizelge 3.** Nadir Toprak cevherinin kimyasal bileşenleri

Bileşen	İçerik (%)	Bileşen	İçerik(g/t)
SiO <sub>2</sub>	2.83	La	19900
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.45	Ce	21300
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.2	Pr	1390
MgO	0.38	Nd	3080
CaO	38.6	Sm	187
Na <sub>2</sub> O	0.04	Eu	37.4
K <sub>2</sub> O	0.17	Gd	84.1
TiO <sub>2</sub>	0.09	Tb	6.7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.8	Dy	34
MnO	1.05	Ho	6.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	Er	18.4
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	Tm	2.8
KK	3.88	Yb	16.5
F	26	Lu	2
BaO	17.5	U	143
S	4.36	Th	493
Toplam	98.39		

Cevherdeki ana bileşenlerin BaO, CaO ve F olduğu görülmektedir. Cevherdeki ana nadir toprak elementeri ise La, Ce, Nd ve Pr'dir. Bu bileşenlerin hangi minerallerden geldiğinin ve bu minerallerin birbirleriyle ilişkilerinin saptanabilmesi amacı ile cevhere modal mineralojik analiz yapılmıştır. Cevherden numune alınarak numunenin tamamı -0.150 mm'ye öğütülmüş ve 0.025 mm'lik elekten elenerek -0.150+0.025 mm fraksiyonu elde edilmiş ve bu fraksiyon ile MLA analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 5.1.2 Kurşun-Çinko Cevheri

Numunenin temin edildiği kurşun-çinko zenginleştirme tesisi 2023 yılı itibariyle 7 senedir üretim yapmaktadır. Bu tesiste rezervlerin tükenmeye başlamasıyla atık sahasının, tüvenan cevher ile paçallanarak beraber tesise beslenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla atık sahasından alınan cevherin ve tüvenan cevherin detaylı karakterizasyonunun yapılması gerekmiştir. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında sahadan yaklaşık 2 ton numune alınmış ve Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarı'na getirilmiştir. Gerçekleştirilen konileme-dörtleme işlemleri sonrası sırasıyla çeneli kırıcı ve merdaneli kırıcıda kırılan tüvenan cevherden numune alınarak cevher tanımlamalı XRD (XRDphaseID) analizine tabi tutulmuş ve cevherin iri boydaki davranımını gözlemlemek amacı ile -0.212+0.106 mm fraksiyonu hazırlanarak MLA analizine gönderilmiş, ayrıca HÜNİTEK'te SEM/EDS ve  $\mu$ CT görüntülemeleri yapılmıştır. Kurşun-çinko cevherinin XRD'den elde edilen mineralojik kompozisyonu **Çizelge 4**'te verilmektedir.

**Çizelge 4.** Tüvenan cevherin tanımlamalı XRD sonuçları

	<b>Mineral Formülü</b>	<b>İçerik (%)</b>
Kuvars	SiO <sub>2</sub>	21.5
Pirit	FeS <sub>2</sub>	32.7
Galen	PbS	3.5
Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	11.1
Sfalerit	ZnS	11.7
Kliniklor	Mg <sub>6</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	9.7
Muskovit-Serizit	Al <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> K(OH) <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	1.6
Kalsit	CaCO <sub>3</sub>	8.2

Cevher %3.5 galenit ve %11.7 sfalerit içermektedir. Ayrıca cevherin %32.7'sini pirit minerali oluşturmaktadır. Ana gang mineralleri kuvars, kalsit, kliniklor ve dolomit mineralleridir. Tüvenan cevherin kimyasal analizi **Çizelge 5**'te verilmektedir.

**Çizelge 5.** Tüvenan cevherin kimyasal analizi

Mineral	İçerik	Birim	Mineral	İçerik	Birim	Mineral	İçerik	Birim
Au	0.008	ppm	Mn	3208	ppm	Hg	<5.00	ppm
Be	<1.000	ppm	Fe	17.38	%	La	10.86	ppm
Na	0.09	%	Co	6.98	ppm	Mo	4.5	ppm
Mg	1.94	%	Ni	32.56	ppm	Pb	3.00	%
Al	0.53	%	Cu	12.56	ppm	Sb	17.35	ppm
P	0.67	%	Zn	7.48	%	Sn	<5.000	ppm
S	23.17	%	Ga	<5.000	ppm	Sr	86.21	ppm
K	0.16	%	As	220.7	ppm	Th	<2.000	ppm
Ca	5.36	%	Ag	<0.150	ppm	Tl	22.56	ppm
Sc	1.29	ppm	Ba	432.5	ppm	W	<5.000	ppm
Ti	0.01	%	Bi	17.9	ppm	Zr	8.53	ppm
V	15.25	ppm	Cd	232.7	ppm			

Tüvenan cevherin kimyasal analizinde kurşun ve çinko içerikleri sırasıyla % 3.00 ve % 7.48 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca cevherin % 17.38'inin demir olduğu görülmektedir. Kurşun-çinko cevherinin modal mineralojisini belirleyebilmek için numune -0.212 mm'ye öğütülmüş ve 0.106 mm'lik elekten elenerek -0.212+0.106 mm fraksiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan fraksiyona MLA analizi yapılmıştır.

### 5.1.3. Feldispat Cevheri

Halihazırda faaliyet gösteren bir zenginleştirme tesisinden temin edilen ilgili feldispat cevherinin rutil içeriğinin yüksek olduğu bilinmektedir. Feldispat cevherlerinde Ti-Fe gibi safsızlıklar renk verici özellikleriyle feldispat ürününün kalitesini bozmaktadır. Bu gibi safsızlıkların neredeyse tamamının uzaklaştırılması gerekmektedir. Rutil miktarının fazla olması sebebiyle rutilin ayrıca kazanılması ve yüksek kalitede bir feldispat ürünü eldesi de hedeflenmektedir. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında, tesisten yaklaşık 2 ton numune alınmış ve bu numune sahadaki kırma-eleme ekipmanları ile tamamı -10 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Cevherden numune alınarak kimyasal analize tabi tutulmuştur. Tüvenan cevherin kimyasal bileşimi **Çizelge 6**'da verilmektedir.

**Çizelge 6.** Feldispat cevherinin kimyasal bileşimi

Bileşen	İçerik(%)	Bileşen	İçerik(%)	Bileşen	İçerik(%)
SiO <sub>2</sub>	65.3	MgO	1.13	TiO <sub>2</sub>	0.91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.45	Na <sub>2</sub> O	9.17	MnO	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.03	K <sub>2</sub> O	0.65	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19
CaO	0.6	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.008	SrO	0.01
				BaO	0.01

Cevher %1.03 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %0.91 TiO<sub>2</sub> içermektedir. Ayrıca titanyum ve demir gibi renk verici minerallerin uzaklaştırılabilmesi amacıyla cevherin detaylı karakterizasyonuna ihtiyaç duyulmuş ve tüvenan cevher -0.300 mm'ye öğütülerek -0.300+0.038 mm fraksiyonunda numune hazırlanarak bu numune MLA analizine gönderilmiş, ayrıca HÜNİTEK'te SEM/EDS ve  $\mu$ CT görüntülemeleri yapılmıştır. Öğütülen numunenin -0.038 mm fraksiyonuna kimyasal analiz yapılmıştır.

#### 5.1.4. Bor Cevheri

Bir bor zenginleştirme tesisinde -3 mm fraksiyonundaki ürünün B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörü yeterli olmamaktadır. Bu kapsamda yapılacak çalışmalarda ürünün detaylı karakterizasyonuna ihtiyaç duyulmuş ve -3 mm ürünlerinden numune alınarak Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarı'na getirilmiştir. Bu bağlamda sahadan yaklaşık 3 ton numune alınmış ve konileme-dörtleme işlemleri sonrası merdaneli kırıcı ile tamamı -0.300 mm'ye kırılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında kimyasal analiz yapılmıştır. Bor cevherinin kimyasal analizi **Çizelge 7**'de verilmektedir.

**Çizelge 7.** Bor cevherinin kimyasal analizi

Bileşen	İçerik(%)	Bileşen	İçerik(%)
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.56	Na <sub>2</sub> O	0.13
As	0	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15
SO <sub>3</sub>	0.26	SiO <sub>2</sub>	12.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	SrO	0.62
CaO	25.49	K.K.	27.61
MgO	6.82		

Cevherin B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörü %25.56'dır. Diğer ana bileşenler MgO, CaO ve SiO<sub>2</sub>'dir ve bunların içerikleri sırasıyla %6.82, %25.49 ve %12.67'dir. Kızdırma kaybının bu kadar çok olmasının sebebi kolemanit içerisinde bulunan suyun buharlaşmasıdır. Yüksek B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü bir ürün elde edebilmek için MgO, CaO ve SiO<sub>2</sub> gibi majör içeriklerin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle bu bileşenlerin bulunduğu minerallerin tanımlanması, bu minerallerin kolemanit mineraliyle ilişkilerinin incelenmesi ve kolemanitin serbestleşme verileri önem kazanmıştır. Bu bağlamda cevher -0.300 mm'ye öğütülmüş ve 0.150 mm'lik elekten elenerek -0.300+0.150 mm fraksiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan numune MLA analizine gönderilmiş, ayrıca HÜNİTEK'te SEM/EDS ve  $\mu$ CT görüntülemeleri yapılmıştır.

## 5.2. $\mu$ CT ile Görüntü Alma Çalışmaları

HÜNİTEK (Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi)'te bulunan Bruker firmasının geliştirmiş olduğu Skyscan 1272 modeli mikro-tomografi cihazı ile görüntüleme yapılmıştır [59, 60, 61]. Skyscan 1272  $\mu$ CT cihazı **Şekil 5**'te verilmektedir. Mikro-tomografi analizlerinde çözünürlüğe bağlı olarak alınacak görüntü sayısı ve buna bağlı olarak analiz süresi değişmektedir [51]. Cevherlerin içindeki minerallerin birbirinden ayırt edilebilmesi amacıyla x-ışını attenüasyonlarına bağlı olarak her bir taramada ayrı voltaj ve akım değerleri kullanılmıştır [84]. Mikro tomografi görüntülerinde kullanılan parametreler **Çizelge 8**'de verilmektedir.



**Şekil 5.** Bruker skyscan 1272 mikro-tomografi cihazı

**Çizelge 8.** Mikro-tomografi görüntülerinde kullanılan parametreler

Numune adı	Parametre			
	Voltaj (kV)	Akım (uA)	Görüntü piksel boyu ( $\mu$ m)	Rotasyon açısı (Derece)
Kurşun-çinko -212+106 $\mu$ m	75	133	3.33	0.5
Feldispat -300+38 $\mu$ m	75	110	5.99	0.3
Nadir toprak -150+25 $\mu$ m	80	125	5.00	0.4
Bor -300+150 $\mu$ m	80	110	12.99	0.5

Görüntüleme sonucunda 3 boyutlu görüntüler elde edilmiştir. Her bir cevher için 1000'den fazla görüntü bulunmaktadır.

### 5.2.1. Mikro-Tomografi Görüntülerinden Sanal Kesitlerin Oluşturulması

Alınan 3 boyutlu görüntülerin kesit olarak değerlendirilebilmesi amacı ile InstaRec programı kullanılarak sanal kesitler oluşturulmuştur. Bu aşamada mikro-tomografi görüntülemesinde oluşabilen x-ışını sertleşmesi, halka artefaktı ve x-ışını yansıması gibi görüntüyü bozan etkileri azaltmak mümkündür. Gürültü azaltma gibi yöntemlerle ve sanal kesitlerin oluşturulması aşamasında görüntü iyileştirme yapılabilir de görüntülerdeki impüritelerin uzaklaştırılması asıl

olarak görüntü alım aşamasında mümkün olmaktadır (**Çizelge 1**). HÜNİTEK'te bulunan  $\mu$ CT cihazının X-Işını tüpündeki sorun sebebiyle cihaz belirlenen akım değerlerini uzun süre koruyamamaktadır. Bu sebeple görüntüler uzun süreli alınamamıştır. Bu sebeple görüntülerde x-ışını sertleşmesi ve halka etkileri bulunmaktadır [51].

### **5.2.2. Sanal Kesitlerle Yapılan Görüntü İyileştirme Çalışmaları ve Sanal Kesitlerden veri-setlerinin elde edilmesi**

Kurşun-çinko cevherinin  $-0.212+0.106$  mm fraksiyonunun  $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan kesitler incelendiğinde halka artefaktı ve minör miktarda x-ışını yansıması etkileri görülmektedir. Feldispat cevheri  $-0.300+0.038$  mm fraksiyonunun  $\mu$ CT görüntüsünden elde edilen sanal kesitler incelendiğinde InstaRec yardımı ile görüntünün büyük oranda temiz olduğu görülmektedir. Kolemanit cevheri  $-0.300+0.150$  mm fraksiyonunun  $\mu$ CT görüntüsünden elde edilen sanal kesitler incelendiğinde feldispat cevherine benzer şekilde temiz bir görüntü elde edildiği görülmektedir. Nadir toprak cevheri  $-0.150+0.025$  mm fraksiyonu  $\mu$ CT görüntüsünden elde edilen sanal kesit incelendiğinde cevher içerisinde bulunan baritin x-ışınlarını büyük oranda yansıttığı ve çalışmaya uygun bir sanal kesit elde edilemediği görülmektedir. Bu durumda oluşturulan sanal kesitlerden düzgün veri setleri elde edilmesi mümkün değildir. Feldispat ve kolemanit cevherlerinin sanal kesitlerinde nadir toprak ve kurşun-çinko cevherlerinin sanal kesitlerine göre görüntülerdeki impüriteler çok daha azdır. Ancak bu cevherlerin görüntülerinde de gürültü bulunmaktadır. Bu görüntülerle çalışılabilmesi için bu görüntülerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu safsızlıkları giderebilmek için harici programlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla ImageJ ve CTan programları içinde bulunan eklentiler kullanılmıştır. Görüntüleri iyileştirmede kullanılan prosedür aşağıda verilmektedir:

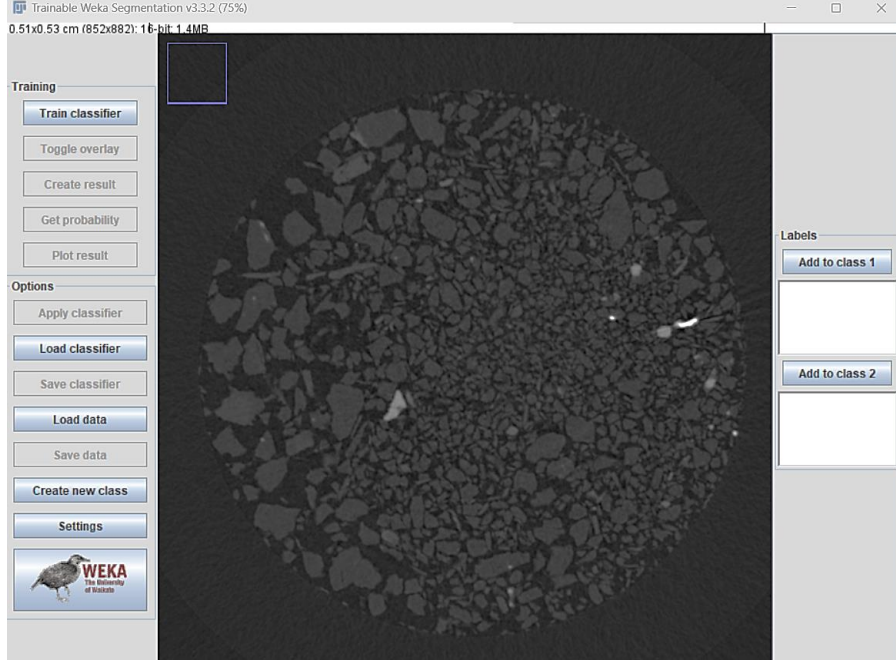
- ImageJ içerisinde bulunan NLM Denoising eklentisi [51] ile görüntülerdeki gürültü azaltılmıştır.
- Farklı minerallerin sınıflandırılması amacı ile ImageJ içerisinde bulunan 3D trainable weka eklentisi ile ana fazlar belirlenmiştir. Bununla birlikte threshold fonksiyonu ile grilik değerleri 2 aralıklı, 4 aralıklı ve 6 aralıklı olacak şekilde ayrılmıştır.
- ImageJ içerisinde bulunan 'binary' ve 'erode' fonksiyonu ile tanelerin birbirinden ayrılması sağlanmış ve x-ışını sertleşmesi etkileri giderilmiştir.



- Gürültü ve diğer etkilerin minimize edildiği görüntülerden 3 boyutlu veri elde edilebilmesi için ImageJ içerisinde bulunan 3D tane analizi (3D particle counter) eklentisi kullanılarak 3 boyutlu analiz gerçekleştirilmiş ve her bir veri setindeki elde edilen grilik değerleri için tane sayısı, hacim ve alan gibi sayısal veriler elde edilmiştir.
- Veri setlerinin elde edilmesi için ImageJ programı dışında tomografi sistemleri için geliştirilmiş olan CTan programı da denenmiş ve ImageJ de bulunan 3D tane analizi ile devam edilmiştir.

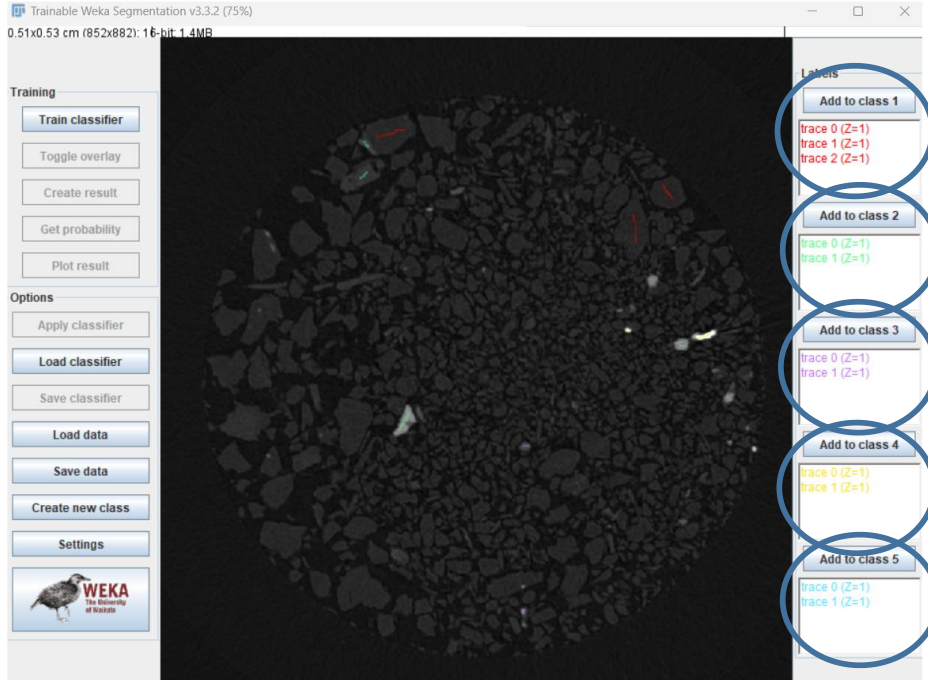
NLM Denoising eklentisi kullanılarak her bir cevherin görüntülerindeki gürültü azaltılmıştır. Oluşturulan görüntülerdeki gürültünün farklı şiddetlerde olması sebebi ile her bir cevher için farklı parametre kullanılarak gürültü azaltma çalışması yapılmıştır. Sigma değeri gürültü standart sapmasıdır. Bu değer ne kadar yüksek olursa görüntü o kadar iyileşmekte, ancak yüksek olması veri kaybına neden olmakta bu sebeple optimum değer belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda her bir cevher için farklı denemeler yapılmış ve sigma değerleri belirlenmiştir.

ImageJ içerisinde bulunan eşik belirleme (threshold) fonksiyonu kullanılarak, ikişer aralık (örnek 47-49 yansıtma değerleri), dörder aralık, altışar aralık ile veri setleri elde edilmiştir. Farklı aralıkların kullanılması ile bir veri kaybı olup olmadığı gözlemlenmiştir. Bu verilerin dışında ImageJ içerisinde bulunan 3D trainable weka eklentisi kullanılarak cevherdeki ana mineral fazları belirlenmiştir. 3D trainable weka eklentisi ve fazların elde edilmesi sırasıyla **Şekil 6**, **Şekil 7** ve **Şekil 8**'de verilmektedir.



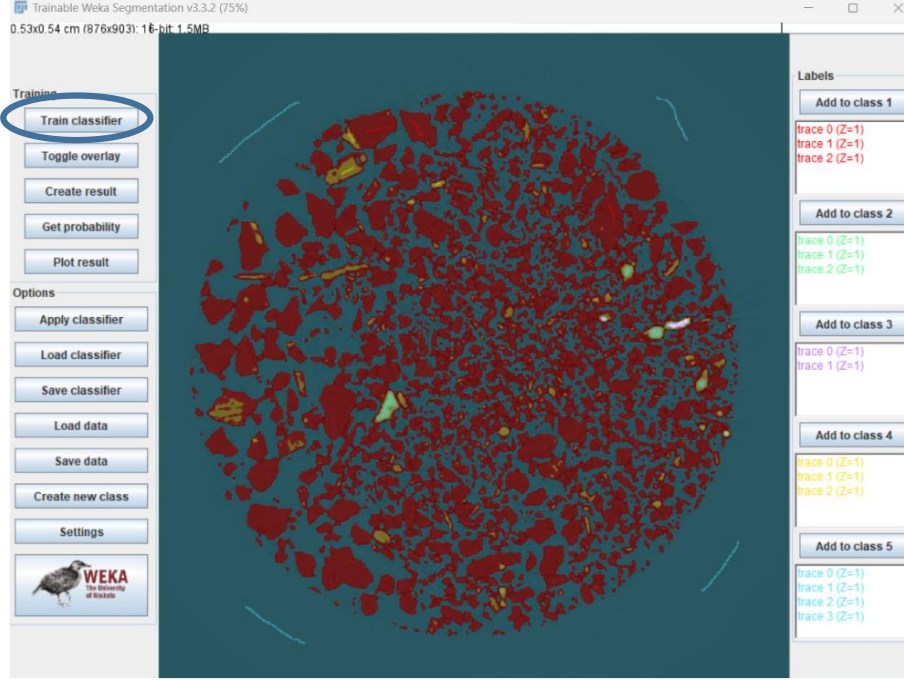
Şekil 6. 3D Trainable Weka Arayüzü

Tüm sanal kesitler eklendikten sonra gözlem yöntemi ile farklı grilik sahiplerine sahip taneler işaretlenmiş ve sınıflara ayrılmıştır.



Şekil 7. Farklı fazların gözlem yolu ile işaretlenmesi

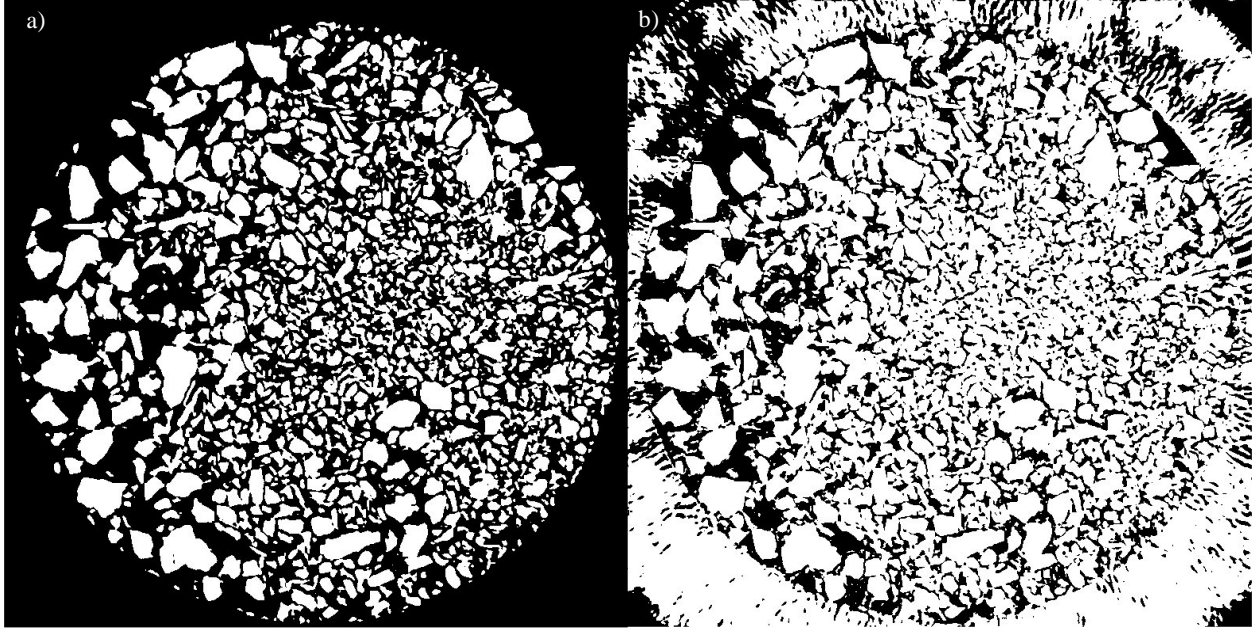
Gözlem yolu ile fazlar belirlendikten sonra program çalıştırılmış ve taneler birbirinden ayrılmıştır.



**Şekil 8.** Fazların belirlenmesi

Kaydedilen görüntüleri eşik belirleme yöntemi uygulanarak her bir cevher için grilik değerleri arasındaki farklı fazlar belirlenmiştir.

Eşik belirleme yapılırken görüntülerde her bir örnek için farklı olmak üzere belli bir yansıtma değerinin altında büyük miktarda gürültü etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Bu etki sebebiyle tutarlı bir veri elde edilemeyeceğinden bu etkilerden kurtulmak amacıyla her bir örnek için ayrı ayrı bir set noktası belirlenmiştir. Belirlenen set noktası altındaki gözlemlenen gürültü etkisinden örnekler **Şekil 9**'da verilmektedir.



Şekil 9. Feldspat cevherinde alt yansıtma değerlerinde gözlemlenen gürültü etkisi a) yansıtma değeri 44-255 b) 44 yansıtma değerinin altında gözlemlenen gürültü

### 5.3. SEM/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağılımlı Spektrometre) Görüntü Alma Çalışmaları

MLA analizleri bulunan ve  $\mu$ CT görüntülemeleri yapılan numunelere ayrıca Hacettepe Üniversitesi HÜNİTEK (Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi)'te bulunan SEM/EDS cihazı ile görüntüleme yapılmıştır. SEM/EDS cihazında görüntüleme yapabilmek için her bir numunenin parlak kesitleri hazırlanmıştır [44].

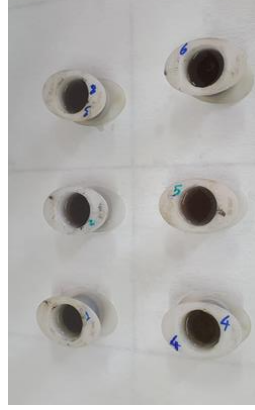
Kesitlerin hazırlanma prosedürü aşağıdaki gibidir:

1. Numunelerin hazırlanması
2. Numunelerin kimyasallardan arınması için asetonla yıkanıp kurutulması
3. Epoksinin hazırlanması
4. Numunenin kesit kabına dökülerek epoksi ile karıştırılıp kurumaya bırakılması
5. Kesitlerin parlatılması

Kesitlerin hazırlanmasında epofix markasının reçine ve sertleştiricisi kullanılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Epofix reçine ve sertleştirici



Şekil 11. Numunelerin epoksi ile karıştırılarak kaplara alınması



Şekil 12. Struers parlatma cihazı düzeneği



Şekil 13. Epoksinin sertleşmesi ile kaplardan çıkarılan kesitler

Her bir kesit için 15 mL reçine 2 mL sertleştirici ile karıştırılarak ısıtılmıştır. Numuneler, hazırlanan epoksi ile birlikte kalıplara dökülerek epoksinin sertleşmesi için bırakılmıştır (Şekil 11).

Epoksinin sertleşmesi sonrasında elde edilen kesitler kalıplardan çıkarılmıştır. Elde edilen kesitler Şekil 13'te verilmektedir. Hazırlanan kesitlere temiz ve düzgün bir yüzeyleri olması amacıyla parlatma işlemi yapılmıştır. Bunun için Struers firmasının parlatma makinesi kullanılmıştır. Bu makine Tegrapol-25, Tegraforce-5 ve Tegradoser-5 modeli 3 bileşenden oluşmaktadır (



## Şekil 12).

Kesitlerin parlatılması için izlenen prosedür şu şekildedir:

- Kesitlerin yüzeylerinin kademeli olarak farklı aşındırıcılarla aşındırılması
- Kesitlerin yüzeylerinin kademeli olarak farklı kimyasalların ve parlatıcı yüzeylerin kullanımıyla birlikte parlatılması

Hazırlanan parlak kesitlere FIB-SEM cihazında görüntüleme yapılabilmesi için numunelerin kaplanması gerekmektedir. Genelde kaplama için karbon ya da altın kullanılır. Kaplama tekniği çözünürlüğe ve uygulamaya bağlı olarak değişmektedir. Numune üzerinde iletken bir tabaka oluşturmak x-ışınlarında oluşabilecek kayıpları engellemekte, termal hasarı azaltmakta ve ikincil elektron sinyalini iyileştirmektedir [44]. Kesitlerin kaplanması için Leica firmasının geliştirmiş olduğu EM ACE600 modeli yüksek vakumlu püskürtmeli kaplayıcı cihaz kullanılmıştır (**Şekil 14**).



**Şekil 14.** Leica EM ACE600 yüksek vakumlu püskürtmeli kaplayıcı



**Şekil 15.** Tescan GAIA3 FIB/SEM cihazı

Parlatması ve kaplaması yapılan kesitlere HÜNİTEK'te bulunan Tescan firmasının geliştirmiş olduğu GAIA3 modeli FIB/SEM cihazı ile görüntüleme yapılmıştır. FIB/SEM cihazı **Şekil 15**'te verilmektedir. Tarama parametreleri ise şu şekildedir:

- 15 kV ivmelendirici gerilim (accelerating voltage),
- 3 nA demet akımı (beam current)
- 9 mm çalışma mesafesi

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1. Numunelerin MLA Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Numunelerin karakterizasyonu çalışmaları kapsamında numunelerin kimyasal bileşimleri ve mineralojik bileşimleri belirlenmiştir [37, 38]. Bunun için her bir numuneye kimyasal analizle birlikte MLA analizi yapılmış ve cevherin kimyasal bileşimi, mineral ilişkileri ve serbestleşme dereceleri değerlendirilmiştir [41].

#### 6.1.1. Nadir Toprak Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi

Cevherden alınan temsili numunenin tamamı -0.150 mm'ye öğütülmüş ve 0.025 mm'lik elekten elenerek -0.150+0.025 mm fraksiyonu elde edilmiş ve bu fraksiyona MLA analizi yapılmıştır. Nadir toprak cevherinin mineralojik bileşimi **Çizelge 9**'da verilmektedir.

**Çizelge 9.** Nadir toprak cevherinin mineralojik bileşimi

<b>-0.150+0.025 mm</b>			
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Mineral</b>	<b>%</b>
Pirit	0.06	K-Mg Silikat	1.26
Sfalerit	0.03	Epidot	0.21
Barit	37.15	Si-Al Killeri	0.51
Fe Oksi/Hidro	0.63	Kalsit	6.16
Mn Hidroksit	0.13	Siderit	0.45
İlmenit	0.03	Bastnazit	3.71
Rutil	0.03	Monazit	2.35
Seriyanit (+ Ce hidroksit)	0.32	Apatit	0
Hollandit	1.68	Florit	43.06
Kuvars	0.56	Lateritik NTE (Altere)	0.39
Feldispat	0.11	Lateritik NTE-Mn Hidroksit	0.19
Mika	0.27	Diğerleri	0.71
		Toplam	100

Nadir toprak cevherinin bağlılık, birliktelik ve serbestleşme verileri **Çizelge 10**'da verilmektedir. **Çizelge 10**'da verilen veriler incelendiğinde florit ve baritin sırasıyla %78.6 ve %77.1'nin serbest durumda olduğu görülmektedir. Florit ve baritin %20-23'ü diğer minerallerle ikili ya da çoklu bağlı olarak bulunmaktadır. Nadir toprak minerallerinin ise serbestleşmeleri bu boyda oldukça düşüktür. Seriyanit, bastnazit ve monazitin sırasıyla %1.7, %17 ve %24.4'ü serbest olarak bulunmaktadır.

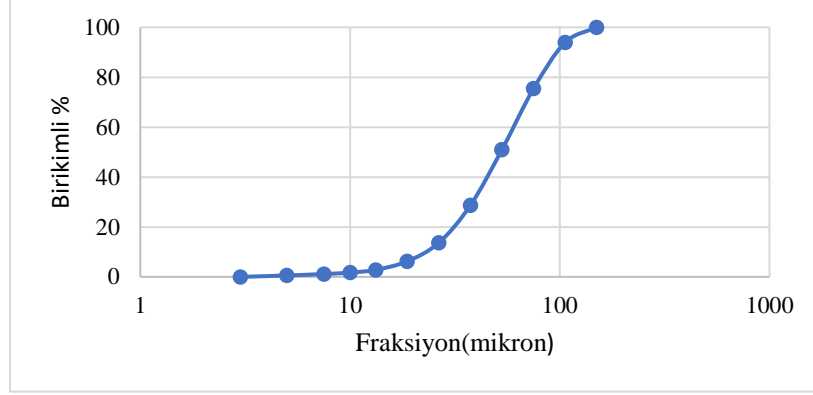
**Çizelge 10.** Nadir toprak cevherinin bağlılık ve serbestleşme verileri

<b>-0.150+0.025 mm</b>										
<b>Barit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %</b>										
<b>Bağlı</b>					<b>Birlikte</b>				<b>Serbest</b>	
<b>&lt;= 10%</b>	<b>&lt;= 20%</b>	<b>&lt;= 30%</b>	<b>&lt;=40%</b>	<b>&lt;=50%</b>	<b>&lt;=60%</b>	<b>&lt;=70%</b>	<b>&lt;=80%</b>	<b>&lt;=90%</b>	<b>&lt;100%</b>	<b>100%</b>
<b>1</b>	0.8	0.9	1	0.9	1.5	3.1	4.8	8.8	43.7	33.3
<b>Seriyanit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %</b>										
<b>Bağlı</b>					<b>Birlikte</b>				<b>Serbest</b>	
<b>&lt;= 10%</b>	<b>&lt;= 20%</b>	<b>&lt;= 30%</b>	<b>&lt;=40%</b>	<b>&lt;=50%</b>	<b>&lt;=60%</b>	<b>&lt;=70%</b>	<b>&lt;=80%</b>	<b>&lt;=90%</b>	<b>&lt;100%</b>	<b>100%</b>
<b>22.7</b>	30.8	10.8	4.2	8.6	5.7	6	2.5	7	1.7	0
<b>Bastnazit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %</b>										
<b>Bağlı</b>					<b>Birlikte</b>				<b>Serbest</b>	
<b>&lt;= 10%</b>	<b>&lt;= 20%</b>	<b>&lt;= 30%</b>	<b>&lt;=40%</b>	<b>&lt;=50%</b>	<b>&lt;=60%</b>	<b>&lt;=70%</b>	<b>&lt;=80%</b>	<b>&lt;=90%</b>	<b>&lt;100%</b>	<b>100%</b>
<b>14.8</b>	8	11.4	8.3	5.9	6.5	8.7	7.9	11.6	13.5	3.5
<b>Monazit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %</b>										
<b>Bağlı</b>					<b>Birlikte</b>				<b>Serbest</b>	
<b>&lt;= 10%</b>	<b>&lt;= 20%</b>	<b>&lt;= 30%</b>	<b>&lt;=40%</b>	<b>&lt;=50%</b>	<b>&lt;=60%</b>	<b>&lt;=70%</b>	<b>&lt;=80%</b>	<b>&lt;=90%</b>	<b>&lt;100%</b>	<b>100%</b>
<b>14.7</b>	7.9	8.8	6	3.6	6.6	8.1	9.6	10.3	22.4	2
<b>Florit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %</b>										
<b>Bağlı</b>					<b>Birlikte</b>				<b>Serbest</b>	
<b>&lt;= 10%</b>	<b>&lt;= 20%</b>	<b>&lt;= 30%</b>	<b>&lt;=40%</b>	<b>&lt;=50%</b>	<b>&lt;=60%</b>	<b>&lt;=70%</b>	<b>&lt;=80%</b>	<b>&lt;=90%</b>	<b>&lt;100%</b>	<b>100%</b>
<b>0.8</b>	0.8	0.9	0.9	0.9	1.4	1.8	3.2	10.7	59.3	19.3

Florit, barit, seriyanit, bastnazit ve monazitin detaylı faz analizleri **Çizelge 11**'de verilmektedir. **Çizelge 11**'deki verilere göre seriyanitin yaklaşık %95'inin, bastnazitin yaklaşık %50'sinin ve monazitin %34'ünün üçlü/çoklu bağlı olduğu görülmektedir. Florit ve baritin bu boyda yaklaşık %80'inin serbest olduğu görülmektedir. Barit çoğunlukla florite bağlı iken, florit ise çoğunlukla kalsit ve seriyanit ile bağlıdır. Monazitin %20'si barit ve %16.1'i bastnazitle; bastnazitin %17'si barit ve %10.5'i monazitle bağlıdır.

MLA analizi ile mineral ilişkileri ve serbestleşme dereceleri gibi verilerin yanı sıra tane boyu dağılımı verisi de elde edilebilmektedir. Nadir toprak cevherinin tane boyu dağılımı **Şekil 16**'da verilmektedir.





Şekil 16. Nadir toprak cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA)

Çizelge 11. Nadir toprak cevherinin detaylı faz analizleri

-0.150+0.025 mm										
Barit birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı									Üçlü Bağlı
Serbest	Kalsit	Seriyanit	Siderit	Hollandit	Florit	Bastnazit	Monazit	Kuvars	Lateritik NTE	Diğer
77.06	2.07	0.12	0.12	0.73	9.41	3.68	1.94	0.07	0.03	4.78
Setyanit birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı									Üçlü Bağlı
Serbest	Kalsit	Barit	Siderit	Hollandit	Florit	Bastnazit	Monazit	Kuvars	Lateritik NTE	Diğer
1.7	0	1.7	0	0	0	0.2	0	0	1.7	94.8
Bastnazit birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı									Üçlü Bağlı
Serbest	Kalsit	Barit	Siderit	Hollandit	Florit	Monazit	Seriyanit	Kuvars	Lateritik NTE	Diğer
17	2.1	17	0	0.9	2.9	10.5	0.8	0	1.8	47.1
Monazit birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı									Üçlü Bağlı
Serbest	Kalsit	Barit	Siderit	Hollandit	Florit	Bastnazit	Seriyanit	Kuvars	Lateritik NTE	Diğer
24.4	2.7	20	0	0.9	1.6	16.1	0	0.6	0	33.7
Florit birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı									Üçlü Bağlı
Serbest	Kalsit	Seriyanit	Siderit	Hollandit	Barit	Bastnazit	Monazit	Kuvars	Lateritik NTE	Diğer
78.6	12.1	5.5	0	0	1	0.2	0.1	0.1	0	2.3

MLA'den elde edilen tane boyu dağılımına göre cevherin %100'ü -0.150 mm'nin altında ve cevherin d80'i yaklaşık 0.083 mm'dir.

### 6.1.2. Kurşun-Çinko Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi

MLA'den elde edilen cevherin modal mineralojisi Çizelge 12'de, çinkonun davranımı Çizelge 13'te verilmektedir.

**Çizelge 12.** Kurşun-çinko cevherinin modal mineralojisi

Mineral	%	Mineral	%
Kalkopirit	-	Muskovit	2.24
Sfalerit	12.98	Biyotit	0.33
Galen	3.01	Amfibol	0.14
Pirit	34.91	Klorit	2.05
Fe Sülfat	0.46	Si-Al Killeri	1.24
Barit	0.1	Kalsit	2.29
Alunit	0.3	Dolomit	12.38
Jarosit	0.01	Siderit	1.24
Fe Oksit/Hidroksit	0.03	Zn-Fe Karbonat	2.44
Rutil	0.08	Apatit	3.51
Titanit	0.01	Monazit	0.01
Zirkon	0	Al Fosfat	0.33
Kuvars	12.29	Fe-Zn Al PO <sub>4</sub>	0
Plajiyoklaz	0.33	Karbonat-Pirit-Kil Karışımı	1.02
K-Feldspat	5.55	Diğerleri	0.72
		Toplam	100

**Çizelge 13.** Kurşun-çinko cevherinde çinkonun dağılımı

-0.212+0.106 mm	
Mineral	%
Sfalerit	92.85
Zn-Fe Karbonat	7.13
Zn-Al Fosfat	0.01

Buna göre cevherin büyük oranda pirit (% 34.91), sfalerit (% 12.98), dolomit (% 12.38), apatit (% 3.51) ve galenden (% 3.01) oluştuğu görülmektedir. Cevherdeki çinkonun büyük çoğunluğu sfalerit mineralinden gelmektedir (% 92.85). Kurşun-çinko cevherindeki sfalerit mineralinin serbestleşme verileri ve diğer minerallerle ilişkileri **Çizelge 14** ve **Çizelge 15**'te verilmektedir.

**Çizelge 14.** Sfalerit serbestleşme verileri

Durum		<b>-0.212+0.106 mm</b>
Bağlı	<= 10%	4.2
	<= 20%	4.4
	<= 30%	5.5
	<= 40%	6.5
	<= 50%	3.9
	<= 60%	6.7
	<= 70%	5.9
	<= 80%	8.8
	<= 90%	9.9
	Serbest	< 100%
100%		22.8

**Çizelge 15.** Sfaleritin mineral ilişkileri

Durum	<b>Mineral</b>	<b>-0.212+0.106 mm</b>
Serbest	Serbest	44.1
İkili Bağlı	Pirit	26.4
	Galen	4
	Kuvars	1.6
	K-Feldispat	0.3
	Muskovit	0.3
	Biyotit	0.1
	Klorit	0
	Zn-Fe Karbonat	2
	Dolomit	2.6
	Kalsit	1
	Agregalar	0
Üçlü/Çoklu Bağlı	Diğerleri	17.7

-0.212+0.106 mm fraksiyonunda sfaleritin % 44.1'inin serbest olduğu görülmektedir. Mineral ilişkileri incelendiğinde sfaleritin bağlı olduğu ana minerallerin pirit ve galenit olduğu görülmektedir. Sfalerit minerali bu fraksiyonlarda üçlü/çoklu bağlı olarak bulunmaktadır. Galenitin serbestleşme verileri ve mineral ilişkileri **Çizelge 16** ve **Çizelge 17**'de verilmektedir.

**Çizelge 16.** Kurşun-çinko cevherindeki galenitin serbestleşme durumları

Durum		<b>-0.212+0.106 mm</b>
Bağlı	<= 10%	10
	<= 20%	10.2
	<= 30%	6.5
	<= 40%	9.4
	<= 50%	6.3
	<= 60%	2.5
	<= 70%	6.3
	<= 80%	7.6
	<= 90%	3.3
	Serbest	< 100%
100%		1.8

**Çizelge 17.** Kurşun-çinko cevherindeki galenitin mineral ilişkileri

Durum	<b>Mineral</b>	<b>-0.212+0.106 mm</b>
Serbest	Serbest	37.9
İkili bağlı	Pirit	11.2
	Sfalerit	22.1
	Kuvars	0
	K-Feldispat	0
	Muskovit	0
	Biyotit	0
	Klorit	0
	Zn-Fe Karbonat	2.9
	Dolomit	0
	Kalsit	0
	Agregalar	0
Üçlü/Çoklu bağlı	Diğerleri	25.8

Galenitin bu fraksiyondaki serbestleşmesi incelendiğinde bu oran %37.9 olup, %22.1'i sfalerit ile, %11.2'si pirit ile ikili bağlıdır. Galenitin % 25.8'inin ise üçlü/çoklu bağlı olduğu görülmektedir.

