

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**TRİPOLİS ANTİK KENTİ (YENİCE, DENİZLİ), ANTİK  
MADENCİLİK KALINTILARININ MİNERALojİK  
PETROGRAfİK VE JEOKİMYASAL İNCELENMESİ**

**TEZLİ YÜKSEK LİSANS**

**ÖMER FARUK ÖZKAYA**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2018**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**TRİPOLİS ANTİK KENTİ (YENİCE, DENİZLİ), ANTİK  
MADENCİLİK KALINTILARININ MİNERALojİK  
PETROGRAfİK VE JEOKİMYASAL İNCELENMESİ**

**TEZLİ YÜKSEK LİSANS**

**ÖMER FARUK ÖZKAYA**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2018**

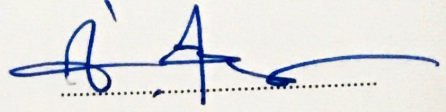
## KABUL VE ONAY SAYFASI

ÖMER FARUK ÖZKAYA tarafından hazırlanan "TRİPOLİS ANTİK KENTİ (YENİCE, DENİZLİ), ANTİK MADENCİLİK KALINTILARININ MİNERALojİK PETROGRAfİK VE JEOKİMYASAL İNCELENMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 30.07.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

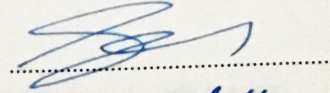
Jüri Üyeleri

İmza

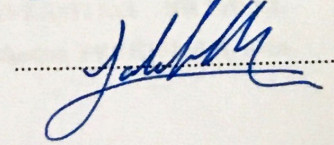
Danışman  
Prof. Dr. Ömer BOZKAYA



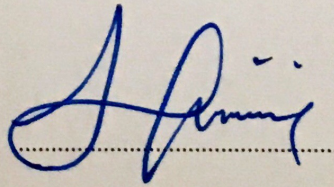
Üye  
Dr. Öğ. Üyesi Ceren KÜÇÜKUYSAL  
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi



Üye  
Doç. Dr. Bahadır DUMAN  
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 28/11/2018 tarih ve 50/09... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



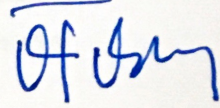
Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL  
ARAŞTIRMALAR KOORDİNATÖRLÜĞÜ tarafından FEBE2016051 nolu  
proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ÖMER FARUK ÖZKAYA



## ÖZET

### TRİPOLİS ANTİK KENTİ (YENİCE,DENİZLİ), ANTİK MADENCİLİK KALINTILARININ MİNERALojİK PETROGRAfİK VE JEOKİMYASAL İNCELENMESİ

TEZLİ YÜKSEK LİSANS  
ÖMER FARUK ÖZKAYA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:PROF. DR. ÖMER BOZKAYA)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2018

Antik madencilik ve metalürji kalıntıları arkeolojik kazılarda sıklıkla karşılaşılan buluntu türlerini oluşturmaktadırlar. Bu kalıntılardan cüruflar, metal eserlerin aksine üretim sürecine dair birçok termokimyasal bilgiyi içinde barındırmakta ve üretim faaliyetine yönelik kapsamlı ipuçları sunmaktadır. Birçok metalin ve metalürjik tekniğin ilk kez kullanılmış olduğu Anadolu'da da yoğun şekilde gözlenen cüruflar, dönemin metal üretim faaliyetlerini ve teknolojisini anlayabilmek adına kullanılabilecek en iyi araçlardır.

Bu tez çalışmasında Denizli ili sınırları içerisinde yer alan Tripolis antik kentindeki kazılarla ortaya çıkarılan cüruf örnekleri mineralojik (XRD), petrografik (optik ve elektron mikroskopi) ve jeokimyasal (XRF, ICP-OES, EDX) yöntemler kullanılarak incelenmiş; kentteki metal üretiminin türü, hammadde kaynağı, kentte gerçekleştirilen metalürjik işlemler ve kullanılan teknolojiye yönelik bilgilerin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Cüruf örnekleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda, Tripolis antik kentinde demir üretimi gerçekleştirildiği belgelenmiş, demir üretimine olası hammadde kaynak sahası önerilmiştir. Kentte ergitme işleminin yapılmadığı, cevherin ergitilmesi ile elde edilen luppelerin henüz bilinmeyen bir ergitme sahasından kente taşınarak saflaştırma ve demircilik işlemleri gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Petrografik ve kimyasal veriler demircilik işleminde kullanılan fırının 1100- 1200° C sıcaklığa ulaştığını ve basit tipte kil, kum, çakıl tabanlı ve kil duvarlı bir demirci fırını olduğuna işaret etmektedir. Mikroskopik gözlemler ile fırında yakıt olarak meşe ağaçlarının kullanıldığı belgelenmiştir. Ayrıca üretimde flaks olarak karbonatça zengin kayaların ve büyük olasılıkla kentin hemen kuzeyinde yer alan travertenlerin kullanıldığı düşünülmektedir. Tüm veriler Çürüksu havzasındaki diğer arkeolojik kazılardaki buluntularla birlikte değerlendirildiğinde Tripolis'in Geç Roma döneminde havza için demir obje üretiminin merkezi olduğu düşünülmektedir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Demir cürufu, Tripolis, Arkeometalürji, Arkeometri, Mineraloji, Petrografi, Jeokimya

## **ABSTRACT**

### **MINERALOGICAL PETROGRAPHICAL AND GEOCHEMICAL INVESTIGATION OF ANTIĆ MINING RESIDUES FROM TRIPOLIS ANCIENT CITY (YENİCE, DENİZLİ)**

**MASTER THESIS**

**ÖMER FARUK ÖZKAYA**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
GEOLOGICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ÖMER BOZKAYA)**

**DENİZLİ, JULY 2018**

Antique mining and metallurgy remains are common findings in archaeological excavations. From these residues, the slag, unlike metal works, can provide many thermochemical information about the production process and offers comprehensive clues to the production activity. In Anatolia, where many metals and metallurgical techniques were used for the first time, slags, which is observed intensely, are optimal material to examine can to understand the metal production activities and technology of the time.

In this thesis study, the samples of slag discovered by the excavations in the ancient city of Tripolis located in Denizli province were investigated by using mineralogical (XRD), petrographic (Optical microscopy, SEM) and geochemical (XRF, ICP-OES, EDX) methods. From these analyses, the type of the metal production which carried out in the city, the source of raw materials which used for the production, the metallurgical processes which carried out in the city, and the technological features of the metal works were documented.

As a result of the studies on the slag samples, it has been documented that the iron production in the ancient city of Tripolis was conducted and the sources of ore thought to be able to provide raw material for to the iron production were suggested. In addition, it was found that the blooms, which were obtained by melting the ore was smelted out of the city. After mining and purification operations the blooms were transported to the city from the smelting area which is currently unknown. It is likely that the furnaces used in the smithing processes was a simple type clay, sand, gravel-base and clay-walled type. Also based on chemical compositions of slags it is thought that temperatures of 1100-1200°C were reached within furnace. Based on mineralogical observations it has been documented that oak trees were used as fuels. There is evidence that carbonate rich rocks and possibly travertines located immediately on the north of the city were used as flux in production.

**KEYWORDS:** Iron slag, Tripolis, Archaeometallurgy, Archaeometry, Mineralogy, Petrography, Geochemistry

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....;	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Önemi.....	2
1.2 Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Niteliği.....	6
1.3 Tripolis Antik Kentinin Konumu.....	7
1.4 Tripolis Antik Kentinin Yakın Bölge Jeolojisi.....	8
1.5 Tripolis Antik Kenti Tarihçesi.....	11
1.6 Tripolis Antik Kentinde Yapılmış Olan Arkeometrik Çalışmalar...	14
<b>2. ANTİK DÖNEM MADENCİLİĞİ VE METALURJİSİ.....</b>	<b>16</b>
2.1 Antik Dönem Madenciligi.....	16
2.1.1 Kalkolitik Dönem Öncesi.....	17
2.1.2 Kalkolitik Dönem.....	21
2.1.3 Tunç Çağı.....	22
2.1.4 Demir Çağı.....	24
2.2 Antik Dönem Metalurjisi.....	25
2.2.1 Cevher Hazırlama.....	26
2.2.1.1 Cevher Zenginleştirme.....	26
2.2.1.2 Kavurma (Sinterleme).....	27
2.2.2 Ergitme (İzabe) İşlemi.....	28
2.2.2.1 Fırın.....	28
2.2.2.2 Yakıt.....	29
2.2.2.3 Flakslar.....	31
2.2.2.4 Yarı Mamuller.....	32
2.2.3 Üretim İşlemleri.....	33
2.2.3.1 Saflaştırma.....	33
2.2.3.2 İşleme.....	34
2.2.3.3 Alaşım Üretme.....	34
2.2.3.4 Döküm.....	34
2.2.3.5 Şekillendirme.....	35
2.2.3.5.1 Soğuk Dövme.....	35
2.2.3.5.2 Sıcak Dövme.....	35
2.2.3.6 Birleştirme.....	35
2.2.3.6.1 Perçin.....	35
2.2.3.6.2 Lehim.....	35
2.2.3.6.3 Kaynak.....	36
<b>3.CÜRUFLLAR.....</b>	<b>37</b>
3.1 Cürufların Morfolojisi.....	38
3.2 Cüruf Kimyası ve Mineralojisi.....	40



3.2.1	Ergitme (İzabe) Cürufları.....	43
3.2.2	Üretim Cürufları.....	47
<b>4.</b>	<b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>49</b>
4.1	Çalışma Alanının Seçilmesi.....	49
4.2	Numune Seçimi.....	49
4.3	Belgeleme Çalışmaları.....	50
4.4	Numunelerin Analizler İçin Hazırlanması.....	50
4.5	Optik Mikroskopi İncelemeleri.....	52
4.6	XRD Analizleri.....	52
4.7	XRF Analizleri.....	53
4.8	ICP-OES Analizleri.....	54
4.9	SEM-EDS Analizleri.....	54
<b>5.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>55</b>
5.1	Petrografik İncelemeler.....	55
5.1.1	Morfolojik İncelemeler.....	55
5.1.2	Optik Mikroskopi İncelemeler.....	65
5.1.3	X-Işını Difraktometrisi (XRD) Analizleri.....	75
5.1.4	SEM-EDS Analizleri.....	84
5.2	Kimyasal İncelemeler.....	87
5.2.1	XRF Analizleri.....	87
5.2.2	ICP-OES Analizleri.....	90
5.3	Tartışma.....	91
5.3.1	Tripolis Antik Kentindeki Üretimin Türü.....	91
5.3.2	Demir Üretiminde Kullanılan Potansiyel Hammadde Kaynağı.....	91
5.3.3	Tripolis Antik Kentindeki Demir Üretim Zinciri.....	93
5.3.3.1	Ergitme İşlemi.....	93
5.3.3.2	Yarı Mamuller.....	94
5.3.3.3	Üretim.....	95
5.3.3.3.1	Saflaştırma.....	95
5.3.3.3.2	Demircilik.....	96
5.3.3.4	Üretim Teknolojisi.....	97
5.3.3.4.1	Fırın.....	97
5.3.3.4.2	Yakıt.....	98
5.3.3.4.3	Flakslar.....	98
<b>6.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>100</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>102</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>111</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil.1.1: Madencilğin Yayılışı (Yalçın, 2016).....	3
Şekil.1.2: Anadoludaki antik maden ocakları (Fidan, 2016).....	4
Şekil.1.3: a) Tripolis Antik kentinin konumu b) Kentin havadan görünümü.....	7
Şekil.1.4: Tripolis Antik kenti yakın çevresinin jeoloji haritası (Yalçın ve diğ., 2004) .....	8
Şekil.1.5: Tripolis Antik kenti yakın çevresi stratigrafik kesiti (Alçıçek ve diğ. 2007; Şengün, 2011).....	10
Şekil.1.6: Lycus (Çürüksu) vadisi ve bölgeden geçen antik yol güzergahları.....	11
Şekil.1.7: Tripolis'in antik dönemdeki konumu.....	12
Şekil.1.8: a) Tripolis Antik kenti mimari planı b) Yapıların havadan görünümü... 13	
Şekil.1.9: Tripolis Antik kenti güncel kazı alanı	14
Şekil.2.1: Lascoux ve Altamira mağaraları duvar resimleri ile aşı boyası (okra)... 18	
Şekil.2.2: Anadolu obsidyenlerinin Prehistorik dönemdeki yayılışı (Milos Mining Museum).....	19
Şekil.2.3: Niğde Kaletpe prehistorik obsidyen atölyesi.....	20
Şekil.2.4: Grimes Grave's prehistorik çakmaktaşı madeni, İngiltere.....	20
Şekil.2.5: Derekütüğün prehistorik bakır madeni ve galerileri, Çorum.....	22
Şekil.2.6: Sardis antik kenti ve günümüzde de işletilmekte olan plaser altın yatağı .....	23
Şekil.2.7: Günümüz ilkel Afrika kabilelerinde metal üretimi.....	25
Şekil.2.8: Antik dönem metalurjik işlem zinciri (Hauptmann, 2014'ten değiştirilerek) .....	25
Şekil.2.9: Antik dönem maden ve işçilik alanı illüstrasyonu (MTA).....	26
Şekil.2.10: Antik dönem cevher zenginleştirme işlemi illüstrasyonu ve cevher öğütme havanı (Kaptan, 1995; MTA Madencilik Müzesi).....	27
Şekil.2.11: Kavurma işlemi uygulaması.....	28
Şekil.2.12: Yüksek tipli kapalı izabe fırını ve cüruf oluşumu.....	29
Şekil.2.13: Torluk uygulaması ve şematik gösterimi (Harris, 1999).....	30
Şekil.2.14: Flaksların metal yüzeyinde tabaka oluşturması (Serneels, 2003).....	32
Şekil.2.15: Mısır hiyeroglifinde bakır külçe ve antik bakır külçe örneği (MTA Madencilik Müzesi).....	33
Şekil.2.16: Akkor halindeki luppe ve soğuduktan sonraki görünümü (Tarhan, 2009) .....	34
Şekil.3.1: Cüruf.....	37
Şekil.3.2: Üretim cüruflarının tipolojileri ile tipolojilerinin hava akışı ve fırın duvarının konumuna bağlı değişimi (Serneels ve Perret, 2003).....	39
Şekil.3.3: Serneels ve Perret (2003)'ün önerdiği morfolojik sınıflama diyagramı..	40
Şekil.3.4: Akma yapısı gösteren bir ergitme cürufu.....	46
Şekil.3.5: Üretim işlemi sırasında demirin oksidasyonu ve demir pulcuklarının oluşumu (Serneels, 2003).....	48
Şekil.3.6: Üretim işlemi sırasında yüksek sıcaklığa bağlı metal kaybı (Serneels, 2003).....	48
Şekil.4.1: İnce ve parlak kesit hazırlamak için kesilen bloklar.....	50

<b>Şekil.4.2:</b> Numunelerin öğütülmesi için kullanılan halkalı değirmen ve XRF analizleri için pellet hazırlık aşaması, Darmstadt Teknik Üniversitesi (Almanya).	51
<b>Şekil.4.3:</b> Olympos BX51 cevher mikroskobu.....	52
<b>Şekil.4.4:</b> GNR APD 2000 PRO X-ışınları difraktometresi, Pamukkale Üniversitesi.....	53
<b>Şekil.4.5:</b> Skyray-EDX-6000B (sağda) ve Bruker S8 Tiger (solda) X-ışınları floüresans spektrometreleri.....	53
<b>Şekil.4.6:</b> Perkin Elmer OPTIMA 7000DV ICP-OES cihazı.....	54
<b>Şekil.4.7:</b> Zeiss Supra 40 VP SEM-EDS cihazı, Pamukkale Üniversitesi.....	54
<b>Şekil.5.1:</b> NE-1 numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	55
<b>Şekil.5.2:</b> NE- 2.1 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	56
<b>Şekil.5.3:</b> NE- 2.2 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	56
<b>Şekil.5.4:</b> NE- 3 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	57
<b>Şekil.5.5:</b> NE- 4 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	57
<b>Şekil.5.6:</b> NE- 5 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	58
<b>Şekil.5.7:</b> NE- 6.1 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	58
<b>Şekil.5.8:</b> NE- 6.2 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	59
<b>Şekil.5.9:</b> NW- 7 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	59
<b>Şekil.5.10:</b> NW- 8 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	60
<b>Şekil.5.11:</b> NW- 9 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	60
<b>Şekil.5.12:</b> NW- 10 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	61
<b>Şekil.5.13:</b> NW- 11 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	61
<b>Şekil.5.14:</b> SE- 14.1 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	62
<b>Şekil.5.15:</b> SE- 14.2 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	62
<b>Şekil.5.16:</b> SE- 16 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	63
<b>Şekil.5.17:</b> SW- 17 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	63
<b>Şekil.5.18:</b> SW- 18 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	64
<b>Şekil.5.19:</b> SW- 19 numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri.....	64
<b>Şekil.5.20:</b> NE- 1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Gözenek çeperlerinde gözlenen karbonat mineralleri b) Nodüler götit taneleri ve demir oksitler c-d) Amorf matriks (koyu gri) üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ve manyetitler ile nodüler götit taneleri ON: Tek nikel CN: Çift nikel.....	65

- Şekil.5.21:** NE- 2.1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ve demir hidroksitler b) Pulcuklar halinde gözlenen demir hidroksitler c) Amorf matriks (koyu gri) üzerinde gözlenen metalik demir taneleri (açık beyaz) ve manyetitler (gri) d) İri ve ufak dentritik vüstit taneleri (açık sarı) ve amorf matriks (koyu gri) ON: Tek nikol CN: Çift Nikol..... 66
- Şekil.5.22:** NE- 2.2 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik ve amorf matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri b) Fayalitik matriks ve dentritik vüstit mineralleri c) Fayalitik (açık gri) ve amorf matriks (koyu gri) üzerinde gözlenen vüstitler ve demir hidroksit tanecikleri d) Fayalitik ve amorf matriks ile küresel vüstit tanecikleri ve metalik demir(açık beyaz) ON: Tek nikol CN: Çift Nikol..... 67
- Şekil.5.23:** NE- 3 kod numaralı örneğin alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde demir oksit taneleri (opak) ve gözenek çeperlerinde gözlenen karbonat mineralleri b) Fayalitik (açık gri) ve amorf (koyu alanlar) matriks ile metalik demir( açık beyaz) ve demir hidroksit taneleri (kahverengi) ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol.. 67
- Şekil.5.24:** NE- 4 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen demir oksit (opak) ve hidroksit (kahverengi) taneleri ile gözenek çeperlerindeki karbonat mineralleri b) Amorf matriks ve demir oksitler ON: Tek Nikol CN: Çift nikol..... 68
- Şekil.5.25:** NE- 5 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri (opak) ve demir hidroksitler (sarı-kahverengi) b) Fayalitik matriks ve demir oksitler (opak) c) Metalik demir ve mekanik işlemlere bağlı gelişen çatlaklar d) Fayalitik matriks ile vüstit tanecikleri ve demir hidroksitler ON: Tek nikol CN: Çift Nikol..... 68
- Şekil.5.26:** NE-6.1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks ile metalik demir (opak) ve demir hidroksitler (kırmızı-kahverengi) b) Ferrit taneleri.....69
- Şekil.5.27:** NE- 6.2 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen demir oksit taneleri (opak) ve demir hidroksitler (sarı-kahverengi) b) Amorf matriks üzerinde pulcuklar halinde gözlenen demir hidroksitler c) Fayalitik ve amorf matriks üzerinde vüstit taneleri demir ve mekanik işlemlere bağlı gelişen çatlaklar d) Fayalitik matris (koyu gri) manyetit (açık gri) ve ferrit tanecikleri (açık sarı) ON: Tek nikol CN: Çift Nikol..... 69
- Şekil.5.28:** NW-7 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik ve amorf matriks ile metalik demir (opak) ve demir hidroksitler (kırmızı-kahverengi) b) Fayalitik matriks(koyu gri) manyetitler (açık gri) ve metalik demir (beyaz-sarı) ile demir hidroksitler (koyu) ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol..... 70
- Şekil.5.29:** NW-8 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde metalik demir ve demir oksitler (opak) ve b) Fayalitik matriks(koyu gri) mayetit (açık gri) ve ferrit taneleri(sarı-beyaz) ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol..... 70
- Şekil.5.30:** NW-9 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen irili-ufaklı vüstit taneleri ve demir oksitler b) Amorf matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler c) Metalik demir ve demir hidroksitler d) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstitler ve metalik demir(ferrit) taneleri ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol..... 71