Tüvenan cevherde bir başka çinko kaynağı ise Zn-Fe karbonatlardır. Çinkonun yaklaşık %6-7'si bu karbonatlardan gelmektedir. Ancak Zn-Fe karbonatlar eğer sfaleritle bağlı değilse çinko konsantrisine bu karbonatları almak mümkün değildir. Kurşun-çinko cevherindeki Zn-Fe karbonatların serbestleşme verileri ve mineral ilişkileri **Çizelge 18** ve **Çizelge 19**'da verilmektedir.

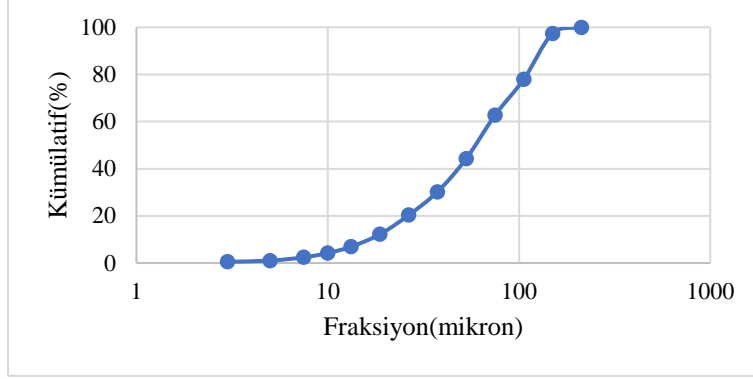
**Çizelge 18.** Kurşun-çinko cevherindeki Zn-Fe karbonatların serbestleşme verileri

Durum		-0.212+0.106 mm
Bağlı	<= 10%	5.4
	<= 20%	6.9
	<= 30%	7
	<= 40%	3.4
	<= 50%	14.6
	<= 60%	5.4
	<= 70%	10.5
	<= 80%	11.8
	<= 90%	17.2
Serbest	< 100%	17.8
	100%	0.1

**Çizelge 19.** Kurşun-çinko cevherindeki Zn-Fe karbonatların mineral ilişkileri

Durum	Mineral	-0.212+0.106 mm
Serbest	Serbest	17.9
İkili Bağlı	Sfalerit	12.5
	Pirit	11.8
	Galen	2.8
	Kuvars	0.2
	K-Feldispat	0
	Muskovit	0
	Biyotit	0
	Klorit	4.5
	Dolomit	0.2
	Kalsit	0
	Agregalar	0
Üçlü/Çoklu Bağlı	Diğerleri	50.2

Tüvenan cevherdeki Zn-Fe karbonatlar çoğunlukla üçlü/çoklu bağlı olarak bulunmaktadır (% 50.2). Bu karbonatların % 17.90'ı serbest bulunmakta geri kalanının ise çoğunlukla sfalerit ve piritle ikili bağlı olduğu görülmektedir. MLA'den elde edilen cevherin tane boyu dağılımı **Şekil 17**'de verilmektedir.

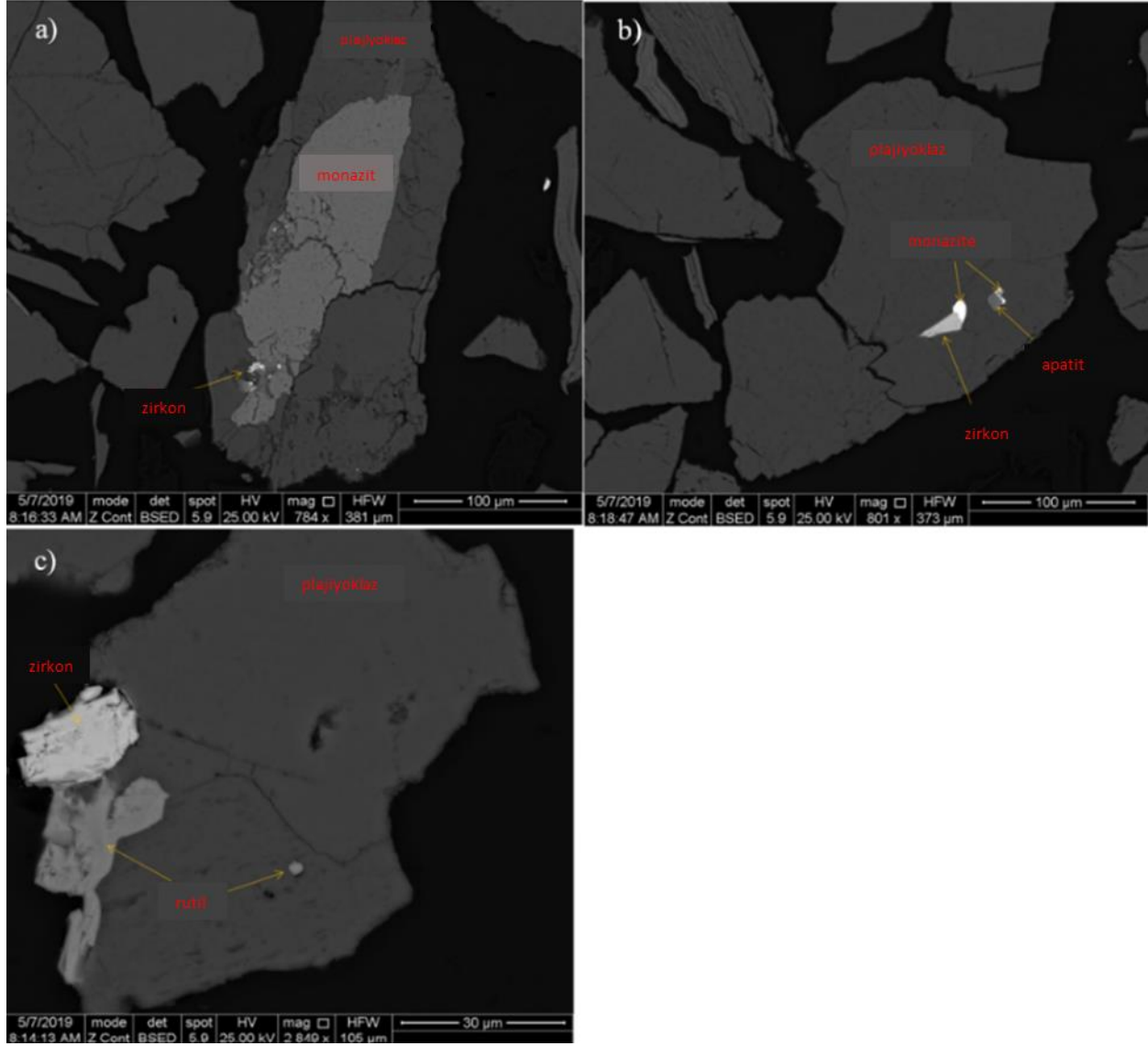


**Şekil 17.** Kurşun-Çinko cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA)

Elde edilen tane boyu dağılım grafiğine göre cevherin %100'ü -0.212 mm altında ve cevherin d80'i yaklaşık 0.110 mm'dir.

### **6.1.3. Feldispat Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi**

Tüvenan cevher -0.300 mm'ye öğütülerek -0.300+0.038 mm fraksiyonunda numune hazırlanarak bu numuneye modal analiz yapılmıştır. BSE ile elde edilen görüntülerden bazıları **Şekil 18**'de verilmektedir.



Şekil 18. a) Plajiyoklaz taneleri içerisinde kapanımlı apatit ve zirkon görünümü b) Plajiyoklaz taneleri içerisinde monazit, apatit ve zirkon kapanımları görünümü c) Plajiyoklaz taneleri içerisinde rutil görünümü

İri plajiyoklaz taneleri genel olarak bu boylarda serbesttir. Ancak plajiyoklaz içerisinde yer yer tespit edilen mikron ölçeğindeki rutil, zirkon, monazit ve apatit oluşumları, iri tane boylarında yüksek kaliteli bir feldispat konsantresi elde etmenin mümkün olmadığını göstermektedir. Modal analiz sonucunda elde edilen mineral içerikleri

Çizelge 20’de verilmektedir.

**Çizelge 20.** Feldispat cevherinin modal mineralojisi

	<b>Mineral</b>	<b>% Ağırlık</b>
Silikatlar	Kuvars	6.48
	Plajiyoklaz	81.03
	K-Feldispat	1.05
	Biyotit	1.82
	İllit	3.82
	Klorit	3.08
	Amfibol	0.39
	Andradit	0.2
	Turmalin	0.42
	Zirkon	0.06
	Titanit (Sfen)	0.01
	Oksitler	Rutil
İlmenit		
Fe Oksit / Hidroksit		0.02
	Apatit	0.77
	Monazit	0.02
	Pirit	0.01
	Diğer	0.04
	Toplam	100

Cevherin yaklaşık 81%'ini plajiyoklaz oluşturmaktadır ve %1.05 oranında K-feldispat içermektedir. Ancak cevherin içinde renk verici mineraller olan biyotit, illit, klorit, amfibol, andradit, turmalin ve rutil gibi mineraller bulunmaktadır.

#### **6.1.4. Bor Cevherinin MLA Analizlerinin Değerlendirilmesi**

Cevher -0.300 mm'ye öğütülmüş ve 0.150 mm'lik elekten elenerek -0.300+0.150 mm fraksiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan fraksiyona MLA analizi yapılmıştır. Fraksiyonların modal mineralojisi **Çizelge 21**'de verilmektedir.

**Çizelge 21.** Bor cevherinin modal mineralojisi

<b>0.300+0.150 mm</b>			
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Mineral</b>	<b>%</b>
Pirit (Framboidal)	0.01	Talk	1.83
Barit	0.02	Si-Al Killeri	0.03
Selestin	0.52	Kolemanit	59.70
Anhidrat	0.00	Kalsit	31.33
Fe Oksi/Hidroksi	<0.01	Dolomit	1.00
İlmenit	-	Strontiyanit	0.08
Kuvars	1.48	Apatit	<0.01
K-Feldispat	0.53	Kalsit-Kil Karışımı	1.65
Plajiyoklaz	0.37	Diğerleri	1.05
Biyotit	0.13	Toplam	100.00
Amfibol	0.27		

Cevherdeki kolemanit miktarı ~%60'tır. Cevherdeki diğer ana mineral kalsittir (%31.33). Cevherdeki kolemanit, selestin ve kalsitin serbestleşme verileri **Çizelge 22**'de verilmektedir. **Çizelge 22**'de verilen verilere göre kolemanitin ve kalsitin yaklaşık %90'ı serbest olarak bulunmaktadır.

**Çizelge 22.** Kolemanit cevherinin bağlılık ve serbestleşme verileri

Kolemanit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %										
Bağlı									Serbest	
<= 10%	<= 20%	<= 30%	<= 40%	<= 50%	<= 60%	<= 70%	<= 80%	<= 90%	< 100%	100%
0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.1	5.0	69.5	23.5
Selestin Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %										
Bağlı									Serbest	
<= 10%	<= 20%	<= 30%	<= 40%	<= 50%	<= 60%	<= 70%	<= 80%	<= 90%	< 100%	100%
17.3	0.2	0.0	0.0	82.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
Kalsit Yüzey Serbestleşme, Ağırlık %										
Bağlı									Serbest	
<= 10%	<= 20%	<= 30%	<= 40%	<= 50%	<= 60%	<= 70%	<= 80%	<= 90%	< 100%	100%
4.1	1.2	0.5	1.1	0.9	0.6	1.2	1.2	5.8	61.0	22.3

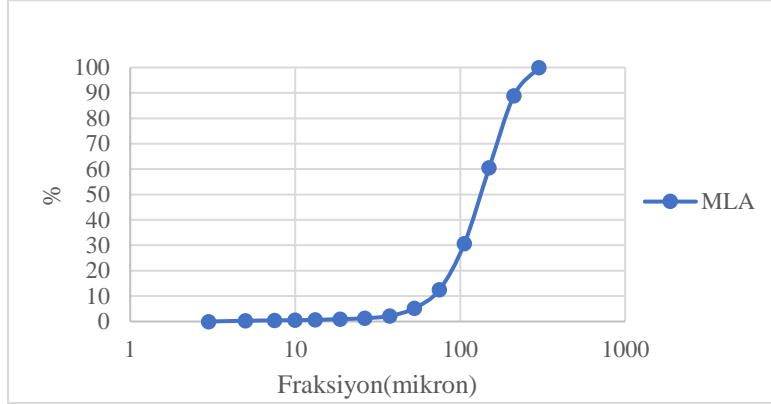
Cevherdeki kolemanit, selestin ve kalsitin mineral ilişkileri **Çizelge 23**'te verilmektedir. **Çizelge 23**'te verilen verilere göre cevherdeki kolemanitin %93'ü serbest olarak bulunmaktadır. İkili bağlı olduğu ana mineral kalsit olup bu oran %5'tir. Kolemanit %1.1 oranında üçlü/çoklu bağlı olarak bulunmaktadır. Selestinin %93.1'i üçlü/çoklu bağlı olarak bulunmaktadır. Selestinin ikili bağlı olduğu ana mineral kalsittir. Kalsitin %83.3'ü serbest olarak bulunmaktadır. İkili bağlı olduğu ana mineral dolomittir.

**Çizelge 23.** Kolemanit cevherinin detaylı faz analizleri

Kolemanitin Birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı								Üçlü/Çoklu Bağlı	
Serbest	Kuvars	Kalsit	Selestin	Amfibol	Biyotit	Strontiyanit	Talk	Dolomit	Diğer	
93.0	0.3	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.1	
Selestinin Birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı								Üçlü/Çoklu Bağlı	
Serbest	Kuvars	Kalsit	Selestin	Amfibol	Biyotit	Strontiyanit	Talk	Dolomit	Diğer	
0.5	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.1	
Kalsitin Birlikteliği, Ağırlık %										
Serbest	İkili Bağlı								Üçlü/Çoklu Bağlı	
Serbest	Kuvars	Kalsit	Selestin	Amfibol	Biyotit	Strontiyanit	Talk	Dolomit	Diğer	
83.3	0.0	5.1	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	2.1	8.6	



MLA'den elde edilen tane boyu dağılımı **Şekil 19**'da verilmektedir.

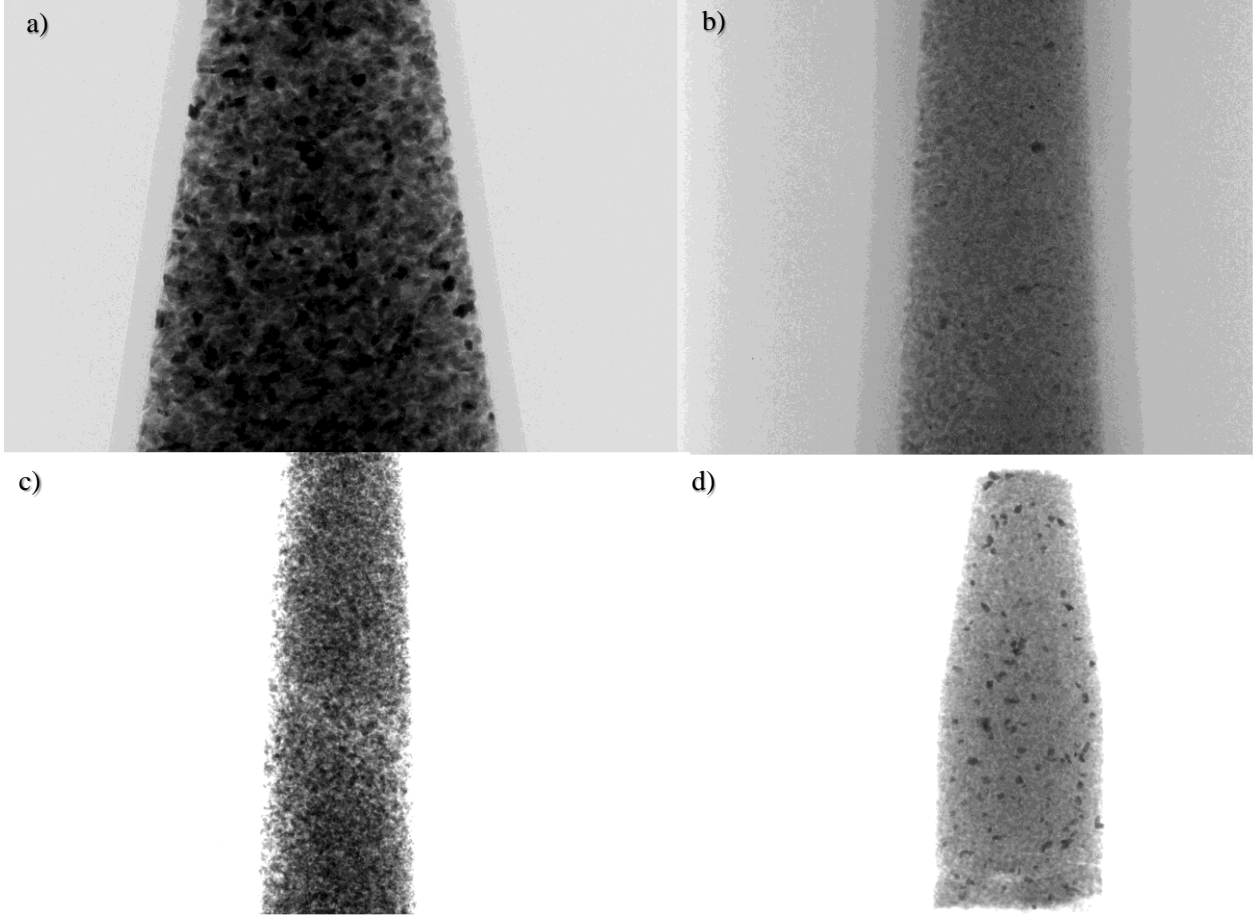


**Şekil 19.** Bor cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA)

MLA'den elde edilen tane boyu dağılımına göre cevherin %100'ü -0.300 mm altında ve cevherin d80'i yaklaşık 0.192 mm'dir.

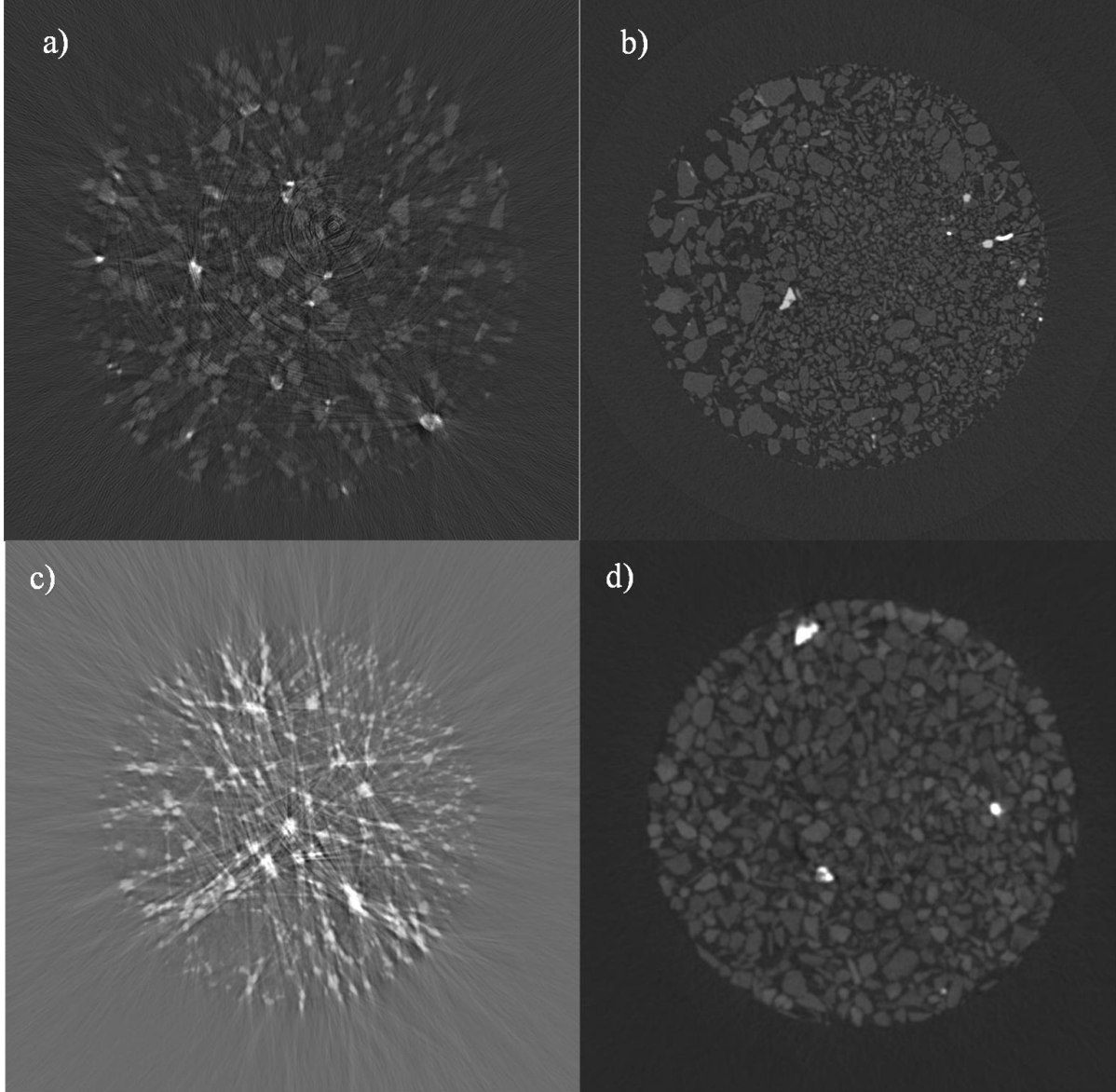
## 6.2. $\mu$ CT ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

$\mu$ CT ile gerçekleştirilen deneysel aşamalar kapsamında her bir cevherin görüntülemesi yapılmış ve binlerce projeksiyondan oluşturulan 3 boyutlu görüntüler elde edilmiştir. Farklı cevherlerden elde edilen 3 boyutlu görüntülerden örnekler **Şekil 20**'de verilmektedir.



**Şekil 20.** a) Kurşun çinko cevheri  $\mu$ CT görüntüsü b) Feldispat cevheri  $\mu$ CT görüntüsü c) Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT görüntüsü d) Bor cevheri  $\mu$ CT görüntüsü

Elde edilen görüntülerden sanal kesitler oluşturulmuştur. Her bir cevher için 1000'den fazla sanal kesit edilmiştir. Oluşturulan sanal kesitlerden örnekler **Şekil 21**'de verilmektedir.

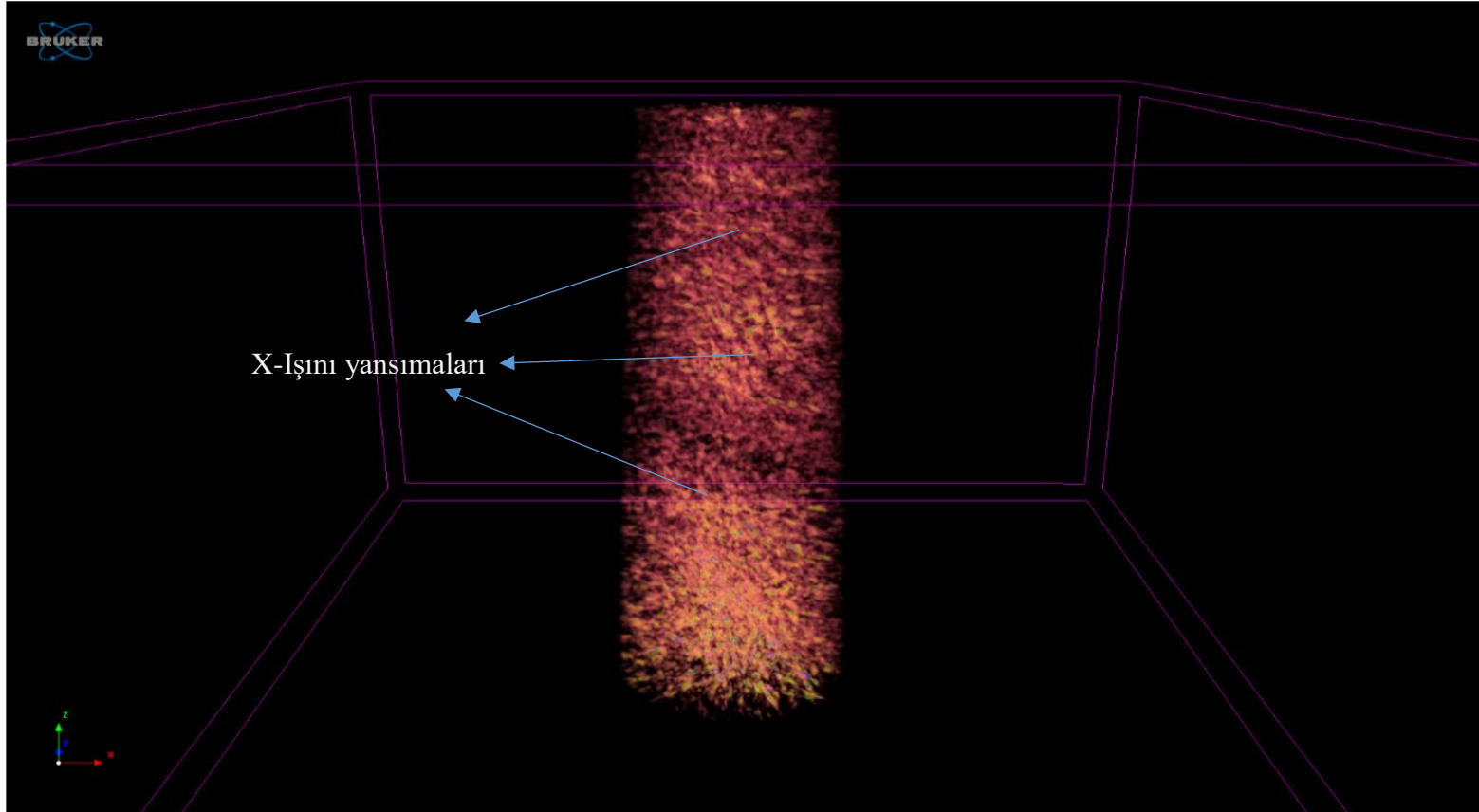


**Şekil 21.** a) Kurşun çinko cevheri  $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti b) Feldispat cevheri  $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti c) Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti d) Bor cevheri  $\mu$ CT görüntüsü sanal kesiti

Oluşturulan sanal kesitlere gürültü azaltma, eşik belirleme ve 'binary' fonksiyonları uygulanarak 3 boyutlu analize tabi tutulmuş ve yansıtma değerlerine düşen hacim, alan ve tane sayısı verileri elde edilmiştir. Bu bağlamda farklı yansıtma değeri aralıkları belirlenmiş ve ikili, dörtlü, altılı olmak üzere 3 veri seti elde edilmiştir. Ayrıca ImageJ içerisinde bulunan '3D trainable weka' eklentisi ile ana mineral fazları belirlenmiş ve bu fazlardan da veri seti elde edilmiştir.

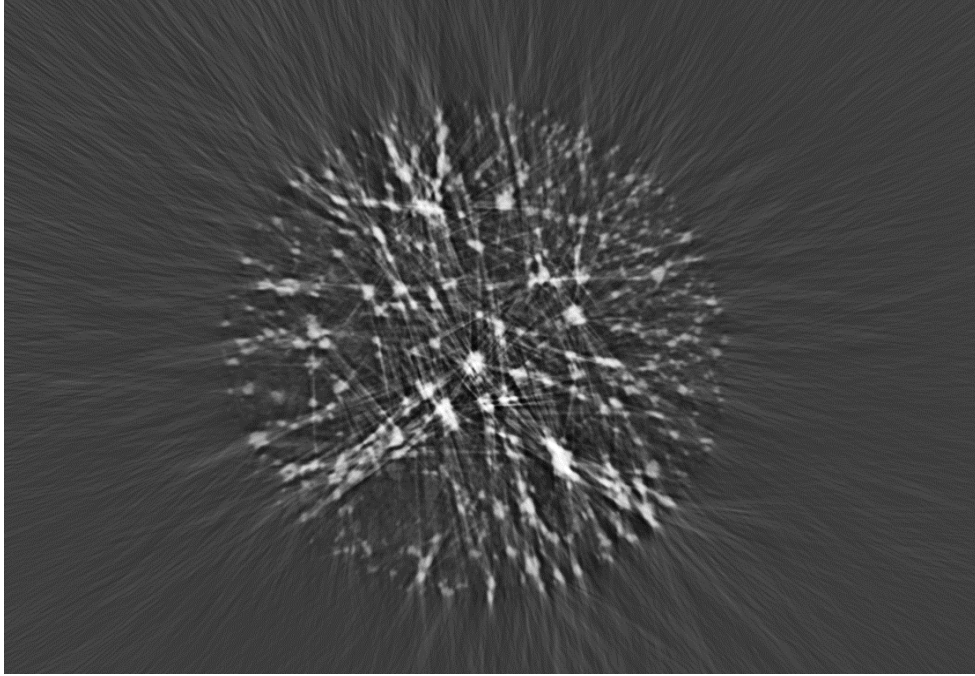
### 6.2.1. Nadir Toprak Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi

Bruker firmasının geliştirdiği cTvox programı kullanılarak InstaRec programından elde edilen sanal kesitlerden 3 boyutlu görüntüleri oluşturulmuş ve renklendirilmiştir. Elde edilen görüntü **şekil 22**'de verilmektedir.



**şekil 22.** Nadir toprak cevheri 3 boyutlu  $\mu$ CT görüntüsü

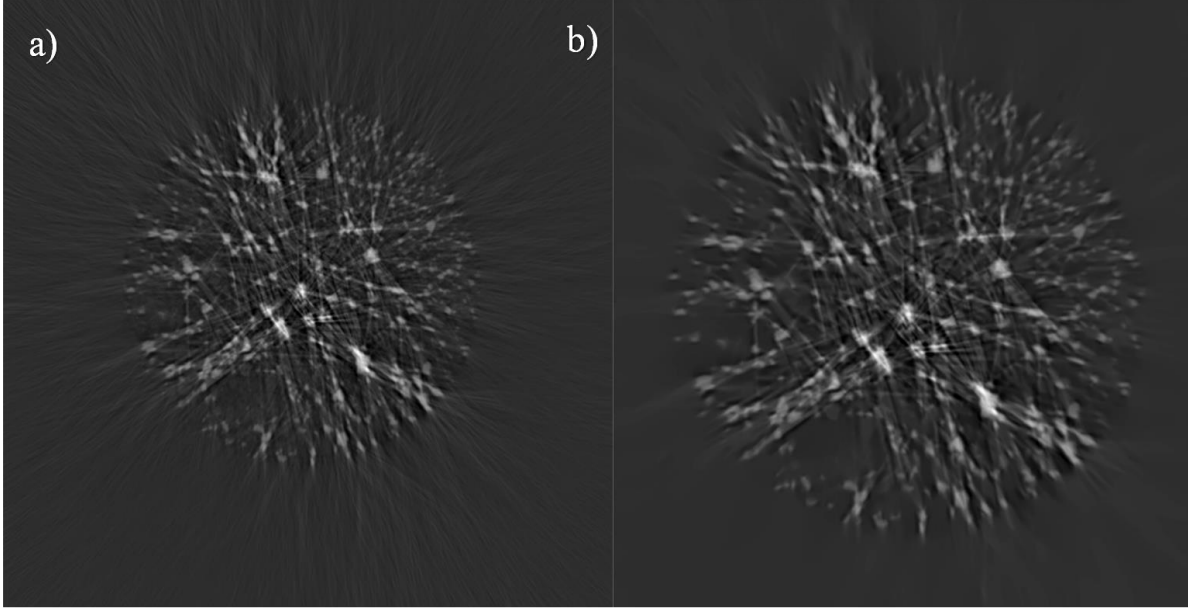
Barit mineralinin x-ışını attenüasyonu (X-Ray Attenuation) galenit gibi yüksektir. Nadir toprak cevherinin barit içeriğinin %37.13 olması (**Çizelge 9**) nedeniyle  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen sanal kesitlerde x-ışını yansıması çoktur. NLM Denoising eklentisi kullanarak gürültü azaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Gürültü azaltma işleminde bu görüntüler için sonuç alınamamıştır. Gürültü azaltma işleminde sigma değerinin yükseltilmesi halinde görüntülerdeki etkilerin kısmen de olsa giderilebildiği ancak veri kaybının çok olduğu görülmektedir. Bu sebeple sigma değeri 1000 olarak belirlenmiştir. Nadir toprak cevherinin sanal kesitlerinde görülen x-ışını yansıması [77] **Şekil 23**'te verilmektedir.



**Şekil 23.** Nadir Toprak cevheri  $\mu$ CT görüntüsü sanal kesitinde görülen x-ışını yansımaları

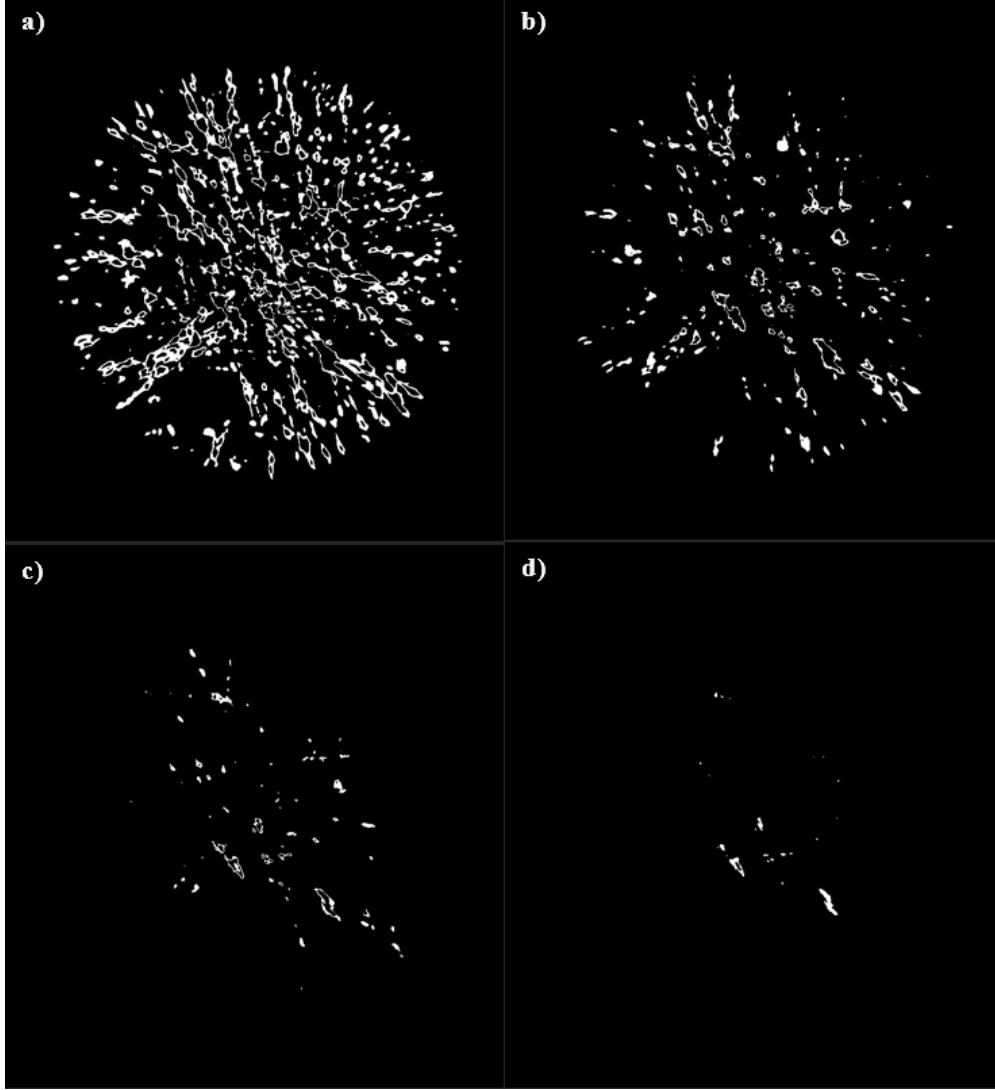
Yansımaların fazlalığı bu görüntülerden doğru bir veri seti elde edilmesine engel olmaktadır. Görüntülerin iyileştirilememesi sebebiyle nadir toprak cevheri için daha yüksek çözünürlükle daha uzun süreli analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Gürültü azaltma işlemi [51] sonrası elde edilen nadir toprak cevherinin kesitlerden örnekler **Şekil 24**'te verilmektedir.



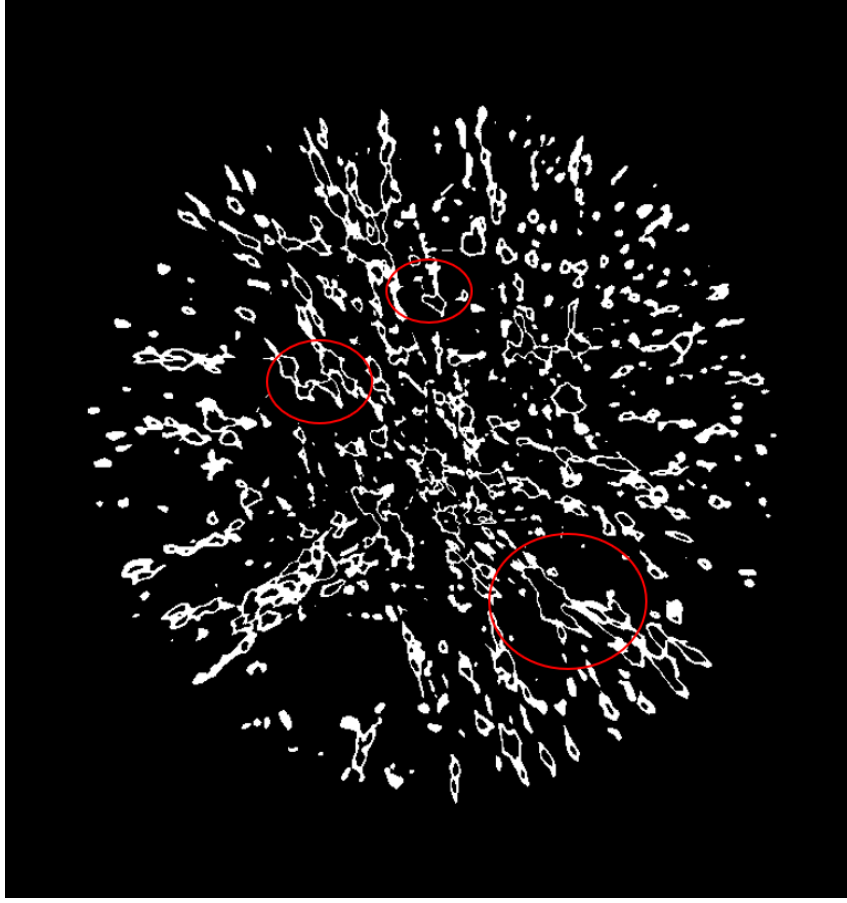
**Şekil 24.** Nadir toprak cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü

Gürültü azaltma işlemi sonrası görüntülerde büyük miktarda yansıma etkileri kaldığı görülmektedir. Gürültü azaltma işleminin sigma değerinin daha da arttırılması büyük miktarda veri kaybına sebep olmaktadır. Nadir toprak cevheri ile yapılan çalışmalarda görüntülerdeki gürültü ve etkiler uzaklaştırılamamıştır. Farklı parametrelerle görüntü alımı da yapılmasına rağmen daha iyi bir görüntü elde edilememesi sebebiyle ilk görüntü ile çalışmalara devam edilmiştir. Görüntü iyileştirme işlemi sonrasında ilk olarak '3D trainable weka' ile farklı mineral fazları elde edilmiş ve bu kapsamda elde edilen ana mineral fazlarının grilik değeri aralıkları (faz) 79-111, 111-145, 145-176, 176-255 olarak belirlenmiştir. Belirlenen grilik değeriyle elde edilen fazlardan örnek görüntüler **Şekil 25**'te verilmektedir.



**Şekil 25.** Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 79-111 b) 111-145 c) 145-176 d) 176-255

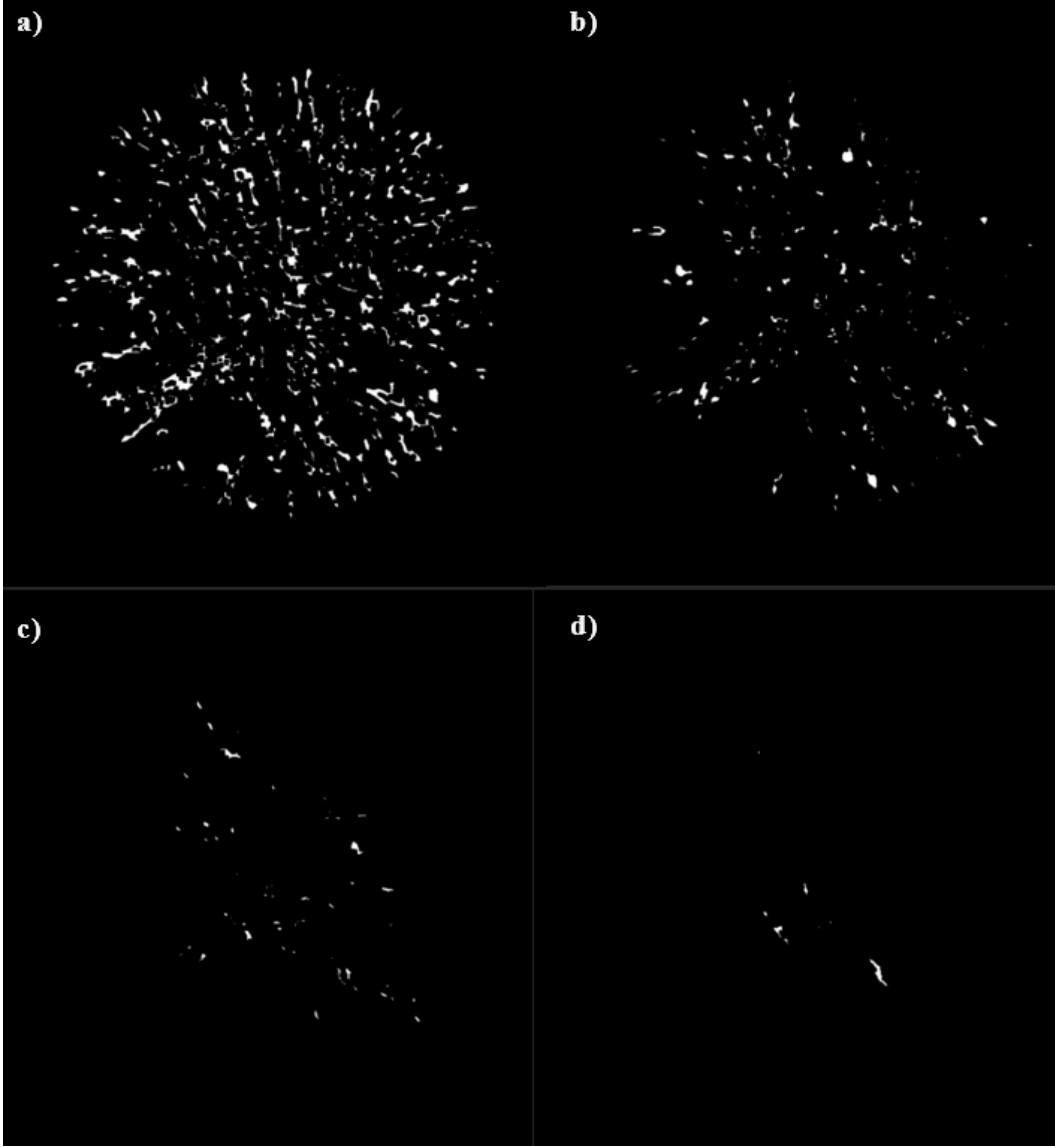
Faz belirlemesi sonrasında elde edilen görüntüler incelendiğinde tanelerin gözlemlenemediği görülmektedir. X-ışını attenüasyonu yüksek olan mineraller x-ışınlarını büyük miktarda yansıtmakta ve ışınların az bir miktarı bu minerallerden geçebilmektedir [77]. Fazlarda çoğunlukla x-ışını sertleşmesi ve x-ışını yansımaları görülmektedir. X-ışını sertleşmesi ve x-ışını yansımaları [77] **Şekil 26'**da görülmektedir.