<b>Şekil.5.31:</b> NW-10 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen uzamış dentritik vüstit taneleri b) Pulcuklar halinde gözlenen demir hidroksit taneleri ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol.....	71
<b>Şekil.5.32:</b> NW-11 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen irili-ufaklı vüstit taneleri ve demir oksitler b) Fayalitik ve amorf matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler c) Metalik demir ve demir hidroksitler d) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstitler ve metalik demir(ferrit) taneleri.....	72
<b>Şekil.5.33:</b> SE-14.1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Kesit üzerinde gözlenen çubuksu fayalitler b) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler c) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstitler ve metalik demir(ferrit) taneleri d) Fayalitik matriks (koyu gri), manyetitler(açık gri) ve metalik demir taneleri (açık sarı) ile demir hidroksitler (kahverengi) ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol .....	72
<b>Şekil.5.34:</b> SE-14.2 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen uzamış dentritik vüstit taneleri b) Amorf matriks üzerinde irili-ufaklı dentritik vüstitler ve demir hidroksit taneleri ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol.....	73
<b>Şekil.5.35:</b> SE-16 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler b) Fayalitik matriks içerisinde gözlenen montisellit kristalleri c) Fayalitik matriks içerisinde gözlenen montisellitler ve ferrit taneleri d) Metalik demir (ferrit) taneleri ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol.....	73
<b>Şekil.5.36 :</b> SW-17 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a-b) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ON: Tek Nikol CN:Çift Nikol.....	74
<b>Şekil.5.37:</b> SW-18 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a-b) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol.....	74
<b>Şekil.5.38:</b> SW-18 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a-b) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol.....	74
<b>Şekil.5.39:</b> Örneklere ait ince kesitlerin taramaları üzerinde gözlenen kömürleşmiş odun kalıntılarına ait selülozik dokular (kırmızı çereçeve içerisinde)..	75
<b>Şekil.5.40:</b> NE- 1 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları.....	76
<b>Şekil.5.41:</b> NE- 2.1 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 76	76
<b>Şekil.5.42:</b> NE- 2.2 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 77	77
<b>Şekil.5.43:</b> NE- 3 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları..... 77	77
<b>Şekil.5.44:</b> NE- 4 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları..... 78	78
<b>Şekil.5.45:</b> NE- 5 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları..... 78	78
<b>Şekil.5.46:</b> NW- 7 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 79	79
<b>Şekil.5.47:</b> NW- 8 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 79	79
<b>Şekil.5.48:</b> NW- 9 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 80	80
<b>Şekil.5.49:</b> NW- 10 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları.. 80	80
<b>Şekil.5.50:</b> NW- 11 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları.. 81	81
<b>Şekil.5.51:</b> SE- 14.1 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları..81	81
<b>Şekil.5.52:</b> SE- 14.2 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları. 82	82
<b>Şekil.5.53:</b> SE- 16 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 82	82
<b>Şekil.5.54:</b> SW- 17 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 83	83
<b>Şekil.5.55:</b> SW- 18 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları... 83	83

<b>Şekil.5.56:</b> SW- 19 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları...	84
<b>Şekil.5.57:</b> NE-2.2 kod numaralı örneğe ait geri saçınımlı elektron mikroskopu görüntüsü ile örnekte gözlenen vüstit minerali ve matriksin (kırmızı çerçeve ile sınırlanan alan) elementer dağılım görüntüsü.....	85
<b>Şekil.5.58:</b> SE-16 kod numaralı örneğe ait geri saçınımlı elektron mikroskopu görüntüsü ile örnekte gözlenen demir oksitler ve matrikste gözlenen yapıların elementer dağılım görüntüsü.....	86
<b>Şekil.5.59:</b> SW-16 kod numaralı örneğe ait geri saçınımlı elektron mikroskopu görüntüsü ile örnekte gözlenen demir oksitler ve matrikste gözlenen yapıların elementer dağılım haritaları.....	86
<b>Şekil.5.60:</b> Cüruf örneklerine ait major oksit değerlerinin dağılım grafiği.....	88
<b>Şekil.5.61:</b> FeO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> diyagramı ve major oksit içeriklerine göre örneklerin diyagramdaki konumu.....	89
<b>Şekil.5.62:</b> FeO-SiO <sub>2</sub> -CaO diyagramı ve major oksit içeriklerine göre örneklerin diyagramdaki konumu.....	89
<b>Şekil.5.64:</b> Örneklerin iz element içeriği değişimleri.....	90
<b>Şekil.6.1 :</b> MTA Denizli ili maden haritası ve Tripolis Antik kenti yakınındaki maden yatakları.....	91
<b>Şekil.6.2 :</b> Tripolis antik kenti ve potansiyel cevher kaynağının konumlarına ait uydu görüntüsü.....	92
<b>Şekil.6.3 :</b> Potansiyel cevher kaynağı sahsında gözlenen galerilerin girişleri (Kaynak: Doç Dr. Bahadır Duman).....	92
<b>Şekil.6.4 :</b> Roma dönemi demirci fırını modeli (Tylecote, 1976).....	97
<b>Şekil.6.5 :</b> a) NE-5 kod numaralı örneğin ince kesiti üzerinde gözlenen kömürleşmiş selülozik doku b) Meşe ağacına ait kesit görüntüsü.....	98
<b>Şekil.6.6 :</b> a) NE-1 kod numaralı örneğin iç yapısında makro olarak gözlenebilen karbonat taneleri (beyaz) b) Cürufların gözenek çeperlerinde gözlenen karbonat minerallerinin optik mikroskoptaki görünümü (Ca: Karbonat).....	99
<b>Şekil.6.7 :</b> Örneklerin demir ve karbonat içeriklerinin birbirlerine göre değişim grafiği.....	99

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo.2.1:</b> Kullanılan flaksların oranlarına göre ergime sıcaklığında meydana gelen değişim (Tylecote, 1976).....	31
<b>Tablo.5.1:</b> Cüruf örneklerine ait XRF analizi major oksit değerleri(%).....	87
<b>Tablo.5.2:</b> Cüruf örnekleri iz element içerikleri (ppm).....	90

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ASM</b>	: Amorf Silis Matriks
<b>Cb</b>	: Karbonat Minerali
<b>CN</b>	: Çift Nikol
<b>DH</b>	: Demir Hidroksil
<b>DO</b>	: Demir Oksit
<b>Fa</b>	: Fayalit
<b>GB</b>	: Güneybatı
<b>GD</b>	: Güneydoğu
<b>Gth</b>	: Götüt
<b>I</b>	: Ferrit
<b>ICP-OES</b>	: İndüktif olarak Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi
<b>KB</b>	: Kuzeybatı
<b>KD</b>	: Kuzeydoğu
<b>Mag</b>	: Manyetit
<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
<b>Mtc</b>	: Montisellit
<b>ON</b>	: Tek Nikol
<b>SEM-EDX</b>	: Enerji Yayılımlı X-ışınlı Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>XRD</b>	: X-ışınları Difraktometresi
<b>XRF</b>	: X-ışını Floresans Spektrometresi
<b>Wus</b>	: Vüstit



## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bana özgür ve huzurlu bir çalışma ortamı sunarak imkanlarını, bilgisini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ömer Bozkaya'ya, Tripolis antik kentindeki buluntular üzerinde araştırma yapmama izin veren kazı başkanı Doç Dr. Bahadır Duman ile incelenen buluntuların gün yüzüne çıkarılmasında emeği geçen Tripolis kazı ekibindeki tüm çalışanlara, tezimi değerlendirerek samimiyetle yol gösteren jüri üyesi Dr. Öğr. Üy. Ceren Küçükuysal'a ve literatürdeki bilimsel çalışmaları ile bu tezin altyapısının oluşmasına katkı sağlayan tüm bilim insanlarına,

Tezin fikir aşamasında bana cesaret veren Bochum Ruhr Üniversitesi'nden Prof. Dr. Ünsal Yalçın'a, örnek hazırlama ve analiz işlemlerinde yardımlarını esirgemeyen Mehmet Tufan'a, PAÜ İnce Kesit Laboratuvarı sorumlusu Mehmet Güngör'e, İTÜ JAL çalışanlarına ve Doç. Dr. Mustafa Kumral'a, Darmstadt Teknik Üniversitesi'nden Dr. Dirk Scheuven's'e ve laboratuvarımı her an kullanma imkanı sağlayarak yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Gülcan Bozkaya'ya,

Tez boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan Pamukkale Ünivesitesi Dr. Öğr. Üy. Barış Semiz'e, tez çalışmam sırasında yanlarında ziyaretçi olarak bulunduğum Darmstadt Teknik Üniversitesi'nden Prof. Dr. Rafael F. Mahlmann'a , Heidelberg Üniversitesi'nden Prof. Dr. Axel K. Schmitt'e ve selülozik dokuların tanımlanmasındaki yardımlarından dolayı Prof. Dr. Gürkan Semiz'e,

Üzerimde emekleri olan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üy. Suat Taşdelen, Dr. Öğr. Üy. Ali Kaya, Dr. Öğr. Üy. Oruç Baykara, Dr. Öğr. Üy. S. Baran Çelik'e ve dostlarım Dr. Öğr. Üy. H. Atacan Tonak, Mustafa Doğan, M. Deniz Cengiz, Cihan Orman, Emre Aytaş, H. İbrahim Orcan ve Hüseyin Yılmaz'a,

Ve son olarak, hayattaki en büyük şanslarım olan ve ona anlam katan; sabırla, sevgiyle, anlayışla her zaman yanımda olarak benim için bir çok fedakarlıkta bulunan ve hala da bulunmakta olan annem, babam ve sevgili eşim Merve Arısoy Özkaya'ya en içten minnet ve teşekkürlerim ile...

Ömer Faruk Özkaya

# 1. GİRİŞ

Antik madencilik ve metalürji araştırmaları için gerekli olan detaylı incelemeler, fen bilimlerine ait çalışma yöntemlerini zorunlu kıldığından, farklı disiplinlere ait araştırma yöntemlerinden faydalanılması gerekmektedir. Bu yönüyle, arkeolojik buluntuların fen bilimlerinin kullandığı analitik tekniklerle araştırıldığı ‘Arkeometri’ biliminin çatısı altında toplanan söz konusu çalışmalar, eski dönem madenciliği ve metalürjisi özelinde ‘Arkeometalürji’ disiplininin kapsamına girmektedir.

Arkeometalürji, geçmiş dönemlerde üretilmiş metallerin üretim teknolojisi, hammadde kaynakları, ticaret ağları ve işçilik teknikleri gibi özelliklerini ortaya koyarak, geçmiş dönemlerin sosyal ve teknolojik yapısının anlaşılmasında arkeoloji çalışmalarına katkı sağlamaktadır. Arkeometalürji araştırmalarına konu olan bulgular eski maden ocaklarından, işçilik alanlarına veya metal eserlerden, cüruf kalıntılarına kadar çok geniş bir alan ve malzeme grubunu kapsamaktadır. Bu malzeme ve alan çeşitliliği sebebiyle de; jeoloji, metalürji, maden ve kimya gibi bilim dallarından ve yöntemlerinden doğrudan faydalanmaktadır (Rehren & Pernicka, 2008).

Madenlerin kaynaklarının oluşum ortamlarını, yapısını ve ekonomik özelliklerini araştıran Jeoloji biliminin temel araçlarından olan mineralojik-petrografik ve jeokimyasal araştırma yöntemleri, benzer amaçlar ile arkeometalürji araştırmalarında da en sık kullanılan yöntemlerdir. Bu durum nedeniyle, arkeometalürji çalışmalarında elde edilen verilerin yorumlanmasında jeolojik bilgi birikiminin gerekliliği yadsınamaz bir gerçektir. Ayrıca; maden cevherinden, metalin elde edilmesine ve objenin üretilmesine kadar geçen bütün üretim aşamalarında da kullanılan malzemelerin doğrudan jeolojik yapılarla ilişkili olduğu düşünöldüğünde, jeolojinin arkeometalürji araştırmalardaki önemi daha da iyi anlaşılabilir.

## 1.1 Çalışmanın Önemi

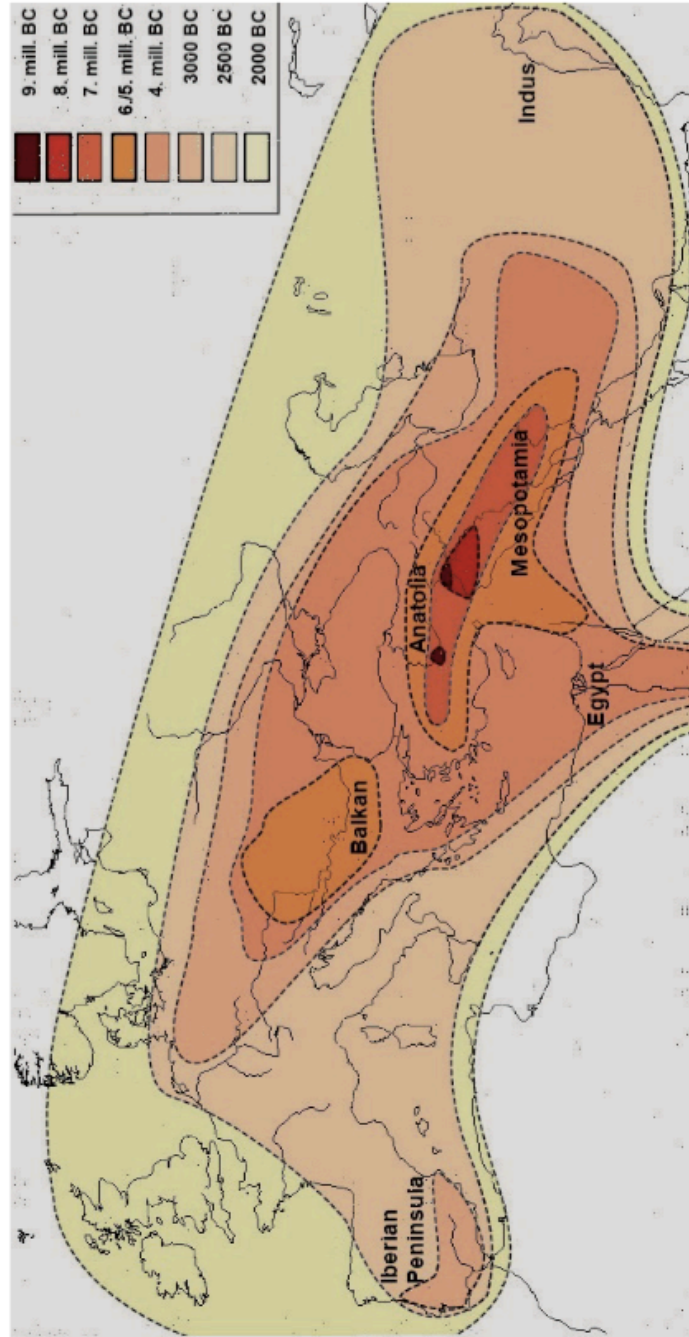
Metallerin, kullanılmaya başladığı ilk günden itibaren teknolojinin gelişmesinde oynadığı rol, tarihin her döneminde metalik cevherlerin önemli bir hammadde kaynağı olmasını sağlamıştır. Metallerin antik dönemde prestijli bir malzeme ve gelişmişliğin göstergesi olarak kabul edilmesi, metal üretimi anlamında gelişmiş ve genellikle çağının ilerisindeki toplumların teknolojik altyapılarını anlamak adına incelenebilecek en önemli malzemelerin metaller olduğunun kanıtları niteliktedir. Bu anlamda, Yalçın (2016) ve Özdoğan (2014)'a göre madencilik ve metalürji tarihi yaklaşık 10.000 yıl öncesine dayanan ve birçok metalin ve metalürjik tekniğin ilk defa kullanıldığı Anadolu için, arkeometalürji araştırmaları önemli bir çalışma alanıdır. Anadolu'nun madencilik ve metalürji geçmişine bakıldığında:

- Nabit bakırın işlenmesiyle metal madenciliğinin başladığı,
- Tunç üretiminin ilk kez gerçekleştirildiği,
- Antik çağlardaki ilk sikkenin (altın-gümüş) basıldığı,