**Şekil 26.** Nadir toprak cevherinin sanal kesitlerinden elde edilen fazlarda gözlenen x-ışını sertleşmesi ve x-ışını yansımaları etkileri

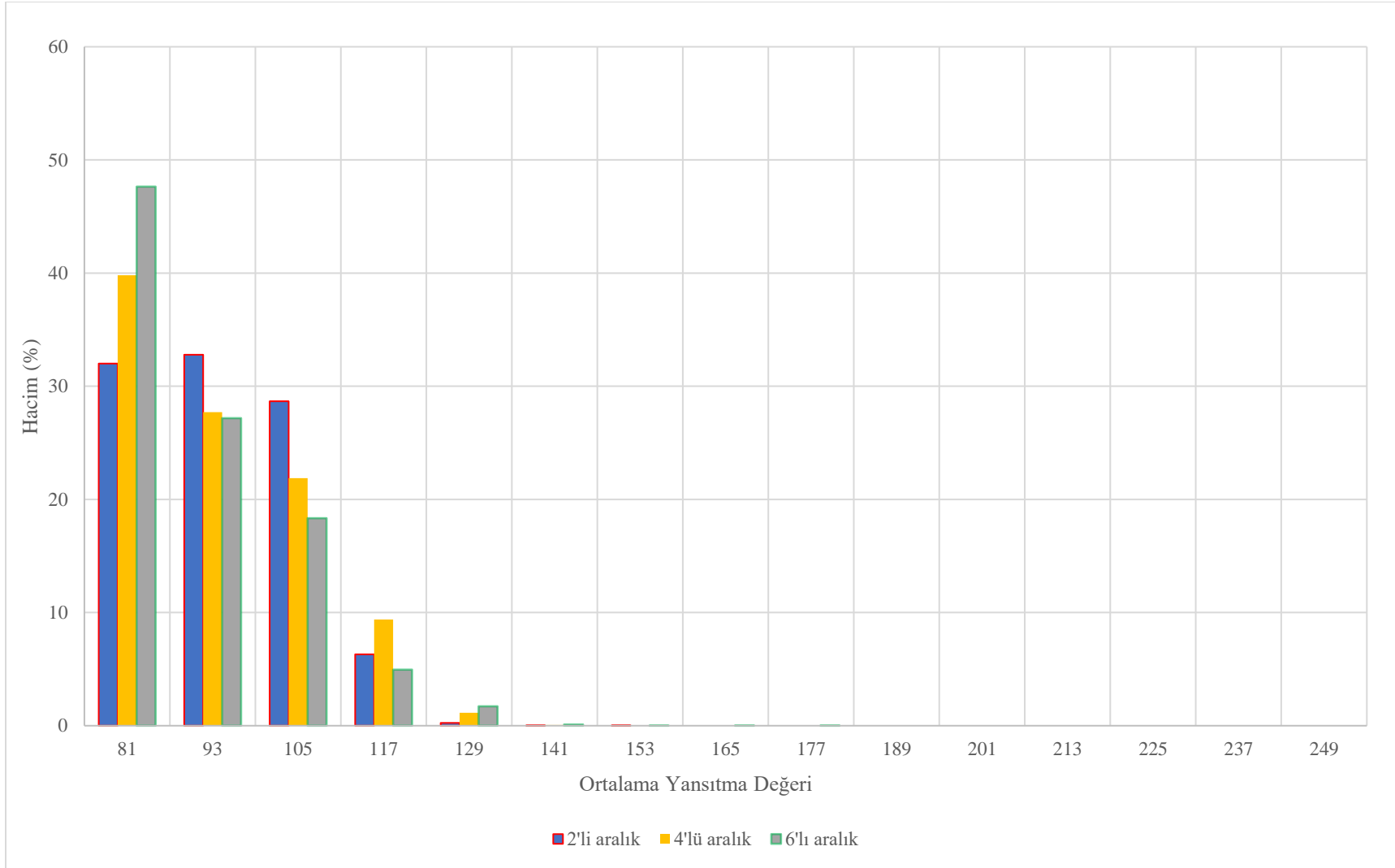
X-ışını sertleşmesi etkilerinin giderilebilmesi amacıyla ImageJ içerisinde Binary sekmesinde bulunan kapama (close) ve aşındırma (erode) fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca bu fonksiyonla birlikte kesitlerin içerisinde bulunan çok küçük tanelerin ( $<1 \mu\text{m}$ ) elimine edilerek düzgün veri setleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan kapama ve aşındırma fonksiyonları sonrası elde edilen kesitlerden örnekler **Şekil 27'**de verilmektedir.





**Şekil 27.** Nadir toprak cevherinin sanal kesitlerinden elde edilen fazlara kapama ve aşındırma fonksiyonları uygulanması sonucu elde edilen kesitlerden örnekler a) 79-111 fazı b) 111-145 fazı c) 145-176 fazı d) 176-255 fazı

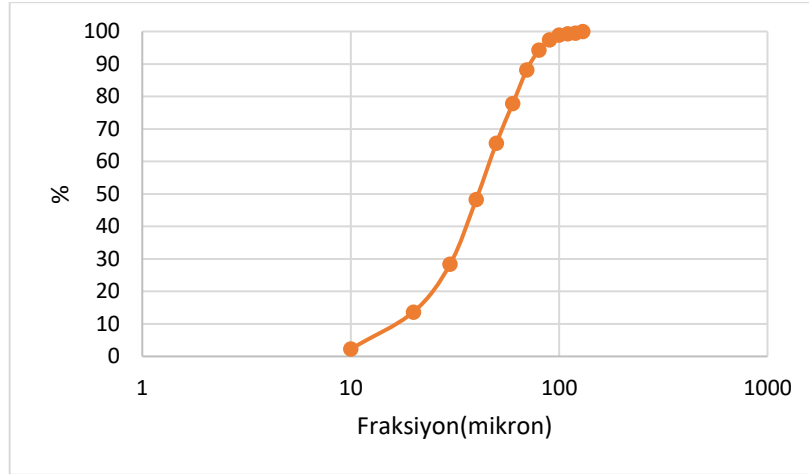
Elde edilen her bir fazda 1000'den fazla görüntü bulunmaktadır. Fazlardaki tane sayısının, yüzey alanının ve hacim verilerinin belirlenebilmesi için ImageJ içinde bulunan 3 boyutlu tane analizi (3D particle counter) eklentisi kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen görüntü iyileştirme aşamaları 2'li aralık, 4'lü aralık ve 6'lı aralıklı görüntü setlerinde de uygulanmıştır. Ana faz, 2'li aralık, 4'lü aralık ve 6'lı aralıklı görüntülerden elde edilen veri setleri **Şekil 28'**de verilmektedir. Veri setlerinin ham hali **Ek 1'**de verilmektedir.



Şekil 28. Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi

Elde edilen veriler incelendiğinde 2'li, 4'lü ve 6'lı aralık veri setlerinin arasında minör farklar olduğu, bu farkların ise düşük yansıtma değerlerinde olduğu görülmektedir. Yüksek yansıtma değerlerinde düşük aralıkta tane gözlemlenemezken, aralık arttıkça bu yansıtma değerlerinde tane gözlemlenmiştir. Tüm veri setlerinde cevherin hacimce yaklaşık %95'i 75-111 yansıtma değeri aralığında bulunmakta olup, 75'in altındaki yansıtma değerlerinde yansıtma etkilerinin çokluğu sebebiyle tane gözlemlenememiştir. Hacim verileri 75-111 yansıtma değerleri arasında eşit dağılmış olup, görüntülerdeki impüriteler sebebiyle tane üzerinden yorum yapmak mümkün değildir.

Elde edilen hacim verilerinin yanı sıra cevher için ImageJ içerisinde bulunan tane boyu dağılımı eklentisi kullanılarak cevherin tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Nadir toprak cevherinin tane boyu dağılımı **Şekil 29**'da verilmektedir.

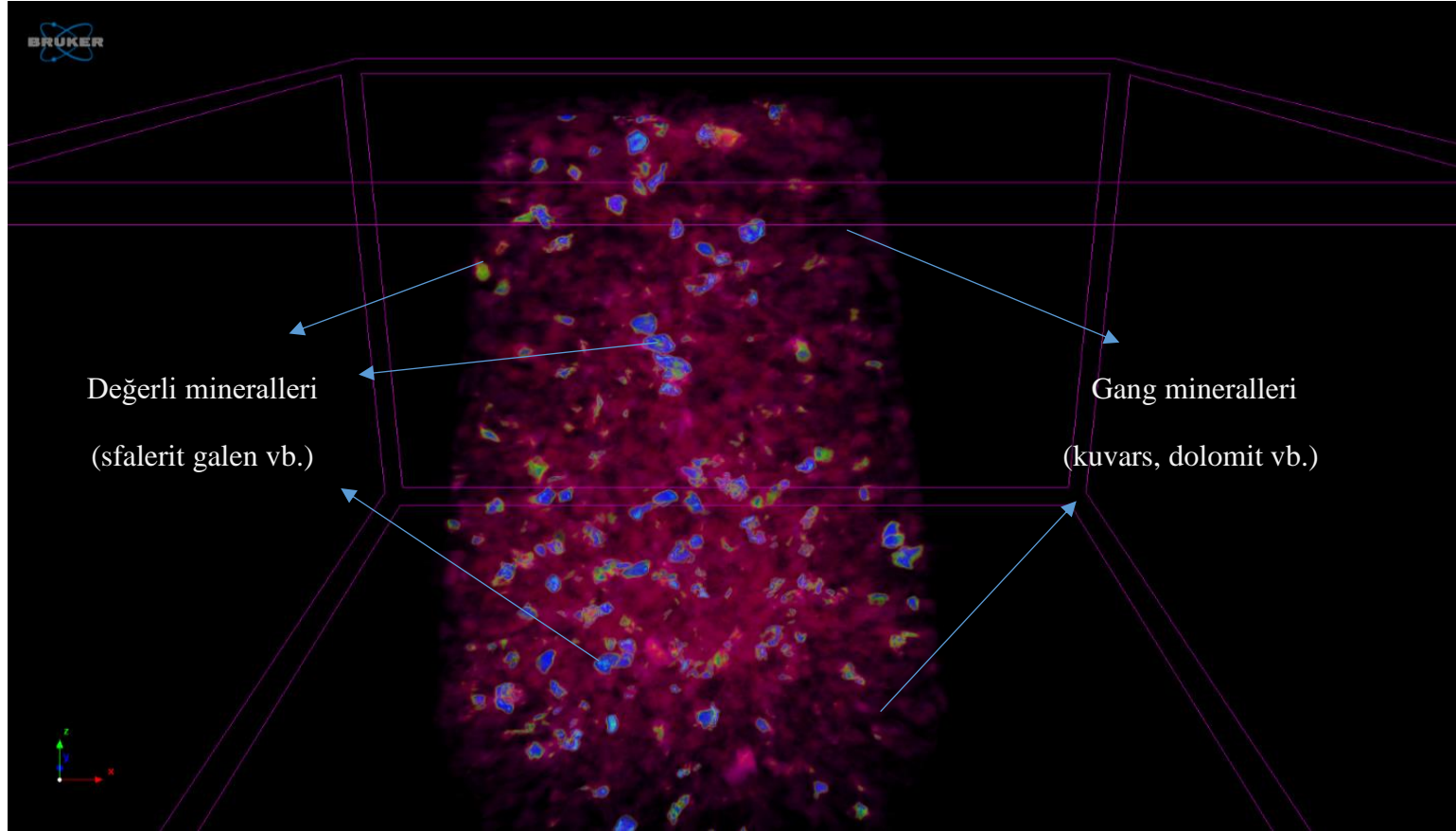


**Şekil 29.** Nadir toprak cevheri birikimli tane boyu dağılımı ( $\mu$ CT)

$\mu$ CT görüntüsünden elde edilen tane boyu dağılımı incelendiğinde cevherin 100%'ünün 0.130 mm altında ve cevherin  $d_{80}$ 'inin yaklaşık 0.062 mm olduğu görülmektedir.

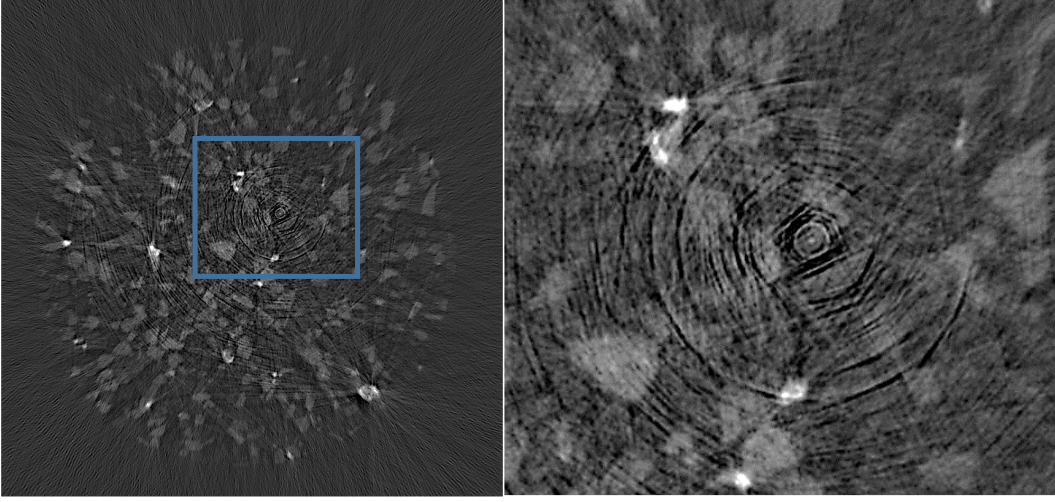
### 6.2.2. Kurşun-Çinko Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi

Bruker firmasının geliştirdiği cTvox programı kullanılarak InstaRec programından elde edilen sanal kesitlerden 3 boyutlu görüntüler oluşturulmuş ve renklendirilmiştir. Elde edilen görüntü **Şekil 30**'da verilmektedir.



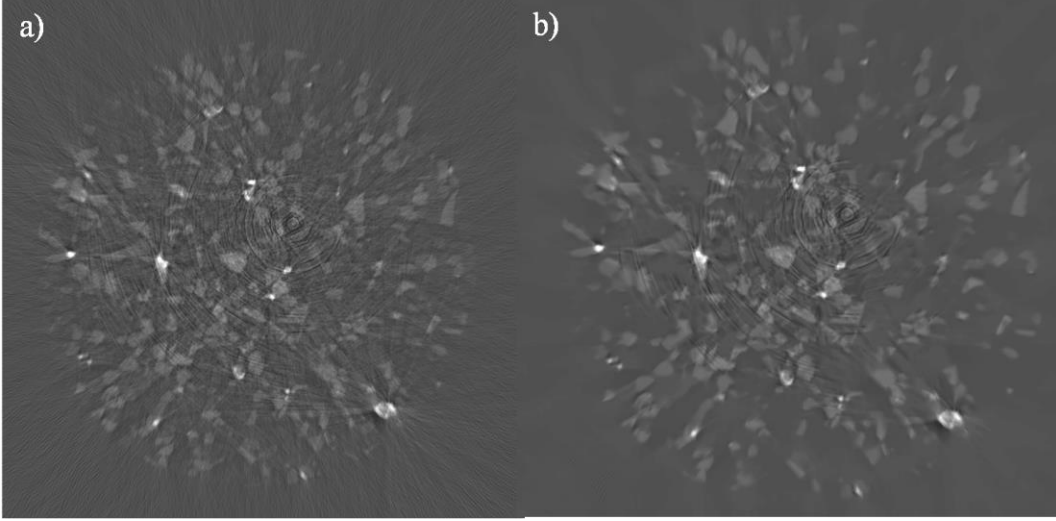
**Şekil 30.** Kurşun-çinko cevheri 3 boyutlu  $\mu$ CT görüntüsü

Kurşun-çinko cevherinde galenitin x-ışını attenüasyonunun yüksek olması sebebi x-ışınlarını yansıtmakta ve bu yansımalar görüntülerde gürültü oluşturmaktadır. Kurşun-çinko sanal kesitlerinde karşılaşılan ve literatürde de gözlemlenen halka artefaktı etkileri [70, 71] **Şekil 31**'de verilmektedir.



**Şekil 31.** Kurşun – çinko cevheri sanal kesitlerinde “ring artifact” etkileri

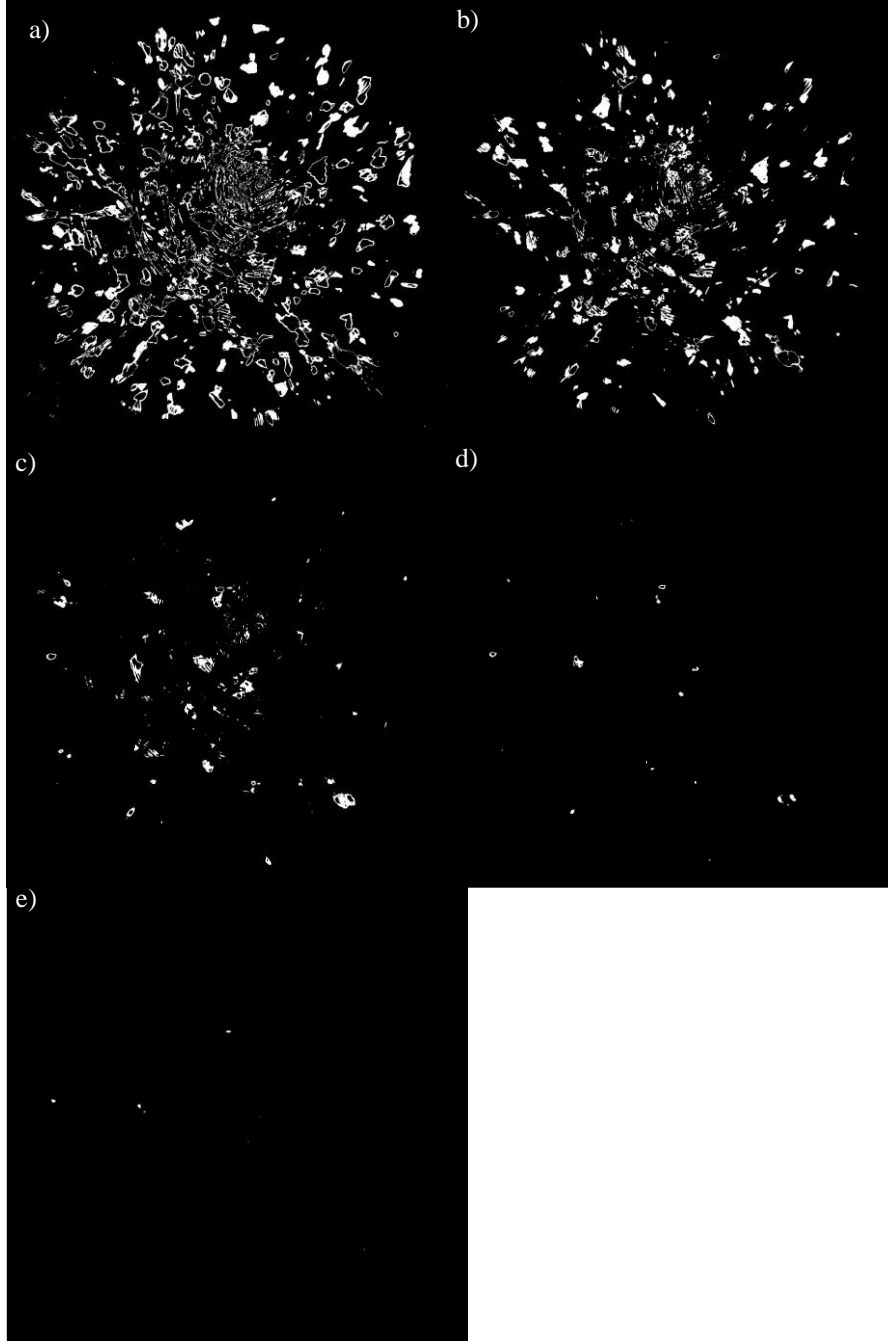
Gürültü ve ‘ring-artifact’ etkisi ve sebebi ile farklı denemelerden sonra sigma 1000 olarak belirlenmiştir. Gürültü azaltma işlemi [51] sonrası kurşun-çinko cevherinden elde edilen kesitlerden örnekler **Şekil 32**'de verilmektedir.



**Şekil 32.** Kurşun-çinko cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü

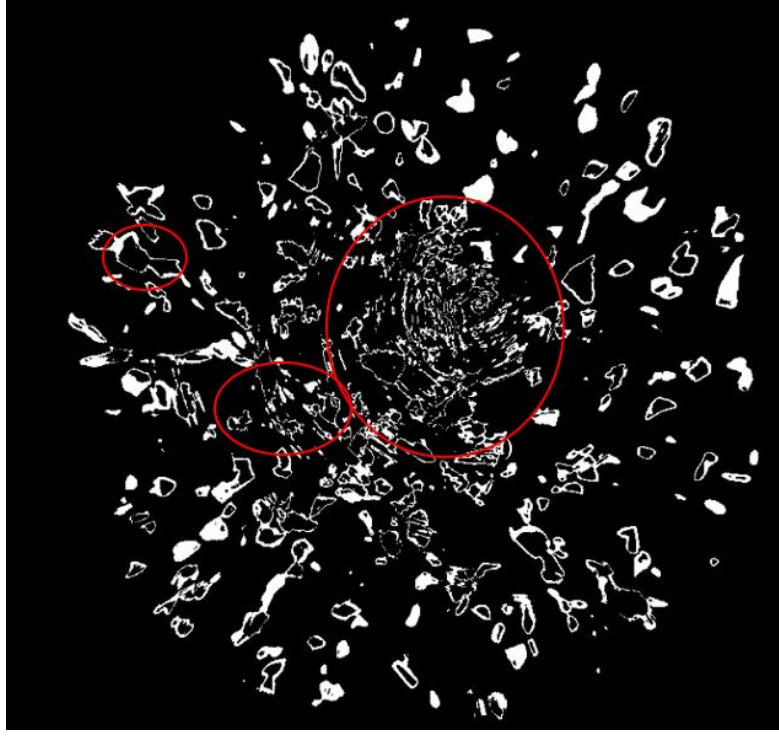
Gürültü azaltma işlemi sonrası görüntülerde ring-artifact etkilerinin kaldığı görülmektedir. Gürültü azaltma işleminin sigma değerinin daha da artırılması büyük miktarda veri kaybına sebep olmaktadır. Bu sebeple çalışmalara bu görüntülerle devam edilmiştir.

Kurşun-çinko cevheri ile yapılan çalışmalarda görüntülerdeki çoğunlukla görülen ring-artifact etkileri giderilememiştir. Farklı parametreler denenip tekrar  $\mu$ CT görüntüleri alınmıştır. Bu parametrelerle farklı bir sonuç elde edilememesi sebebiyle ilk görüntülerle çalışılmaya devam edilmiştir. Görüntü iyileştirme işlemi sonrasında ilk olarak '3D trainable weka' ile farklı mineral fazları elde edilmiş ve bu kapsamda elde edilen ana mineral fazlarının grilik değeri aralıkları (faz) 26-33, 33-45, 45-85, 85-137, 137-255 olarak belirlenmiştir. Bu fazlardan örnek kesitler **Şekil 33**'te verilmektedir.



**Şekil 33.** Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 26-33 b) 33-45 c) 45-85 d) 85-137 e) 137-255

Kurşun-çinko cevherinin  $\mu$ CT görüntülerinde gözlemlenen halka-artefaktı [70, 71] ve x-ışını sertleşmesi [77] etkileri **Şekil 34**'te verilmektedir.



**Şekil 34.** Kurşun-çinko cevherinin  $\mu$ CT görüntülerinde gözlemlenen ring-artifact ve x-ışını sertleşmesi etkileri

X-ışını sertleşmesi etkilerinin giderilebilmesi amacıyla ImageJ içerisinde 'Binary' sekmesinde bulunan kapama (close) ve aşındırma (erode) fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca bu fonksiyonla birlikte kesitlerin içerisinde bulunan çok küçük tanelerin ( $<1 \mu\text{m}$ ) elimine edilerek düzgün veri setleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Kapama ve aşındırma fonksiyonları sonrası elde edilen farklı fazlardan örnek kesitler **Şekil 35**'te verilmektedir.

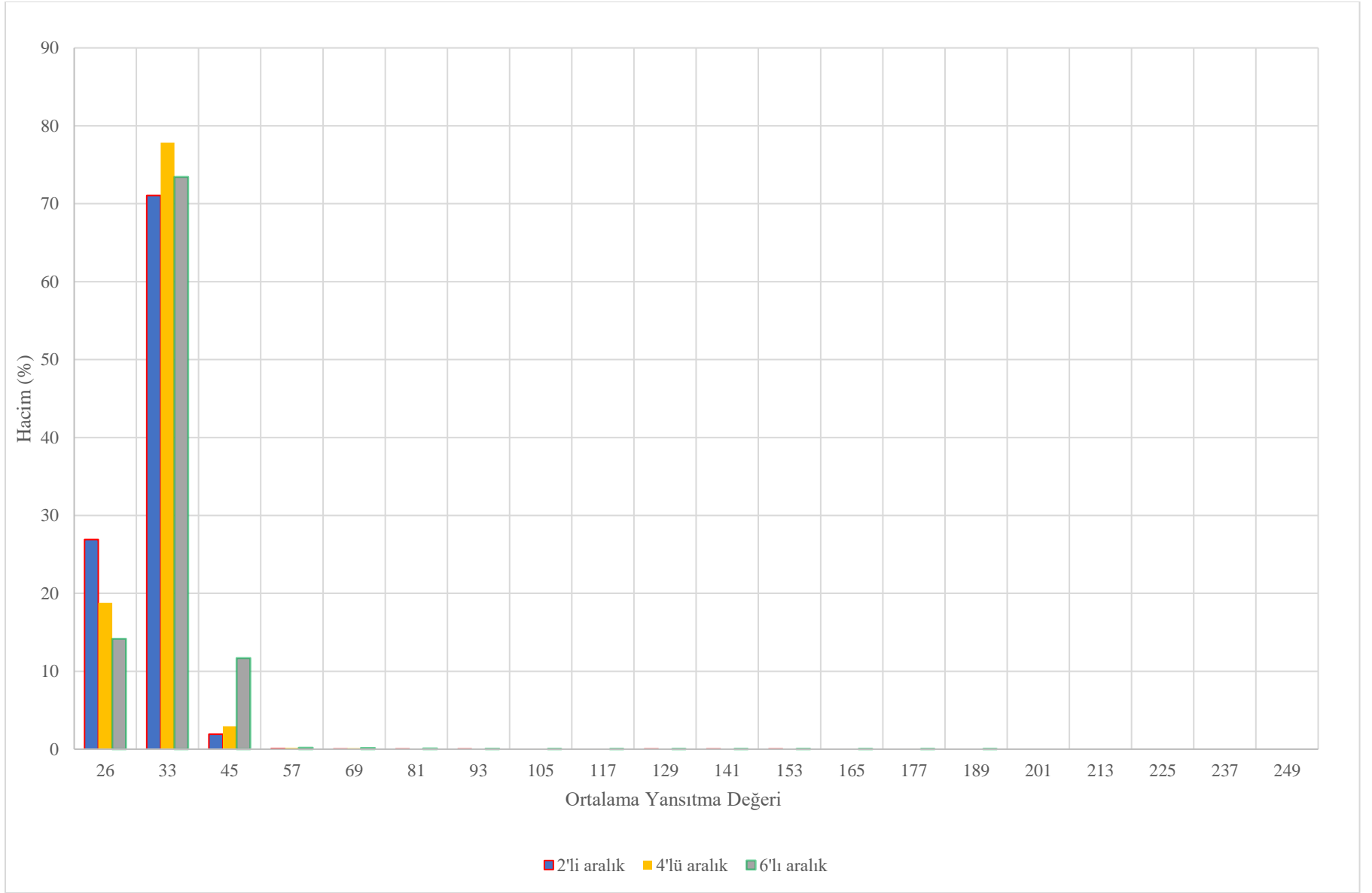




Şekil 35. Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT görüntüsünden kapama ve aşındırma eklentileri kullanıldıktan sonraki fazlardan örnek kesitler a) 26-33 b) 33-45 c) 45-85 d) 85-137 e) 137-255

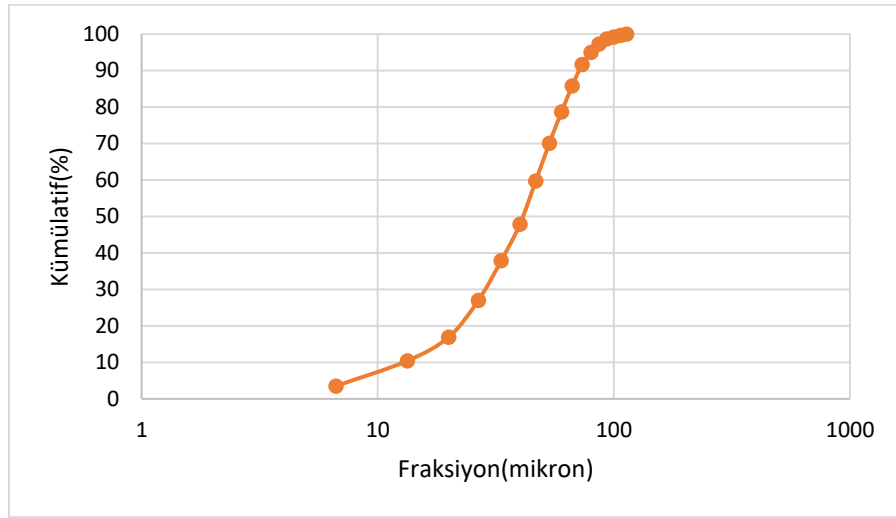
Elde edilen her bir fazda 1000 ‘den fazla görüntü bulunmaktadır. Fazlardaki tane sayısının, yüzey alanının ve hacim verilerinin belirlenebilmesi için ImageJ içinde bulunan 3 boyutlu tane analizi (3D particle counter) eklentisi kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen görüntü iyileştirme aşamaları 2’li aralık, 4’lü aralık ve 6’lı aralıklı görüntü setlerinde de uygulanmıştır. Ana faz, 2’li aralık, 4’lü aralık ve 6’lı aralıklı görüntülerden elde edilen veri setleri

Şekil 36’de verilmekte ve veri setlerinin ham hali Ek 2’de verilmektedir.



**Şekil 36.** Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi

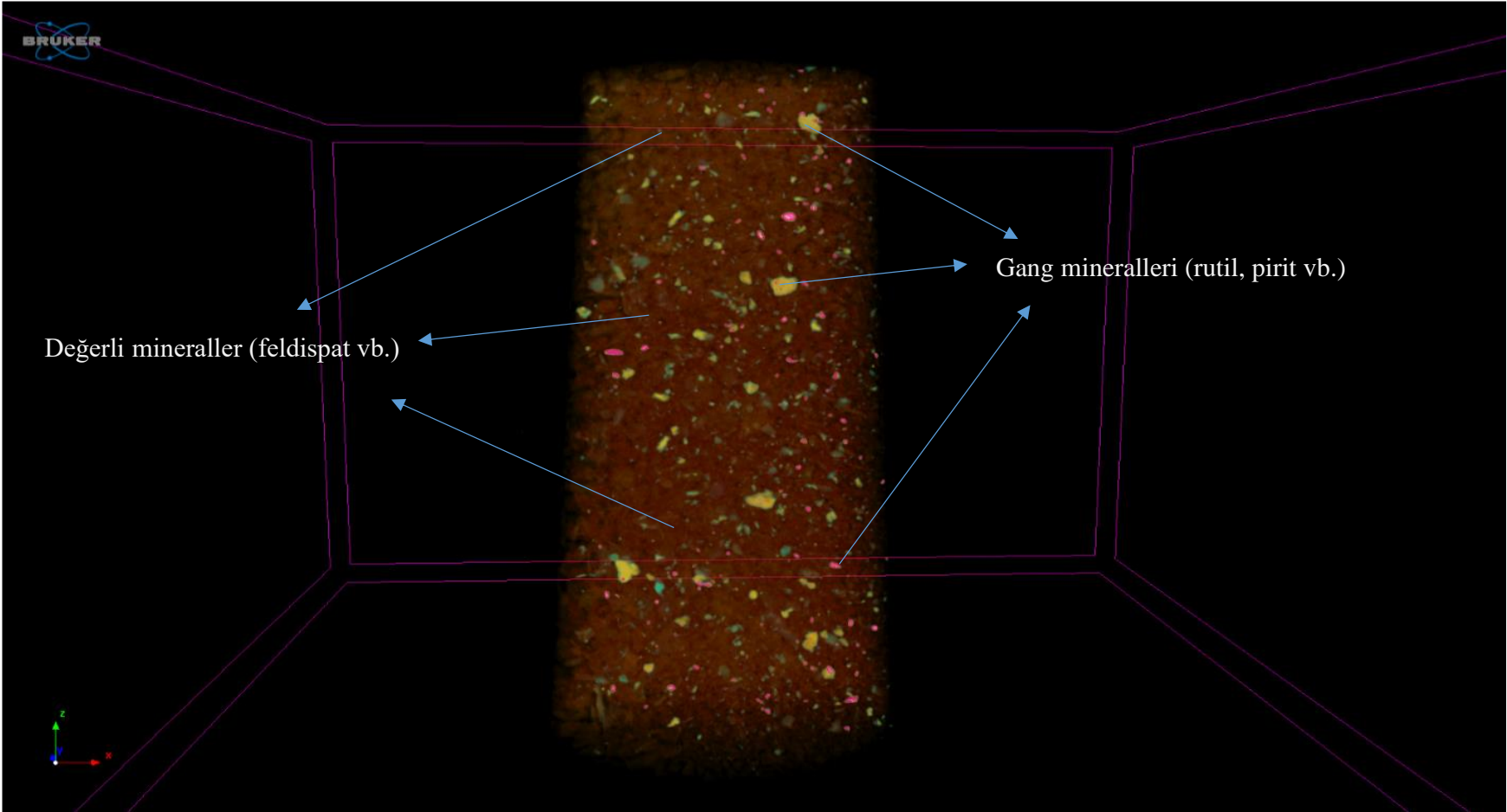
Elde edilen veriler incelendiğinde 2'li, 4'lü ve 6'lı aralık veri setlerinin arasında minör farklar olduğu, bu farkların ise düşük yansıtma değerlerinde olduğu görülmektedir. Yüksek yansıtma değerlerinde düşük aralıkta tane gözlemlenemezken, aralık arttıkça bu yansıtma değerlerinde tane gözlemlenmiştir. Tüm veri setlerinde cevherin hacimce yaklaşık %95'i düşük yansıtma değerlerinde (26-51) bulunmakta olup, bu aralıktaki dağılım veri setlerinde farklılık göstermektedir. Bununla birlikte cevherin %71-78'i 27-39 yansıtma değerleri arasında bulunmaktadır. Elde edilen hacim verilerinin yanı sıra cevher için ImageJ içerisinde bulunan tane boyu dağılımı eklentisi kullanılarak cevherin tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Kurşun-çinko cevherinin tane boyu dağılımı **Şekil 37**'de verilmektedir.



**Şekil 37.** Kurşun-Çinko cevheri birikimli tane boyu dağılımı

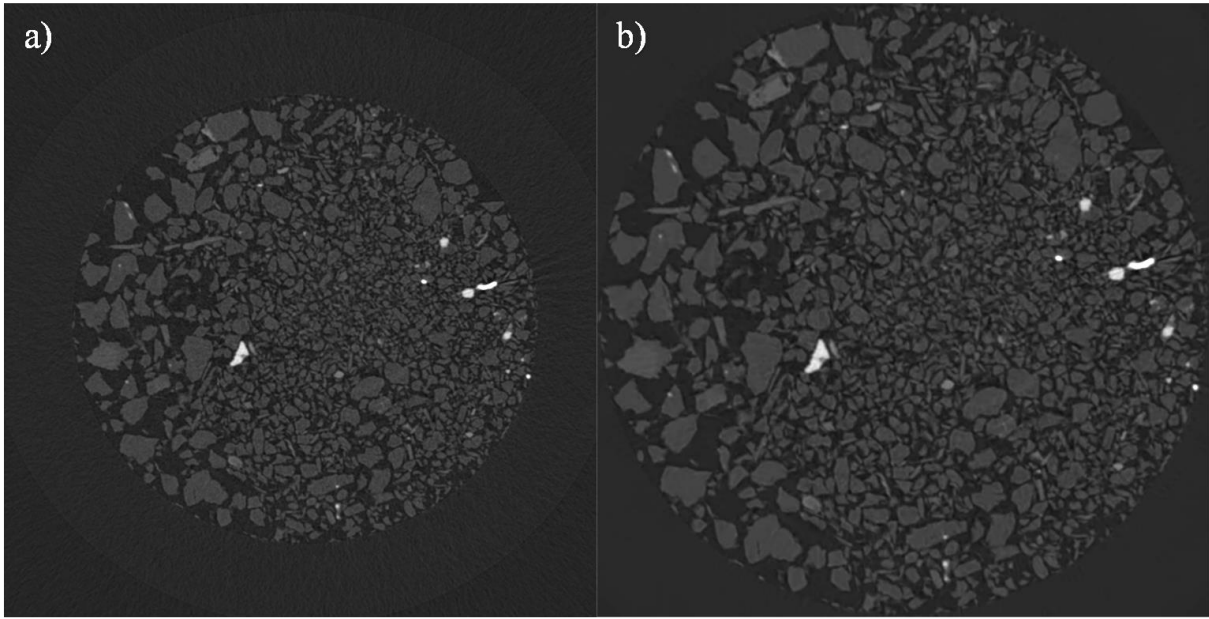
### 6.2.3. Feldispat Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi

Bruker firmasının geliştirdiği cTvox programı kullanılarak InstaRec programından elde edilen sanal kesitlerden 3 boyutlu görüntüler oluşturulmuş ve renklendirilmiştir. Elde edilen görüntü **Şekil 38**'de verilmektedir.



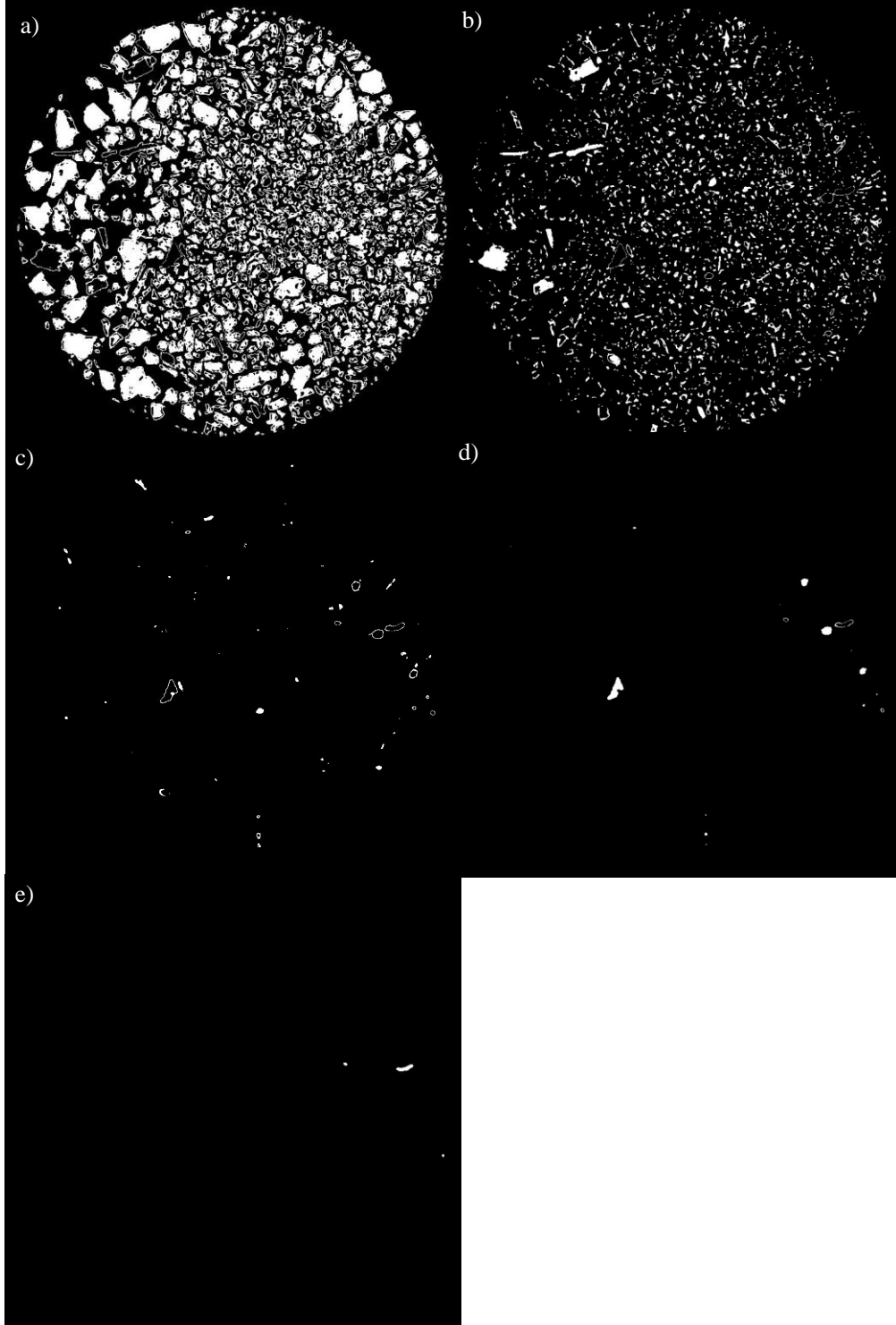
Şekil 38. Feldispat cevheri 3 boyutlu  $\mu$ CT görüntüsü

Feldispat cevherinin  $\mu$ CT görüntülerinde kurşun-çinko cevherinde görülen ring-artifact etkileri (Şekil 31) ve nadir toprak cevherinde gözlemlenen x-ışını yansımaları (Şekil 23) görülmemektedir. Feldispat cevherinin  $\mu$ CT görüntülerinde gözlemlenen etkiler gürültü ve düşük miktarda x-ışını sertleşmesi etkileridir. Bu etkiler NLM Denoising eklentisi aracılığıyla düşük bir sigma değeri ile veri kaybı minimumda tutularak giderilmiştir. Feldispat  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen sanal kesitlerinde gürültü az olduğu için farklı denemelerden sonra sigma 500 olarak belirlenmiştir. Gürültü azaltma işlemi sonrası [51] feldispat cevherinden elde edilen kesitlerden örnekler Şekil 39’da verilmektedir.