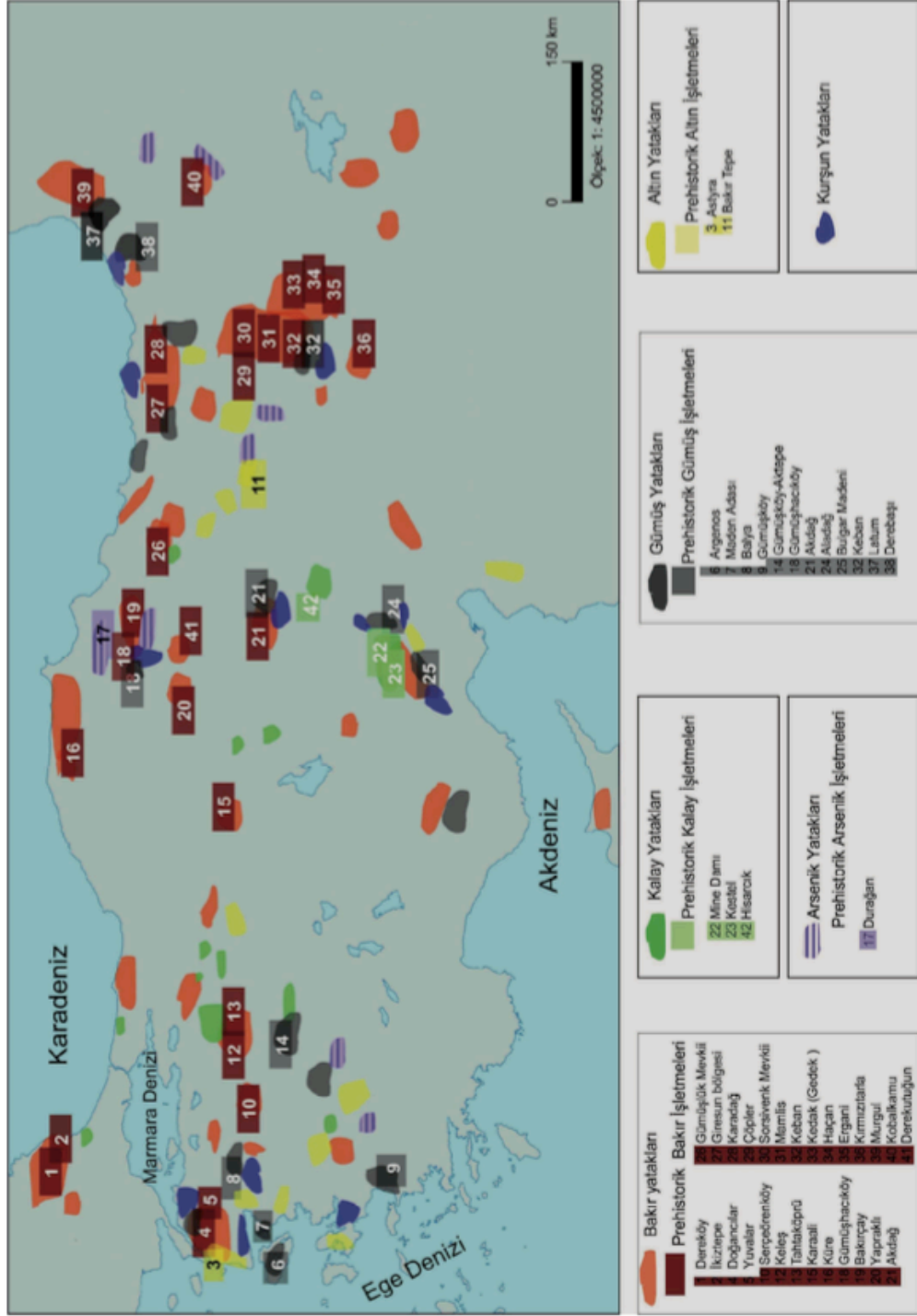
ve madencilik teknolojisinin Anadolu'dan başlayarak komşu bölgelere yayıldığı görülmektedir (Atalay 2012). Öyle ki yukarıdaki özelliklerinden dolayı bir çok araştırmacı Anadolu'yu madenciliğin beşiği olarak nitelendirmiştir (Przeworski, 1939; Yalçın, 2016) (Şekil 1.1).

Hitit ve Urartu medeniyetleri gibi madencilikte ve metal işçiliğinde çağlarının ilerisinde medeniyetlere ev sahipliği yapmış ülkemiz, çok sayıda antik maden ocağına sahiptir (Fidan, 2016) (Şekil 1.2). Bu antik ocaklar üzerine yapılan araştırmaların birçoğu Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak; Kaptan 1977, 1978,1982, 1984, 2008, 2012; Baflaranet ve diğ. 2012, 2010; Kartalkanat ve diğ. 2011; Kaya ve diğ. 2012; Pehlivan ve Alpan 1986; de Jesus 1977; Ryan 1960; Giles ve Kuijpers 1974; de Jesus ve Dardeniz 2015; Yalçın 1998, 2000, 2003, 2009; Wagner ve diğ. 1984; Öztunalı 1984; Özbal ve diğ. 1999, 2000; Hauptmann 2000, 2007; Yener 1986, 1993; Bachmann 2008; de Jesus 1977,1980 verilebilir. Jeoloji, arkeoloji, kimya, maden ve metalürji-malzeme gibi bilim dallarından insanların gerçekleştirdiği bu disiplinler arası çalışmalar Anadolu arkeolojisine önemli katkılar sağlamıştır. Fakat tüm bu

çalışmalara rağmen, antik madencilik in beşiği kabul edilen ülkemizde, hala araştırılmayı bekleyen bir çok alan ve malzeme mevcuttur (Atalay 2012; Yalçın 2016). Özellikle de pek çok kazıda çıkarılmasına ve önem arz etmesine rağmen metalürjik üretim artıkları olan ‘‘crurflar’’ üzerinde yapılmış araştırma sayısının oldukça az olduğu literatür taramalarında açıkça görülmektedir.



şekil.1.1: Madencilik in Yayılışı (Yalçın, 2016)



Şekil.1.2: Anadoludaki antik maden ocakları (Fidan, 2016)

Metalürjik üretim artıkları, Geç Neolitik dönemden itibaren arkeolojik kazılarda sıklıkla karşılaşılan buluntulardır (Hauptmann, 2014). Cüruf olarak adlandırılan söz konusu buluntular, kazı yapılan bölgede geçmişte madencilik ve

metalürji faaliyetlerinin gerçekleşmiş olabileceğini gösteren en önemli ipuçlarını oluştururlar (Bachmann 1978).

Cüruflar, cevherin ergitilmesi ve ergitilmiş cevherden metalin üretilmesi sırasında veya sonrasında oluşan; silikat ve çeşitli oksitler içeren malzemelerdir. Şekil ve tipolojileri nedeniyle metal objelere kıyasla tanımlanması daha zor olan cürufların, doğru tanımlanabilmesi için ileri analitik yöntemlerden faydalanılması zorunludur (Hauptmann 2014).

Cüruflar, metal objelerden elde edilemeyen, metal üretimine ait termokimyasal izleri de bünyesinde barındırdığından; üretim döngüsünün anlaşılmasına imkan veren en önemli malzemelerdir (Charlton ve diğ., 2013). Bu yönüyle, cüruflar üzerinde yapılan incelemeler;

- Cürufun hangi metal ya da alaşımın üretimi sırasında oluştuğuna,
- Cürufun cevherin ergitilmesinden metal üretimine kadar geçen sürecin evrelerine,
- Cürufun ve dolayısıyla metalin üretimine hammadde olan cevherin doğasına,
- Cürufun ve dolayısıyla metalin oluştuğu fırın ortamının (sıcaklık, yakıt, gaz atmosferi vb.) özelliklerine,
- Cürufu oluşturan cevherin kaynağını ya da kaynaklarının ve kökensel ilişkilerinin ve dolayısı ile dönemin ticaret ağına,

dair bilgilere ulaşılmasına imkan vermektedir (Hauptmann 2014). Yukarıda maddelenmiş tüm bu bilgiler, metal üretiminin aşamalarını, yani “Üretim Zinciri” ni ortaya koyma fırsatı verdiğiinden dolayı arkeolojik anlamda da oldukça önemlidir.

Cüruflar ayrıca, biçimsiz yapıları nedeni ile görsel ve estetik anlamda bir değere sahip olmamaları nedeniyle tahribatlı analiz tekniklerinin rahatça uygulanabileceği ve dolayısı ile daha detaylı bir incelemeye olanak sağlayan türde bir arkeolojik buluntu grubunu oluşturmaktadırlar. Bu yönü ile de tahribatlı analiz yöntemlerinin çok daha kısıtlı olarak uygulanabildiği metal objelere kıyasla çok daha fazla bilgiye ulaşma şansı sunmaktadırlar.

## 1.2 Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Niteliği

Bu tez çalışması, Denizli iline 40 km. uzaklıktaki Yenice kasabası sınırları içerisinde yer alan Tripolis antik kentinde, yapılan kazılarla ortaya çıkarılmış ve Geç Roma (4- 6. yy.) dönemine tarihlenmiş madencilik ve metalurji kalıntılarının, mineralojik- petrografik ve jeokimyasal yöntemlerle incelenmesini konu almaktadır.

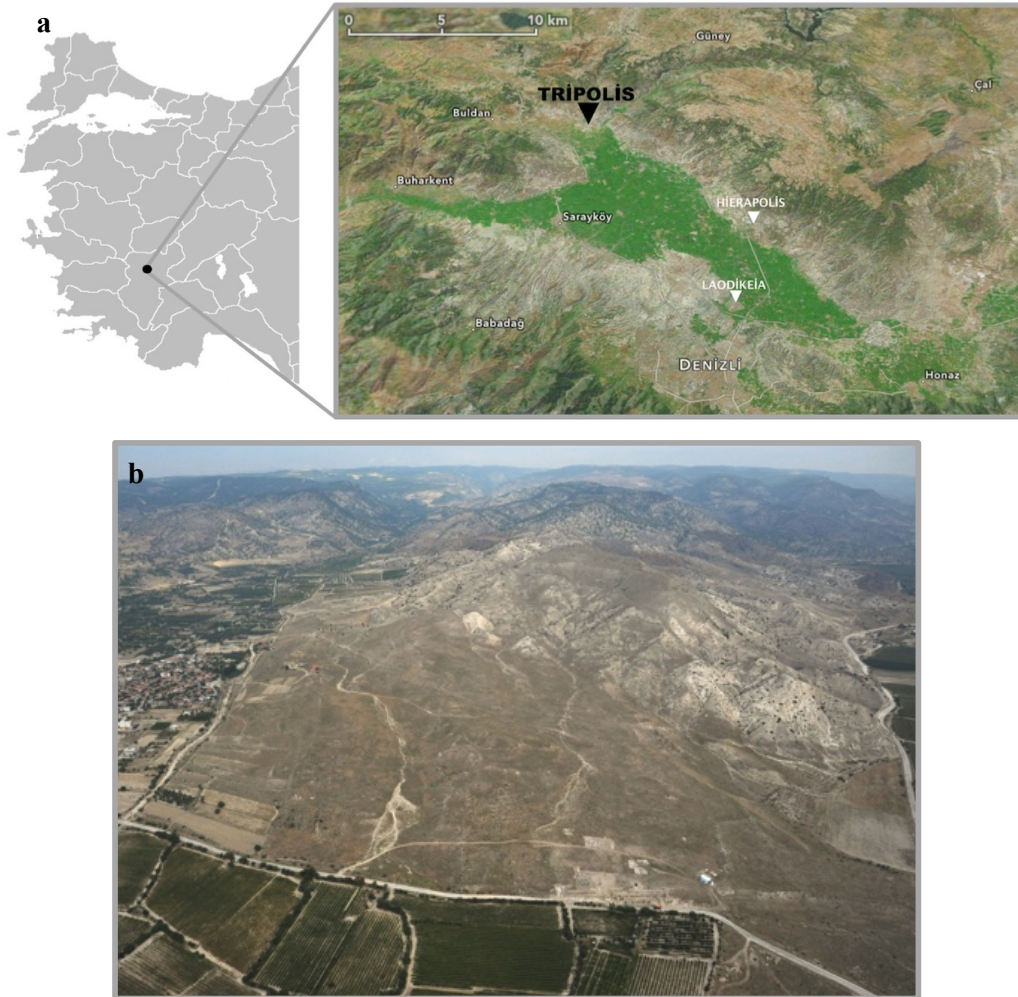
Çalışmanın amacı, (1)Tripolis antik kentindeki söz kalıntılarının hangi metal yada metallere ilişkili olduklarını, (2)söz konusu metal ya da metallerin hammaddesi olabilecek cevherlerin bölge jeolojisi içerisindeki muhtemel konumlarını, (3) kentteki üretim faaliyetinin niteliğini ve hangi aşamalarını temsil ettiğini, (4) üretimde kullanılan teknolojiyi ortaya koymaktır.

Bu amaçlar doğrultusunda; 19 adet metalürji artığı(cüruf) örneği incelenmiş ve cüruf örnekleri üzerinde; mikro dokuları ve mineral fazları incelemek amacıyla optik mikroskopi, mikroskopta tanımlanamayan mineral fazlarının tanımlanabilmesi amacıyla X-ışınları kırınımı(XRD), örneklerin majör oksit içeriklerini öğrenmek amacıyla X-ışınları Floresans Spektrometresi (XRF), örneklerin iz element içeriklerini öğrenmek amacıyla indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon (ICP-OES), mineralojik fazların ve mikro yapıların kimyasal bileşimlerine yönelik yorumlar yapılabilmesi amacıyla ise enerji yayımlı X-ışını analizine sahip (EDX) taramalı elektron mikroskopi (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması, Batı Anadolu'da yer alan ve Tripolis antik kenti dışında Hierapolis, Laodikeia, Collosae gibi antik kentleri de içerisinde barındıran, antik dönemdeki ismi ile Lycus (Çürüksu) vadisinde arkeometalürji alanında yapılan ilk çalışma olmakla birlikte, bölgede yapılacak sonraki araştırmalar için bir başlangıç olma niteliği taşımaktadır.

### 1.3 Tripolis Antik Kentinin Konumu

Tripolis antik kenti, Batı Anadolu'da yer alan Denizli iline bağlı ve 40 km. uzaklıktaki, Buldan ilçesi Yenicekent kasabası sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1.3a). Günümüzde Menderes havzası olarak bilinen ve antik dönemde Lycos vadisi olarak adlandırılan bölgenin kuzeybatı ucundaki kent, vadiye hakim bir tepenin güney yamacında yaklaşık 3 km<sup>2</sup>'lik alan üzerine konumlandırılmıştır (Duman 2013) (Şekil 1.3b).

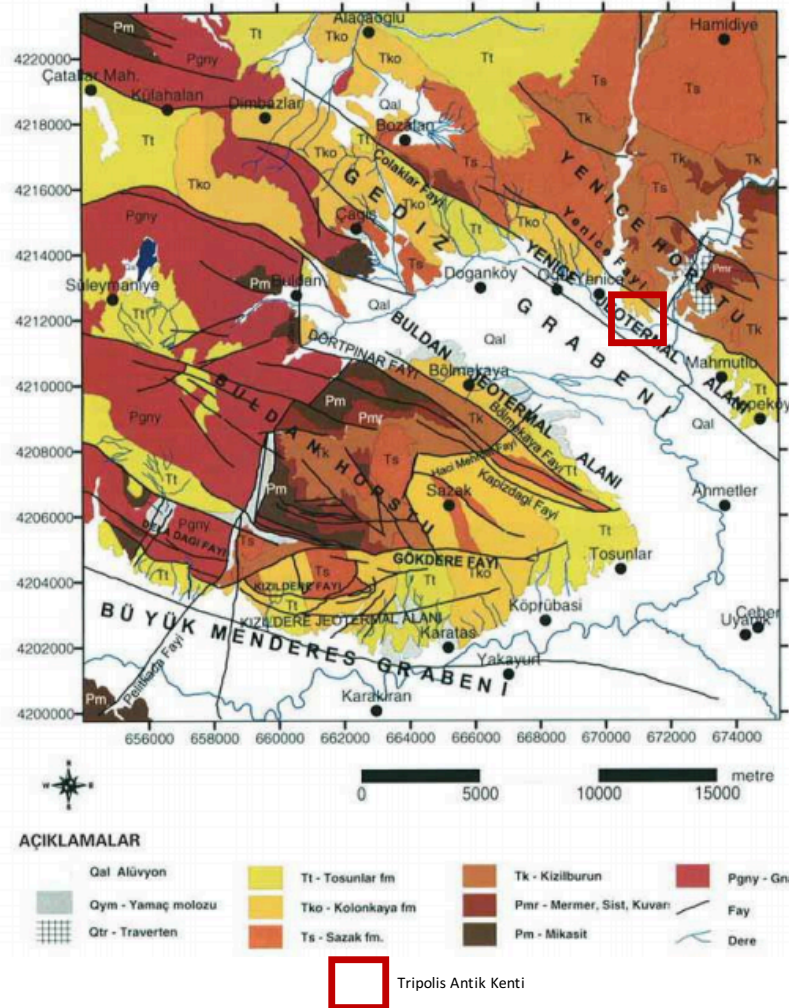


Şekil.1.3: a) Tripolis Antik kentinin konumu b) Kentin havadan görünümü (Duman, 2013)



#### 1.4 Tripolis Antik Kentinin Yakın Bölge Jeolojisi

Şengör (1980) tarafından Ege graben sistemi olarak tanımlanan neotektonik ortam içerisinde yer alan Tripolis antik kenti, Büyük Menderes ve Gediz grabenlerinin uzantılarının kesiştiği alanın doğusunda, Şimşek ve diğ. (1978) tarafından Çürüksu grabeni; Westaway (1990) tarafından ise Denizli havzası olarak adlandırılan bölgenin kuzey kenarında bulunmaktadır. Havza kuzeyde GD eğimli ve 700 m yüksekliğe sahip, güneyde ise KB eğimli ve 2000 m yüksekliğe sahip topoğrafik yükseltilerle sınırlanmıştır. Bu yükseltilerin, kuzeydeki Pamukkale ve güneydeki Babadağ aktif normal faylarının etkisi ile oluştuğu Şaroğlu (1992) ve Westaway (1990, 1993) tarafından yorumlanmıştır (Şekil 1.4).



Şekil.1.4: Tripolis Antik kentinin yakın çevresinin jeoloji haritası (Yalçın ve diğ., 2004)

Havzadaki kayaçlar birçok çalışmada Neojen öncesi ve Neojen sonrası birimler olarak tanımlanmıştır (Altunel 1996; Özkul ve diğ. 2002; Kaymakçı 2006). Havzanın Neojen öncesi temel kayaçlarını, Menderes masifinin Paleozoyik yaşlı metamorfikleri, Mesozoyik yaşlı kireçtaşları ve bu masifin üzerine tektonik dokanakla gelen yine Mesozoyik yaşlı Likya naplarına ait sedimanter kayaçlar oluşturmaktadır (Okay 1989, Sun 1990). Bu temel kayaçlar, Denizli grubu olarak adlandırılan, yaşlıdan gence doğru; erken-orta Miyosen yaşlı Kızılburun, orta Miyosen yaşlı Sazak ve orta-geç Miyosen yaşlı Kolonkoya formasyonları tarafından uyumsuzlukla örtülmüştür (Şimşek 1984; Sun 1990; Alçıçek ve diğ. 2007; Şengün, 2011) (Şekil 1.4).

Bölgedeki temel kayaçları ilk olarak Hamilton (1840) tanımlamış, fakat Parejas (1940) Menderes masifi olarak adlandırmıştır. Menderes masifine ait kayaçlar havza içerisinde genellikle şistler ve mermerler olarak yüzlek vermektedir. Söz konusu şistler; granatlı, muskovit-biyotitli, serizit-kloritli, kuvars-muskovitli ve kuvarsitli seviyeler içerirken, mermerler bantsı ve merceksi yapılar göstermektedir (Oberhansli 1997).

Temel kayaçlar üzerinde yer alan Neojen sonrası birimler Şimşek (1984) tarafından tanımlanmıştır. Sun (1990)'ın Üst Miyosene tariheddiği Kızılburun formasyonu, temel birim üzerine uyumsuzlukla yerleşmiş olup çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı ve kiltaşından oluşmaktadır. Kızılburun formasyonu üzerinde yer alan Sazak formasyonu silttaşı, kiltaş ve masif kireçtaşlarından meydana gelmiş olup Kastelli (1971) ve Taner (1974) tarafından Alt Pliyosen'e, Göktaş (1990) tarafından Üst Miyosen'e tarihlendirilmiştir. Sazak formasyonu üzerine uyumlu olarak gelen ve Orta Geç Miyosen'e tarihlenen Kolonkaya formasyonu laminalı çamurtaşı-silttaşı ve marn, marn-kiltaş araldanması, kumtaşı, çamurtaşı ve killi kireçtaşından oluşmaktadır (Alçıçek ve diğ. 2007; Erten 2014). En üstte yer alan Kuvaterner yaşlı genç birimler Tosunlar formasyonu olarak adlandırılmış olup karbonat-kil çimentolu ve çoğunlukla beslenme alanının litolojilerini temsil eden çakıltaşı-kumtaşı araldanması ile marnlı kireçli seviyeleri içermektedir (Alçıçek 2007; Bülbül 2000; Çakır 1999; Gökgöz 1994) (Şekil 1.5).