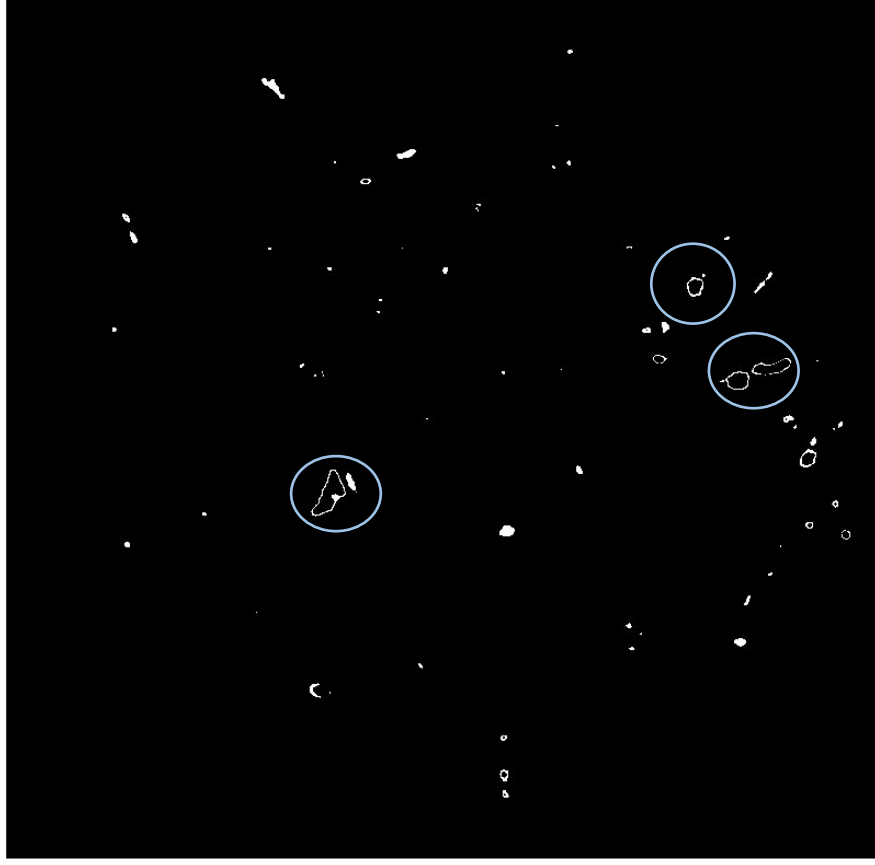
Şekil 39. Feldispat cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü

Feldispat cevherinde eser miktarda gürültü bulunmaktadır. Gürültü azaltma işleminde sigma değeri düşük tutularak veri kaybı minimuma indirilmiştir. Çalışmalara gürültüsü azaltılmış görüntülerle devam edilmiştir. Görüntü iyileştirme işlemi sonrasında ilk olarak ‘3D trainable weka’ ile farkı mineral fazları elde edilmiş ve bu kapsamda elde edilen ana mineral fazlarının grilik değeri aralıkları (faz) 44-55, 55-71, 71-107, 107-163, 163-255 olarak belirlenmiştir. Belirlenen fazlardan örnek kesitler Şekil 40’da verilmektedir.



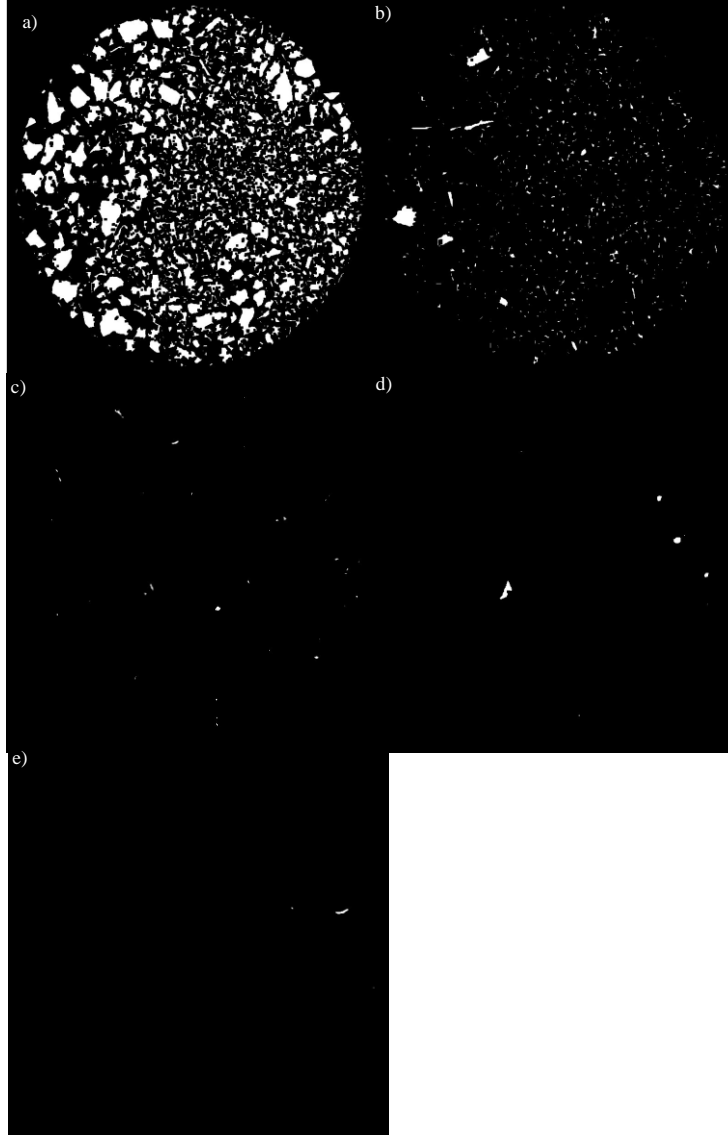
**Şekil 40.** Feldispat cevheri  $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 44 - 55 b) 55 - 71 c) 71 - 107 d) 107 - 163 e) 163 - 255

Feldispat cevherinin sanal kesitlerinde gözlemlenen x-ışını sertleşmesi etkisi [70, 71] **Şekil 41**'de verilmektedir.



**Şekil 41.** Feldspat cevherinin sanal kesitlerinden elde edilen fazlarda gözlenen x-ışını sertleşmesi etkileri

X-ışını sertleşmesi etkilerinin giderilebilmesi amacıyla ImageJ içerisinde Binary sekmesinde bulunan kapama ve aşındırma fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca bu fonksiyonla birlikte kesitlerin içerisinde bulunan çok küçük tanelerin ( $<1 \mu\text{m}$ ) elimine edilerek düzgün veri setleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Kapama ve aşındırma fonksiyonları sonrası elde edilen farklı fazlardan sanal kesitlerden örnekler **Şekil 42**'de verilmektedir.

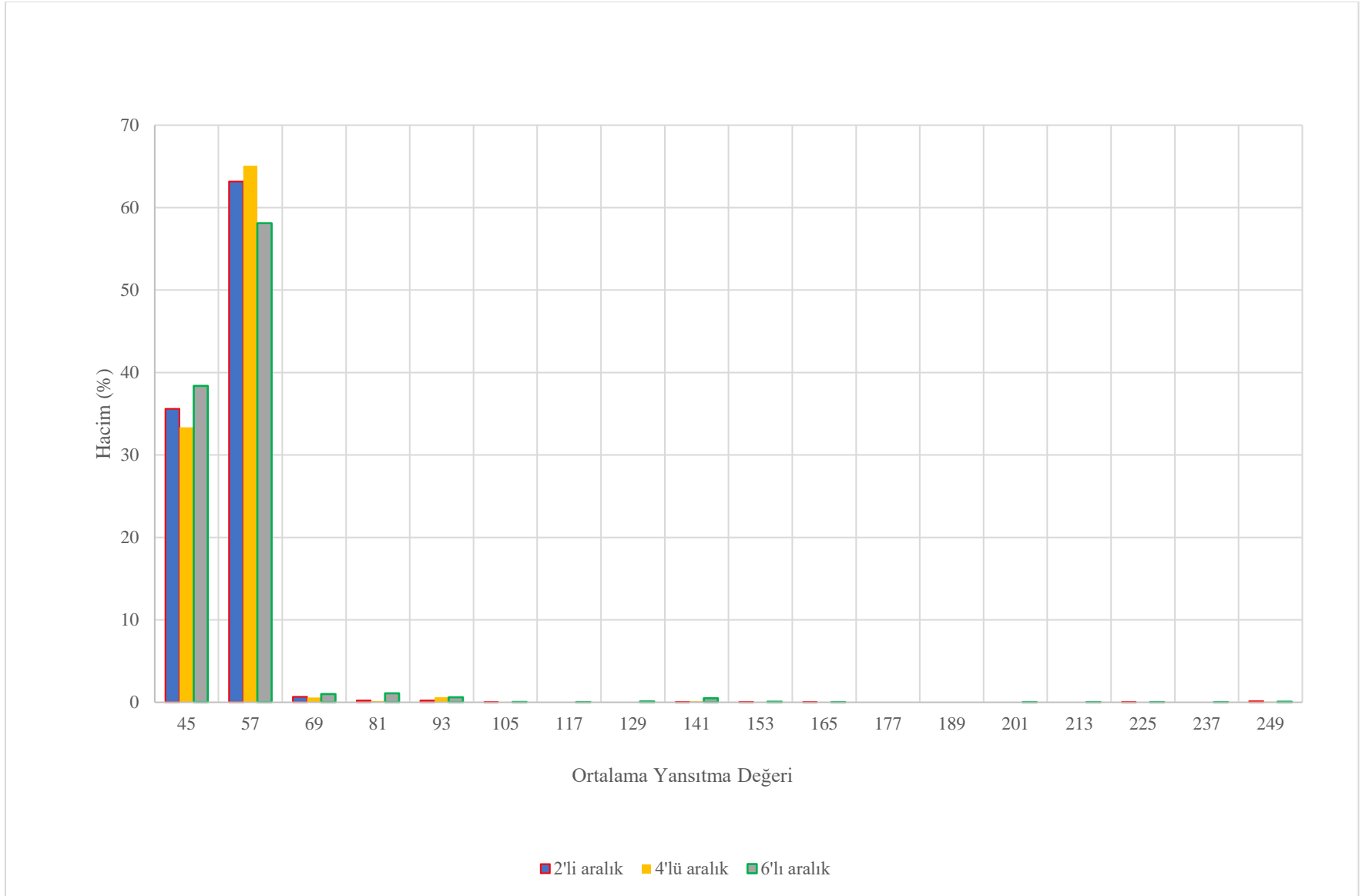


**Şekil 42.** Kapama ve aşındırma fonksiyonları uygulanan feldispat cevheri  $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 44-55 b) 55-71 c) 71-107 d) 107-163 e) 163-255

Elde edilen her bir fazda 1000 ‘den fazla görüntü bulunmaktadır. Fazlardaki tane sayısının, yüzey alanının ve hacim verilerinin belirlenebilmesi için ImageJ içinde bulunan 3 boyutlu tane analizi (3D particle counter) eklentisi kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen görüntü iyileştirme aşamaları 2’li aralık, 4’lü aralık ve 6’lı aralıklı görüntü setlerinde de uygulanmıştır. Ana faz, 2’li aralık, 4’lü aralık ve 6’lı aralıklı görüntülerden elde edilen veri setleri

**Şekil 43’**te verilmektedir. Veri setlerinin ham hali **Ek 3’**te verilmektedir.



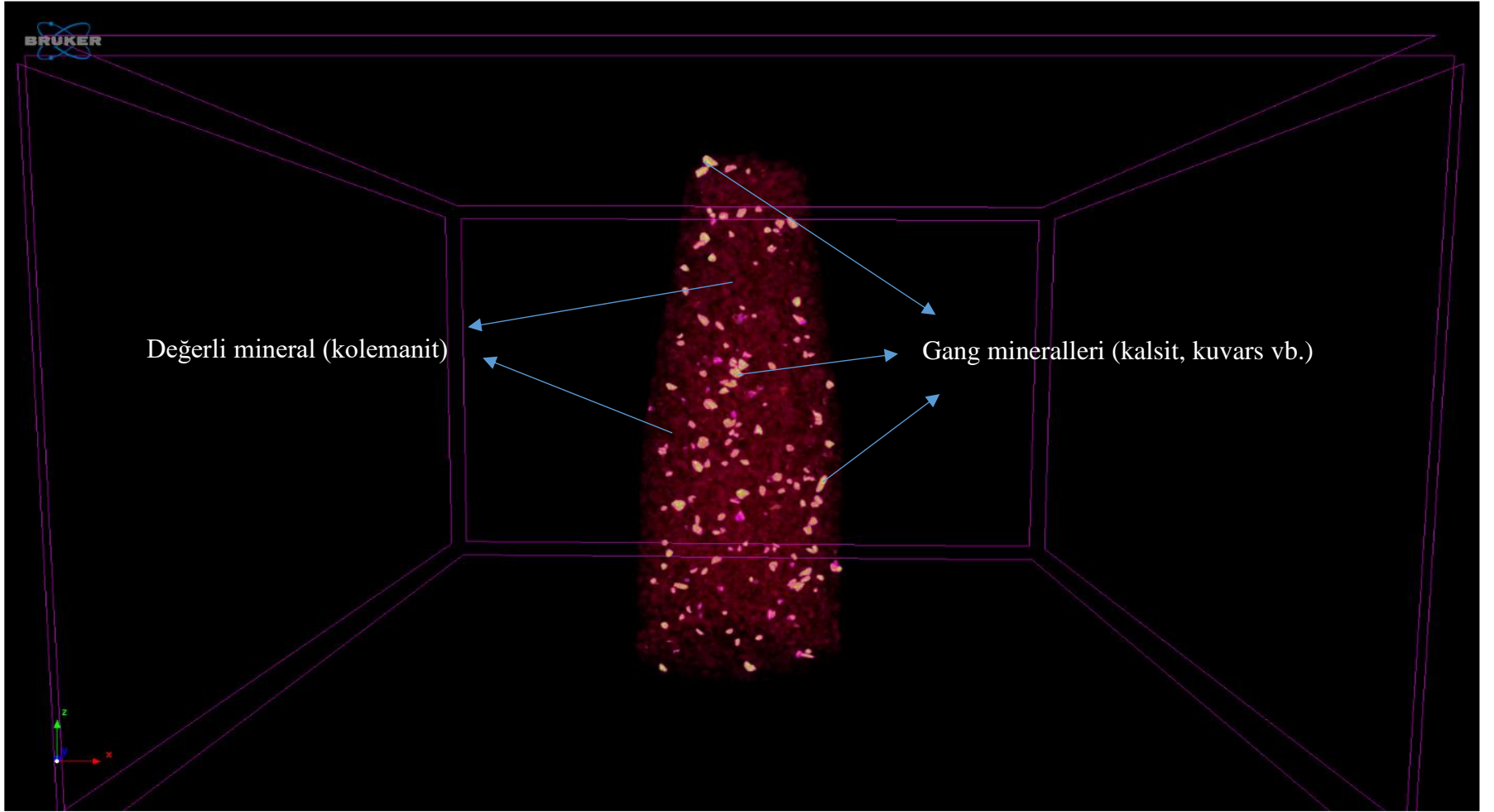


**Şekil 43.** Feldspat cevheri  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi

Elde edilen veriler incelendiğinde 2'li, 4'lü ve 6'lı aralık veri setlerinin arasında minör farklar olduğu, özellikle yüksek yansıtma değerlerinde 6'lı aralıktan elde edilen veri setinde hacimce daha çok tane olduğu görülmektedir. Bunun sebebi feldispat cevheri içinde minör miktarda bulunan diğer minerallerin küçük aralıklı veri setlerinde gözlemlenememesi/veri kaybı oluşması şeklinde yorumlanabilir. Tüm veri setlerinde cevherin hacimce yaklaşık %95'i düşük yansıtma değerlerinde (39-63) bulunmakta olup, bu aralıktaki dağılım veri setlerinde farklılık göstermektedir. Bununla birlikte cevherin hacimce %58-65'i 51-63 yansıtma değerleri arasında ve %33-39'u 39-51 yansıtma değerleri arasında bulunmaktadır.

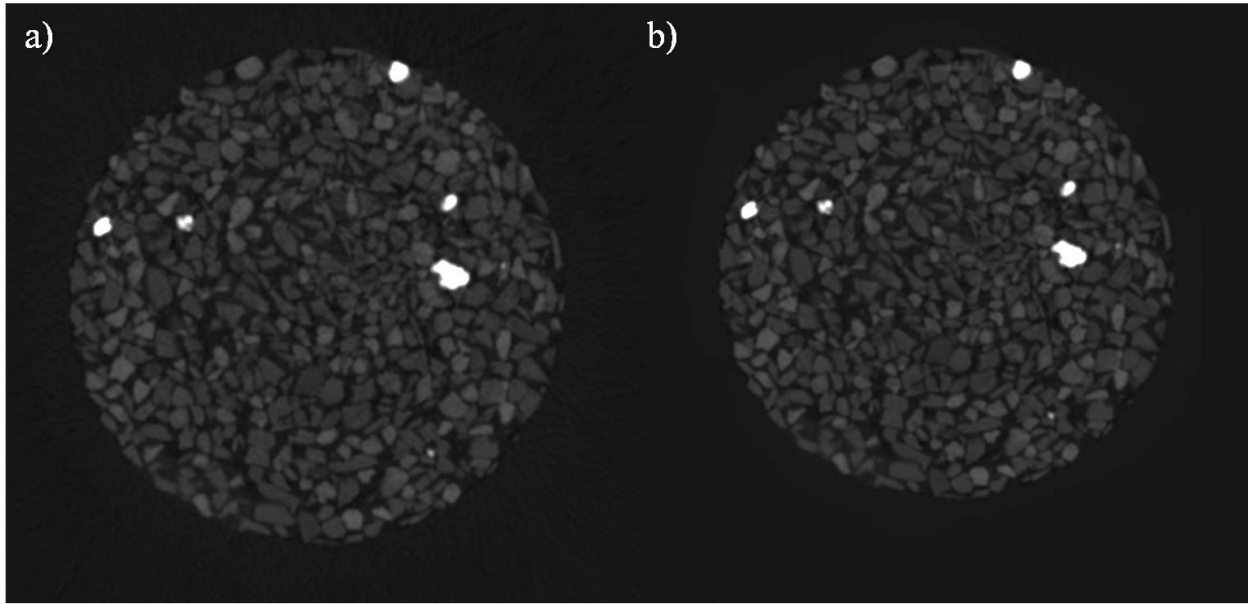
#### **6.2.4. Bor Cevherinin $\mu$ CT Görüntülerinden Veri Setlerinin Elde Edilmesi**

Bruker firmasının geliştirdiği cTvox programı kullanılarak InstaRec programından elde edilen sanal kesitlerden 3 boyutlu görüntüler oluşturulmuş ve renklendirilmiştir. Elde edilen görüntü **Şekil 44**'te verilmektedir.



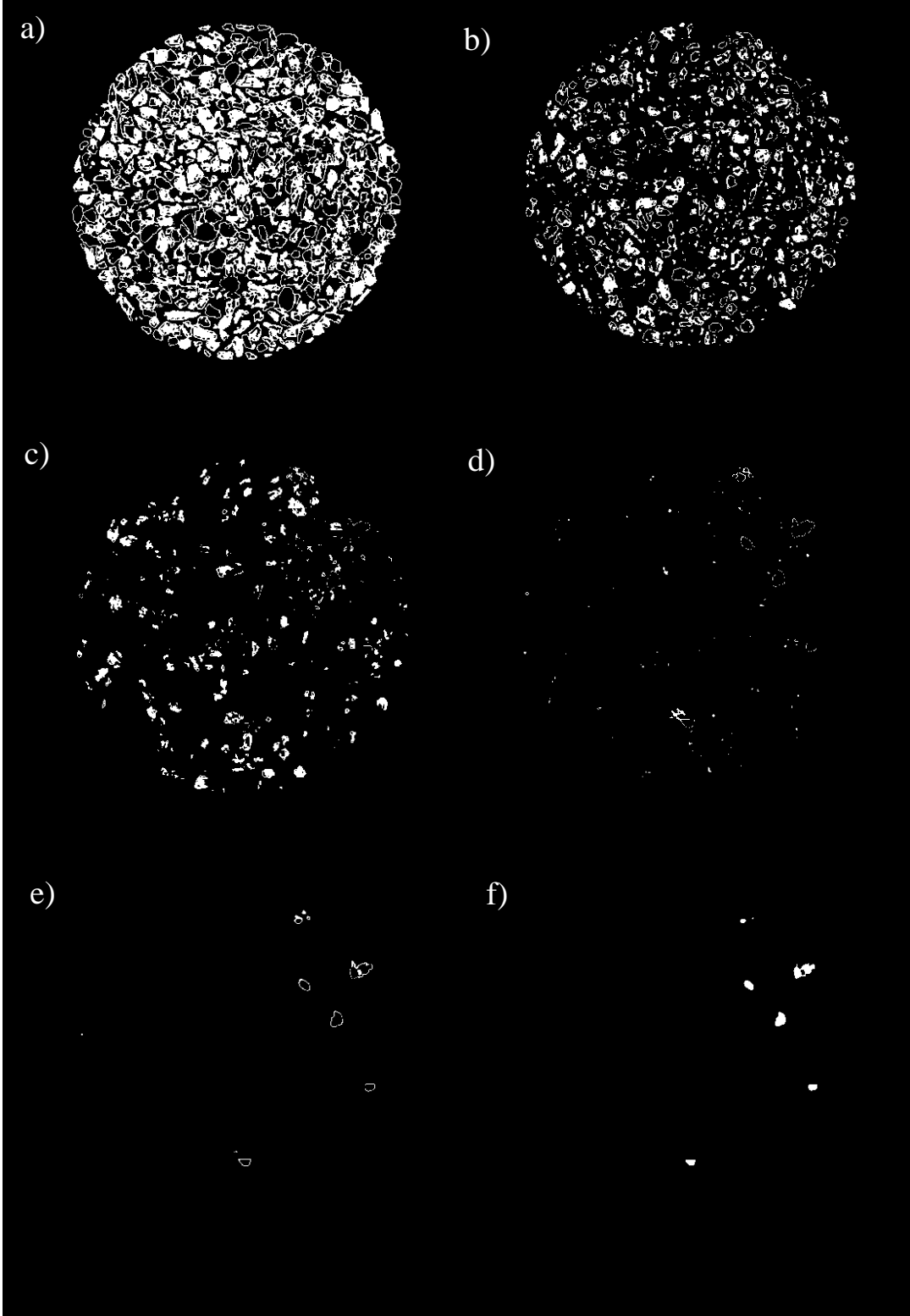
Şekil 44. Bor cevheri 3 boyutlu  $\mu$ CT görüntüsü

Kolemanit cevherinin  $\mu$ CT görüntülerinde kurşun-çinko cevherinde görülen ring-artifact etkileri (**Şekil 31**) görülmemektedir. Gözlemlenen etkiler düşük miktarda gürültü, x-ışını yansıması ve x-ışını sertleşmesi etkileridir. Bu etkiler ‘NLM Denoising’ eklentisi aracılığıyla düşük bir sigma değeri ile veri kaybı minimumda tutularak giderilmiştir. Kolemanit cevherlerinin  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen sanal kesitlerinde gürültü az olduğu için farklı denemelerden sonra sigma 300 olarak belirlenmiştir. Gürültü azaltma işlemi [51] sonrası kolemanit cevherinden elde edilen görüntülerden örnekler **Şekil 45**'te verilmektedir.



**Şekil 45.** Kolemanit cevheri için uygulanan gürültü azaltma işlemi a) ham görüntü b) işlenmiş görüntü

Kolemanit cevherinden elde edilen görüntüler incelendiğinde görüntülerde feldispat cevherine benzer eser miktarda gürültü bulunmaktadır. Gürültü azaltma işleminde sigma değeri düşük tutularak veri kaybı minimuma indirilmiştir. Bor cevherinin görüntülerinde gürültünün az miktarda gözlemlenmesi ve diğer etkilerin görülmemesi sebebi ile tekrar görüntü alımına ihtiyaç duyulmamıştır. Görüntü iyileştirme işlemi sonrasında ilk olarak ‘3D trainable weka’ ile farklı mineral fazları elde edilmiş ve bu kapsamda elde edilen ana mineral fazlarının grilik değeri aralıkları (faz) 35-47, 47-55, 55-64, 64-80, 80-134 ve 134-255 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu fazlardan elde edilen kesitlerden örnekler **Şekil 46**'da verilmektedir.



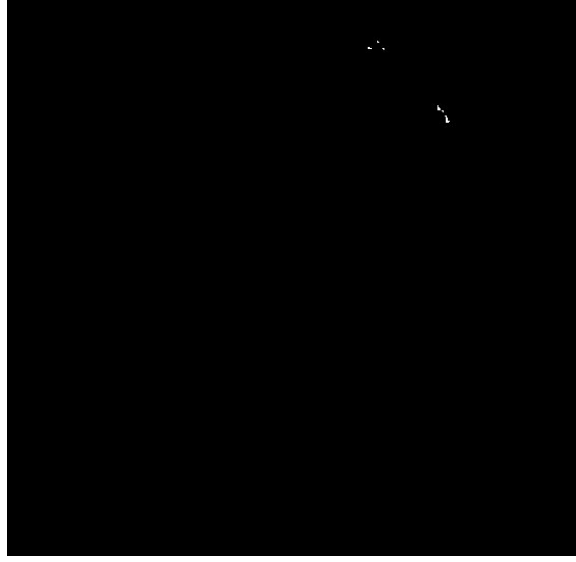
**Şekil 46.** Bor cevheri  $\mu$ CT görüntüsünden oluşturulan bir sanal kesitten elde edilen farklı grilik değerlerindeki fazlar a) 35 - 47 b) 47 - 55 c) 55 - 64 d) 64 - 80 e) 80 - 134 f) 134 - 255

Bor cevherinin  $\mu$ CT görüntüsü sanal kesitlerinde gözlemlenen X-ışını sertleşmesi etkisi [70, 71] **Şekil 47**'de verilmektedir.



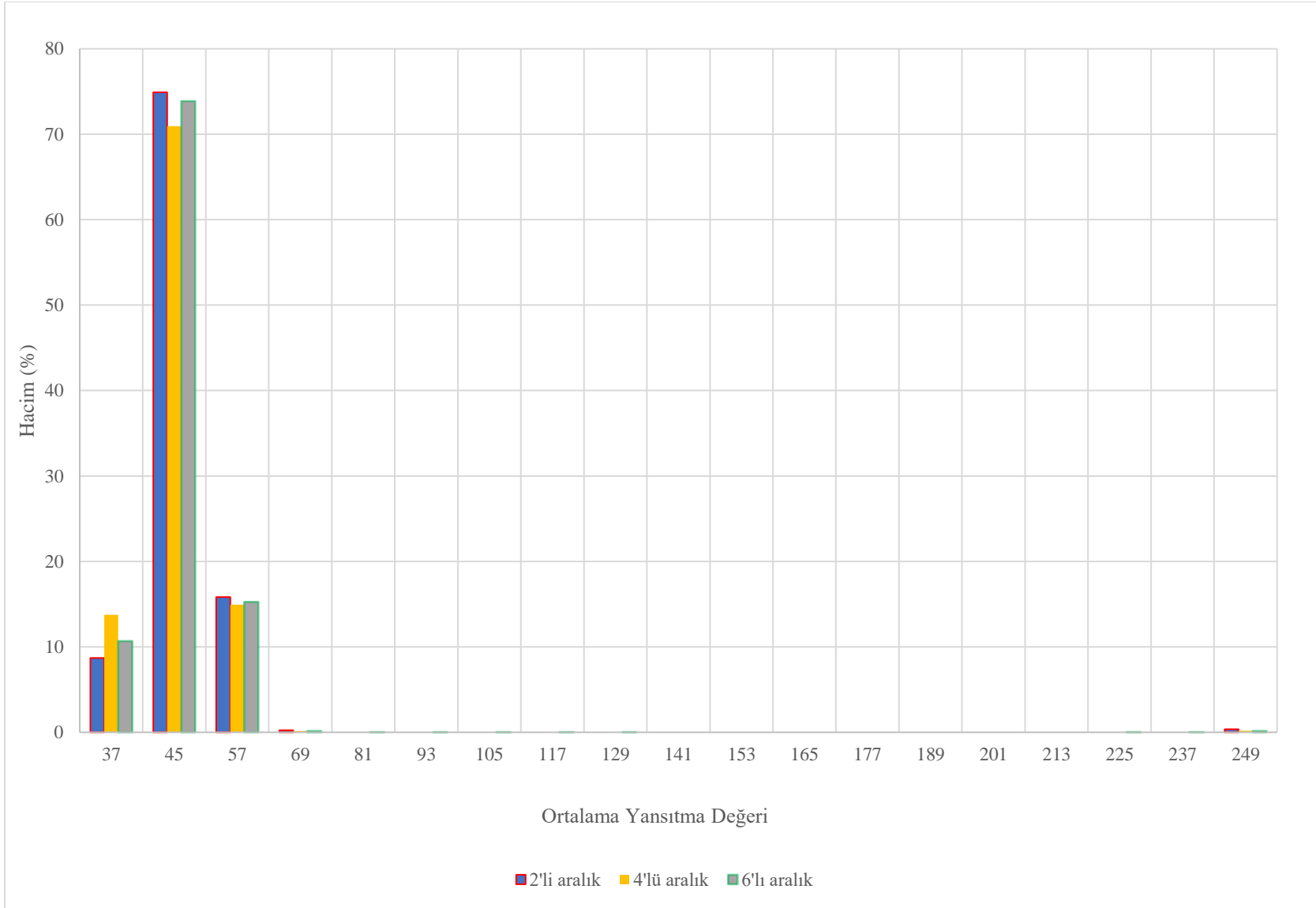
**Şekil 47.** Bor cevheri 80 – 134 fazındaki bir kesitteki x-ışını sertleşmesi etkisi

X-ışını sertleşmesi etkilerinin giderilebilmesi amacıyla ImageJ içerisinde Binary sekmesinde bulunan kapama ve aşındırma fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca bu fonksiyonla birlikte kesitlerin içerisinde bulunan çok küçük tanelerin ( $<1 \mu\text{m}$ ) elimine edilerek düzgün veri setleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Kapama ve aşındırma fonksiyonları sonrası elde edilen sanal kesit **Şekil 48**'da verilmektedir.



**Şekil 48.** Bor cevheri 80 – 134 fazındaki bir kesitin x-ışını sertleşmesi etkilerinin close- ile giderildikten sonraki görüntüsü

Elde edilen her bir fazda 1000 ‘den fazla görüntü bulunmaktadır. Fazlardaki tane sayısının, yüzey alanın ve hacim verilerinin belirlenebilmesi için ImageJ içinde bulunan 3 boyutlu tane analizi (3D particle counter) eklentisi kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen görüntü iyileştirme aşamaları 2’li aralık, 4’lü aralık ve 6’lı aralıklı görüntü setlerinde de uygulanmıştır. Ana faz, 2’li aralık, 4’lü aralık ve 6’lı aralıklı görüntülerden elde edilen veri setleri verilmektedir. Veri setlerinin ham hali **Ek 4**’te verilmektedir.

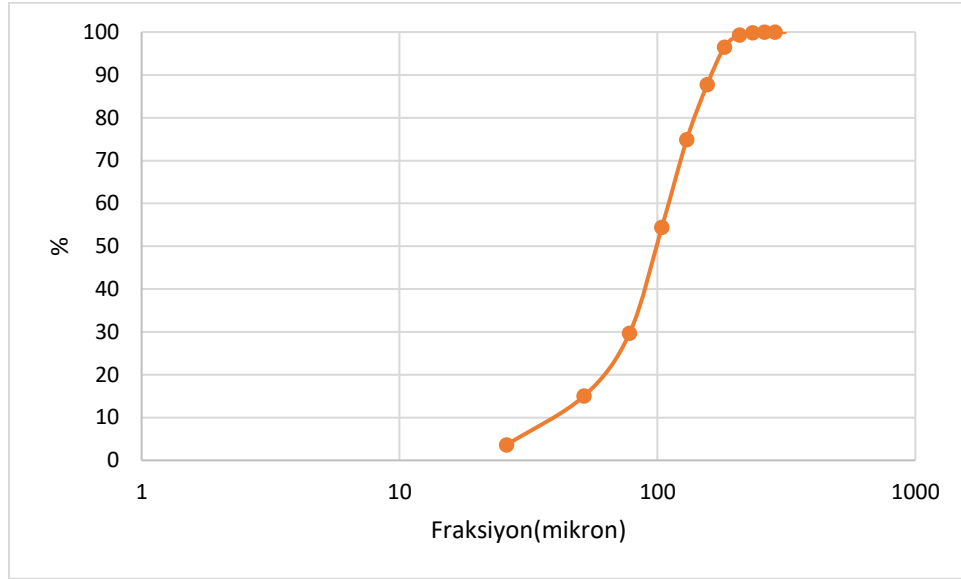


**Şekil 49.** Bor cevheri  $\mu$ CT görüntülerinden elde edilen veri setlerinin grafiksel gösterimi



Elde edilen veriler incelendiğinde 2'li, 4'lü ve 6'lı aralık veri setlerinin arasında minör farklar olduğu, bu farkların ise düşük yansıtma değerlerinde olduğu görülmektedir. Düşük yansıtma değerlerine sahip taneler cevherin büyük kısmını oluşturduğundan burada veri kaybının etkisi fazla olmamaktadır. Tüm veri setlerinde cevherin hacimce yaklaşık %95'i düşük yansıtma değerlerinde (35-63) bulunmakta olup, bu aralıktaki dağılım veri setlerinde farklılık göstermektedir. Bununla birlikte cevherin hacimce %70-75'i 39-51 yansıtma değerleri arasında bulunmaktadır.

Elde edilen hacim verilerinin yanı sıra cevher için ImageJ içerisinde bulunan tane boyu dağılımı eklentisi kullanılarak cevherin tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Kurşun-çinko cevherinin tane boyu dağılımı Şekil 50'de verilmektedir.



Şekil 50. Bor cevheri birikimli tane boyu dağılımı ( $\mu$ CT)

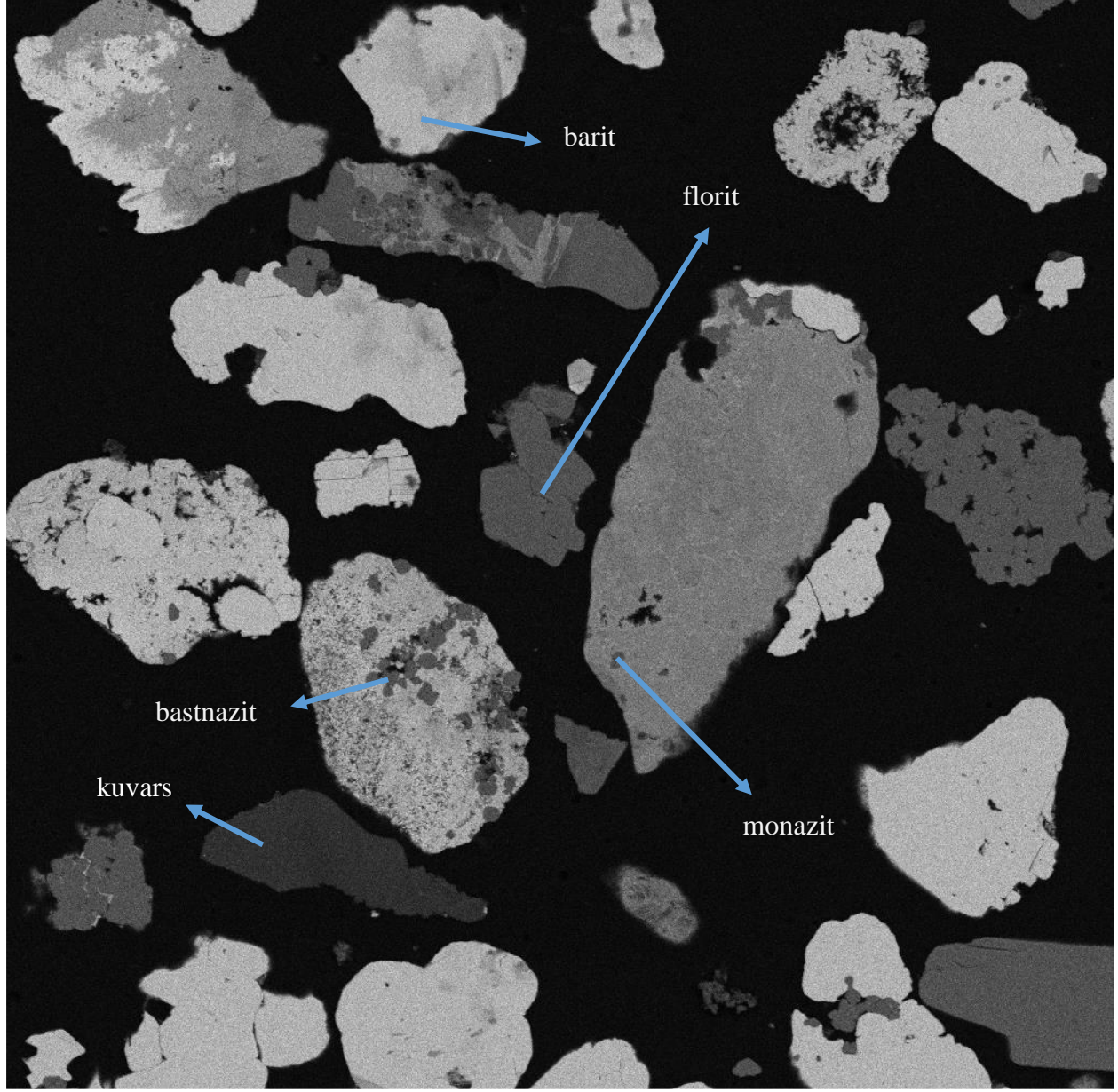
Elde edilen tane boyu dağılımı verilerine göre cevherin tamamı 0.312 mm altında ve cevherin d80'i yaklaşık 0.133 mm'dir.

### 6.3. SEM Görüntülerinin ve EDS Spektralarının Elde edilmesi

Karbonla kaplanan kesitlerin görüntülemeleri HÜNİTEK'te bulunan SEM cihazında (Şekil 15) yapılmıştır. Cihazdan elde edilen BSE görüntüleri ve cihazda bulunan EDS kullanılarak tane bazında değerlendirme yapılmıştır.

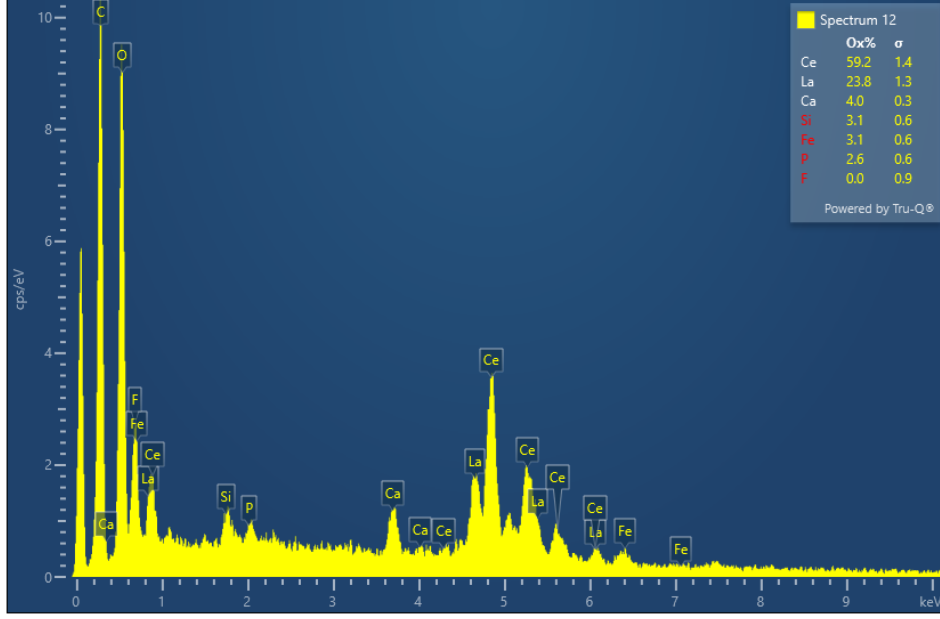
#### 6.3.1. Nadir Toprak Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları

Nadir toprak cevherinin kesitinden elde edilen SEM görüntüsü Şekil 51'de verilmektedir.



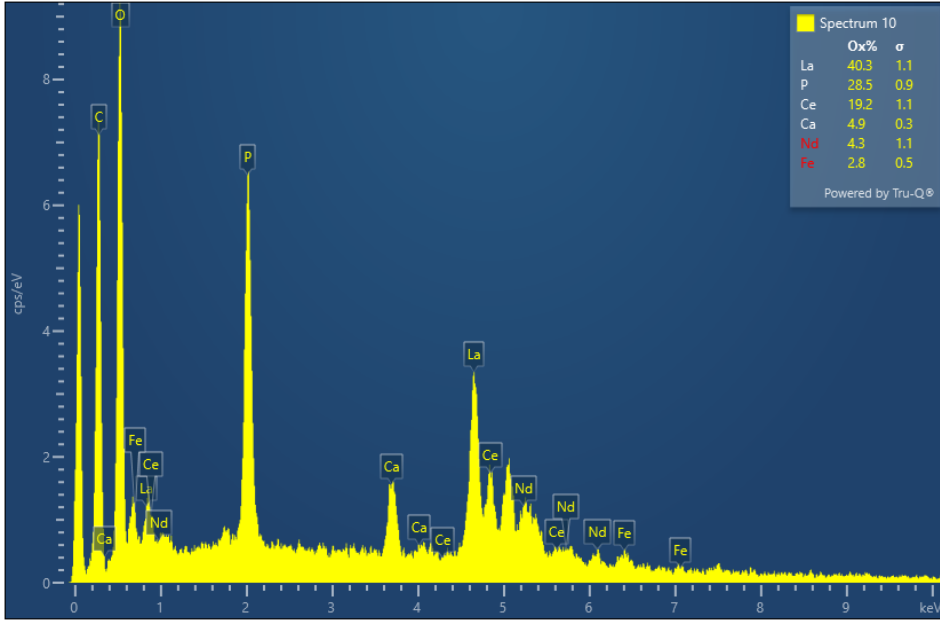
**Şekil 51.** Nadir toprak cevheri SEM görüntüsü

Şekil 51’de işaretlenen her bir tanenin EDS spektrası alınmış ve tanımlamaları EDS spektraları değerlendirilerek yapılmıştır. Elde edilen EDS spektralarından örnekler Şekil 52 ve Şekil 53’te, diğer spektralar Ek 5, Ek 6 ve Ek 7 ’de verilmektedir.



**Şekil 52.** Bastnazit tanesinin EDS spektrası

Nadir toprak cevherine ilişkin bir tanenin **Şekil 52**'de verilen spektrası incelendiğinde tanenin nadir toprak elementleri seryum ve lantandan, ayrıca flor, karbon ve oksijenden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane bir florokarbon içerikli nadir toprak minerali olan bastnazit olarak tanımlanmıştır.