Bölge, tektonik olarak aktif faylarla sınırlanmış, bu neotektonik sistemle ilişkili antitetik-sintetik faylarla şekillenmiştir. KB-GD doğrultulu bu faylar havzanın jeomorfolojisini direk olarak etkilemiştir. Uzunluğu en fazla 13 km. olan fay segmentlerinin oluşturduğu sistemin kuzeydeki parçaları Hierapolis, Akköy ve Tripolis segmentleri olarak adlandırılmıştır (Çakır 1999). Havzanın güneyinde ise Babadağ fayı, Bağbaşı'ndan başlayarak Servergazi, Şirinköy ve Göveçlik üzerinden geçerek Babadağ'a kadar ulaşmaktadır.

Y A Ş	FORMASYON VE KALINLIK	LİTOLOJİ	AÇIKLAMA
Kuvaterner	Alüvyal yelpaze, alüvyon, traverten		Konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, traverten <b>AÇISAL UYUMSUZLUK</b>
	Tosunlar Formasyonu (50- 250m)		Az pekleşmiş çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşı <b>AÇISAL UYUMSUZLUK</b>
Orta-geç Miyosen Geç Pliyosen	Kolonkaya Formasyonu (200-500m)		Memeli fosili; Tosunlar, Kıranyer Konglomera, kumtaşı, silttaşı
			Memeli fosili; Babadağ, Güzelpınar ve Mahmutgazi Az pekleşmiş kumtaşı, kiltası, silttaşı, siyah şeyl, marn, killi kireçtaşı Çamurtaşı, silttaşı, marn
Orta-Geç Miyosen	Sazak Formasyonu (150-300m)		Jips, halit, jipsli çamurtaşı ve şeyl Çörtlü kireçtaşı Memeli fosili; Pamukkale, Haytabey Kiltası, silttaşı, marn, çamurtaşı, killi kireçtaşı
Erken-Orta erken Miyosen	Kızılburun Formasyonu (300-450m)		Memeli fosili; Bostanyeri ve Kabağağaç Kömür, killi kireçtaşı Konglomera, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı
Paleozoik	Menderes Masifi		<b>UYUMSUZLUK</b> Mermer, kuvarşit, çeşitli şist ar dalanması Kalk şist, biyotit şist, klorit şist, muskovit şist, gnays, fillit, rekristalize dolomitik kireçtaşı

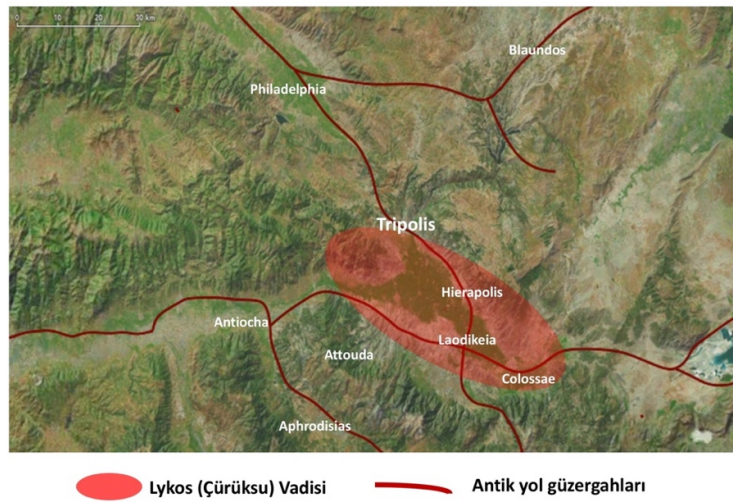
Şekil.1.5: Tripolis Antik kenti yakın çevresi stratigrafik kesiti (Alçıçek ve diğ. 2007; Şengün, 2011)

Tez çalışması amacıyla incelenen malzemelerin çıkarıldığı Tripolis antik kenti, 1/25000 ölçekli harita sisteminde UŞAK-L21-C3 paftası içerisinde yer almaktadır. Tez kapsamında jeolojik haritalama amaçlı saha çalışması gerçekleştirilmemiş, önceki araştırmacıların çalışmalarından faydalanılarak Tripolis antik kentinin yakın bölgesine ait jeolojik bilgiler sunulmuştur.

## 1.5 Tripolis Antik Kenti Tarihçesi

Tripolis antik kentinin de içerisinde yer aldığı Çürüksu vadisi, antik dönemde Lykos vadisi olarak bilinmektedir. Vadinin zeminini oluşturan ve Büyük Menderes nehrinin Miletus'da denize dökülmesine kadar izlediği hat üzerinde yer alan havza, Akdeniz iklimi ile karasal iklimin geçiş noktasında yer aldığından tarıma elverişli bir bölgedir. Ayrıca jeolojik konumu itibarıyla ulaşım ve ticarete bir geçiş noktası olma özelliği göstermektedir. Tüm bu nitelikleri nedeniyle havza, çağlar boyunca bir çok topluma ev sahipliği yapmıştır (Şimşek 2013).

Antik dönemde Lykos vadisi; Frigya, Karya ve Lidya topraklarının sınırlarının kesiştiği bölgede yer almıştır. Aynı zaman diliminde Menderes rotası olarak bilinen vadi, ticaret yollarının üzerinde yer alması sebebiyle önemli bir konuma sahiptir (Şimşek 2013) (Şekil.1.6).



Şekil.1.6: Lycus (Çürüksu) vadisi ve bölgeden geçen antik yol güzergahları

Lycos vadisinin en batısında yer alan Tripolis Antik kenti, yukarıda bahsedilen üç bölgenin sınırlarının kesiştiği noktanın kuzeyinde, Lydia bölgesinin güneydoğu sınırında yer almaktadır (Şekil 1.7). Kentin konumuna ait bu durum, Tripolis'in farklı tarihi kaynaklarda farklı bölgeler içerisinde değerlendirilmesine neden olmuştur. Değişik dönemlerde meydana gelen sınır değişikliklerinin de kentin konumuna ilişkin bilgilerin farklılık göstermesinde başlıca sebep olduğu düşünülmektedir (Duman 2016).

Tripolis'in yakın çevresinde yapılan yüzey araştırmaları, bölgedeki yerleşimlerin günümüzden yaklaşık 7500 yıl öncesine, yani Geç Kalkolitik-Erken Neolitik döneme kadar dayanan bir geçmişe sahip olduğunu göstermektedir (Konakçı 2017). Söz konusu Prehistorik bulgulara ulaşılmadan önce, kentin tarihi birçok araştırmacı tarafından Helenistik döneme dayandırılmıştır (Duman 2013).

Sikkelerden ve antik kaynaklardan edinilen bilgiler, kent yönetiminin birçok kez el değiştirerek farklı isimlerle adlandırıldığını göstermektedir. İlk olarak M.Ö. 3. yüzyılda Apollonia adıyla kurulduğu düşünülen kentin, üç bölgenin kesişim noktasında yer almasından ve bu bölgelerden gelen halkların yaşadığı bir kent olmasından dolayı M.Ö. 1. yüzyılda Tripolis adını aldığı düşünülmektedir (Duman 2013).



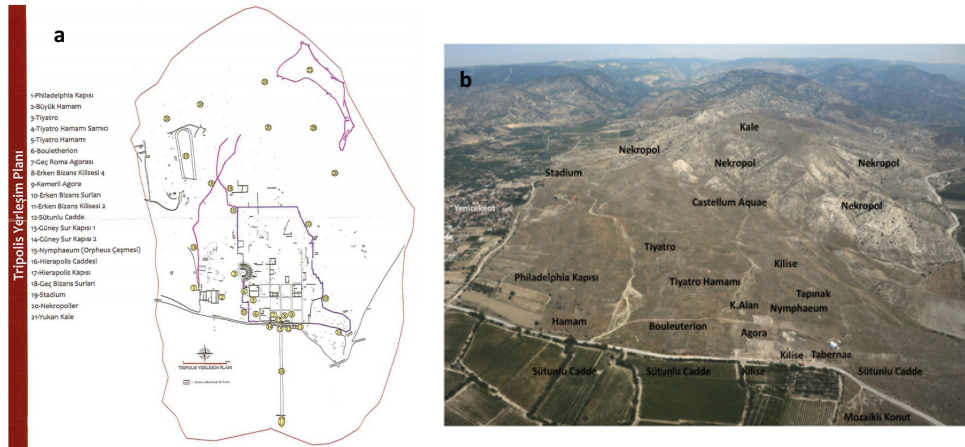
Şekil.1.7: Tripolis'in antik dönemdeki konumu

Kentle ilgili ilk bilimsel tespitler 17. yüzyılın ortalarından itibaren seyyahlar tarafından yapılmıştır. Arkeolojik anlamda ilk ciddi çalışmalar ise 1993 yılından itibaren Denizli Müzeler Müdürlüğü tarafından kısa dönem aralıklarıyla

gerçekleştirilmiş olup, 2012 yılından bu yana kesintisiz olarak Pamukkale Üniversitesi Arkeoloji bölümü öğretim üyesi Doç Dr. Bahadır Duman'ın kazı başkanlığında devam etmektedir. Yüzey araştırmaları, arkeolojik buluntular ve gün yüzüne çıkarılan mimari yapılar, kentin en ihtişamlı çağının Roma dönemi olduğunu göstermektedir (Duman 2016). Kentin; batısında tiyatro, stadium (stadyum), doğusunda agora, sütunlu cadde, kuzeyinde kale ve nekropoller (mezarlık) gibi klasik bir Roma kentine ait birçok mimari yapı gözlenmektedir (Şekil 1.8).