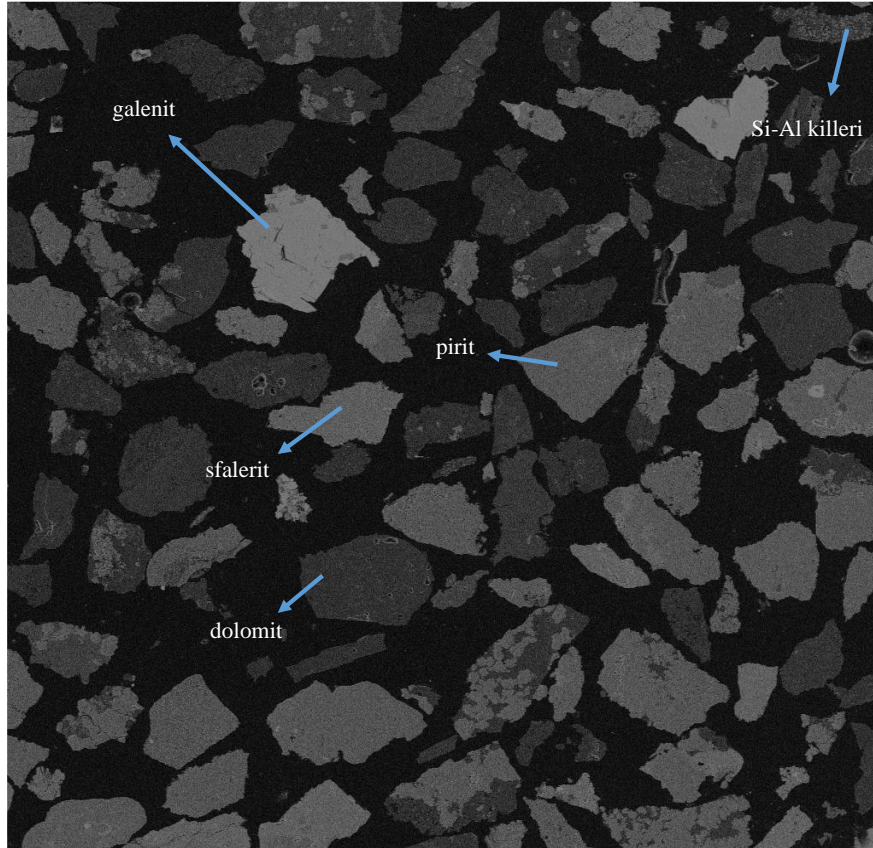


**Şekil 53.** Monazit tanesinin EDS spektrası

Nadir toprak cevherine ilişkin bir tanenin **Şekil 53**'te verilen spektrası incelendiğinde tanenin nadir toprak elementleri neodimyum, seryum ve lantandan, ayrıca fosfor, karbon ve oksijenden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane bir fosfor içerikli nadir toprak minerali olan monazit olarak tanımlanmıştır. Nadir toprak cevherine ilişkin bir tanenin spektrası incelendiğinde tanenin baryum ve sülfürden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane barit olarak değerlendirilmiştir (**Ek 5**). Nadir toprak cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin kalsiyum ve floridan oluştuğu görülmektedir. Ayrıca spektrada karbon piki de gözlenmiştir. Ancak bu pikin düşük keV değerlerinde olması ve kesitin karbon kaplanmış olması sebebi ile değerlendirmeye alınmamış ve bu tane florit olarak tanımlanmıştır (**Ek 6**). Nadir toprak cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin büyük oranda silisyumdan oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane kuvars olarak tanımlanmıştır (**Ek 7**).

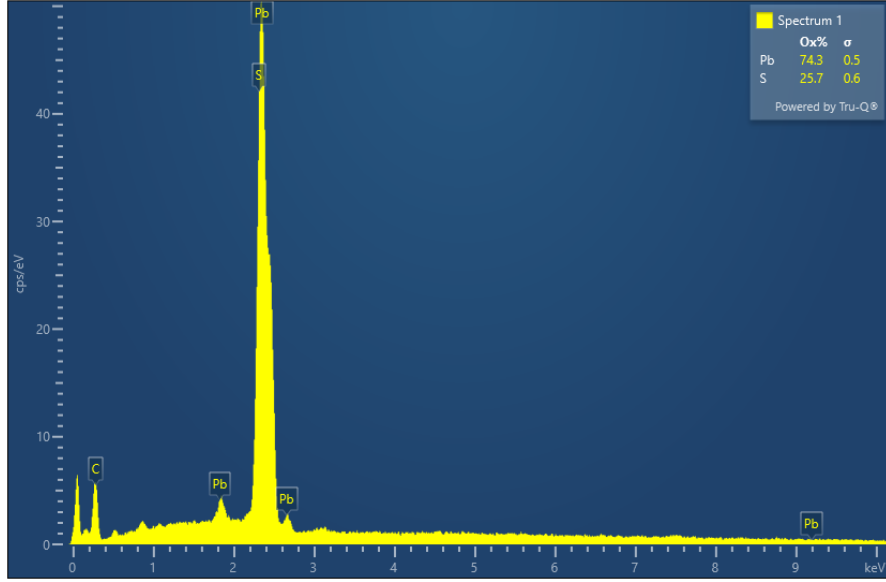
### 6.3.2. Kurşun-Çinko Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları

Kurşun-çinko cevherinin kesitinden elde edilen SEM görüntüsü **Şekil 54**'te verilmektedir.



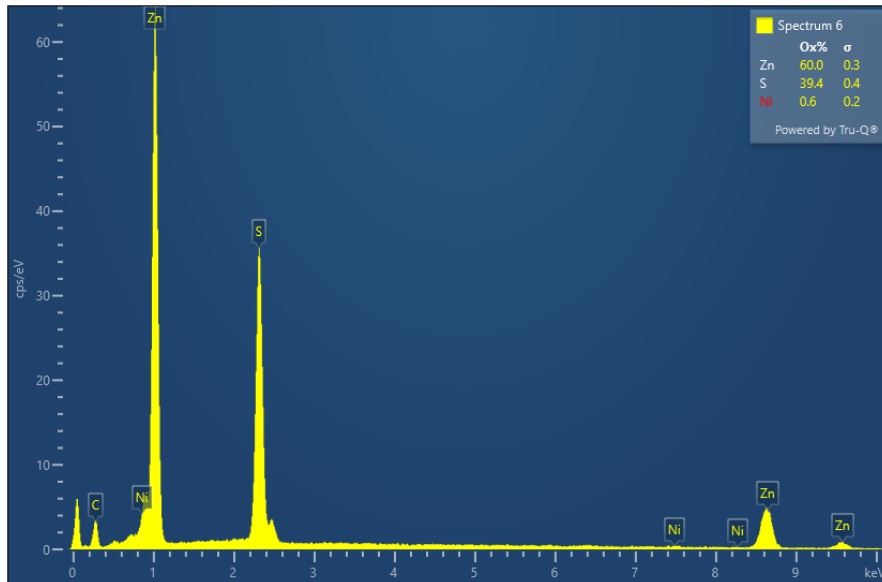
**Şekil 54.** Kurşun-çinko cevheri SEM görüntüsü

Şekil 54’de işaretlenen her bir tanenin EDS spektrası alınmış ve tanımlamaları EDS spektraları değerlendirilerek yapılmıştır. Elde edilen EDS spektralarından örnekler Şekil 55 ve Şekil 56’da, diğer spektralar Ek 8, Ek 9 ve Ek 10’da verilmektedir.



Şekil 55. Galenit tanesi EDS spektrası

Kurşun-çinko cevherine ilişkin bir tanenin Şekil 55’te verilen EDS spektrası incelendiğinde tanenin kurşun ve kükürten oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane galenit olarak tanımlanmıştır.

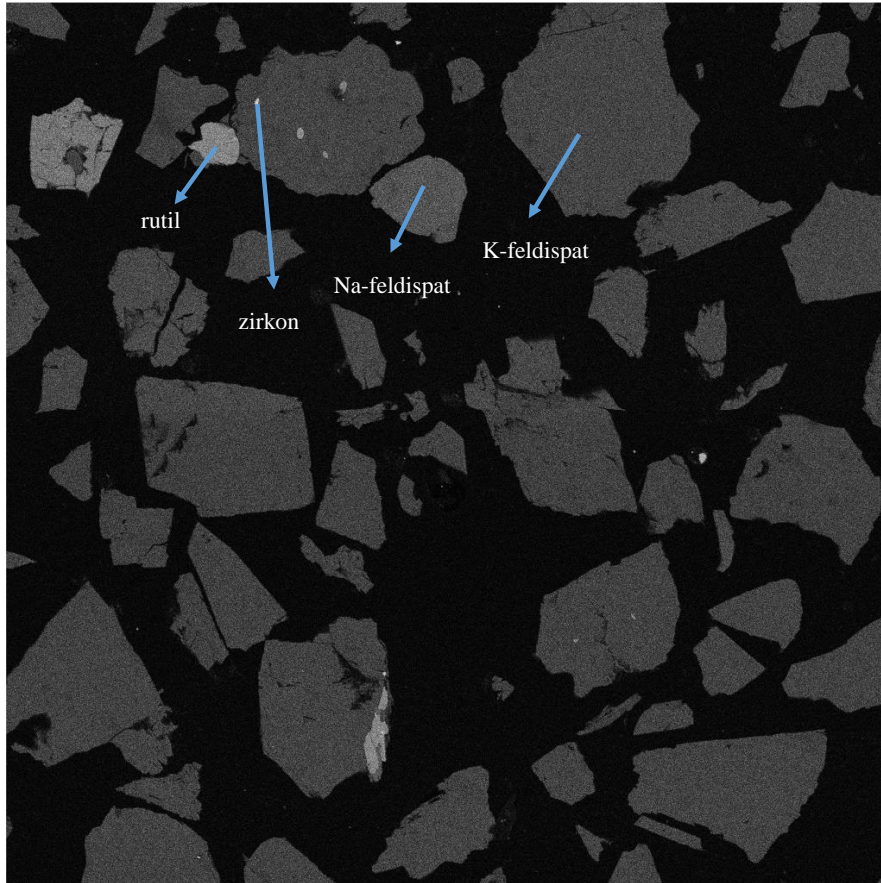


Şekil 56. Kurşun-Çinko cevheri sfalerit tanesi EDS spektrası

Kurşun-çinko cevherine ilişkin bir diğer tanenin **Şekil 56**'da verilen EDS spektrası incelendiğinde tanenin çinko ve kükürttten oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane sfalerit olarak tanımlanmıştır. Kurşun-çinko cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin demir ve kükürttten oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane pirit olarak tanımlanmıştır (**Ek 8**). Kurşun-çinko cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin çoğunlukla kalsiyum ve magnezyumdan oluştuğu, ayrıca demir içerdiği görülmektedir. Bu sebeple bu tane dolomit olarak tanımlanmıştır (**Ek 9**). Kurşun-çinko cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin çoğunlukla silisyum, alüminyum ve kükürttten oluştuğu, ayrıca potasyum, demir ve magnezyum içerdiği görülmektedir. Bu sebeple bu tane Si-Al kili olarak tanımlanmıştır (**Ek 10**).

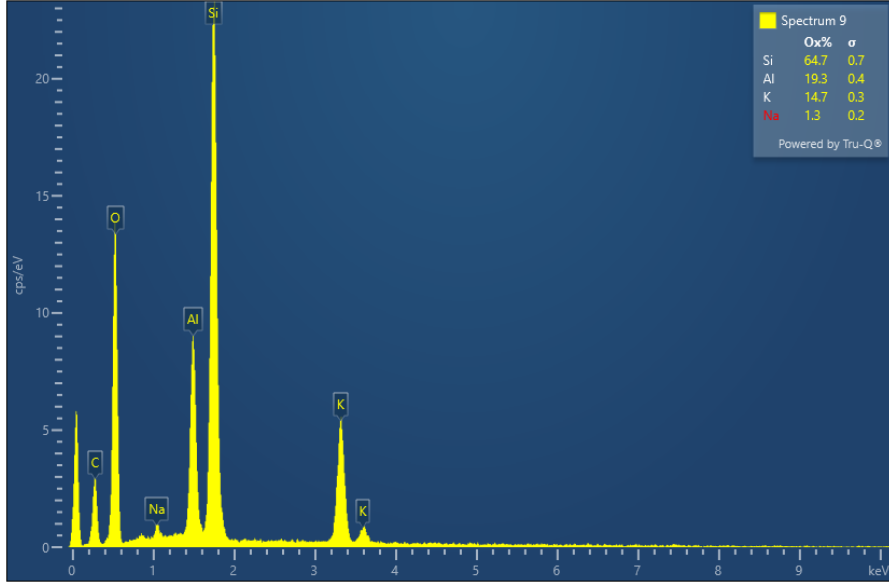
### 6.3.3. Feldispat Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları

Feldispat cevherinin kesitinden elde edilen SEM görüntüsü **Şekil 57**'de verilmektedir.



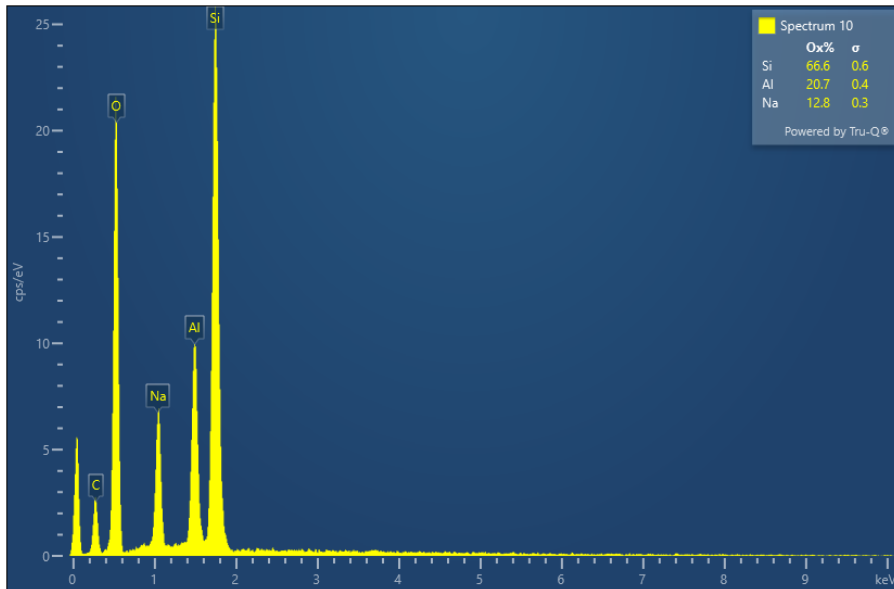
**Şekil 57.** Feldispat cevheri SEM görüntüsü

Şekil 57’de işaretlenen her bir tanenin EDS spektrası alınmış ve tanımlamaları EDS spektraları değerlendirilerek yapılmıştır. EDS spektralarından örnekler Şekil 58 ve Şekil 59’de, diğer spektralar Ek 11 ve Ek 12’de verilmektedir.



Şekil 58. K-feldispat tanesinin EDS spektrası

Feldispat cevherine ilişkin bir tanenin Şekil 58’de verilen EDS spektrası incelendiğinde tanenin silisyum, alüminyum ve potasyumdan oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane K-feldispat olarak tanımlanmıştır.



Şekil 59. Na-feldispat tanesinin EDS spektrası

Feldispat cevherine ilişkin bir diğer tanenin **Şekil 59**'da verilen EDS spektrası incelendiğinde tanenin silisyum, alüminyum ve sodyumdan oluştuğu görölmektedir. Bu sebeple bu tane Na-feldispat olarak tanımlanmıştır. Feldispat cevherine ilişkin bir tanenin spektrası incelendiğinde tanenin titanyumdan oluştuğu görölmektedir. Bu sebeple bu tane rutil olarak tanımlanmıştır (**Ek 11**). Feldispat cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası tanenin zirkon, silisyum, alüminyum ve sodyumdan oluştuğu görölmektedir. Hedeflenen zirkon tanesi çok küçüğ olduğundan EDS ölçümü yanındaki Na-feldispat tanesiyle birlikte yapılmış bu sebeple spektra 2 mineralin birleşimi şeklinde ölçölmüştür (**Ek 12**).

#### 6.3.4. Bor Cevherinin SEM Görüntüleri ve EDS Spektraları

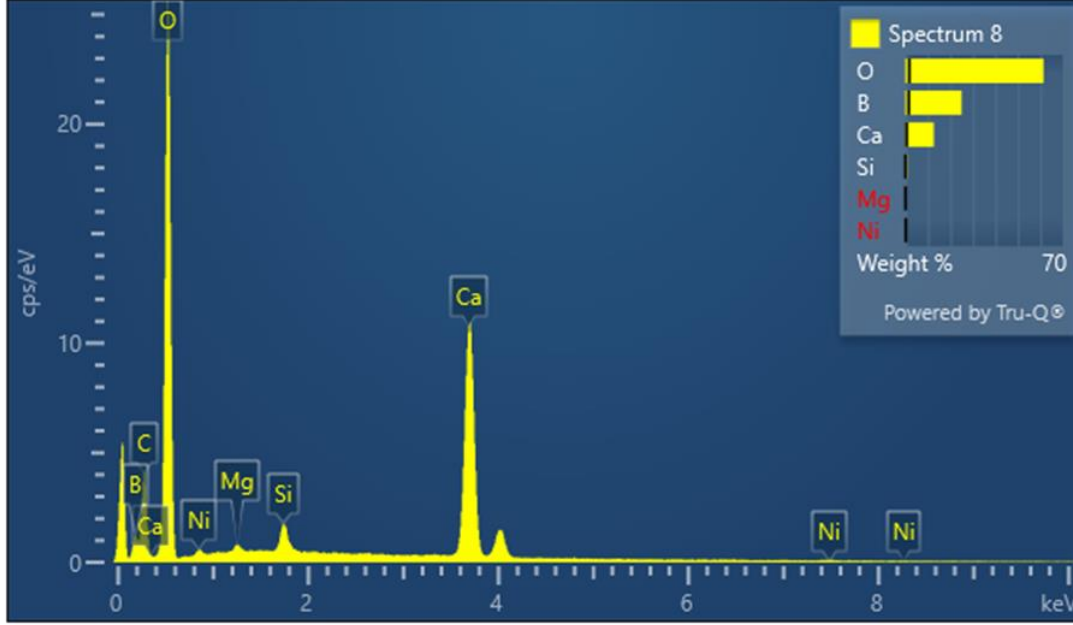
Bor cevherinin kesitinden elde edilen SEM görüntüsü **Şekil 60**'ta verilmektedir.



**Şekil 60.** Bor cevheri SEM görüntüsü



Şekil 60'ta işaretlenen her bir tanenin EDS spektrası alınmış ve tanımlamaları EDS spektraları değerlendirilerek yapılmıştır. Elde edilen EDS spektralarından örnek spektra Şekil 61'de, diğer spektralar Ek 13, Ek 14 ve Ek 15'te verilmektedir.



Şekil 61. Kolemanit tanesinin EDS spektrası

Bor cevherine ilişkin bir tanenin Şekil 61'de verilen spektrası incelendiğinde tanenin bor, oksijen ve kalsiyumdan oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane kolemanit olarak tanımlanmıştır. Bor cevherine ilişkin bir tanenin spektrası incelendiğinde tanenin stronsiyum, kalsiyum ve oksijenden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane strontiyanit olarak tanımlanmıştır (Ek 13). Spektroda gözlemlenen yüksek kalsiyum varlığı ise tane küçük olduğundan EDS'in yanındaki kalsit tanesinden de ölçüm almasından kaynaklanmaktadır. Bor cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin çoğunlukla kalsiyum ve magnezyumdan oluştuğu, ayrıca demir içerdiği görülmektedir. Bu sebeple bu tane dolomit olarak tanımlanmıştır (Ek 14). Bor cevherine ilişkin bir diğer tanenin spektrası incelendiğinde tanenin kalsiyum ve oksijenden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple bu tane kalsit olarak tanımlanmıştır (Ek 15).

## 7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

MLA analizinden elde edilen veriler ağırlıkça % olarak verilmektedir.  $\mu$ CT'den elde edilen veriler ise hacimce % olarak verilmektedir.

**Çizelge 24**'te verilen minerallerin yoğunlukları kullanılarak MLA'den elde edilen ağırlıkça % verilerinden hacimce yüzde verisi hesaplanmış ve iki cihazdan da elde edilen % hacim verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen veri setlerini karşılaştırma amacı ile istatistiksel yöntemlerden betimsel istatistik, iki değişkenli korelasyon ve  $\mu$ CT veri setlerini kendi içerisinde karşılaştırmak için ANOVA yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda ilk aşamada  $\mu$ CT veri setlerinin örneklem sayısı MLA verilerindeki örneklem sayısına eşit olacak şekilde aralıklar daraltılmış ve betimsel istatistik ile veri setleri aralarındaki temel benzerlik ve standart sapmaları belirlenmiş, iki değişkenli korelasyon yöntemi ile ise elde edilen veri setleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

**Çizelge 24.** Kullanılan cevherlerin içindeki minerallerin yoğunlukları(g/cm<sup>3</sup>) [122, 123]

Nadir Toprak		Kurşun-çinko		Bor		Feldispat	
Mineral	Yoğunluk	Mineral	Yoğunluk	Mineral	Yoğunluk	Mineral	Yoğunluk
Pirit	5.01	Kalkopirit	4.19	Pirit	5.01	Kuvars	2.62
Sfalerit	4.05	Sfalerit	4.05	Barit	4.48	Plajiyoklaz	2.68
Barit	4.48	Galen	7.4	Selestin	3.96	K-Feldispat	2.7
Fe Oksi/Hidro	4.32	Pirit	5.01	Anhidrat	2.6	Biyotit	2.8
Mn Hidroksit	3.3	Fe Sülfat	3.65	Fe Oksi/Hidroksit	4.32	İllit	2.75
İlmenit	4.72	Barit	4.48	Ilmenit	4.72	Klorit	2.9
Rutil	4.25	Alunit	2.74	Kuvars	2.62	Amfibol	3.07
Serianit (+ Ce hidroksit)	7.2	Jarosit	3.09	K-Feldispat	2.7	Antradit	2.9
Hollandit	4.95	Fe Oksit/Hidroksit	4.32	Plajiyoklaz	2.68	Turmalin	3.1
Kuvars	2.62	Rutil	4.25	Biyotit	2.8	Zirkon	4.65
Feldispat	2.7	Titanit	3.48	Amfibol	3.07	Titanit (Sfen)	3.54
Mika	2.9	Zirkon	4.65	Talk	2.65	Rutil	4.25
Plogopit	2.82	Kuvars	2.62	Si-Al Killeri	2.6	İlmenit	4.72
Epidot	3.43	Plajiyoklaz	2.68	Kolemanit	2.42	Fe Oksit / Hidroksit	4.32
Si-Al Killeri	2.6	K-Feldispat	2.7	Kalsit	2.71	Apatit	3.19
Kalsit	2.71	Muskovit	2.82	Dolomit	2.84	Monazit	5.15
Siderit	3.96	Flogopit /Biyotit	2.8	Strontiyanit	3.76	Pirit	5.01
Bastnazit	4.97	Amfibol	3.07	Apatit	3.19	Diğer	2.6
Monazit	5.15	Klorit	3	Kalsit-Kil Karışımı	2.6		
Apatit	3.19	Si-Al Killeri	2.6	Diğerleri	2.6		
Florit	3.56	Kalsit	2.71				
Lateritik NTE (Altere)	5.05	Dolomit	2.84				
Lat NTE-MnOH	3.3	Siderit	3.96				
Diğerleri	2.6	Zn-Fe Karbonat	3.96				
		Apatit	3.19				
		Monazit	5.15				
		Al Fosfat	2.57				
		Fe-Zn Al PO4	3.2				
		CaCO3-FeS-Kil Mix	3.16				
		Diğerleri	2.6				

## 7.1. Nadir Toprak Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi

$\mu$ CT veri setlerini kendi içerisinde değerlendirme amacıyla ANOVA testi kullanılmıştır. ANOVA testinin sonuçları **Çizelge 25**'te ve **Çizelge 26**'da verilmektedir.

**Çizelge 25.** Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri

<i>Grup</i>	<i>Sayı</i>	<i>Toplam</i>	<i>Ortalama</i>	<i>Varyans</i>
<b>2'li</b>	24	100	4.17	9.25
<b>4'lü</b>	24	100	4.17	29.64
<b>6'lı</b>	24	100	4.17	60.47

Gruplar arttıkça varyansların arttığı görülmektedir. Bunun sebebi aralık değeri arttıkça cevher içerisindeki tanelerin kümelenmesi ve bu bağlamda yüzdelerin artmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 26.** Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları

<i>Varyasyon Kaynağı</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-değeri</i>	<i>F krit</i>
<b>Gruplar Arasında</b>	4.54747E-12	3	1.51582E-12	2.71522E-14	1	2.703594
<b>Grup İçerisinde</b>	5136.086092	92	55.82702274			
<b>Toplam</b>	5136.086092	95				

Nadir toprak cevheri  $\mu$ CT veri setlerine uygulanan ANOVA testi sonuçları incelendiğinde F değerinin F-krit değerinden küçük olduğu, gruplar arasındaki değerler incelendiğinde varyasyon (SS) değerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ortalamaların karesi bakımından gruplar karşılaştırıldığında fark olmadığı görülmektedir. Bu veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığını ifade etmektedir.

MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin karşılaştırılması amacıyla ilk olarak betimsel istatistik kullanılmıştır. Betimsel istatistik sonuçları **Betimsel** istatistik testi sonuçları incelendiğinde MLA verileri ile 6'lı aralık, 4'lü aralık ve 2'li aralık veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte aralık arttıkça standart sapma basıklık ve çarpıklık gibi değerlerin arttığı görülmekte, bu da verilerin belli aralık değerleri arasında toplandığını göstermektedir. Bu bulguyu maksimum değerleri de desteklemektedir.  $\mu$ CT veri setlerinin örneklem sayısının MLA örneklem sayılarına indirgenmesiyle birlikte her bir veri seti için aynı ortalama değeri elde edilmiştir. Verilerin normalitesinin belirlenmesinde basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (skewness) değerleri incelenmiş, sadece 2'li aralık veri setinin normal dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir [119]. Bunun sonucunda 2'li aralık veri seti için Pearson, diğer veri setleri için Spearman

korelasyon yöntemi kullanılmıştır [118]. Test sonucu elde edilen korelasyon katsayıları **Çizelge 28’de** verilmektedir.

**Çizelge 27’de** verilmektedir. Betimsel istatistik testi sonuçları incelendiğinde MLA verileri ile 6’lı aralık, 4’lü aralık ve 2’li aralık veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte aralık arttıkça standart sapma basıklık ve çarpıklık gibi değerlerin arttığı görülmekte, bu da verilerin belli aralık değerleri arasında toplandığını göstermektedir. Bu bulguyu maksimum değerleri de desteklemektedir.  $\mu$ CT veri setlerinin örneklem sayısının MLA örneklem sayılarına indirgenmesiyle birlikte her bir veri seti için aynı ortalama değeri elde edilmiştir. Verilerin normalitesinin belirlenmesinde basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (skewness) değerleri incelenmiş, sadece 2’li aralık veri setinin normal dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir [119]. Bunun sonucunda 2’li aralık veri seti için Pearson, diğer veri setleri için Spearman korelasyon yöntemi kullanılmıştır [118]. Test sonucu elde edilen korelasyon katsayıları **Çizelge 28’de** verilmektedir.

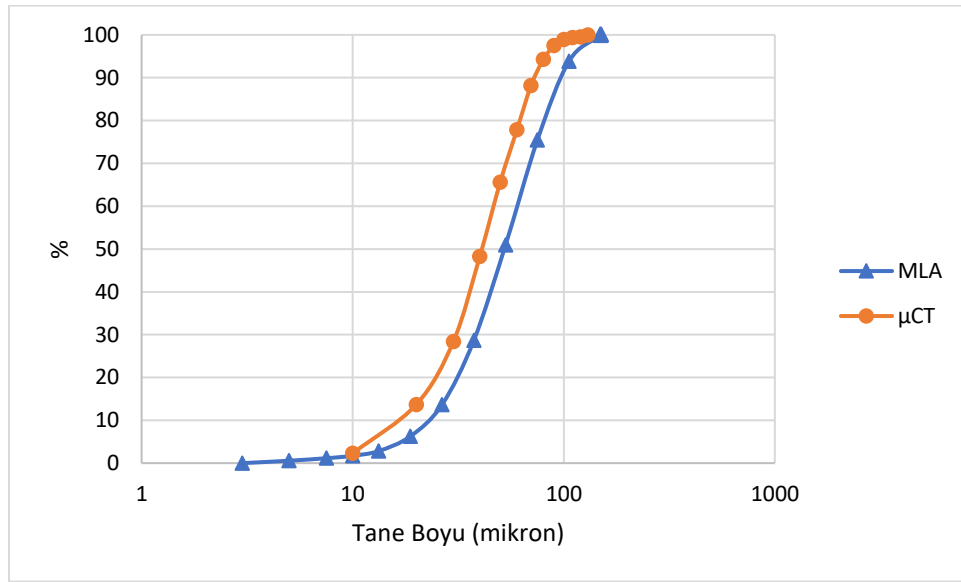
**Çizelge 27.** Nadir toprak cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin betimsel istatistik ile karşılaştırılması

<i>MLA</i>		<i>2’li</i>		<i>4’lü</i>		<i>6’lı</i>	
<b>Ortalama</b>	4.17	<b>Ortalama</b>	4.17	<b>Ortalama</b>	4.17	<b>Ortalama</b>	4.17
<b>Standart Hata</b>	2.27	<b>Standart Hata</b>	0.62	<b>Standart Hata</b>	1.11	<b>Standart Hata</b>	1.59
<b>Medyan</b>	0.40	<b>Medyan</b>	3.94	<b>Medyan</b>	1.62	<b>Medyan</b>	0.03
<b>Mod</b>	#N/A	<b>Mod</b>	#N/A	<b>Mod</b>	0.00	<b>Mod</b>	0.00
<b>Standart Sapma</b>	11.13	<b>Standart Sapma</b>	3.04	<b>Standart Sapma</b>	5.44	<b>Standart Sapma</b>	7.78
<b>Varyans</b>	123.94	<b>Varyans</b>	9.25	<b>Varyans</b>	29.64	<b>Varyans</b>	60.47
<b>Basıklık</b>	10.49	<b>Basıklık</b>	1.33	<b>Basıklık</b>	2.24	<b>Basıklık</b>	5.42
<b>Çarpıklık</b>	3.30	<b>Çarpıklık</b>	0.91	<b>Çarpıklık</b>	1.47	<b>Çarpıklık</b>	2.26
<b>Aralık</b>	46.45	<b>Aralık</b>	12.72	<b>Aralık</b>	20.85	<b>Aralık</b>	31.10
<b>Minimum</b>	0.00	<b>Minimum</b>	0.08	<b>Minimum</b>	0.00	<b>Minimum</b>	0.00
<b>Maksimum</b>	46.45	<b>Maksimum</b>	12.80	<b>Maksimum</b>	20.85	<b>Maksimum</b>	31.10
<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00
<b>Sayı</b>	24.00	<b>Sayı</b>	24.00	<b>Sayı</b>	24.00	<b>Sayı</b>	24.00

**Çizelge 28.** Nadir toprak cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması

<b>Korelasyon Katsayısı</b>	
<b>6lı aralık</b>	-0.408
<b>4lü aralık</b>	-0.425
<b>2li aralık</b>	-0.097

İki değişkenli korelasyon testi sonuçları incelendiğinde MLA veri seti ile 6'lı aralık ve 4'lü aralık veri setleri arasında ters yönlü orta şiddetli korelasyon (-0.408, -0.425) olduğu, MLA veri seti 2'li aralık veri setleri arasında ters yönlü düşük şiddetli korelasyon (-0.097) olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek şiddetli korelasyon gözlemlenmemesinin sebebi nadir toprak cevherinin  $\mu$ CT görüntülerindeki baritten kaynaklanan [102] yansıma etkilerinin giderilememesinden [77] ve bu etkilerin 3 boyutlu analizlerden elde edilecek verileri tamamen bozmasından kaynaklanmaktadır. Nadir toprak cevheri için MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları da karşılaştırılmıştır. MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları **Şekil 62**'de verilmektedir.



**Şekil 62.** Nadir toprak cevheri kümülatif tane boyu dağılımları (MLA ve  $\mu$ CT)

MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde MLA'de dağılım grafiğinin 0'dan başladığı,  $\mu$ CT'de ise 0.010 mm'den başladığı ve MLA'de cevherin tamamının 0.150 mm altında olduğu,  $\mu$ CT'de ise 0.130 mm altında olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebi cihazlardaki çözünürlük farkıdır. Genel dağılımdaki farklılıkların sebebi ise  $\mu$ CT'deki görüntü iyileştirme adımlarından ve nadir toprak cevherindeki giderilmeyen yansıma etkilerinden kaynaklanmaktadır.

## 7.2. Kurşun-Çinko Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi

$\mu$ CT setlerini kendi içerisinde değerlendirme amacıyla ANOVA testi kullanılmıştır. ANOVA testinin sonuçları **Çizelge 29**'da ve **Çizelge 30**'da verilmektedir.

**Çizelge 29.** Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri

<i>Grup</i>	<i>Sayı</i>	<i>Toplam</i>	<i>Ortalama</i>	<i>Varyans</i>
<b>2'li</b>	30	100.00	3.33	59.60
<b>4'lü</b>	30	100.00	3.33	107.11
<b>6'lı</b>	30	100.00	3.33	169.03

Gruplar arttıkça varyansların arttığı görülmektedir. Bunun sebebi aralık değeri arttıkça cevher içerisindeki tanelerin kümelenmesi ve bu bağlamda yüzdelere artmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 30.** Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları

<i>Varyasyon Kaynağı</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-değeri</i>	<i>F krit</i>
<b>Gruplar Arasında</b>	2.37E-07	2	1.1871E-07	1.06074E-09	0.99	3.10
<b>Grup İçerisinde</b>	9736.40	87	111.9126352			
<b>Toplam</b>	9736.40	89				

Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT veri setlerine uygulanan ANOVA testi sonuçları incelendiğinde F değerinin F-krit değerinden küçük olduğu, gruplar arasındaki değerler incelendiğinde varyasyon (SS) değerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ortalamaların karesi bakımından gruplar karşılaştırıldığında fark olmadığı görülmektedir. Bu veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığını ifade etmektedir. MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin karşılaştırılması amacıyla ilk olarak betimsel istatistik kullanılmıştır. Betimsel istatistik sonuçları **Çizelge 31**'de verilmektedir.

**Çizelge 31.** Kurşun-çinko cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin betimsel istatistik ile karşılaştırılması

<i>MLA</i>		<i>2'li</i>		<i>4'lü</i>		<i>6'lı</i>	
<b>Ortalama</b>	4.88	<b>Ortalama</b>	3.33	<b>Ortalama</b>	3.33	<b>Ortalama</b>	3.33
<b>Standart Hata</b>	1.62	<b>Standart Hata</b>	1.41	<b>Standart Hata</b>	1.89	<b>Standart Hata</b>	2.37
<b>Medyan</b>	1.06	<b>Medyan</b>	0.01	<b>Medyan</b>	0.01	<b>Medyan</b>	0.02
<b>Mod</b>	0.00	<b>Mod</b>	0.00	<b>Mod</b>	0.00	<b>Mod</b>	0.00
<b>Standart Sapma</b>	8.87	<b>Standart Sapma</b>	7.72	<b>Standart Sapma</b>	10.34	<b>Standart Sapma</b>	13.00
<b>Varyans</b>	78.71	<b>Varyans</b>	59.60	<b>Varyans</b>	107.11	<b>Varyans</b>	169.02
<b>Basıklık</b>	5.64	<b>Basıklık</b>	5.21	<b>Basıklık</b>	12.02	<b>Basıklık</b>	24.81
<b>Çarpıklık</b>	2.43	<b>Çarpıklık</b>	2.49	<b>Çarpıklık</b>	3.50	<b>Çarpıklık</b>	4.86
<b>Aralık</b>	36.67	<b>Aralık</b>	27.28	<b>Aralık</b>	46.12	<b>Aralık</b>	69.28
<b>Minimum</b>	0.00	<b>Minimum</b>	0.00	<b>Minimum</b>	0.00	<b>Minimum</b>	0.00
<b>Maksimum</b>	36.67	<b>Maksimum</b>	27.28	<b>Maksimum</b>	46.12	<b>Maksimum</b>	69.28
<b>Toplam</b>	146.42	<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00
<b>Sayı</b>	30	<b>Sayı</b>	30	<b>Sayı</b>	30	<b>Sayı</b>	30

Betimsel istatistik testi sonuçları incelendiğinde MLA verileri ile 6'lı aralık, 4'lü aralık ve 2'li aralık veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte aralık arttıkça

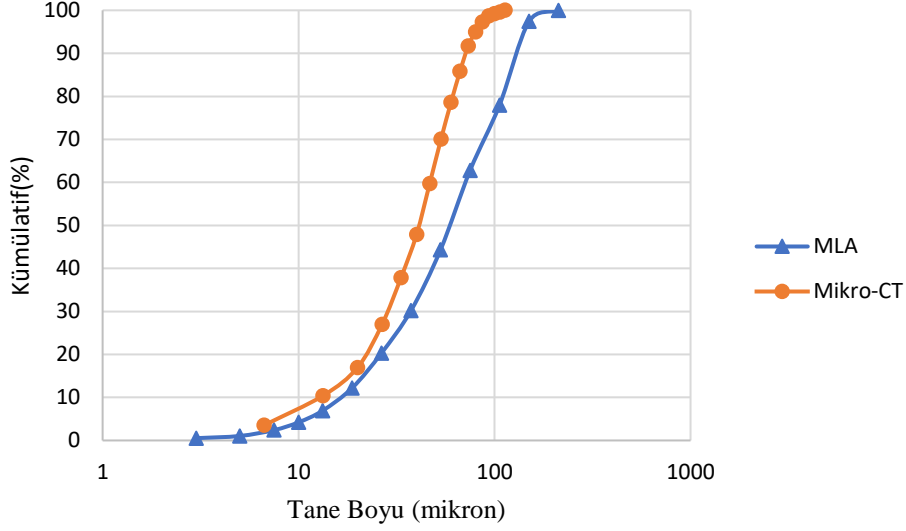


standart sapma basıklık ve çarpıklık gibi değerlerin arttığı görülmekte, bu da verilerin belli aralık değerleri arasında toplandığını göstermektedir. Bu bulguyu maksimum değerleri de desteklemektedir.  $\mu$ CT veri setlerinin örneklem sayısının MLA örneklem sayılarına indirgenmesiyle birlikte her bir veri seti için aynı ortalama değeri elde edilmiştir. Verilerin normalitesinin belirlenmesinde basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (skewness) değerleri incelenmiş, 2'li aralık veri setinin normal dağılım gösterdiği, diğer verilerin normal dağılım göstermediği gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda 2'li aralık veri seti için Pearson, diğer veri setleri için Spearman korelasyon yöntemi kullanılmıştır [118]. Test sonucu elde edilen korelasyon katsayıları **Çizelge 32**'de verilmektedir.

**Çizelge 32.** Kurşun-çinko cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması

<b>Korelasyon Katsayısı</b>	
<b>6lı aralık</b>	-0.119
<b>4lü aralık</b>	-0.199
<b>2li aralık</b>	0.239

İki değişkenli korelasyon testi sonuçları incelendiğinde MLA veri seti ile 6'lı aralık ve 4'lü aralık veri setleri arasında ters yönlü düşük şiddetli korelasyon (-0.119, -0.199), ve 2'li aralık veri seti arasında pozitif yönlü düşük şiddetli korelasyon (0.239) olduğu görülmektedir. Korelasyon gözlemlenememesinin sebebi kurşun-çinko cevherinin  $\mu$ CT görüntülerindeki galenitten kaynaklanan [102] halka [51] ve yansıma etkilerinin [77] giderilememesinden kaynaklanmaktadır. Kurşun-çinko cevheri için MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları da karşılaştırılmıştır. MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları **Şekil 63**'ta verilmektedir.



**Şekil 63.** Kurşun-çinko cevheri birikimli tane boyu dağılımı (MLA ve  $\mu$ CT)

MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde MLA'de dağılım grafiğinin 0'dan başladığı,  $\mu$ CT'de ise 0.06 mm'den başladığı ve MLA'de cevherin tamamının 0.212 mm altında olduğu,  $\mu$ CT'de ise 0.113 mm altında olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebi cihazlardaki çözünürlük farkıdır. Genel dağılımdaki farklılıkların sebebi ise  $\mu$ CT'deki görüntü iyileştirme adımlarından ve kurşun-çinko cevherindeki giderilmeyen halka etkileri ve yansıma etkilerinden kaynaklanmaktadır.

### 7.3. Feldispat Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi

$\mu$ CT setlerini kendi içerisinde değerlendirme amacıyla ANOVA testi kullanılmıştır. ANOVA testinin sonuçları **Çizelge 33** ve **Çizelge 34**'te verilmektedir.

**Çizelge 33.** Feldispat cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri

<i>Grup</i>	<i>Sayı</i>	<i>Toplam</i>	<i>Ortalama</i>	<i>Varyans</i>
<b>2'li</b>	18	100	5.56	180.44
<b>4'lü</b>	18	100	5.56	221.34
<b>6'lı</b>	18	100	5.56	201.72

Gruplar arttıkça varyansların arttığı görülmektedir. Bunun sebebi aralık değeri arttıkça cevher içerisindeki tanelerin kümelenmesi ve bu bağlamda yüzdelerin artmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu düzenin 6'lı aralıkta feldispat cevherinde bozulduğu gözlemlenmiştir. Cevherin kompleks bir yapıda olmaması sebebiyle aralık arttıkça daha fazla kümelenme olmamakta ve

varyans değişmemektedir. Bununla birlikte  $\mu$ CT verilerinden elde edilen örneklem sayıları MLA'den elde edilen örneklem sayısına indirgenğinde farklılık azalmıştır.

**Çizelge 34.** Feldispat cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları

<i>Varyasyon Kaynağı</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-değeri</i>	<i>F krit</i>
<b>Gruplar Arasında</b>	-1.81899E-12	2	-9.09495E-13	-4.52112E-15	-	3.178799
<b>Grup İçerisinde</b>	10259.45565	51	201.1657971			
<b>Toplam</b>	10259.45565	53				

Feldispat cevheri  $\mu$ CT veri setlerine uygulanan ANOVA testi sonuçları incelendiğinde F değerinin F-krit değerinden küçük olduğu, gruplar arasındaki değerler incelendiğinde varyasyon (SS) değerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ortalamaların karesi bakımından gruplar karşılaştırıldığında fark olmadığı görülmektedir. Bu veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığını ifade etmektedir. MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin karşılaştırılması amacıyla ilk olarak betimsel istatistik kullanılmıştır. Betimsel istatistik sonuçları **Çizelge 35**'te verilmektedir.

**Çizelge 35.** Feldispat cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin betimsel istatistik ile karşılaştırılması

<i>MLA</i>		<i>2'li</i>		<i>4'lü</i>		<i>6'lı</i>	
<b>Ortalama</b>	5.56	<b>Ortalama</b>	5.56	<b>Ortalama</b>	5.56	<b>Ortalama</b>	5.56
<b>Standart Hata</b>	4.50	<b>Standart Hata</b>	3.17	<b>Standart Hata</b>	3.51	<b>Standart Hata</b>	3.35
<b>Medyan</b>	0.35	<b>Medyan</b>	0.29	<b>Medyan</b>	0.08	<b>Medyan</b>	0.25
<b>Mod</b>	#N/A	<b>Mod</b>	#N/A	<b>Mod</b>	#N/A	<b>Mod</b>	#N/A
<b>Standart Sapma</b>	19.09	<b>Standart Sapma</b>	13.43	<b>Standart Sapma</b>	14.88	<b>Standart Sapma</b>	14.20
<b>Varyans</b>	364.54	<b>Varyans</b>	180.44	<b>Varyans</b>	221.34	<b>Varyans</b>	201.72
<b>Basıklık</b>	17.64	<b>Basıklık</b>	7.32	<b>Basıklık</b>	9.98	<b>Basıklık</b>	9.01
<b>Çarpıklık</b>	4.18	<b>Çarpıklık</b>	2.79	<b>Çarpıklık</b>	3.16	<b>Çarpıklık</b>	3.02
<b>Aralık</b>	81.73	<b>Aralık</b>	49.41	<b>Aralık</b>	57.94	<b>Aralık</b>	54.42
<b>Minimum</b>	0.00	<b>Minimum</b>	0.07	<b>Minimum</b>	0.03	<b>Minimum</b>	0.02
<b>Maksimum</b>	81.73	<b>Maksimum</b>	49.48	<b>Maksimum</b>	57.97	<b>Maksimum</b>	54.43
<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00	<b>Toplam</b>	100.00
<b>Sayı</b>	18.00	<b>Sayı</b>	18.00	<b>Sayı</b>	18.00	<b>Sayı</b>	18.00

Betimsel istatistik testi sonuçları incelendiğinde MLA verileri ile 6'lı aralık, 4'lü aralık ve 2'li aralık veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte aralık arttıkça standart sapma basıklık ve çarpıklık gibi değerlerin arttığı görülmekte, bu da verilerin belli aralık değerleri arasında toplandığını göstermektedir. Bu bulguyu maksimum değerleri de desteklemektedir.  $\mu$ CT veri setlerinin örneklem sayısının MLA örneklem sayılarına indirgenmesiyle birlikte her bir veri seti için aynı ortalama değeri elde edilmiştir. Verilerin normalitesinin belirlenmesinde basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (skewness) değerleri incelenmiş, verilerin normal dağılım göstermediği gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda tüm veri setleri için

Spearman korelasyon yöntemi kullanılmıştır [118]. Test sonucu elde edilen korelasyon katsayıları **Çizelge 36**'da verilmektedir.

**Çizelge 36.** Feldispat cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması

Korelasyon Katsayısı	
6lı aralık	-0.564
4lü aralık	-0.753
2li aralık	-0.004

İki değişkenli korelasyon testi sonuçları incelendiğinde MLA veri seti ile 4'lü aralık veri setleri arasında ters yönlü yüksek şiddetli korelasyon (-0.753) olduğu, 6'lı aralık veri seti ile ters yönlü orta şiddetli korelasyon (-0.564) olduğu ve 2'li veri seti arasında ise ters yönlü düşük şiddetli korelasyon (-0.004) olduğu görülmektedir.  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri ile MLA'den elde edilen veri seti arasında yüksek şiddetli korelasyon çıkmasının sebebi  $\mu$ CT görüntülerindeki etkilerin uzaklaştırılması ile plajiyoklaz, kuvars gibi diğer gang minerallerinin attenüasyon katsayısının benzer olmasına karşın cevherin büyük oranda plajiyoklazdan oluşmasından ve diğer gang minerallerinin düşük yüzdelerde bulunmasından kaynaklanmaktadır.

#### 7.4. Bor Cevheri ile Gerçekleştirilen $\mu$ CT Analizlerinin Değerlendirilmesi

$\mu$ CT setlerini kendi içerisinde değerlendirme amacıyla ANOVA testi kullanılmıştır. ANOVA testinin sonuçları **Çizelge 37** ve **Çizelge 38**'de verilmektedir.

**Çizelge 37.** Bor cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin varyans ve ortalama değerleri

Grup	Sayı	Toplam	Ortalama	Varyans
2'li	20	100	5.00	49.03
4'lü	20	100	5.00	101.66
6'lı	20	100	5.00	126.69

Gruplar arttıkça varyansların arttığı görülmektedir. Bunun sebebi aralık değeri arttıkça cevher içerisindeki tanelerin kümelenmesi ve bu bağlamda yüzdelerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 38.** Bor cevheri  $\mu$ CT veri setlerinin ANOVA sonuçları

Varyasyon Kaynağı	SS	df	MS	F	P-değeri	F krit
Gruplar Arasında	0	3	0	0	1.00	2.72
Grup İçerisinde	9533.672544	76	125.44			
<b>Total</b>	9533.672544	79				

Bor cevheri  $\mu$ CT veri setlerine uygulanan ANOVA testi sonuçları incelendiğinde F değerinin F-krit değerinden küçük olduğu, gruplar arasındaki değerler incelendiğinde varyasyon (SS) değerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ortalamaların karesi bakımından gruplar karşılaştırıldığında fark olmadığı görülmektedir. Bu veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığını ifade etmektedir. MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin karşılaştırılması amacıyla ilk olarak Bağımsız bileşen T-Testi kullanılmıştır. T-Testi sonuçları **Çizelge 39**'da verilmektedir.

Betimsel istatistik testi sonuçları incelendiğinde MLA verileri ile 6'lı aralık, 4'lü aralık ve 2'li aralık veri setleri arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte aralık arttıkça standart sapma basıklık ve çarpıklık gibi değerlerin arttığı görülmekte, bu da verilerin belli aralık değerleri arasında toplandığını göstermektedir. Bu bulguyu maksimum değerleri de desteklemektedir.  $\mu$ CT veri setlerinin örneklem sayısının MLA örneklem sayılarına indirgenmesiyle birlikte her bir veri seti için aynı ortalama değeri elde edilmiştir. Verilerin normalitesinin belirlenmesinde basıklık (kurtosis) ve çarpıklık (skewness) değerleri incelenmiş, verilerin normal dağılım göstermediği gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda tüm veri setleri için Spearman korelasyon yöntemi kullanılmıştır [118]. Test sonucu elde edilen korelasyon katsayıları **Çizelge 40**'ta verilmektedir.

**Çizelge 39.** Bor cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin T testi ile karşılaştırılması

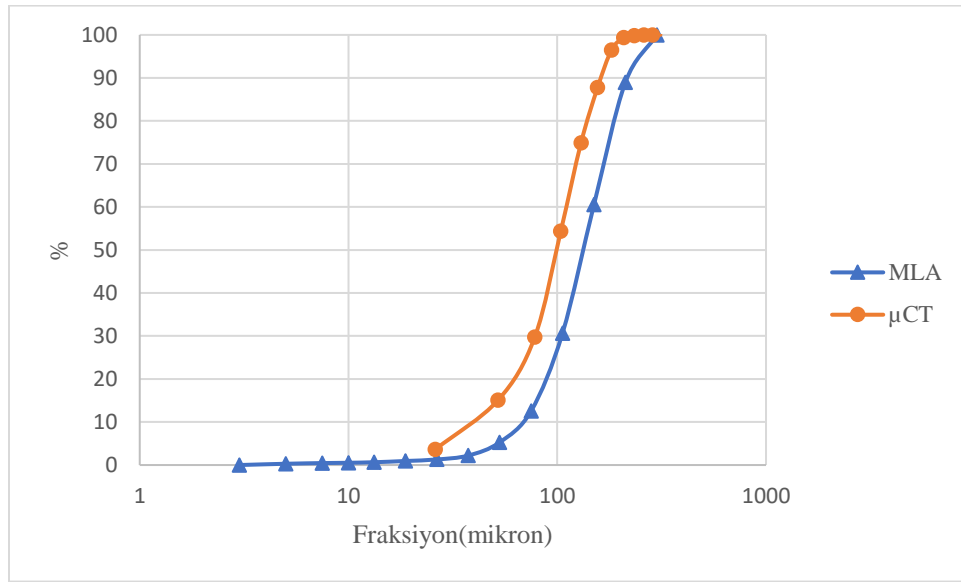
<i>MLA</i>		<i>2'li</i>		<i>4'lü</i>		<i>6'lı</i>	
Ortalama	5.00	Ortalama	5.00	Ortalama	5.00	Ortalama	5.00
Standart Hata	3.35	Standart Hata	1.57	Standart Hata	2.25	Standart Hata	2.52
Medyan	0.28	Medyan	3.06	Medyan	0.01	Medyan	0.00
Mod	0.00	Mod	#N/A	Mod	0.00	Mod	#N/A
Standart Sapma	14.98	Standart Sapma	7.00	Standart Sapma	10.08	Standart Sapma	11.26
Varyans	224.39	Varyans	49.03	Varyans	101.66	Varyans	126.69
Basıklık	12.58	Basıklık	4.63	Basıklık	7.50	Basıklık	6.72
Çarpıklık	3.51	Çarpıklık	2.20	Çarpıklık	2.65	Çarpıklık	2.59
Aralık	62.43	Aralık	26.43	Aralık	39.89	Aralık	43.07
Minimum	0.00	Minimum	0.00	Minimum	0.00	Minimum	0.00
Maksimum	62.43	Maksimum	26.43	Maksimum	39.89	Maksimum	43.07
Toplam	100.00	Toplam	100.00	Toplam	100.00	Toplam	100.00
Sayı	20.00	Sayı	20.00	Sayı	20.00	Sayı	20.00

**Çizelge 40.** Bor cevheri MLA verileri ve  $\mu$ CT veri setlerinin iki değişkenli korelasyon testi ile karşılaştırılması

<b>Korelasyon Katsayısı</b>	
<b>6lı aralık</b>	-0.154
<b>4lü aralık</b>	-0.168
<b>2li aralık</b>	-0.208

İki değişkenli korelasyon testi sonuçları incelendiğinde MLA veri seti ile 6'lı aralık, 4'lü aralık ve 2'li aralık veri setleri arasında ters yönlü düşük şiddetli korelasyon (-0.121, -0.154, -0.208) olduğu, görülmektedir. Korelasyon gözlemlenememesinin sebebi bor cevherinin yaklaşık %90'ini oluşturan kalsit ve kolemanitin birbirine çok benzer attenüasyon katsayılarına sahip olmalarıdır [7]. Bu sebeple  $\mu$ CT sisteminden elde edilen görüntülerde kalsit ve kolemanit birbirinden ayrı görüntülenememiş olup MLA verileri ile karşılaştırıldığında tutarlı bir ilişki çıkmamaktadır [51].

Bor cevheri için MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları da karşılaştırılmıştır. MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları **Şekil 64**'te verilmektedir.



Şekil 64. Bor cevheri tane boyu dağılımı (MLA ve  $\mu$ CT)

MLA ve  $\mu$ CT'den elde edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde MLA'de dağılım grafiğinin 0'dan başladığı,  $\mu$ CT'de ise 0.026 mm'den başladığı ve MLA'de cevherin %100'ünün 0.300 mm altında olduğu,  $\mu$ CT'de ise 0.312 mm altında olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebi cihazlardaki çözünürlük farkıdır. Genel dağılımdaki farklılıkların sebebi ise  $\mu$ CT'deki görüntü iyileştirme adımlarından kaynaklanmaktadır.

## 7.5. MLA Verileri ile $\mu$ CT'de Yoğunluk Tayini

$\mu$ CT ile mineral tanımlaması yapılamadığından [7, 102, 107, 109],

**Çizelge 24'** de belirtilen MLA'de tanımlanmış minerallerin yoğunlukları kullanılmış ve bu verilerin  $\mu$ CT'den elde edilen hacim, tane sayısı ve alan verileriyle karşılaştırılması amacıyla istatistiksel PCA yöntemi uygulanmış, ilişki (kümelenme) gözlenmesi halinde regresyon analizleri uygulanmıştır. PCA analizinde mineral yoğunlukları ile  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri ve hacim değerleri kullanılmıştır. Regresyon analizlerinde ise;

- Yoğunluk ile yansıtma değeri
- Yoğunluk ile hacim ve yansıtma değeri
- Yoğunluk ile hacim, tane sayısı ve yansıtma değeri,

kullanılmış ve bu kapsamda  $\mu$ CT'den elde edilen diğer verilerin yoğunluğun belirlenmesine etkisi değerlendirilmiştir.

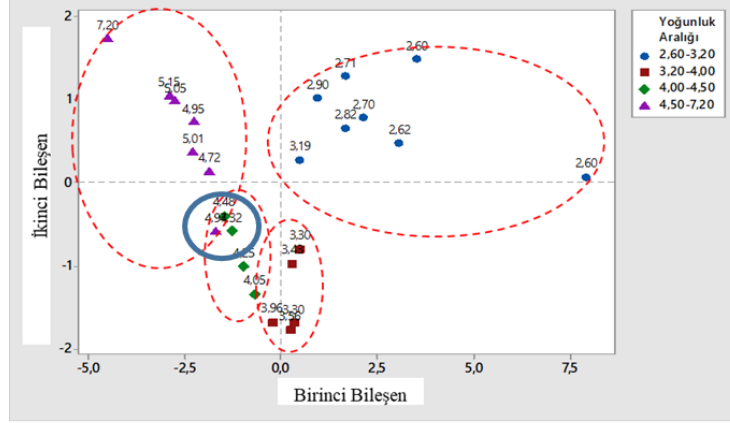
### 7.5.1. Nadir Toprak Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini

MLA'den elde edilen minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri ile karşılaştırma amacıyla ilk aşamada PCA analizi kullanılmıştır. Bu kapsamda MLA'den elde edilen minerallerin yoğunlukları aralıklar halinde alınmıştır. Kullanılan aralıklar **Çizelge 41'**de verilmektedir.

**Çizelge 41.** Nadir Toprak Cevheri MLA'de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları

Mineral	Yoğunluk Aralığı	Mineral	Yoğunluk Aralığı
Si-Al Killeri	2.6-3.2	Siderit	3.2-4.0
Diğerleri	2.6-3.2	Sfalerit	4.0-4.5
Kuvars	2.6-3.2	Rutil	4.0-4.5
Feldispat	2.6-3.2	Fe Oksit/Hidroksit	4.0-4.5
Kalsit	2.6-3.2	Barit	4.0-4.5
Plogopit	2.6-3.2	İlmenit	4.5-7.2
Mika	2.6-3.2	Hollandit	4.5-7.2
Apatit	2.6-3.2	Bastnazit	4.5-7.2
Mn Hidroksit	3.2-4.0	Pirit	4.5-7.2
Lat NTE-MnOH	3.2-4.0	Lateritik NTE (Altere)	4.5-7.2
Epidot	3.2-4.0	Monazit	4.5-7.2
Florit	3.2-4.0	Seriyanit	4.5-7.2

Elde edilen aralıklar ile  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri, hacim ve tane sayısı verileri kullanılmış ve bu değerler ile PCA analizi yapılmıştır. PCA analizi sonucu **Şekil 65'**te verilmektedir.



**Şekil 65.** Nadir Toprak Cevheri PCA analizi sonucu

PCA analizi çıktısı incelendiğinde benzer yoğunluklu mineraller arasında gruplaşma olduğu ve bu minerallerin belli bir bölgede toplandığı görülmektedir. Gruplaşma gözlenmesi bu minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri, tane sayısı ve hacim verileri ile doğrudan ilişkileri olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte yüksek yoğunluklarda bu minerallerin birbirinden ayrımı zorlaşmaktadır.

PCA analizi sonucunda ilişki gözlemlendiğinden farklı parametreler kullanılarak regresyon testleri uygulanmıştır. Kullanılan veriler ve elde edilen  $R^2$ 'lere ilişkin özet çıktı **Çizelge 42**'de verilmektedir.

**Çizelge 42.** Nadir toprak cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin  $R^2$ 'leri

Cevher Tipi	Kullanılan Veriler	$R^2$ (%)
Nadir toprak	RV2, hacim 2, tane Sayısı 2	91.15
Nadir toprak	RV4, hacim 4, tane sayısı 4	99.03
Nadir toprak	RV6, hacim 6, tane sayısı 6	95.56
Nadir toprak	RV2, RV4, RV6	98.56
Nadir toprak	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6	99.55
Nadir toprak	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6, tane sayısı 2, tane sayısı 4, tane sayısı 6	99.71

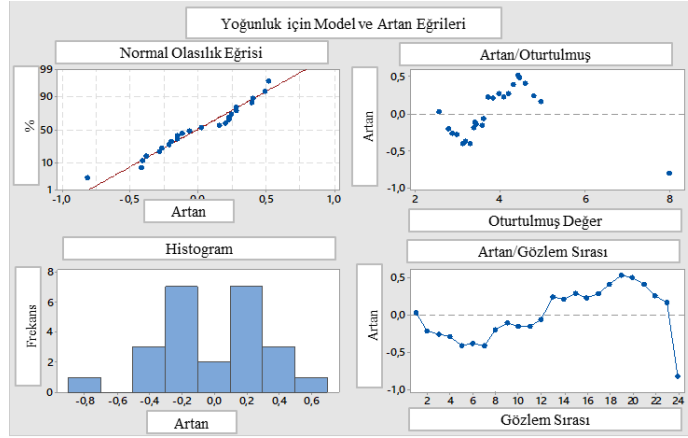
İlk aşamada farklı aralıktaki veri setlerinden elde edilen veriler ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiş, sonraki aşamada bu verilerin kombinasyonu ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 66**'da verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:



Eşitlik 2. Nadir toprak cevheri 2’li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$Yoğunluk = -0.693 + 0.04584 RV\_2 - 0.035 NTO\_HACİM\_2 + 0.017 NTO\_TANE SAY\_2 \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 91.15$$



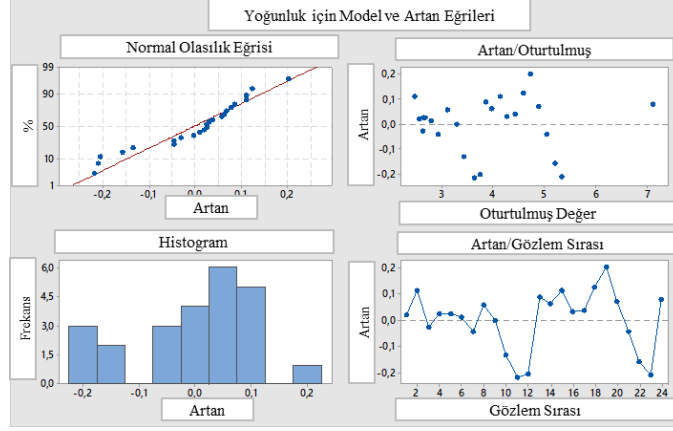
**Şekil 66.** Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı %91.15’tir. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 67**’de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ ’si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 3. Nadir toprak cevheri 4’li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$Yoğunluk = -0.958 + 0.03830 RV\_4 - 0.0409 NTO\_HACİM\_4 + 0.0627 NTO\_TANE SAY\_4 \text{ ve}$$

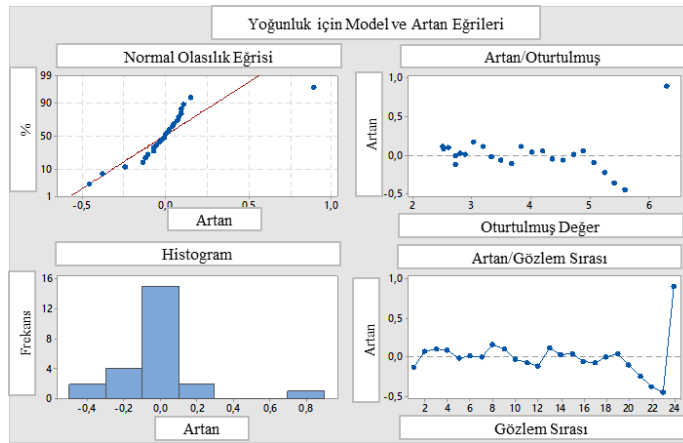
$$R^2 = \% 99.03$$



**Şekil 67.** Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları  
 Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 99.03'tür. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte yüksek aralıklı veri seti kullanıldığında güven aralığında artış gözlemlenmektedir. Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 68**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 4. Nadir toprak cevheri 6'lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = -0.538 + 0.02924 \text{ RV}_6 + 0.0103 \text{ NTO\_HACİM}_6 + 0.0203 \text{ NTO\_TANE SAY}_6 \text{ ve} \\ R^2 = \% 95.53$$

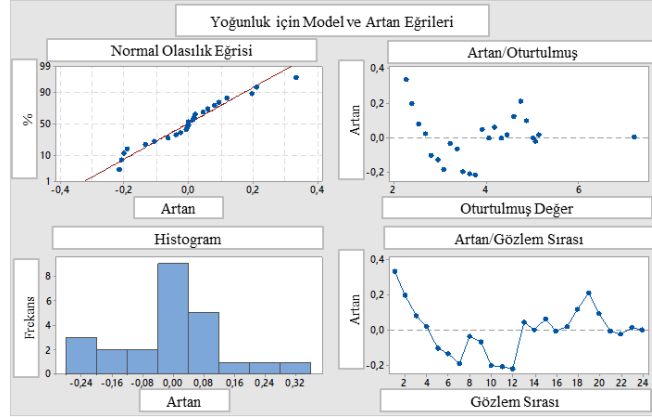


**Şekil 68.** Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 95.53'tür. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Nadir toprak cevherinde gözlemlenen etkiler sebebiyle yansıtma değeri 79 gibi yüksek bir değerden başlamaktadır. Diğer cevherlere göre daha dar bir aralıkta çalışıldığından veri setlerindeki aralık sayısı arttıkça gruplaşma daha da büyük oranda artmakta bu da 6'lı aralık veri seti ile elde edilen regresyon eğrisinin güven aralığının 4'lü aralık veri seti ile elde edilen regresyon eğrisinin güven aralığından düşük olmasına sebep olmuştur. Yoğunluk ve farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 69**'da verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 5. Nadir toprak cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

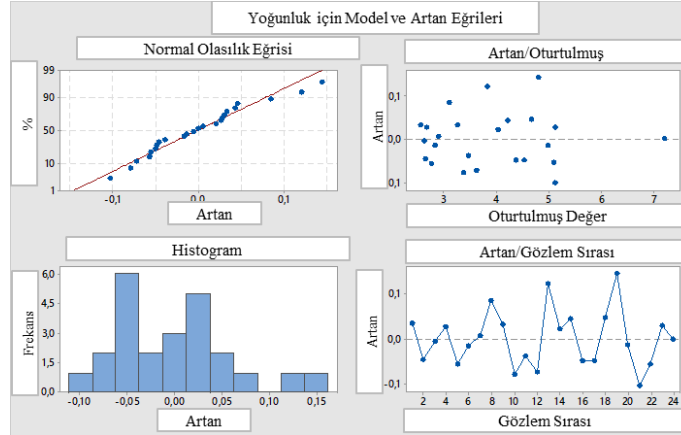
$$\text{Yoğunluk} = -0.718 - 0.0376 \text{ RV}_2 + 0.1231 \text{ RV}_4 - 0.0466 \text{ RV}_6 \text{ ve } R^2 = \% 98.56$$



**Şekil 69.** Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları. Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 98.56'dır. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 70**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 6. Nadir toprak cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = -1,026 - 0,0816 \text{ RV}_2 - 0,00486 \text{ NTO\_HACİM}_2 + 0,2068 \text{ RV}_4 - 0,01511 \text{ NTO\_HACİM}_4 - 0,0851 \text{ RV}_6 + 0,02851 \text{ NTO\_HACİM}_6 \text{ ve } R^2 = \% 99.55$$

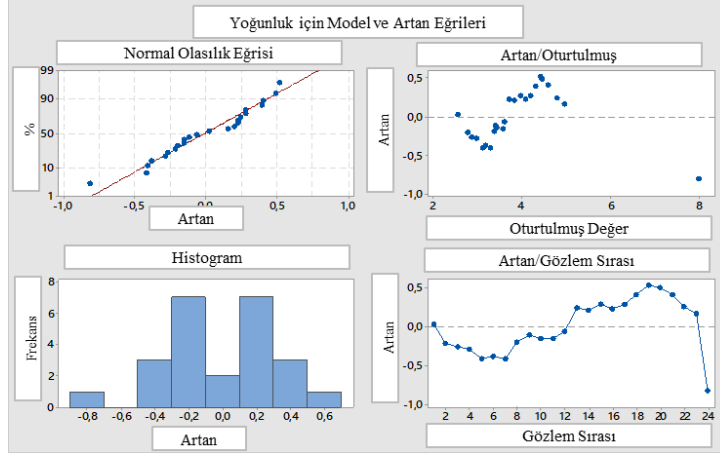


**Şekil 70.** Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 99.55'tir. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim ve yansıtma değeri ile yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Farklı veri setlerinin birlikte kullanımıyla güven aralığının daha da arttığı görülmektedir. Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim değerleri ve tane sayılarının birlikte incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 71**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 7. Nadir toprak cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayısı ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = -0.819 - 0.0636 \text{ RV}_2 - 0.0460 \text{ NTO\_HACİM}_2 + 0.0476 \text{ NTO\_TANE SAY}_2 + 0.1731 \text{ RV}_4 - 0.0122 \text{ NTO\_HACİM}_4 - 0.0205 \text{ NTO\_TANE SAY}_4 - 0.0702 \text{ RV}_6 - 0.0019 \text{ NTO\_HACİM}_6 + 0.0324 \text{ NTO\_TANE SAY}_6 \text{ ve } R^2 = \% 99.71$$



**Şekil 71.** Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun tüm veri setleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı %99.71'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, tane sayısı ve yansıtma değerleri ile yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. En yüksek güven aralığına bu sonuç ile ulaşılmıştır.

Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

- 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıktan elde edilen tüm verilerin birlikte kullanımı ile en yüksek güven aralığında yoğunluk için denklemler elde edilmiştir,
- Cevherdeki yansıma etkilerinin fazlalığı sebebiyle daha dar bir grilik değeri aralığında çalışılmış, bu sebeple 6'lı aralık veri setinde gruplaşma çok olduğundan bu setten elde edilen regresyon eğrisinin (% 91.15), 4'lü aralık ile elde edilen regresyon eğrisinin güven aralığına (% 99.03) kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir,
- Kurşun-çinko cevherinde sadece 4'lü aralık veri seti ile yoğunluğun regresyon eğrisinin güven aralığı % 99.03'tür.

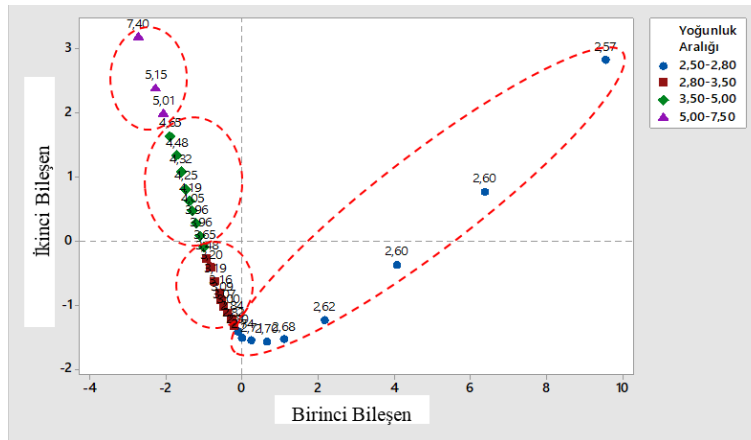
### 7.5.2. Kurşun-Çinko Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini

MLA'den elde edilen minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri ile karşılaştırma amacıyla ilk aşamada PCA analizi kullanılmıştır. Bu kapsamda MLA'den elde edilen minerallerin yoğunlukları aralıklar halinde alınmıştır. Kullanılan aralıklar **Çizelge 43**'te verilmektedir.

**Çizelge 43.** Kurşun-Çinko Cevheri MLA’de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları

Mineral	Yoğunluk Aralığı	Mineral	Yoğunluk Aralığı
Al Fosfat	2,50-2,80	Apatit	2,80-3,50
Si-Al Killeri	2,50-2,80	Fe-Zn Al PO4	2,80-3,50
Diğerleri	2,50-2,80	Titanit	2,80-3,50
Kuvars	2,50-2,80	Fe Sülfat	3,50-5,00
Plajiyoklaz	2,50-2,80	Siderit	3,50-5,00
K-Feldspat	2,50-2,80	Zn-Fe Karbonat	3,50-5,00
Kalsit	2,50-2,80	Sfalerit	3,50-5,00
Alunit	2,50-2,80	Kalkopirit	3,50-5,00
Biyotit	2,50-2,80	Rutil	3,50-5,00
Muskovit	2,80-3,50	Fe Oksit/Hidroksit	3,50-5,00
Dolomit	2,80-3,50	Barit	3,50-5,00
Klorit	2,80-3,50	Zirkon	3,50-5,00
Amfibol	2,80-3,50	Pirit	5,00-7,50
Jarosit	2,80-3,50	Monazit	5,00-7,50
CaCO3-FeS-Kil Mix	2,80-3,50	Galen	5,00-7,50

Elde edilen aralıklar ile  $\mu$ CT’den elde edilen yansıtma değeri, hacim ve tane sayısı verileri kullanılmış ve bu değerler ile PCA analizi yapılmıştır. PCA analizi sonucu **Şekil 72**’de verilmektedir.



**Şekil 72.** Kurşun-Çinko Cevheri PCA analizi sonucu

PCA analizi çıktısı incelendiğinde benzer yoğunluklu mineraller arasında gruplaşma olduğu ve bu minerallerin belli bir bölgede toplandığı görülmektedir. Gruplaşma gözlenmesi bu minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT’den elde edilen yansıtma değeri, tane sayısı ve hacim verileri ile doğrudan ilişkileri olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte düşük yoğunluk aralığında (2.5-2.8) bulunan bazı tanelerin farklı alanda bulunduğu görülmektedir. Bu durum noktaların birbirinden farklı mineraller olduğuna ve  $\mu$ CT ile bu minerallerin ayrı tanımlanabileceğini göstermektedir.

PCA analizi sonucunda ilişki gözlemlendiğinden farklı parametreler kullanılarak regresyon testleri uygulanmıştır. Kullanılan veriler ve elde edilen  $R^2$ 'lere ilişkin özet çıktı **Çizelge 44**'te verilmektedir.

**Çizelge 44.** Kurşun-Çinko cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin  $R^2$ 'leri

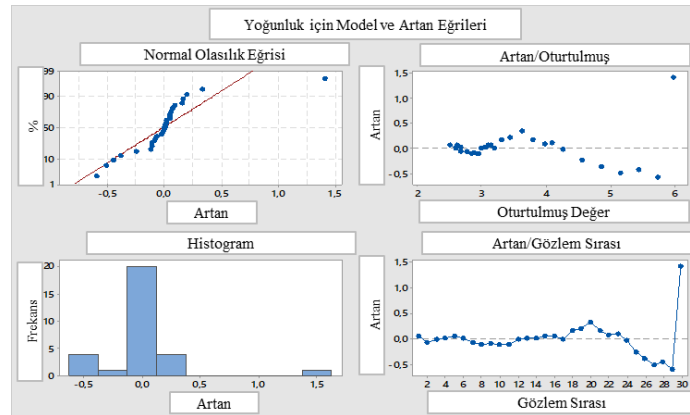
Cevher Tipi	Kullanılan Veriler	$R^2$ (%)
Kurşun-Çinko	RV2, hacim 2, tane Sayısı 2	89.93
Kurşun-Çinko	RV4, hacim 4, tane sayısı 4	92.65
Kurşun-Çinko	RV6, hacim 6, tane sayısı 6	88.84
Kurşun-Çinko	RV2, RV4, RV6	95.82
Kurşun-Çinko	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6	95.82
Kurşun-Çinko	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6, tane sayısı 2, tane sayısı 4, tane sayısı 6	96.24

İlk aşamada farklı aralıktaki veri setlerinden elde edilen veriler ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiş, sonraki aşamada bu verilerin kombinasyonu ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 73**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 8. Kurşun-çinko cevheri 2'li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 2.314 + 0.01472 \text{ RV\_2} + 0.0301 \text{ KÇ\_HACİM\_2} - 0.0425 \text{ KÇ\_TANE SAY\_2} \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 89.93$$

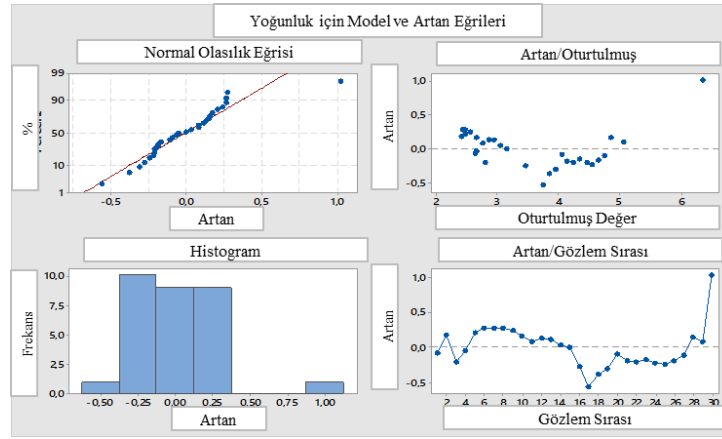


**Şekil 73.** Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları. Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 89.93'tür. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve

yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 74**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 9. Kurşun-çinko cevheri 4'lü veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1.113 + 0.02513 \text{ RV}_4 - 0.0514 \text{ KÇ\_HACİM}_4 + 0.0891 \text{ KÇ\_TANE SAY}_4 \text{ ve} \\ R^2 = \% 92.65$$



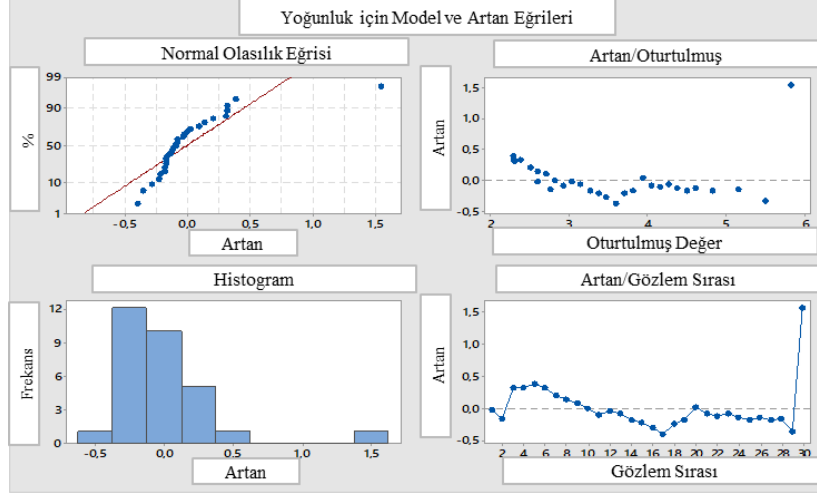
**Şekil 74.** Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 92.65'tir. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte yüksek aralıklı veri seti kullanıldığında güven aralığında artış gözlemlenmektedir.

Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 75**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 10. Kurşun-çinko cevheri 6'lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1.231 + 0.01875 \text{ RV}_6 - 0.0157 \text{ KÇ\_HACİM}_6 + 0.0397 \text{ KÇ\_TANE SAY}_6 \text{ ve} \\ R^2 = \% 88.84$$



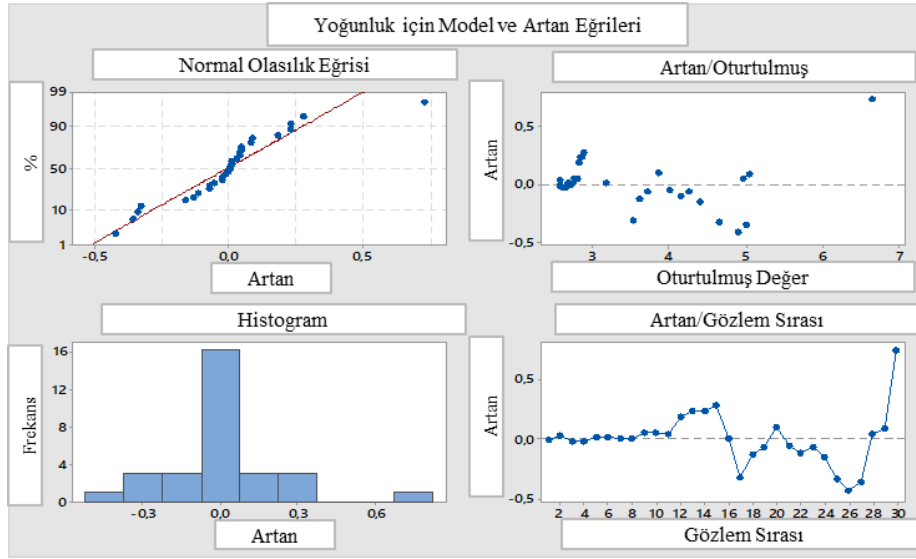


**Şekil 75.** Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları  
 Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 88.84'tür. Yoğunluk ve farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 76**'da verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 11. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 2.096 + 0.01261 \text{ RV}_2 + 0.03524 \text{ RV}_4 - 0.02413 \text{ RV}_6 \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 95.82$$



**Şekil 76.** Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

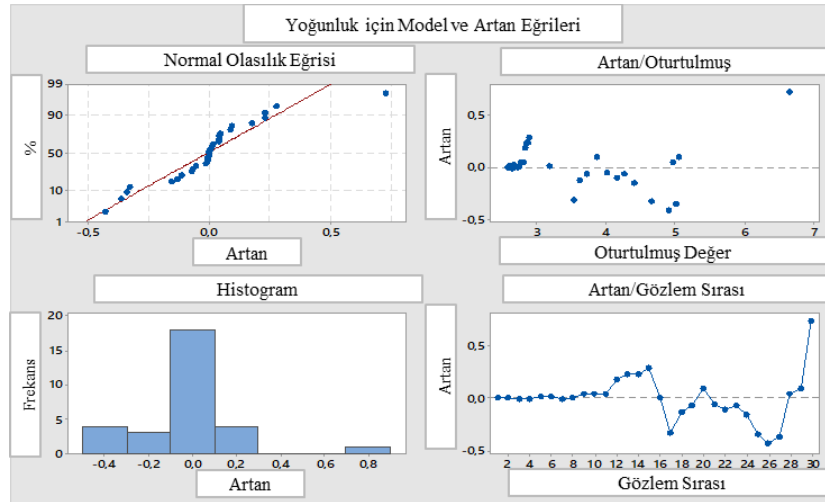
Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 95.82'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. 4'lü aralıktan elde edilen güven aralığı 2'li aralıktan elde edilen güven aralığından daha yüksek olmasına karşın 6'lı aralıktan elde edilen güven aralığı 4'lü aralıktan elde edilen güven aralığından daha düşüktür. Bunun sebebi aralık arttıkça gruplaşmanın artmasıdır.

Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 77**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 12. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 2.120 + 0.01280 \text{ RV}_2 - 0.0037 \text{ KÇ\_HACİM}_2 + 0.03548 \text{ RV}_4 + 0.0044 \text{ KÇ\_HACİM}_4 - 0.02462 \text{ RV}_6 - 0.0020 \text{ KÇ\_HACİM}_6 \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 95.82$$



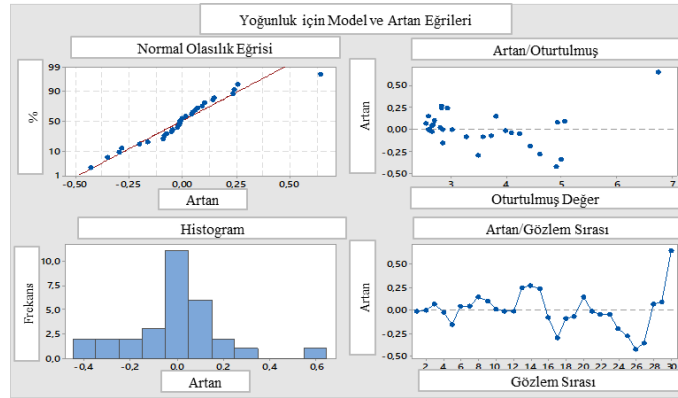
**Şekil 77.** Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 95.82'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, tane sayısı ve yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Farklı veri setlerinin birlikte kullanımıyla güven aralığının daha da arttığı görülmektedir.

Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim değerleri ve tane sayılarının birlikte incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 78**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 13. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayısı ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\begin{aligned} \text{Yoğunluk} = & 2.223 + 0.01328 \text{ RV}_2 - 0.679 \text{ KÇ\_HACİM}_2 + 0.158 \text{ KÇ\_TANE SAY}_2 \\ & + 0.03686 \text{ RV}_4 + 0.187 \text{ KÇ\_HACİM}_4 + 0.680 \text{ KÇ\_TANE SAY}_4 - 0.0268 \text{ RV}_6 \\ & - 0.1091 \text{ KÇ\_HACİM}_6 - 0.243 \text{ KÇ\_TANE SAY}_6 \text{ ve } R^2 = \% 96.24 \end{aligned}$$



**Şekil 78.** Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun tüm veri setleriyle olan ilişkisi denklemle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 96.24'tür. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, tane sayısı ve yansıtma değerleri ile yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. En yüksek güven aralığına bu sonuç ile ulaşılmıştır.

Yapılan regresyon analizleri sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıktan elde edilen tüm verilerin birlikte kullanımı ile en yüksek güven aralığında yoğunluk için denklem elde edilmiştir,
- Halka artefaktı sebebiyle aralık arttıkça gruplaşma arttığından ve görüntü iyileştirme aşamasında uygulanan 'binary' fonksiyonunun etkisinin azalması sebebiyle 6'lı aralık veri setinden elde edilen regresyon eğrisinin (% 88.84), 4'lü aralık ile elde edilen regresyon eğrisinin güven aralığına (% 92.65) kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir,
- Kurşun-çinko cevherinde sadece 4'lü aralık veri seti ile yoğunluğun regresyon eğrisinin güven aralığı % 92.65'tir.

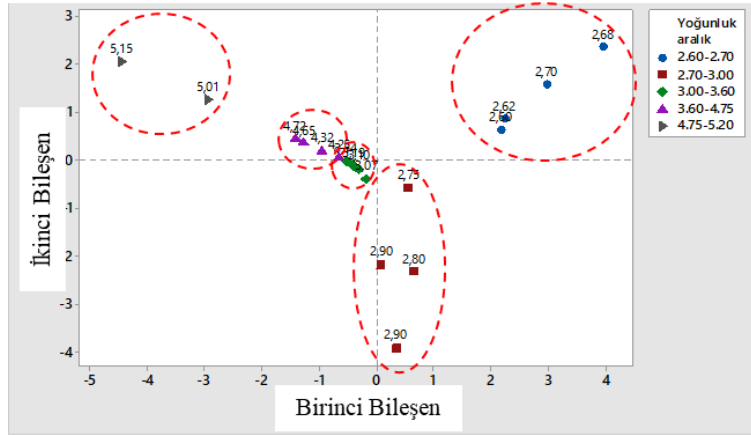
### 7.5.3. Feldispat Cevheri $\mu$ CT ile Yoğunluk Tayini

MLA'den elde edilen minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri ile karşılaştırma amacıyla ilk aşamada PCA analizi kullanılmıştır. Bu kapsamda MLA'den elde edilen minerallerin yoğunlukları aralıklar halinde alınmıştır. Kullanılan aralıklar **Çizelge 45**'te verilmektedir.

**Çizelge 45.** Feldispat Cevheri MLA'de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları

Mineral	Yoğunluk aralığı	Mineral	Yoğunluk aralığı
Diğer	2.60-2.70	Turmalin	3.00-3.60
Kuars	2.60-2.70	Apatit	3.00-3.60
Plajiyoklaz	2.60-2.70	Titanit (Sfen)	3.00-3.60
K-Feldispat	2.60-2.70	Rutil	3.60-4.75
İllit	2.70-3.00	Fe Oksit / Hidroksit	3.60-4.75
Biyotit	2.70-3.00	Zirkon	3.60-4.75
Klorit	2.70-3.00	İlmenit	3.60-4.75
Antradit	2.70-3.00	Pirit	4.75-5.20
Amfibol	3.00-3.60	Monazit	4.75-5.20

Elde edilen aralıklar ile  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri, hacim ve tane sayısı verileri kullanılmış ve bu değerler ile PCA analizi yapılmıştır. PCA analizi sonucu **Şekil 79**'da verilmektedir.



**Şekil 79.** Feldispat Cevheri PCA analizi sonucu

PCA analizi çıktısı incelendiğinde benzer yoğunluklu mineraller arasında gruplaşma olduğu ve bu minerallerin belli bir bölgede toplandığı görülmektedir. Gruplaşma gözlenmesi bu minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri, tane sayısı ve hacim verileri ile doğrudan ilişkileri olduğunu göstermektedir.

PCA analizi sonucunda ilişki gözlemlendiğinden farklı parametreler kullanılarak regresyon testleri uygulanmıştır. Kullanılan veriler ve elde edilen  $R^2$ 'lere ilişkin özet çıktı Çizelge 46'de verilmektedir.

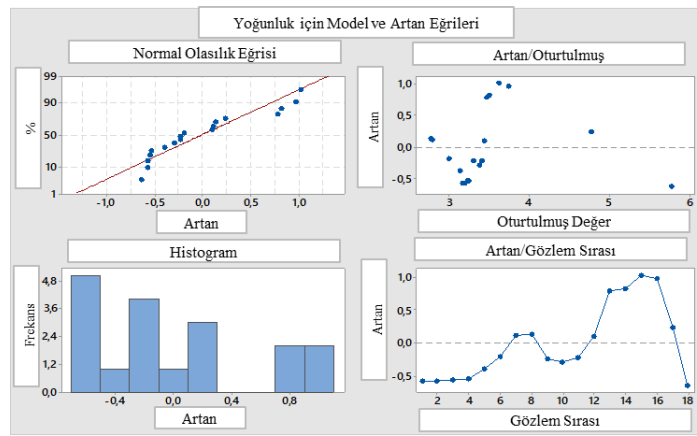
Çizelge 46. Feldispat cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin  $R^2$ 'leri

Cevher Tipi	Kullanılan Veriler	$R^2$ (%)
Feldispat	RV2, hacim 2, tane Sayısı 2	61.97
Feldispat	RV4, hacim 4, tane sayısı 4	85.89
Feldispat	RV6, hacim 6, tane sayısı 6	86.44
Feldispat	RV2, RV4, RV6	95.91
Feldispat	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6	96.49
Feldispat	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6, tane sayısı 2, tane sayısı 4, tane sayısı 6	98.66

İlk aşamada farklı aralıktaki veri setlerinden elde edilen veriler ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiş, sonraki aşamada bu verilerin kombinasyonu ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 80**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 14. Feldispat cevheri 2'li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 2.698 + 0.01216 \text{ RV\_2} + 0.0029 \text{ FELD\_HACİM\_2} - 0.0210 \text{ FELD\_TANE SAY\_2} \text{ ve } R^2 = \% 61.97$$



Şekil 80. Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

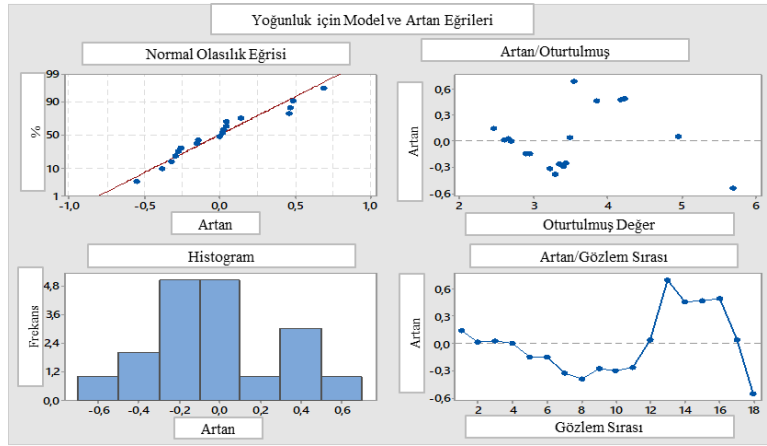
Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 61.97'dir. Bu sonuç bu veri setinde düşük güven aralığında 2'li veri seti ve yoğunluk arasında ilişki olduğunu göstermektedir.

Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 81**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 15. Feldispat cevheri 4'lü veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\mathbf{Yoğunluk} = 2.390 + 0.01308 RV\_4 + 0.0213 FELD\_HACİM\_4 - 0.0376 FELD\_TANE SAY\_4$$

ve  $R^2 = \% 85.89$



**Şekil 81.** Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

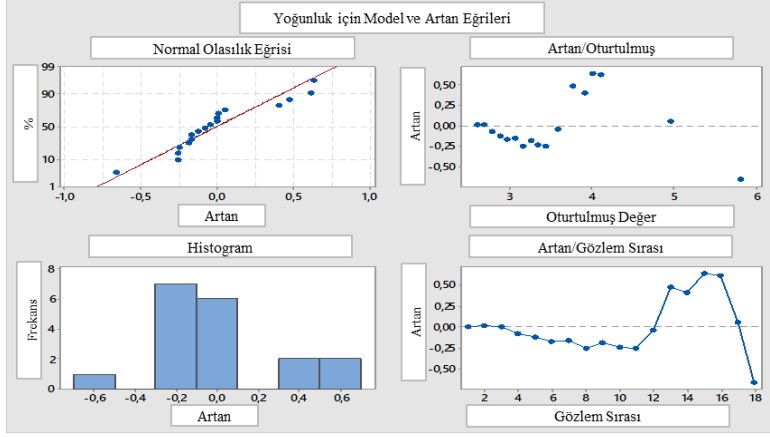
Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 85.89'dur. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte yüksek aralıklı veri seti kullanıldığında güven aralığında artış gözlemlenmektedir.

Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 82**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 16. Feldispat cevheri 6'lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\mathbf{Yoğunluk} = 1.831 + 0.01581 RV\_6 - 0.0021 FELD\_HACİM\_6 + 0.0034 FELD\_TANE SAY\_6$$

ve  $R^2 = \% 86.44$



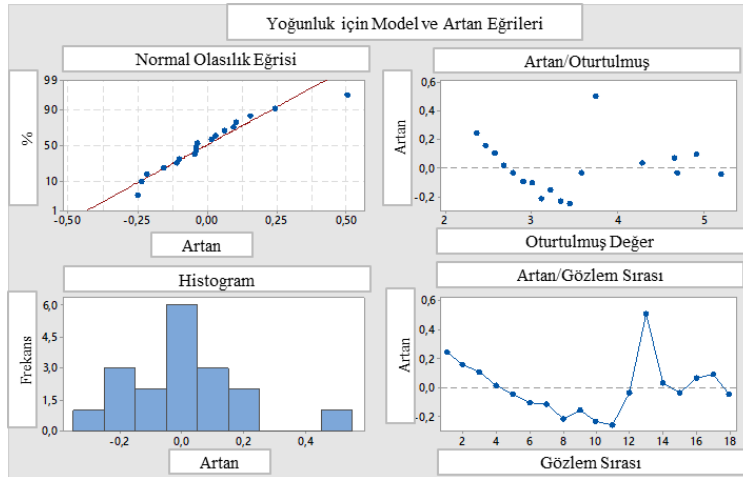
**Şekil 82.** Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları  
Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 86.44'tür.

Yoğunluk ve farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 83**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 17. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1,770 - 0,01726 \text{ RV}_2 + 0,02121 \text{ RV}_4 + 0,00970 \text{ RV}_6 \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 95.91$$



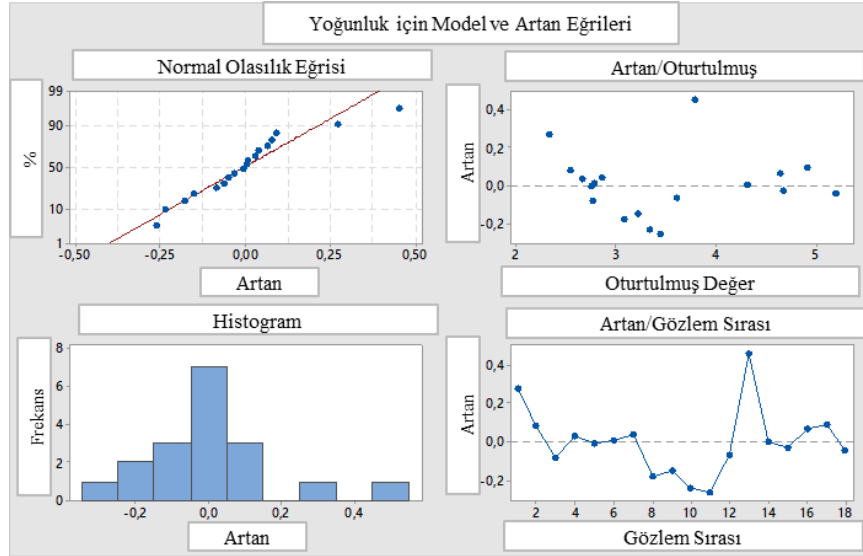
**Şekil 83.** Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları  
Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı 95.91%'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve

yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Nadir toprak ve kurşun-çinko cevherinde gözlemlenen etkiler feldispat cevherinde gözlemlenmediğinden 6'lı aralık veri setinin regresyon analizinin güven aralığı 4'lü ve 2'li veri setinin regresyon analizinin güven aralığından daha yüksektir. Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 84**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 18. Feldispat cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1,692 - 0,01770 \text{ RV}_2 - 0,00265 \text{ FELD\_HACİM}_2 + 0,01946 \text{ RV}_4 + 0,00024 \text{ FELD\_HACİM}_4 + 0,01221 \text{ RV}_6 + 0,00420 \text{ FELD\_HACİM}_6 \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 96.49$$



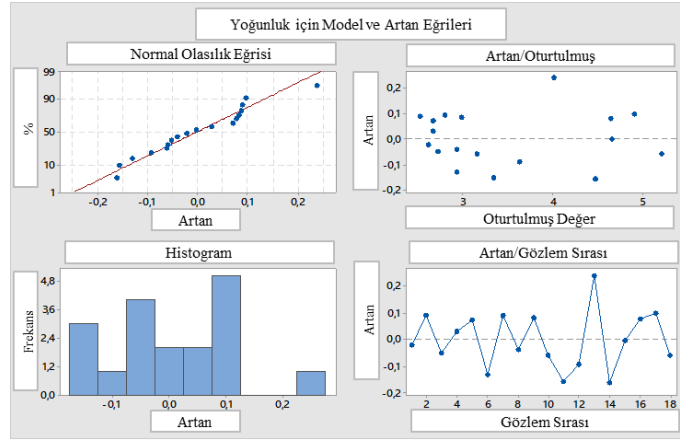
**Şekil 84.** Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 96.49'dur. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Farklı veri setlerinin birlikte kullanımıyla güven aralığının daha da arttığı görülmektedir. Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim değerleri ve tane sayılarının birlikte incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 85**'te verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:



Eşitlik 19. Kurşun-çinko cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayıları ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 0,652 - 0,02435 \text{ RV}_2 + 0,00045 \text{ FELD\_HACİM}_2 + 0,00498 \text{ FELD\_TANE SAY}_2 + 0,00939 \text{ RV}_4 - 0,0393 \text{ FELD\_HACİM}_4 + 0,0673 \text{ FELD\_TANE SAY}_4 + 0,03318 \text{ RV}_6 - 0,00083 \text{ FELD\_HACİM}_6 + 0,00947 \text{ FELD\_TANE SAY}_6 \text{ ve } R^2 = \% 98,66$$



**Şekil 85.** Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 98.66'dır. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, yansıtma değeri ve tane sayısı ile yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. En yüksek güven aralığına bu sonuç ile ulaşılmıştır.

Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

- 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıktan elde edilen tüm verilerin birlikte kullanımı ile en yüksek güven aralığında yoğunluk için denklemler elde edilmiştir,
- Nadir toprak ve kurşun-çinko cevherinde gözlemlenen etkiler feldispat cevherinde gözlemlenmediğinden 6'lı aralık veri setinin regresyon analizinin güven aralığı 4'lü ve 2'li veri setinin regresyon analizinin güven aralığından daha yüksektir,
- Feldispat cevherinde sadece 6'lı aralık veri seti ile yoğunluğun regresyon eğrisinin güven aralığı % 86.44'tür.

#### 7.5.4. Bor Cevheri $\mu\text{CT}$ ile Yoğunluk Tayini

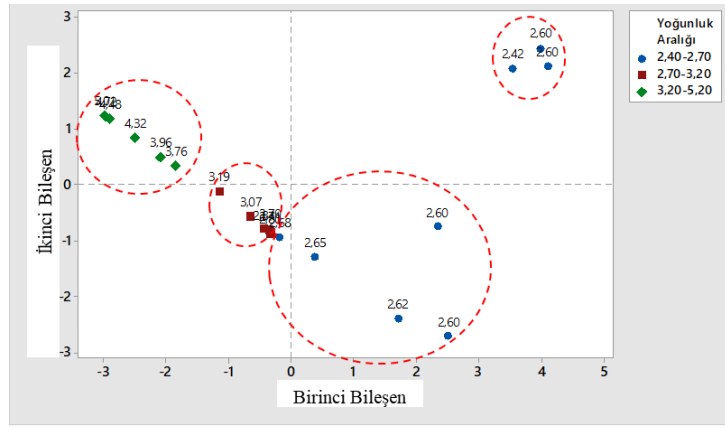
MLA'den elde edilen minerallerin yoğunluklarının  $\mu\text{CT}$ 'den elde edilen veri setleri ile karşılaştırma amacıyla ilk aşamada PCA analizi kullanılmıştır. Bu kapsamda MLA'den elde edilen

minerallerin yoğunlukları aralıklar halinde alınmıştır. Kullanılan aralıklar **Çizelge 47**'de verilmektedir.

**Çizelge 47.** Bor Cevheri MLA'de tanımlanan minerallerin yoğunluk aralıkları

Mineral	Yoğunluk Aralığı	Mineral	Yoğunluk Aralığı
Kolemanit	2,40-2,70	Biyotit	2,70-3,20
Anhidrat	2,40-2,70	Dolomit	2,70-3,20
Si-Al Killeri	2,40-2,70	Amfibol	2,70-3,20
Kalsit-Kil Karışımı	2,40-2,70	Apatit	2,70-3,20
Diğerleri	2,40-2,70	Strontiyanit	3,20-5,20
Kuvars	2,40-2,70	Selestin	3,20-5,20
Talk	2,40-2,70	Fe Oksit/Hidroksit	3,20-5,20
Plajiyoklaz	2,40-2,70	Barit	3,20-5,20
K-Feldispat	2,40-2,70	Ilmenit	3,20-5,20
Kalsit	2,70-3,20	Pirit (Framboidal)	3,20-5,20

Elde edilen aralıklar ile  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri, hacim ve tane sayısı verileri kullanılmış ve bu değerler ile PCA analizi yapılmıştır. PCA analizi sonucu **Şekil 86**'da verilmektedir.



**Şekil 86.** Bor Cevheri PCA analizi sonucu

PCA analizi çıktısı incelendiğinde benzer yoğunluklu mineraller arasında gruplaşma olduğu ve bu minerallerin belli bir bölgede toplandığı görülmektedir. Gruplaşma gözlenmesi bu minerallerin yoğunluklarının  $\mu$ CT'den elde edilen yansıtma değeri, tane sayısı ve hacim verileri ile doğrudan ilişkileri olduğunu göstermektedir. Ayrıca düşük yoğunluk aralığında (2,4-2,7) iki farklı gruplaşma gözlemlenmesi bu iki grubun birbirinden ayrı tanımlanabileceğini göstermektedir. PCA analizi sonucunda ilişki gözlemlendiğinden farklı parametreler kullanılarak regresyon testleri

uygulanmıştır. Kullanılan veriler ve elde edilen R<sup>2</sup>'lere ilişkin özet çıktı **Çizelge 48**'de verilmektedir.

**Çizelge 48.** Feldispat cevheri regresyon analizinde kullanılan veriler ve regresyon analizlerinin R<sup>2</sup>'leri

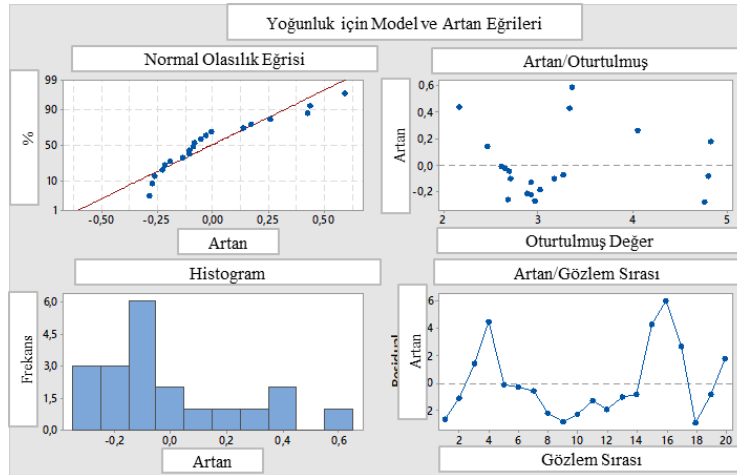
Cevher Tipi	Kullanılan Veriler	R <sup>2</sup> (%)
Bor	RV2, hacim 2, tane Sayısı 2	90.39
Bor	RV4, hacim 4, tane sayısı 4	92.38
Bor	RV6, hacim 6, tane sayısı 6	96.74
Bor	RV2, RV4, RV6	98.76
Bor	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6	99.17
Bor	RV2, RV4, RV6, hacim 2, hacim 4, hacim 6, tane sayısı 2, tane sayısı 4, tane sayısı 6	99.17

İlk aşamada farklı aralıktaki veri setlerinden elde edilen veriler ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiş, sonraki aşamada bu verilerin kombinasyonu ile yoğunluk arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 87**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve R<sup>2</sup>'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 20. Bor cevheri 2'li veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 2,847 + 0,00777 \text{ RV}_2 + 0,0949 \text{ KOLE\_HACİM}_2 - 0,1552 \text{ KOLE\_TANE SAY}_2$$

ve  $R^2 = \% 90.39$

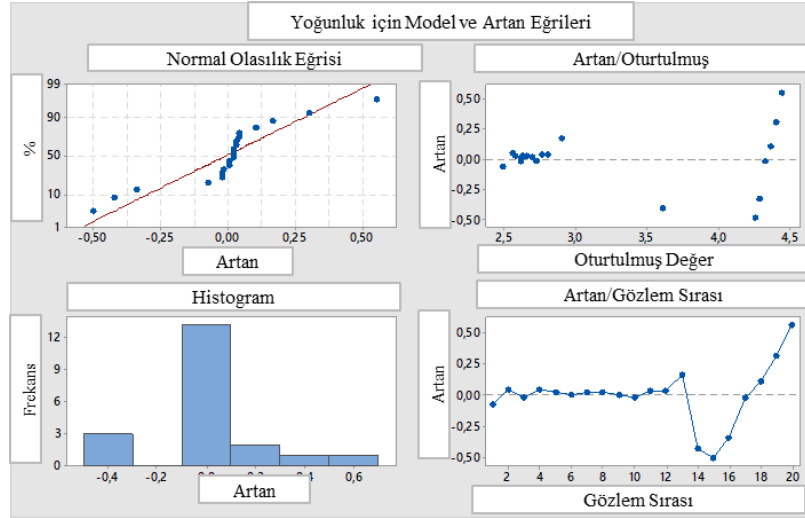


**Şekil 87.** Yoğunluk ile 2 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları. Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 90.39'dur. Bu sonuç yüksek güven aralığında 2'li veri seti ve yoğunluk

arasında ilişki olduğunu göstermektedir. Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 88**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 21. Bor cevheri 4'lü veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

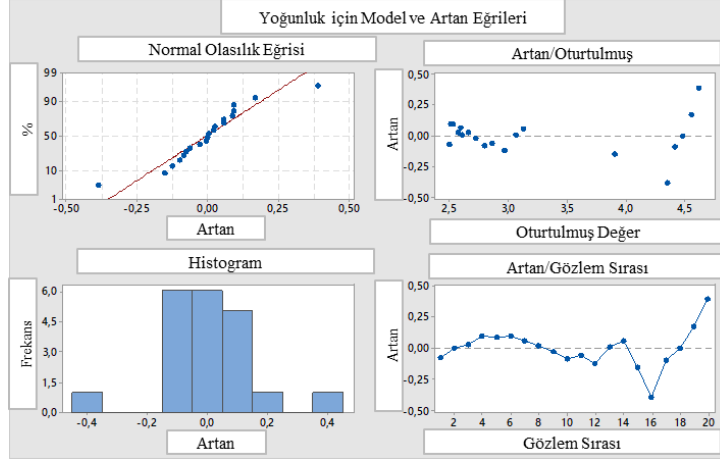
$$\text{Yoğunluk} = 2,033 + 0,009554 \text{ RV}_4 + 0,0023 \text{ KOLE\_HACİM}_4 + 0,0030 \text{ KOLE\_TANE SAY}_4 \text{ ve } R^2 = \% 92,38$$



**Şekil 88.** Yoğunluk ile 4 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları. Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 92.38'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte yüksek aralıklı veri seti kullanıldığında güven aralığında artış gözlemlenmektedir. Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim ve tane sayılarının incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 89**'da verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 22. Bor cevheri 6'lı veri setinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1,7794 + 0,011268 \text{ RV}_6 + 0,00596 \text{ KOLE\_HACİM}_6 + 0,00496 \text{ KOLE\_TANE SAY}_6 \text{ ve } R^2 = \% 96,74$$

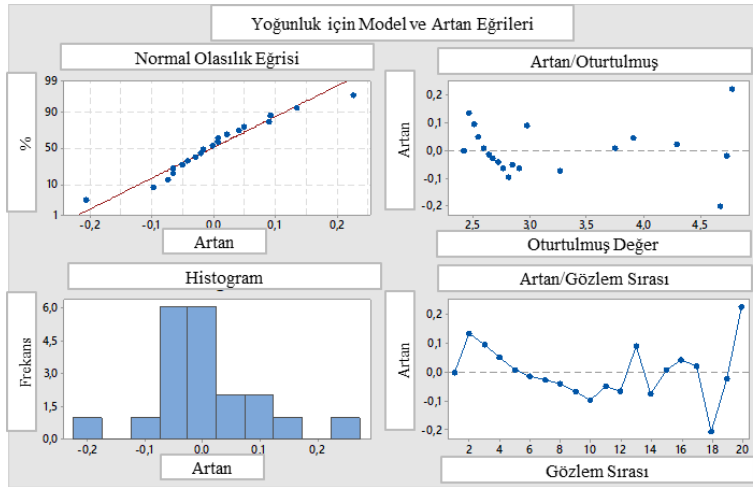


**Şekil 89.** Yoğunluk ile 6 aralıklı veri setinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları  
 Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 96.74'tür. Yoğunluk ve farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 90**'da verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 23. Bor cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerlerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 2,0254 + 0,003878 \text{ RV}_2 + 0,00346 \text{ RV}_4 + 0,00357 \text{ RV}_6 \text{ ve}$$

$$R^2 = \% 98.76$$



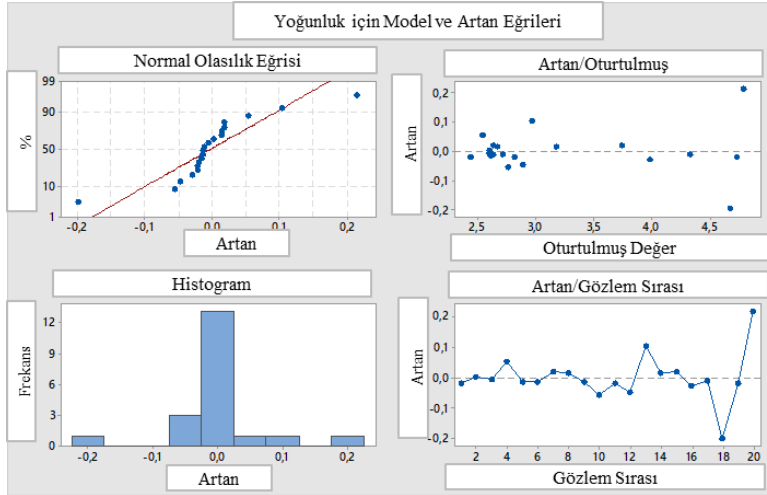
**Şekil 90.** Yoğunluk ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları  
 Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 98.76'dır. Bu sonuç yüksek güven aralığında yansıtma değeri ve

yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Nadir toprak ve kurşun-çinko cevherinde gözlemlenen etkiler bor cevherinde gözlemlenmediğinden 6'lı aralık veri setinin regresyon analizinin güven aralığı 4'lü ve 2'li veri setinin regresyon analizinin güven aralığından daha yüksektir. Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim değerlerinin incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 91**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 24. cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1,8795 + 0,003343 \text{ RV}_2 + 0,00309 \text{ KOLE\_HACİM}_2 + 0,00234 \text{ RV}_4 + 0,00267 \text{ KOLE\_HACİM}_4 + 0,00584 \text{ RV}_6 + 0,00406 \text{ KOLE\_HACİM}_6 \text{ ve}$$

$$R^2=99.17\%$$



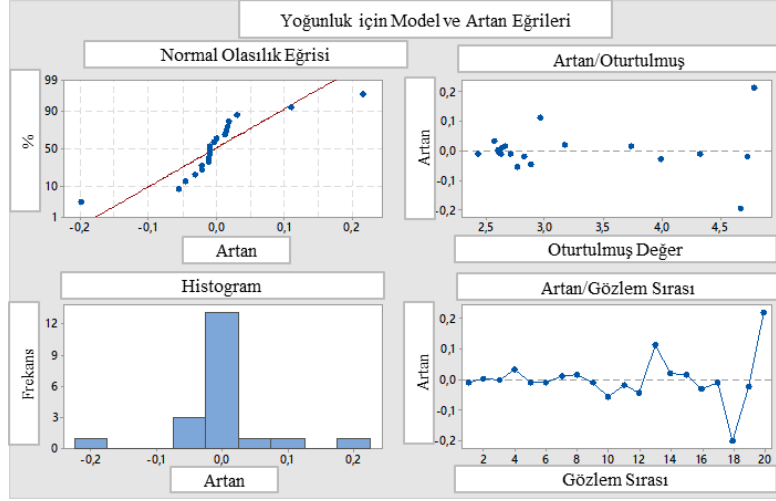
**Şekil 91.** Yoğunluk, hacim ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 99.17'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, yansıtma değeri ve yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Farklı veri setlerinin birlikte kullanımıyla güven aralığının daha da arttığı görülmektedir.

Yoğunluk ile farklı aralıklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, hacim değerleri ve tane sayılarının birlikte incelendiği analizde elde edilen regresyon eğrisi **Şekil 92**'de verilmiş olup elde edilen yoğunluk denklemi ve  $R^2$ 'si aşağıdaki gibidir:

Eşitlik 25. Bor cevheri farklı veri setlerinden elde edilen yansıtma değerleri, tane sayıları ve hacim verilerinin regresyon analizinden elde edilen yoğunluk denklemi

$$\text{Yoğunluk} = 1,856 + 0,003330 \text{ RV}_2 - 0,0029 \text{ KOLE\_HACİM}_2 + 0,0087 \text{ KOLE\_TANE SAY}_2 + 0,00244 \text{ RV}_4 + 0,00238 \text{ KOLE\_HACİM}_4 - 0,0002 \text{ KOLE\_TANE SAY}_4 + 0,00585 \text{ RV}_6 + 0,0045 \text{ KOLE\_HACİM}_6 - 0,0004 \text{ KOLE\_TANE SAY}_6 \text{ ve } R^2 = \% 99.17$$



**Şekil 92.** Yoğunluk, hacim, tane sayısı ve yansıtma değerlerinin regresyon analizinde kullanılan model çıktıları

Bu analizle birlikte yoğunluğun yansıtma değerleriyle olan ilişkisi denklemlerle belirlenmiş olup bu denklemin güven aralığı % 99.17'dir. Bu sonuç yüksek güven aralığında hacim, yansıtma değeri ve tane sayısı ile yoğunluk arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir. En yüksek güven aralığına bu sonuç ile ulaşılmıştır.

Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

- 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıktan elde edilen tüm verilerin birlikte kullanımı ile en yüksek güven aralığında yoğunluk için denklem elde edilmiştir,
- Bor cevherinde feldispat cevherine benzer şekilde gruplaşma gözlemlendiğinden 6'lı aralık veri setinin regresyon analizinin güven aralığı 4'lü ve 2'li veri setinin regresyon analizinin güven aralığından daha yüksektir,
- Bor cevherinde sadece 6'lı aralık veri seti ile yoğunluğun regresyon eğrisinin güven aralığı % 96.74'tür.

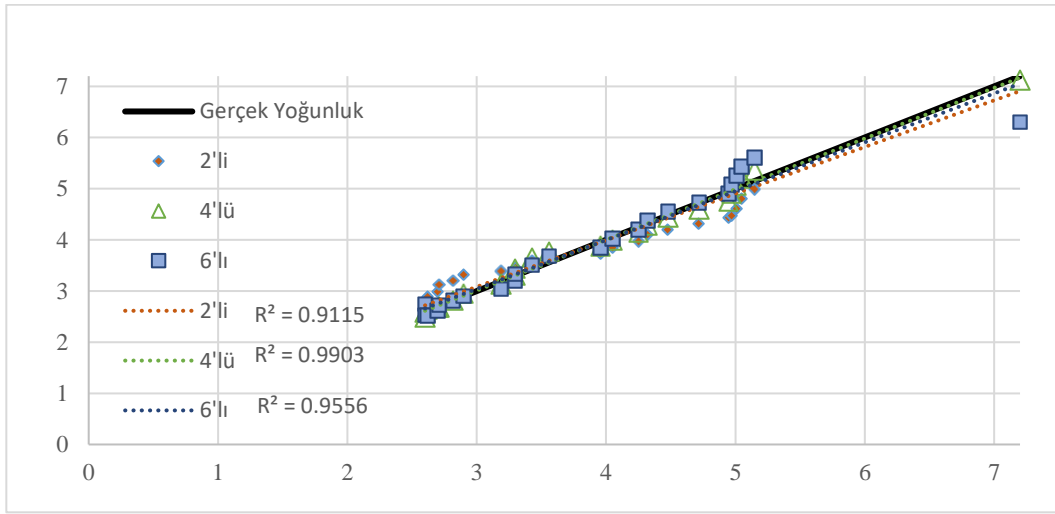
## 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, XRD, XRF ve ICP gibi yöntemlerle karakterize edilen cevher numunelerinden elde edilen iki boyutlu MLA veri setleri ile,  $\mu$ CT taramalarından elde edilen 3 boyutlu veriler karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda; feldispat, nadir toprak, bor ve kurşun-çinko cevherleri ile çalışılmıştır. Bu cevherler öncelikle MLA ile karakterize edilmiş ve mineral türleriyle bunların dağılımları incelenmiştir. Devamında eş numuneler ile kapsamlı  $\mu$ CT analizleri gerçekleştirilmiştir.  $\mu$ CT'den elde edilen görüntülere uygulanan görüntü iyileştirme yöntemleri ve 3 boyutlu görüntü analizlerinin ardından elde edilen veri setleri kendi içerisinde istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve MLA verileri arasındaki ilişki istatistiksel yöntemler olan betimsel (descriptive) istatistik, iki değişkenli korelasyon testi, bağımsız bileşen analizi (Principal Component Analysis - PCA) ve regresyon testleri ile araştırılarak, elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

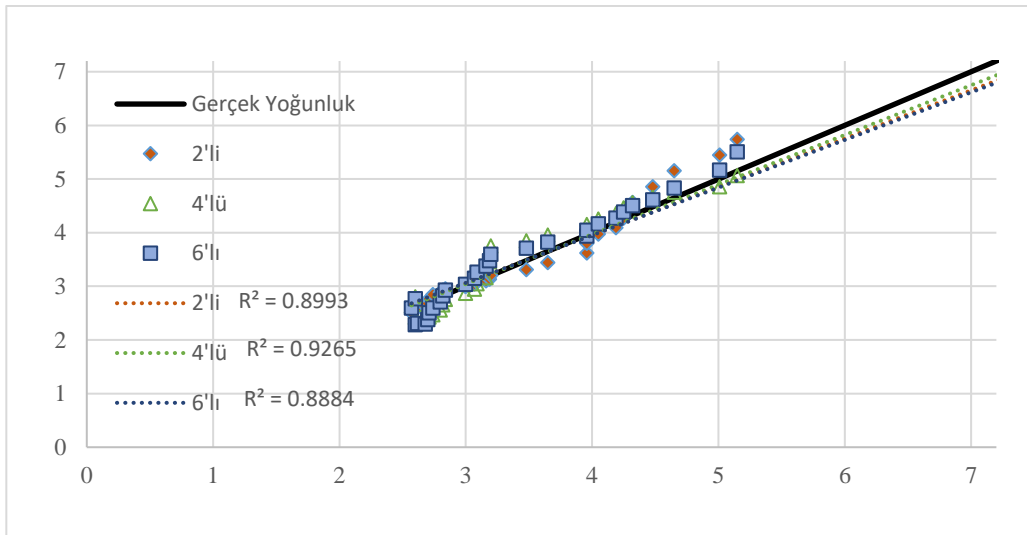
- 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıklı veri setlerinin çıkarılması, görüntü iyileştirme aşamalarında oluşabilecek veri kayıplarının da incelenmesini sağlamış ve tüm cevherler için 2'li, 4'lü ve 6'lı aralık değerleri incelendiğinde verilerin kendi içinde tutarlı olduğu ancak verilerin birbirinden farklı olduğu görülmüştür.
- Farklı veri setlerinin analiz çıktıları incelendiğinde 4'lü aralık veri setinin tek başına kullanımıyla da yüksek güven aralığında denklem elde edildiği gözlemlenmiştir. 6'lı veri setinin tek başına kullanımında gruplaşmanın fazla olması, 2'li aralık veri setinde ise artan detaydan dolayı görüntü iyileştirme aşamalarında veri kaybı oluşması sebebiyle bu veri setlerinin regresyon analizinden elde edilen denklemlerin güven aralığı daha düşüktür.
- MLA verileri ile  $\mu$ CT veri setleri arasında genel olarak yüksek şiddetli korelasyon gözlemlenememiş olması, cevherlerin karmaşıklığına ve içeriklerindeki yüksek attenüasyon katsayılarına sahip minerallerin miktarına bağlıdır.
- MLA'de tanımlanmış minerallerin yoğunluk aralıkları ve bu verilerin  $\mu$ CT'den elde edilen hacim, tane sayısı ve alan verileriyle karşılaştırılması amacıyla uygulanan PCA yöntemi sonucunda her bir cevherde mineral yoğunlukları ve yansıtma değerleri arasında ilişki olduğu gözlemlenmiştir.
- Farklı veri setleri ve yoğunluk aralıkları kullanılarak yapılan regresyon analizleri yapılmış ve bu doğrultuda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:



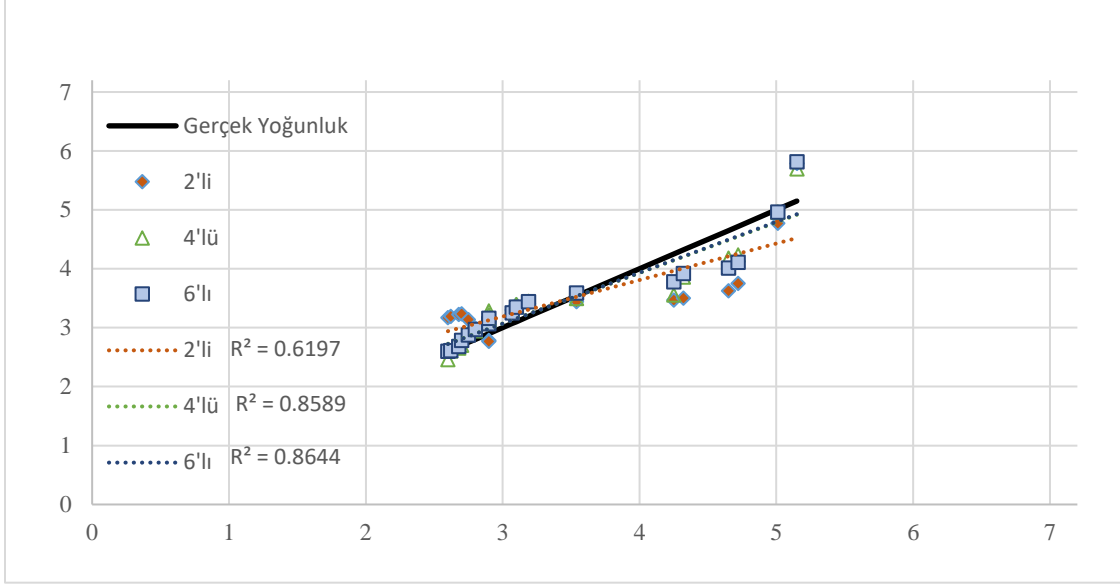
- Feldispat cevherinin 2'li aralık verileri haricinde tüm cevherlerin tüm veri setleri ile yoğunluğun belirlenmesine ilişkin yüksek güven aralıklı (>%85) ilişkiler gözlemlenmiştir,
- 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıktan elde edilen tüm verilerin birlikte kullanımı ile %99'lara varan güven aralığında yoğunluğun belirlenmesine ilişkin ilişki gözlemlenmiştir.
- En yüksek güven aralığının 2'li, 4'lü ve 6'lı aralıktan elde edilen tüm verilerin birlikte kullanımı ile elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Regresyon sonucunda elde edilen yoğunluk ilişkilerinden hesaplanmış yoğunluklar ve cevherlerdeki minerallerin gerçek yoğunlukları Şekil 93, Şekil 94, Şekil 95 ve Şekil 96'da verilmektedir.



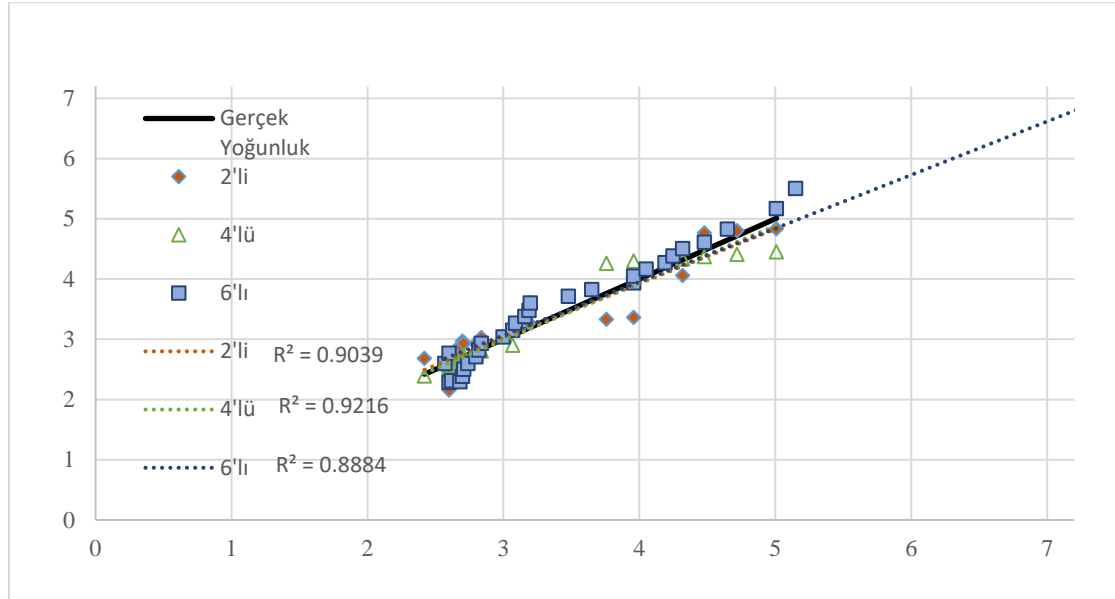
Şekil 93. Nadir toprak cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek)



Şekil 94. Kurşun-çinko cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek)



Şekil 95. Feldspat cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek)



Şekil 96. Bor cevherindeki minerallerin yoğunlukları (hesaplanan-gerçek)

- Görüntü iyileştirmede kullanılan eklentiler tek başına yeterli olmamakta, gözlemlenen impüriteler çoğunlukla cihazdan kaynaklanmaktadır. Nadir toprak ve kurşun-çinko cevherlerinde gözlemlenen impüriteler  $\mu$ CT cihazındaki X-ışını kaynağının sorunlu olması ile birlikte cevherler içerisinde bulunan barit galenit gibi yüksek attenüasyon katsayısına sahip minerallerin x-ışınlarını yansıtması ya da düşük enerjili x-ışınlarının bu mineral tanelerini de geçememesinden kaynaklanmaktadır.

- $\mu$ CT'nin şu aşamada mineral karakterizasyonunda tek başına kullanılacak bir cihaz olmadığını korelasyon sonuçları göstermektedir. Ancak; ICP, XRD, XRF, MLA gibi yöntemlerle karakterizasyonu yapılmış (içeriği bilinen) cevherlerin analiz çıktıları ile  $\mu$ CT'den elde edilecek farklı yansıtma değeri aralıklarına sahip veri setlerinin beraber kullanılması durumunda  $\mu$ CT ile yoğunluk tayinine yönelik önemli bulgular elde edilmiştir.
- Tez kapsamında uygulanan analizlerin çıktıları incelendiğinde  $\mu$ CT'nin karmaşık yapılı olmayan ve içinde yüksek attenüasyon katsayısına sahip az miktarda mineral bulunan cevherlerde; endüstriyel hammadde konsantrelerindeki ağır minerallerin varlığının tespiti yapılabilir.
- $\mu$ CT son yıllarda mineral karakterizasyonu hakkında pek çok çalışmaya konu olmuş tahribatsız ve 3 boyutlu bir görüntüleme yöntemidir. ICP, XRD, XRF, MLA gibi analitik karakterizasyon yöntemlerinden 3 boyutlu veriler elde edilememektedir.  $\mu$ CT cihazından elde edilecek 3 boyutlu veriler ile analitik karakterizasyon cihazlarından elde edilecek verilerin birbiriyle birlikte kullanılması cevherlerin karakterizasyonu için önemli olup; bu bağlamda  $\mu$ CT cihazı tamamlayıcı bir yöntem olması ile öne çıkmaktadır.

$\mu$ CT'de veri setinin eldesinde doğru aralıkların seçilmesi oldukça önemlidir. Yüksek aralıklı veri setlerinde gruplaşmalar artmakta bu da doğru bir karşılaştırma yapılmasını zorlaştırmaktadır. Düşük aralıkların kullanılması halinde ise detay fazla artacağından görüntü işleme aşamasında veri kayıpları oluşacak ve bu da doğru bir karşılaştırma yapılmasını zorlaştıracaktır.  $\mu$ CT cihazındaki x-ışını tüpünün sıkıntılı olması görüntülerde bazı impüritelere sebep olmuştur. Bu etkilerden bazıları uzun süreli taramalar yapıldığında giderilebilecek ve daha yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilecektir.  $\mu$ CT cihazından elde edilecek 3 boyutlu veriler ile diğer analitik cihazlardan elde edilen çıktıların beraber kullanılması, pek çok farklı çalışmanın önünü açacaktır.  $\mu$ CT cihazından elde edilecek çıktılar bu cihazlardan elde edilen çıktılar için tamamlayıcı özelliğe sahiptir.

## KAYNAKLAR

- [1] Wills BA, Finch JA., Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Oxford: Elsevier, **2016**.
- [2] Y. Wang, C. McClung, C.L. Lin, J.D. Miller, Stereological correction of perimeter based estimates of exposed grain surface area, Minerals Engineering, Volume 126, 64-73, **2018**.
- [3] Strelcić C., Wobrauschek P., Kregsamer P., Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition), 707–715, **2017**.
- [4] Gu, Ying., Automated Scanning Electron Microscope Based Mineral Liberation Analysis An Introduction to JKMRC/FEI Mineral Liberation Analyser. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 02. 33-41, **2003**.
- [5] Leißner T, Mütze T, Bachmann K, Rode S, Gutzmer J, Peuker UA., Evaluation of mineral processing by assessment of liberation and upgrading. Miner Eng. 53:171–173, **2013**.
- [6] Rolf Fandrich, Ying Gu, Debra Burrows, Kurt Moeller, Modern SEM-based mineral liberation analysis, International Journal of Mineral Processing, Volume 84, Issues 1–4, 310-320, **2007**.
- [7] F. Reyes, Q. Lin, O. Udoudo, C. Dodds, P.D. Lee, S.J. Neethling, Calibrated X-ray micro-tomography for mineral ore quantification, Minerals Engineering, Volume 110, 122-130, **2017**.
- [8] Sang Ho Cho, Mitsuhiro Yokota, Mayumi Ito, Satoru Kawasaki, Soo Bok Jeong, Byoung Kon Kim, Katsuhiko Kaneko, Electrical disintegration and micro-focus X-ray CT observations of cement paste samples with dispersed mineral particles, Minerals Engineering, Volume 57, 79-85, **2014**.
- [9] Little L., Becker M., Wiese J., Mainza A.N., Auto-SEM particle shape characterisation: Investigating fine grinding of UG2 ore, Minerals Engineering 82, 92–100, **2015**.

- [10] Little L., Mainza A.N., Becker M., Wiese J.G Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture, *Powder Technology* 301, 794–804, **2016**.
- [11] Zhao Y., Suna Y., Liud S., Chene Z., Yuana L., Pore structure characterization of coal by synchrotron radiation nano-CT, *Fuel* 215, 102–110, **2018**.
- [12] Wenz, M. D., Jacobsen, S. D., Zhang, D., Regier, M., Bausch, H. J., Dera, P. K., Rivers, M., Eng, P., Shirey, S. B. & Pearson, D. G. , Fast identification of mineral inclusions in diamond at GSECARS using synchrotron X-ray microtomography, radiography and diffraction, *J. Synchrotron Rad.* 26, 1763-1768, **2019**.
- [13] Ying Da Wang, Mehdi Shabaninejad, Ryan T. Armstrong, Peyman Mostaghimi, Physical Accuracy of Deep Neural Networks for 2D and 3D Multi-Mineral Segmentation of Rock micro-CT Images, **2020**.
- [14] Guilherme José Ramos Oliveira, Daniela Gomes Horta, Fabiane Leocádia da Silva, Fernando Leopoldo von Krüger, Fernando Gabriel da Silva Araújo & Douglas Batista Mazzinghy, Determination of Mineral Liberation of a Bauxite Ore Based on 3D Compositional and Textural Characteristics Using X-ray Microtomography, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43:8, 978-988, **2022**.
- [15] Guilherme José Ramos Oliveira, Daniela Gomes Horta, Fabiane Leocádia da Silva, Fernando Leopoldo von Krüger, Guilherme Jorge Brigolini Silva & Douglas Batista Mazzinghy, Evaluation of mineral liberation and stereological bias based on X-ray microtomography and scanning electron microscopy for an iron ore tailing, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 131:3, 250-259, **2022**.
- [16] Tung, P.K.M.; Halim, A.Y.; Wang, H.; Rich, A.; Marjo, C.; Regenauer-Lieb, K. Deep-XFCT: Deep Learning 3D-Mineral Liberation Analysis with Micro-X-ray Fluorescence and Computed Tomography. *Energies*, 15, 5326, **2022**.
- [17] Kunning Tang, Ying Da Wang, Peyman Mostaghimi, Mark Knackstedt, Chad Hargrave, Ryan T. Armstrong, Deep convolutional neural network for 3D mineral identification and liberation analysis, *Minerals Engineering*, Volume 183, **2022**.

- [18] Liu, Xiu-yang & Xu, Ding-Ping & Jiang, Quan, An Insight into the Mechanical and Fracture Characterization of Minerals and Mineral Interfaces in Granite Using Nanoindentation and Micro X-Ray Computed Tomography. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **2023**.
- [19] Spiess, L. & Gerd, Teichert & Schwarzer, Robert & Behnken, Herfried & Genzel, Christoph. Röntgenographische Spannungsanalyse, In: *Moderne Röntgenbeugung*, B, **2009**.
- [20] J. Epp, X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization, Editor (s): Gerhard Hübschen, Iris Altpeter, Ralf Tschuncky, Hans-Georg Herrmann, *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Woodhead Publishing, 81-124, **2016**.
- [21] Garnier, Emmanuel, *Powder Diffraction. Theory and Practice*. Edited by R. E. Dinnebier and S. J. L. Billinge. Cambridge: RSC Publishing, **2008**.
- [22] Alderton, D. *X-Ray Diffraction (XRD)*, **2020**.
- [23] Hailey S. Reynolds, Rahul Ram, Fiona A. Charalambous, Frank Antolasic, James Tardio, Suresh Bhargava, Characterisation of a uranium ore using multiple X-ray diffraction based methods, *Minerals Engineering*, Volume 23, Issue 9, 739-745, **2010**.
- [24] P. Escárate, D. Bailo, A. Guesalaga, V. Rossi Albertini, Energy dispersive X-ray diffraction spectroscopy for rapid estimation of calcite in copper ores, *Minerals Engineering*, Volume 22, Issue 6, 566-571, **2009**.
- [25] Luke J. Kirwan, Francis A. Deeney, Gerard M. Croke, Kieran Hodnett, Characterisation of various Jamaican bauxite ores by quantitative Rietveld X-ray powder diffraction and  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopy, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 91, Issues 1–2, 14-18, **2009**.
- [26] Akash Behera, Smruti Ranjan Sahu, Dharampal Singh Kandari, Kishan Singh Rawat, Ms Sulekha Varma, X-Ray Diffraction Analysis Of Bauxite Ore In Central Peninsular, India. *EEO*, 20 (3), 3945-3951, **2021**.
- [27] Johan P.R. de Villiers, Liming Lu, Chapter 3— Quantitative XRD analysis and evaluation of iron ore, sinter, and pellets, Editor(s): Liming Lu, In *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*, *Iron Ore (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 109-126, **2022**.

- [28] Keiko Sasaki, Ikumi Suyama, Yuji Aoki, Kojo T. Konadu, Cindy, Chitiphon Chuaicham, Hajime Miki, Tsuyoshi Hirajima, Significance of Fe contents on the surface of the gold ores in gold leaching by thiourea and ethylene thiourea, *Minerals Engineering*, Volume 191, **2023**.
- [29] Michael W. Jones, Robert M. Adlington, Jack E. Baldwin, Delphine D. Le Pevelen, Nicolas Smiljanic, New mononuclear Pd(II) complexes of sterically hindered bispyrazolylmethanes, *Inorganica Chimica Acta*, Volume 363, Issue 6, **2010**.
- [30] Utz Kramar, X-Ray Fluorescence Spectrometers\*, Editor (s): John C. Lindon, *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Second Edition)*, Academic Press, 2989-2999, **1999**.
- [31] Christina Strelj, P. Wobrauschek, P. Kregsamer, X-ray Fluorescence Spectroscopy, Applications, Editor (s): John C. Lindon, *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Elsevier, 2478-2487, **1999**.
- [32] Navid Khajehzadeh, Olli Haavisto, Lauri Koresaar, On-stream mineral identification of tailing slurries of an iron ore concentrator using data fusion of LIBS, reflectance spectroscopy and XRF measurement techniques, *Minerals Engineering*, Volume 113, Pages 83-94, **2017**.
- [33] I.F. Seregina, A.I. Volkov, K. Ossipov, M.A. Bolshov, Characterization of REE-Nb ores by a combination of spectrochemical techniques, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Volume 148, Pages 172-182, **2018**.
- [34] A. Tanhua, M. Peltoniemi, R. Kallio, S. Peräniemi, S. Luukkanen, The effects of dry grinding and chemical conditioning during grinding on the flotation response of a Cu-Zn sulphide ore and a spodumene pegmatite silicate ore, *Minerals Engineering*, Volume 189, **2022**.
- [35] Butcher, A.R., Helms, T.A., Gottlieb, P., Bateman, R., Ellis, S. & Johnson, N.W., Advances in the quantification of gold deportment by QEMSCAN. In *Seventh Mill Operators Conference*, Kalgoorlie, AusIMM, 267–272, **2000**.
- [36] Schulz, B.; Merker, G.; Gutzmer, J. Automated SEM Mineral Liberation Analysis (MLA) with Generically Labelled EDX Spectra in the Mineral Processing of Rare Earth Element Ores. *Minerals* 9, 527, **2019**.
- [37] Pratama Istiadi Guntoro, Glaciale Tiu, Yousef Ghorbani, Cecilia Lund, Jan Rosenkranz, Application of machine learning techniques in mineral phase segmentation for X-ray microcomputed tomography ( $\mu$ CT) data, *Minerals Engineering*, Volume 142, **2019**.

- [38] Ghadiri, M., Harrison, S.T.L., Fagan-Endres, M.A., Quantitative X-ray CT Measurement of the Effect of Ore Characteristics on Non-Surface Mineral Grain Leaching. *Minerals*, vol. 10, 9, **2020**, pp. 746.
- [39] Rolf Fandrich, Ying Gu, Debra Burrows, Kurt Moeller, Modern SEM-based mineral liberation analysis, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 84, Issues 1–4, Pages 310-320, **2007**.
- [40] Salah A. Al-Khribash, Mineralogical characterization of low-grade nickel laterites from the North Oman Mountains: Using mineral liberation analyses – scanning electron microscopy-based automated quantitative mineralogy, *Ore Geology Reviews*, Volume 120, **2020**.
- [41] Ford, F.D., Wercholaz, C.R. & Lee, A., Predicting process outcomes for Sudbury platinum-group minerals using grade-recovery modelling from Mineral Liberation Analyzer (MLA) data. *Can Mineral* 49, 1627 – 1642, **2011**.
- [42] Lowe, D.G., Sylwester, P.J. & Enachescu, M.E., Provenance and paleodrainage patterns of Upper Jurassic and Lower Cretaceous synrift sandstones in the Flemish Pass Basin, offshore Newfoundland, east coast of Canada. *AAPG Bull.* 95, 1295–1320, **2011**.
- [43] Mostafa Redwan, Dieter Rammlmair, Jeannet A. Meima, Application of mineral liberation analysis in studying micro-sedimentological structures within sulfide mine tailings and their effect on hardpan formation, *Science of The Total Environment*, Volume 414, 480-493, **2012**.
- [44] Joanna Pszonka, Bernhard Schulz, Dariusz Sala, Application of mineral liberation analysis (MLA) for investigations of grain size distribution in submarine density flow deposits, *Marine and Petroleum Geology*, Volume 129, **2021**.
- [45] Will R. Goodall, Peter J. Scales, An overview of the advantages and disadvantages of the determination of gold mineralogy by automated mineralogy, *Minerals Engineering*, Volume 20, Issue 5, Pages 506-517, **2007**.
- [46] Oktay Celep, Ersin Y. Yazici, Pelin Altinkaya, Haci Deveci, Characterization of a refractory arsenical silver ore by mineral liberation analysis (MLA) and diagnostic leaching, *Hydrometallurgy*, Volume 189, **2019**.



- [47] Zhang, Xl., Kou, J., Sun, Cb. et al. Mineralogical characterization of copper sulfide tailings using automated mineral liberation analysis: A case study of the Chambishi Copper Mine tailings. *Int J Miner Metall Mater* 28, 944–955, **2021**.
- [48] Liu, Q.; Liu, R.; Yang, S.; Feng, W.; Wang, M. Removal Mechanism of Mineral Impurities in Molybdenum Concentrate Treatment Process, **2023**.
- [49] Benvie B., Mineralogical imaging of kimberlites using SEM-based techniques, *Minerals Engineering* 20, 435–443, **2007**.
- [50] Hounsfield, G.N., Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography). Part 1. Description of System. *The British Journal of Radiology*, 46, 1016-1022, **1973**.
- [51] Y. Wang, J.D. Miller, Current developments and applications of micro-CT for the 3D analysis of multiphase mineral systems in geometallurgy *Earth-Science Reviews*, Volume 211, **2020**.
- [52] Stock, S.R., Recent advances in X-ray microtomography applied to materials. *Int. Mater. Rev.* 53 (3), 129–181, **2008**.
- [53] V. Cnudde, M.N. Boone, High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications, *Earth-Science Reviews*, Volume 123, 2013, 1-17, **2013**.
- [54] McCullough, E.C., Photon attenuation in computed tomography. *Med. Phys.* 2 (6), 307–320, **1975**.
- [55] Maire, E., Withers, P.J., Quantitative X-ray tomography. *Int. Mater. Rev.* 59 (1), 1–43, **2014**.
- [56] Grabska, I., Fabiszewska, E., Pasicz, K., Skrzyński, W., Estimation of the effective focal spot sizes in medical diagnostic X-ray tube assemblies. *Polish J. Med. Phys. Eng.* 22 (2), 25–33, **2016**.
- [57] De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J.-P., Schmitt, R., Weckenmann, A., Industrial applications of computed tomography. *CIRP Ann.* 63 (2), 655–677, **2014**.
- [58] Varga, P., Weber, L., Hesse, B., Langer, M., Synchrotron X-ray phase nanotomography for bone tissue characterization. In: *X-ray and Neutron Techniques for Nanomaterials Characterization*. Springer, Berlin, Germany, 1–42, **2016**.

- [59] Flisch, A., Wirth, J., Zanini, R., Breitenstein, M., Rudin, A., Wendt, F., Mnich, F., Golz, R., Industrial computed tomography in reverse engineering applications. *DGZ-fP- Proc. BB 4 (7)*, 45–53, **1999**.
- [60] Hofmann, J., Flisch, A., Obrist, A., Adaptive CT scanning—mesh based optimisation methods for industrial X-ray computed tomography applications. *NDT E Int.* 37 (4), 271–278, **2004**.
- [61] Khadivi, K.O., Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications. *Med. Phys.* 3, **2006**.
- [62] Zheng, Y., Rogowska, M., Yang, Y., Gundlach, C., Micro-CT in situ study of carbonate rock microstructural evolution for geologic CO<sub>2</sub> storage. In: Müller, B., Wang, G. (Eds.), *Proceedings SPIE 10391, Developments in X-Ray Tomography XI*, **2017**.
- [63] Geyer, L.L., Schoepf, U.J., Meinel, F.G., Nance, J.W., Bastarrika, G., Leipsic, J.A., Paul, N. S., Rengo, M., Laghi, A., De Cecco, C.N., State of the art: Iterative CT reconstruction techniques. *Radiology* 276 (2), 339–357, **2015**.
- [64] D. Wolf, A. Lubk, H. Lichte, Weighted simultaneous iterative reconstruction technique for single-axis tomography, *Ultramicroscopy*, Volume 136, 15-25, **2014**.
- [65] Fontarensky, Mikael & Alfidja, Agaïcha & Perignon, Renan & Schoenig, Arnaud & Perrier, Christophe & Mulliez, Aurelien & Guy, Lauryn & Boyer, Louis, Reduced Radiation Dose with Model-based Iterative Reconstruction versus Standard Dose with Adaptive Statistical Iterative Reconstruction in Abdominal CT for Diagnosis of Acute Renal Colic. *Radiology*. 276. 141287. 10.1148, **2015**.
- [66] Hansen, P.C., Jørgensen, J.S. AIR Tools II: algebraic iterative reconstruction methods, improved implementation. *Numer Algor* 79, 107–137, **2018**.
- [67] Maire, E., Buffière, J.Y., Salvo, L., Blandin, J.J., Ludwig, W., Létang, J.M., On the application of X-ray microtomography in the field of materials science. *Adv. Eng. Mater.* 3 (8), 539–546, **2001**.
- [68] Landis, E.N., Keane, D.T., X-ray microtomography. *Mater. Charact.* 61 (12), 1305–1316, **2010**.
- [69] Leipsic, J., Heilbron, B.G., Hague, C., Iterative reconstruction for coronary CT angiography: Finding its way. *Int. J. Card. Imaging* 28 (3), 613–620, **2012**.

- [70] Kinney, J.H., Johnson, Q.C., Nichols, M.C., Bonse, U., Saroyan, R.A., Nusshardt, R., Pahl, R., X-ray microtomography on beamline X at SSRL. *Rev. Sci. Instrum.* 60 (7), 2471–2474, **1989**.
- [71] Sijbers, J., Postnov, A., Reduction of ring artefacts in high resolution micro-CT reconstructions. *Phys. Med. Biol.* 49 (14), 247–253, **2004**.
- [72] Kyriakou, Y., Prell, D., Kalender, W.A., Ring artifact correction for high-resolution micro CT. *Phys. Med. Biol.* 54 (17), 385–391, **2009**.
- [73] Eldib, M.E., Hegazy, M., Mun, Y.J., Cho, Myung Hye, Cho, Min Hyung, Lee, S.Y., A ring artifact correction method: Validation by micro-CT imaging with flat-panel detectors and a 2D photon-counting detector. *Sensors (Basel)*. 17 (2), 26, **2017**.
- [74] Prell, Daniel & Kyriakou, Yiannis & Kalender, Willi., Comparison of ring artifact correction methods for flat-detector CT. *Physics in medicine and biology*. 54. 3881-95, **2009**.
- [75] Abu Anas, E.M., Kim, J.G., Lee, S.Y., Hasan, M.K., Comparison of ring artifact removal methods using flat panel detector based CT images. *Biomed. Eng. Online* 10 (1), 72, **2011**.
- [76] Brooks, R.A., Di Chiro, G., Beam hardening in X-ray reconstructive tomography. *Phys. Med. Biol.* 21 (3), 390–398, **1976**.
- [77] Hammersberg, P., Mångård, M., Correction for beam hardening artefacts in computerised tomography. *J. X-ray Sci. Technol.* 8 (1), 75–93, **1998**.
- [78] Meganck, J.A., Kozloff, K.M., Thornton, M.M., Broski, S.M., Goldstein, S.A., Beam hardening artifacts in micro-computed tomography scanning can be reduced by X-ray beam filtration and the resulting images can be used to accurately measure BMD. *Bone* 45 (6), 1104–1116, **2009**.
- [79] Erlandsson, K., Buvat, I., Pretorius, P.H., Thomas, B.A., Hutton, B.F., A review of partial volume correction techniques for emission tomography and their applications in neurology, cardiology and oncology. *Phys. Med. Biol.* 57 (21), 119–159, **2012**.
- [80] Cal-Gonzalez, J., Li, X., Heber, D. et al. Partial volume correction for improved PET quantification in <sup>18</sup>F-NaF imaging of atherosclerotic plaques. *J. Nucl. Cardiol.* 25, 1742–1756, **2018**.

- [81] Jomaa, H., Mabrouk, R., Khelifa, N., Partial volume effect correction in PET image using iterative deconvolution and shearlet transform. In: 2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). IEEE, **2018**, pp. 1–6.
- [82] Schulze, R., Heil, U., Grob, D., Bruellmann, D.D., Dranischnikow, E., Schwanecke, U., Schoemer, E., Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofacial Radiol.* 40 (5), 265–273, **2011**.
- [83] Du Plessis, A., Broeckhoven, C., Guelpa, A., Gerhard Le Roux, S., Laboratory x-ray micro-computed tomography: a user guideline for biological samples. *GigaScience* 6 (6), 1–11, **2017**.
- [84] Berger, M.J., Hubbell, J.H., XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer (No. NBSIR-87-3597). National Bureau of Standards, Washington, DC (USA), **1987**.
- [85] Lin, C.L., Hsieh, C.H., Tserendagva, T.A., Miller, J.D., Dual energy rapid scan radiography for geometallurgy evaluation and isolation of trace mineral particles. *Miner. Eng.* 40, 30–37, **2013**.
- [86] Maire, E., Colombo, P., Adrien, J., Babout, L., Biasetto, L., Characterization of the morphology of cellular ceramics by 3D image processing of X-ray tomography. *J. Eur. Ceram. Soc.* 27 (4), 1973–1981, **2007**.
- [87] Iassonov, P., Gebrenegus, T., Tuller, M., Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: a crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. *Water Resour. Res.* 45, **2009**.
- [88] Singh, T.R., Roy, S., Singh, O.I., Sinam, T., Singh, K.M., A new local adaptive thresholding technique in binarization. *Int. J. Computer. Sci. Issues* 8 (6), 271–277, **2012**.
- [89] Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat. Methods* 9, 676–682, **2012**.
- [90] Garboczi, E.J., Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: application to aggregates used in concrete. *Cem. Concr. Res.* 32 (10), 1621–163, **2002**.
- [91] Erdoğan, S.T., Garboczi, E.J., Fowler, D.W., Shape and size of microfine aggregates: X-ray microcomputed tomography vs. laser diffraction. *Powder Technol.* 177 (2), 53–63, **2007**.

- [92] Devarrewaere, W., Foqu'e, D., Heimbach, U., Cantre, D., Nicolai, B., Nuyttens, D., Verboven, P., Quantitative 3D shape description of dust particles from treated seeds by means of X-ray micro-CT. *Environ. Sci. Technol.* 49 (12), 7310–7318, **2015**.
- [93] Wang, Y., Lin, C.L., Miller, J.D., 3D image segmentation for analysis of multisize particles in a packed particle bed. *Powder Technol.* 301, 160–168, **2016**.
- [94] Furat, O., Leißner, T., Ditscherlein, R., Sedivý, O., Weber, M., Bachmann, K., Gutzmer, J., Peuker, U., Schmidt, V., Description of ore particles from X-ray microtomography (XMT) images, supported by scanning electron microscope (SEM)-based image analysis. *Microsc. Microanal.* 24 (5), 461–470, **2018**.
- [95] LIN, C. & Miller, Jan & Cortes, Brayan & Galery, Roberto, Coal Washability Analysis by X-ray Computed Tomography. *Coal Preparation.* 9. 107-119, **2007**.
- [96] Gay, S.L., Morrison, R.D., Using two dimensional sectional distributions to infer three dimensional volumetric distributions-validation using tomography. *Part. Part. Syst. Charact.* 23 (3-4), 246–253, **2006**.
- [97] Ueda, T., Oki, T., Koyanaka, S., Statistical effect of sampling particle number on mineral liberation assessment. *Miner. Eng.* 98, 204–212, **2016**.
- [98] Wang, Y., Lin, C.L., Miller, J.D., Improved 3D image segmentation for X-ray tomographic analysis of packed particle beds. *Miner. Eng.* 83, 185–191, **2015**.
- [99] Y. Wang, C.L. Lin, J.D. Miller, Quantitative analysis of exposed grain surface area for multiphase particles using X-ray microtomography, *Powder Technology*, Volume 308, 368-377, **2017**.
- [100] Lin, C.L., Miller, J.D., 3D characterization and analysis of particle shape using X-ray microtomography (XMT). *Powder Technol.* 154 (1), 61–69, **2005**.
- [101] Lin, C.L. & Garcia, C.. Microscale characterization and analysis of particulate systems via cone-beam X-ray microtomography (XMT). *Proceedings of the Jan D. Miller Symposium - Innovations in Natural Resource Processing.* 2005. 421-432, **2005**.
- [102] Howard, L.E. & Elangovan, Premkumar & Dominy, Simon & Armstrong, Robin & Hezel, Dominik & Abel, Richard. Characterisation of gold ores by X-ray computed tomography - Part 1:

Software for calibration and quantification of mineralogical phases. GeoMet 2011 - 1st AusIMM International Geometallurgy Conference 2011, 321-330, **2011**.

[103] Wang, Y., McClung, C., Lin, C.L., Miller, J.D., Stereological correction of perimeter based estimates of exposed grain surface area. *Miner. Eng.* 126, 64–73, **2018**.

[104] Reyes, Francisco & Lin, Qingyang & Cilliers, J.J. & Neethling, Stephen., Quantifying mineral liberation by particle grade and surface exposure using X-ray microCT. *Minerals Engineering*. 125. 75-82, **2018**.

[105] Takao Ueda, Tatsuya Oki, Shigeki Koyanaka, Experimental analysis of mineral liberation and stereological bias based on X-ray computed tomography and artificial binary particles, *Advanced Powder Technology*, Volume 29, Issue 3, 462-470, **2018**.

[106] Takao Ueda, Experimental validation of a statistical reliability method for the liberation distribution measurement of ore particles, *Minerals Engineering*, Volume 140, **2019**.

[107] Wenz, Michelle & Jacobsen, Steven & Zhang, Dongzhou & Regier, Margo & Bausch, Hannah & Dera, Przemyslaw & Rivers, Mark & Eng, Peter & Shirey, Steven & Pearson, Graham., Fast identification of mineral inclusions in diamond at GSECARS using synchrotron X-ray microtomography, radiography and diffraction. *Journal of Synchrotron Radiation*, **2019**.

[108] Guilherme José Ramos Oliveira, Daniela Gomes Horta, Fabiane Leocádia da Silva, Fernando Leopoldo von Krüger, Guilherme Jorge Brigolini Silva & Douglas Batista Mazzinghy, Evaluation of mineral liberation and stereological bias based on X-ray microtomography and scanning electron microscopy for an iron ore tailing, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 131:3, 250-259, **2022**.

[109] Guilherme José Ramos Oliveira, Daniela Gomes Horta, Fabiane Leocádia da Silva, Fernando Leopoldo von Krüger, Fernando Gabriel da Silva Araújo & Douglas Batista Mazzinghy, Determination of Mineral Liberation of a Bauxite Ore Based on 3D Compositional and Textural Characteristics Using X-ray Microtomography, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43:8, 978-988, **2022**.

[110] Jin, J., Lin, CL., Miller, J.D. et al. X-ray Computed Tomography Evaluation of Crushed Copper Sulfide Ore for Pre-concentration by Ore Sorting. *Mining, Metallurgy & Exploration* 39, 13–21, **2022**.

- [111] Jennifer L. Green, Sarah E. Manski, Timothy A. Hansen, Jennifer E. Broatch, Descriptive statistics, Editor(s): Robert J Tierney, Fazal Rizvi, Kadriye Ercikan, International Encyclopedia of Education (Fourth Edition), Elsevier, 723-733, **2023**.
- [112] Everitt, B. S.; Skrondal, A., The Cambridge Dictionary of Statistics, Cambridge University Press, **2010**.
- [113] Vogt, W.P. Dictionary of Statistics & Methodology: A Nontechnical Guide for the Social Sciences. SAGE, **2005**.
- [114] Wheelan, C., Naked Statistics. W. W. Norton & Company, **2014**.
- [115] Maddala, G. S.; Lahiri, Kajal, Introduction to Econometrics (Fourth ed.). Chichester: Wiley. pp. 155–160, **2009**.
- [116] Aldrich, John ‘Fisher and Regressio’. Statistical Science. 20 (4): 401–417, **2005**.
- [117] David A. Freedman, Statistical Models: Theory and Practice. Cambridge University Press, **2009**.
- [118] Bishara, A. J., & Hittner, J. B., Testing the significance of a correlation with nonnormal data: Comparison of Pearson, Spearman, transformation, and resampling approaches. Psychological Methods, 17(3), 399–417, **2012**.
- [119] George, D. and Mallery, M., SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 Update, 10th Edition, Pearson, Boston, **2010**
- [120] Brereton R.G., Introduction to multivariate calibration in analytical chemistry, Analyst, 125, 2125-2154, **2000**.
- [121] Emmel, N. Sampling and choosing cases in qualitative research: A realist approach. London: Sage, **2013**.
- [122] <https://www.mindat.org/> (Erişim tarihi: **25 Ekim 2022**)
- [123] <https://www.webmineral.com/> (Erişim tarihi: **28 Ekim 2022**)

## EKLER

RV _2	NTO_HA CİM 2	NTO_TANE SAY_2	RV _4	NTO_HA CİM 4	NTO_TANE SAY_4	RV _6	NTO_HA CİM 6	NTO_TANE SAY_6
76	12.80	13.99	77	20.85	23.01	78	31.10	33.06
78	4.14	4.33	81	10.34	12.26	84	16.54	21.38
80	5.33	5.93	85	8.63	11.26	90	13.43	14.20
82	4.07	3.76	89	7.09	8.21	96	13.75	10.11
84	2.28	2.67	93	9.35	7.41	102	11.69	7.85
86	3.37	4.29	97	11.28	8.22	108	6.66	5.66
88	2.03	2.40	101	11.02	7.75	114	3.18	3.28
90	2.91	3.41	105	6.86	5.58	120	1.78	2.11
92	5.65	5.21	109	4.01	3.99	126	1.56	1.86
94	7.73	6.46	113	2.26	2.51	132	0.16	0.26
96	6.17	5.53	117	4.47	4.93	138	0.06	0.10
98	8.29	6.79	121	2.65	3.16	144	0.04	0.07
100	7.61	6.26	125	0.99	1.35	150	0.02	0.03
102	6.39	5.31	129	0.09	0.15	156	0.01	0.01
104	5.25	4.88	133	0.06	0.10	162	0.00	0.00
106	3.99	4.01	137	0.03	0.04	168	0.00	0.00
108	3.39	3.79	141	0.02	0.04	174	0.00	0.00
110	2.04	2.47	145	0.02	0.02	180	0.00	0.00
112	0.62	0.85	149	0.01	0.01	186	0.00	0.00
114	3.90	4.72	153	0.00	0.00	192	0.00	0.00
116	1.53	2.13	157	0.00	0.00	198	0.00	0.00
120	0.24	0.37	161	0.00	0.00	204	0.00	0.00
124	0.18	0.30	165	0.00	0.00	210	0.00	0.00
190	0.08	0.15	211	0.00	0.00	234	0.00	0.00

Ek 1. Nadir Toprak cevheri  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri



RV _2	KÇ_HAC İM 2	KÇ_TANE SAY_2	RV _4	KÇ_HAC İM 4	KÇ_TANE SAY_4	RV _6	KÇ_HAC İM 6	KÇ_TANE SAY_6
26	26.92	23.50	25	46.12	36.68	30	69.28	47.62
28	27.29	20.58	28	33.11	25.92	36	16.29	28.16
30	19.50	17.52	33	13.86	17.66	42	13.01	11.89
32	12.40	13.01	37	4.66	9.75	48	0.62	4.75
34	6.28	8.82	41	1.37	4.50	54	0.13	1.39
36	3.89	6.59	45	0.44	2.36	60	0.09	0.73
38	1.72	3.60	49	0.14	1.05	66	0.12	0.97
40	0.86	1.97	53	0.03	0.30	72	0.06	0.49
42	0.50	1.40	57	0.03	0.20	78	0.05	0.49
44	0.21	0.90	61	0.03	0.17	84	0.07	0.48
46	0.23	1.05	65	0.03	0.16	90	0.05	0.36
48	0.11	0.60	69	0.05	0.28	96	0.02	0.20
50	0.02	0.13	73	0.00	0.02	102	0.01	0.16
52	0.00	0.03	77	0.01	0.06	108	0.03	0.31
54	0.01	0.08	81	0.03	0.17	114	0.03	0.31
56	0.01	0.04	93	0.02	0.13	120	0.00	0.01
61	0.05	0.12	105	0.00	0.04	126	0.01	0.19
68	0.01	0.02	109	0.00	0.00	132	0.01	0.18
77	0.00	0.01	113	0.01	0.05	138	0.01	0.13
89	0.00	0.01	117	0.00	0.00	144	0.01	0.19
101	0.00	0.01	121	0.00	0.00	150	0.01	0.14
113	0.00	0.00	125	0.00	0.00	156	0.03	0.25
121	0.00	0.00	129	0.00	0.03	162	0.01	0.13
133	0.00	0.02	133	0.01	0.11	168	0.01	0.12
153	0.00	0.00	137	0.00	0.03	174	0.02	0.26
173	0.00	0.00	141	0.01	0.05	180	0.01	0.11
193	0.00	0.00	145	0.00	0.01	192	0.00	0.01
213	0.00	0.00	149	0.00	0.02	210	0.00	0.00
233	0.00	0.00	157	0.01	0.08	228	0.00	0.00
249	0.00	0.00	209	0.01	0.15	246	0.00	0.00

Ek 2. Kurşun-çinko cevheri  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri

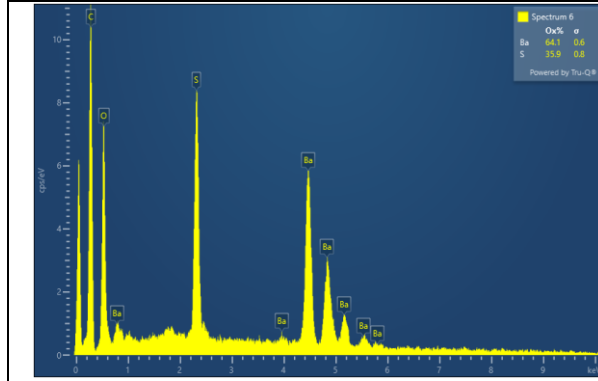
RV_2	FELD_HACİM_2	FELD_TAN E SAY_2	RV_4	FELD_H ACİM 4	FELD_TAN E SAY_4	RV_6	FELD_HACİM_6	FELD_TAN E SAY_6
40	0.11	0.67	41	1.52	13.23	42	7.59	35.60
42	0.13	0.81	45	1.41	10.70	48	30.80	25.67
44	0.09	0.31	49	30.42	27.20	54	54.43	32.35
46	0.39	1.08	53	57.97	42.99	60	3.67	3.35
48	2.53	7.16	57	2.66	7.88	66	0.83	0.86
50	32.33	19.39	61	4.45	8.86	72	0.18	0.22
52	49.48	32.91	65	0.42	0.76	78	0.45	0.44
54	10.98	29.45	69	0.09	0.23	84	0.65	0.45
56	1.23	3.94	73	0.06	0.11	90	0.58	0.21
58	0.76	0.96	77	0.05	0.13	96	0.02	0.05
60	0.53	0.83	81	0.04	0.10	102	0.02	0.04
62	0.20	0.39	85	0.06	0.14	111	0.04	0.08
64	0.26	0.45	89	0.57	0.28	123	0.03	0.13
67	0.29	0.59	113	0.06	0.24	132	0.09	0.22
77	0.22	0.45	137	0.03	0.12	138	0.26	0.16
87	0.28	0.35	141	0.05	0.08	144	0.24	0.07
171	0.07	0.18	197	0.05	0.09	198	0.07	0.05
254	0.12	0.08	253	0.08	0.08	252	0.07	0.06

Ek 3. Feldispat cevheri  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri

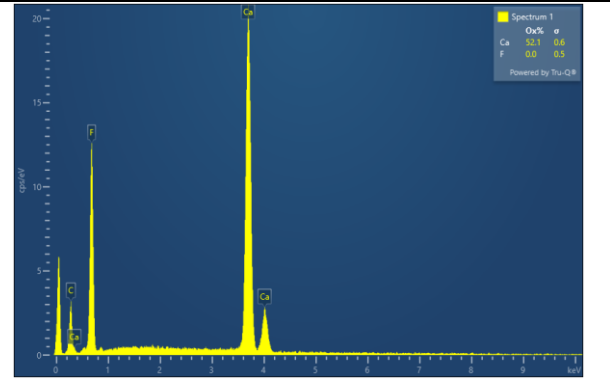
RV_2	BOR_H ACİM 2	BOR_TANE SAY_2	RV_4	BOR_HA CİM 4	BOR_TANE SAY_4	RV_6	BOR_H ACİM 6	BOR_TANE SAY_6
36	3.62	5.08	37	13.75	23.36	36	23.58	34.47
38	5.07	5.92	41	22.01	26.10	42	43.07	18.28
40	5.99	8.17	45	39.89	21.08	48	20.04	26.79
42	11.65	13.66	49	9.05	11.36	54	8.70	13.83
44	26.43	19.91	53	5.74	8.07	60	4.34	6.09
46	20.31	15.99	57	6.79	7.11	66	0.12	0.31
48	7.22	7.76	61	2.42	2.54	72	0.01	0.05
50	3.32	4.24	65	0.14	0.22	78	0.00	0.00
52	2.36	3.24	69	0.01	0.03	84	0.00	0.00
54	2.81	3.86	73	0.00	0.01	90	0.00	0.00
56	3.61	4.48	77	0.00	0.00	96	0.00	0.00
58	3.61	3.94	81	0.00	0.00	105	0.00	0.00
60	2.55	2.48	91	0.00	0.00	114	0.00	0.00
62	0.87	0.91	165	0.00	0.00	120	0.00	0.00
64	0.20	0.21	233	0.00	0.00	189	0.00	0.00
67	0.02	0.03	237	0.00	0.00	228	0.00	0.00
156	0.00	0.00	241	0.00	0.00	234	0.00	0.01
247	0.00	0.00	245	0.00	0.00	240	0.00	0.01

252	0.00	0.00	249	0.00	0.01	246	0.00	0.00
254	0.34	0.11	253	0.19	0.11	252	0.14	0.15

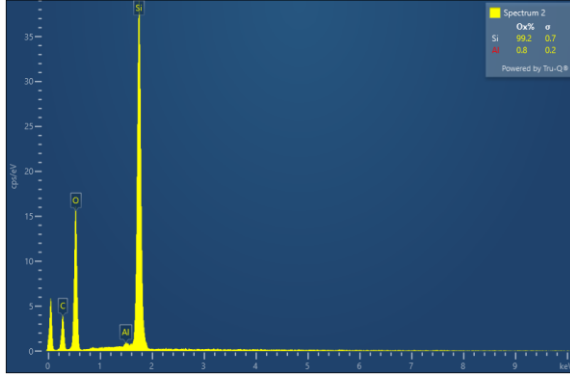
Ek 4. Bor cevheri  $\mu$ CT'den elde edilen veri setleri



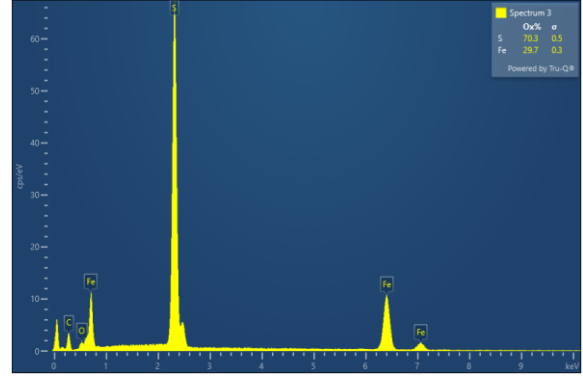
Ek 5. Nadir toprak cevheri barit tanesi EDS spektrası



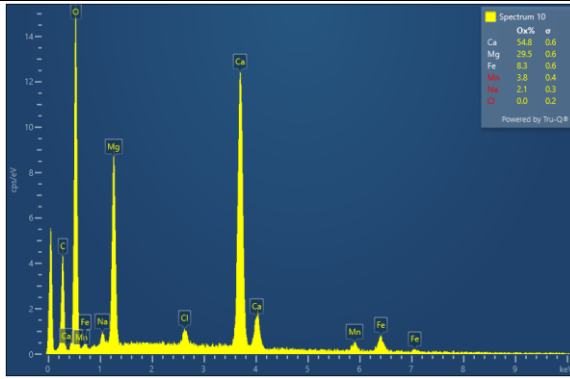
Ek 6. Nadir toprak cevheri florit tanesi EDS spektrası



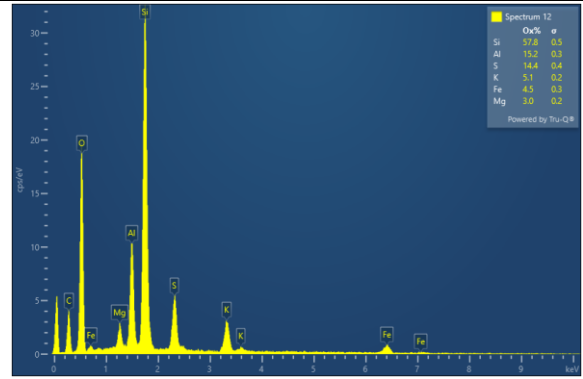
Ek 7. Nadir toprak cevheri kuvars tanesi EDS spektrası



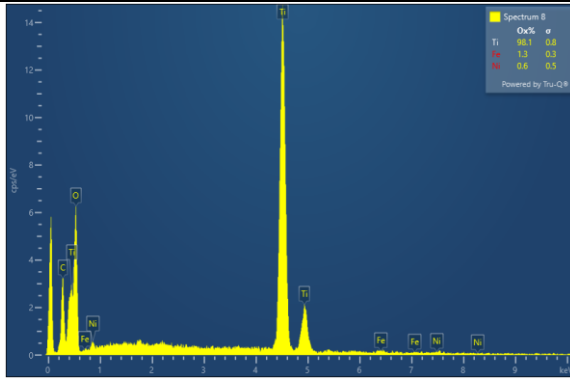
Ek 8. Kurşun-Çinko cevheri pirit tanesi EDS spektrası



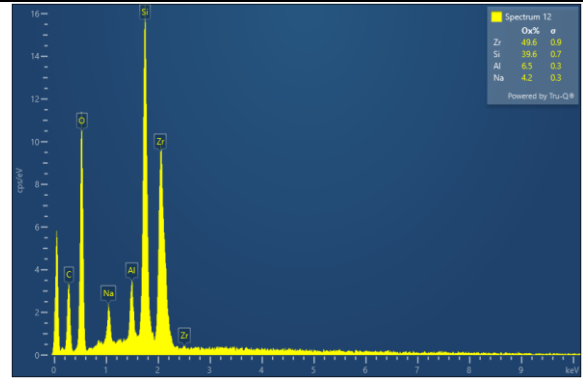
Ek 9. Kurşun-Çinko cevheri dolomit tanesi EDS spektrası



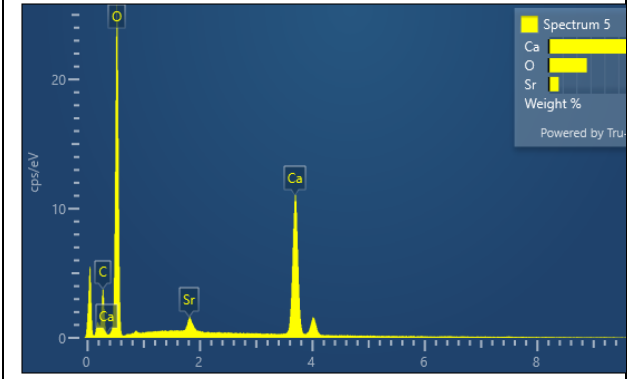
Ek 10. Kurşun-Çinko cevheri Si-Al killeri tanesi EDS spektrası



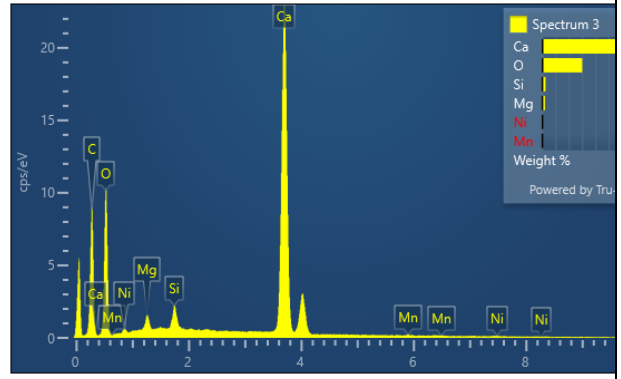
Ek 11. Feldispat cevheri rutil tanesi EDS spektrası



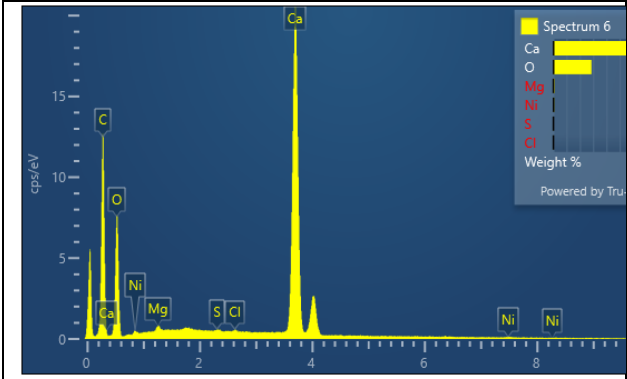
Ek 12. Feldispat cevheri zirkon tanesi EDS spektrası



Ek 13. Bor cevheri strontiyanit tanesi EDS spektrası



Ek 14. Bor cevheri dolomit tanesi EDS spektrası



Ek 15. Bor cevheri kalsit tanesi EDS spektrası