Tripolis'in, Laodikeia ve Hierapolis ile birlikte bölgenin önemli merkezlerinden birisi olduğu düşünülmektedir. Jeolojik konumu itibarıyla, kıyı Ege'den iç Ege ve Akdeniz'e giden ticaret yolları üzerinde yer alması bu tespiti güçlendiren en önemli veridir. Pergamon'dan başlayıp Sardeis, Philadelphia gibi kentlerden geçtikten sonra Tripolis kenti üzerinden Hierapolis ve Laodikeia kentlerine uzanan bu ticaret yolları, kente önemli bir geçiş noktası olma özelliği kazandırmaktadır (Duman 2013).

Kentteki kazı çalışmaları şu an için daha çok kent merkezi olarak düşünülebilecek ve agora, kutsal alan, ve meclis binası gibi sosyal yaşamın önemli yapılarını barındıran dar bir çevrede gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.9). Kentin ana geçim kaynağının tarım olduğu düşünülmeyle birlikte farklı üretim faaliyetlerinin de gerçekleştirilmiş olduğu yapılan çalışmalarla belgelenmiştir (Duman 2013).



Şekil.1.8: a) Tripolis Antik kenti mimari planı b) Yapıların havadan görünümü



**Şekil.1.9:** Tripolis Antik kenti güncel kazı alanı

## **1.6 Tripolis Antik Kentinde Yapılmış Olan Arkeometrik Çalışmalar**

Tripolis antik kenti ve bulunduğu bölgedeki Hierapolis, Laodikeia, Colossae gibi antik kentlerde bu tez çalışması öncesinde arkeometalürji alanında herhangi bir çalışma gerçekleştirilmediği, yapılan literatür taramaları ile saptanmış ve söz konusu kentlere ait kazı çalışmalarını yürüten kazı başkanları ile yapılan yüz yüze görüşmelerle teyit edilmiştir.

Kent ve yakın çevresinde tezin kapsamı konusunda herhangi bir çalışma gerçekleştirilmediğinden, önceki çalışmalar başlığı altında Tripolis antik kentinde yapılan arkeometrik çalışmalar verilecektir. Tez çalışmasına konu olan malzemelere ilişkin literatürdeki çalışmalar ‘Antik Dönem Madenciliği ve Metalürjisi’ ile ‘Cürufklar’ başlıkları altında verilecektir.

Tez çalışması öncesinde Tripolis Antik kentinde gerçekleştirilen arkeometrik çalışmalarda:

- Koralay ve diğ. (2015), kentteki koruma ve onarım çalışmalarında kullanılması amacıyla yapılarda kullanılan sıva ve harçları analitik yöntemler kullanarak incelemiştir.

- Koralay ve diğ. (2017), Tripolis antik kentindeki mimari yapılarda kullanılan yapı taşlarını mineralojik ve petrografik yöntemlerle inceleyerek sınıflandırmışlardır.
- Semiz (2016), kentteki seramik buluntuları üzerine araştırmalar gerçekleştirmiştir.
- Tarhan ve şenol (2017), kentteki kazılardan çıkarılan bronz heykel ayağı üzerinde konservasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.



## 2. ANTİK DÖNEM MADENCİLİĞİ VE METALÜRJİSİ

### 2.1 Antik Dönem Madenciliği

İnsanın yaşadığı çevre içerisindeki jeolojik kaynakların varlığı, tarih boyunca sosyal yaşantıyı ve teknolojik gelişimi etkilemiştir (Beaumont, 2010). Başlangıçta, şekil ve boyutlarına göre kullanılacak amaca yönelik olarak seçilerek doğal halleriyle kullanılan bu jeolojik kaynaklar, zaman içerisinde insanın malzemeye şekil verme becerisini kazanması ile birlikte kompleks üretim faaliyetlerini gerçekleştirmesinde başlıca hammaddeleri oluşturmuşlardır (Leakey ve Lewin 1978). İlkel taş araç-gereçlerden, seramik ve metal gibi ısı işlemler uygulanarak üretilen (piroteknolojik) araç-gereçlere geçiş süreci, gün geçtikçe çeşitlenen hammadde unsurlarının insanın hayatına girmesine olanak sağlamıştır (Tylecote 1976). Metal üretiminin hammaddesi olan maden kaynaklarının da bu unsurlardan bir tanesi olduğu, günümüz teknolojisi içerisindeki yerleri düşünüldüğünde açıkça görülmektedir.

Madenler, günün teknolojik imkanlarının sağladığı bilgi birikimi ile kullanıldığında insan yaşantısına doğrudan ya da dolaylı yoldan fayda sağlayan yer altı zenginlikleridir. Bu anlamda, madenciliğin gelişimi teknolojik bilgi birikiminin ve imkanların gelişimine paralel bir yapı göstermektedir. Ateşin henüz kullanılmadığı, tarım faaliyetlerinin olmadığı, hayvanların evcilleştirilmediği dönemlerden, günümüz yaşantısına ulaşana dek teknolojik gelişmelerle birlikte madenler ve madencilik kavramı anlamını değiştirmiş olsa da insan yaşamındaki önemini her zaman korumuştur. Bu durum Prehistorik dönemlerin, o dönemde kullanılan hammaddelere göre adlandırılmasından dahi anlaşılmalıdır. Taş devri, yontma taş devri, tunç devri vb. dönemler insanın teknolojik gelişimini ve hammaddelerin farklılaşmasını yansıtan buluntulardan hareketle bu isimleri almışlardır.

Maden kaynaklarının metal üretimi amacıyla kullanılması, Özdoğan (2014) 'e göre 2,5 milyon yıllık geçmişi olan insanlık tarihinin, son 10.000 yıllık dönemi içerisinde gerçekleşmiştir. Başlangıçta fiziksel özellikleri (renk, yoğunluk, sertlik vb.) ile dikkat çeken maden cevherlerinin ilk olarak, süs eşyası ve boyama amacı ile hayatımıza girdiği ve daha sonraki aşamalarda piroteknolojik tekniklerin keşfedilmesi

ile metal üretimi amacıyla kullanıldığı ve birçok yeniliğin önünü açtığı bilinmektedir (Tylecote 1976; Yalçın 2016).

Bu başlık altında, avcı-toplayıcı dönemlerden günümüze kadar gelişimini devam ettiren madencilik ve metalürji faaliyetlerine dönemselsel olarak kısaca değinilerek, konunun tarihsel arka planı verilmeye çalışılacaktır. Bu kapsamda, metallerin henüz keşfedilmediği fakat diğer jeolojik hammaddelerin kullanılmış olduğu, çok geniş bir zaman dilimini kapsayan Prehistorik dönemdeki gelişmeler ‘Kalkolitik Dönem öncesi’ başlığı altında; metalik buluntuların ilk defa karşımıza çıktığı döneme ait gelişmeler ‘Kalkolitik Dönem’ başlığı altında; madenlerin daha etkin kullanılarak bir çok yeni metalürjik tekniğin keşfedildiği ve alaşımların hayatımıza girdiği döneme ait gelişmeler ‘Tunç Çağı’ başlığı altında; demirin kullanılmaya başladığı ve metalin günlük hayatta kullanımının iyice yaygınlaştığı dönemden, Tripolis antik kentinden çıkarılarak tez çalışmasına konu olan buluntuların tarihlendirildiği Orta Çağ dönemine kadar olan sürede gerçekleşen gelişmeler ise ‘Demir Çağı’ başlığı altında verilecektir.

### **2.1.1 Kalkolitik Dönem Öncesi**

İnsanlığın başlangıcına ait izlere rastlanan en eski dönemlerden, yazının kullanılmaya başladığı yaklaşık 5000 yıl öncesine kadar geçen zaman aralığını kapsayan Prehistorik dönemlerin alt sınırı genellikle 2,5 milyon yıl öncesine tarihlenmiştir. Fakat modern bilimsel araştırmalar bu sınırı daha da aşağı çekecek bulguları bize sunmaktadır. Bu anlamda insana ait en eski araç-gereç buluntularını, Prehistorik dönemin en erken devri olan Paleolitik döneme tarihlenen taş aletler oluşturmaktadır. 3,3 milyon yıl öncesine tarihlenen söz konusu buluntular bazalt ve konglomera gibi kayaların basit yöntemlerle şekillendirilmesiyle üretilmiş aletlerdir (Harmand ve diğ., 2015). Genellikle beslenme ve savunma gibi amaçlar için kullanıldığı düşünülen bu aletlerin, insanın besin zincirinde üst sıralara tırmanmasını sağlayarak, türümüzün gelişiminde önemli bir yere sahip olduğu düşünülmektedir (Shick ve Toth 1994). Henüz metalik madenlerin kullanılmaya başlamadığı Paleolitik dönem aletlerine bakıldığında, genellikle sedimanter süreçlerin şekillendirdiği, sert ve

sivri yüzeyleri olan kayaların hammadde olarak seçildiği görülmektedir (Wright, 1992).

Taş aletlerin yanında, Paleolitik döneme tarihlenen birçok mağarada duvar resimleri ile de sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu duvar resimlerinde kullanılan boyaların, demir oksitçe zengin killer olduğu bilinmektedir. Bu nedenle -bilinçsizce de olsa- insanın kullandığı ilk metalin boyama amaçlı kullanılan demir oksitler olduğu düşünülmektedir (Tylecote 1976) (Şekil 2.1c,d). Fransa'daki Lascaux ve İspanya'daki Altamira mağaralarındaki duvar resimleri demir oksitlerin boya amaçlı kullanımına en güzel örneklerdir (Şekil 2.1a,b)

Prehistorik dönemde boya amaçlı kullanılan diğer malzemelere bakıldığında bakır minerallerinin başı çektiği söylenebilir. Malahit(yeşil) ve azurit(mavi) gibi bakır oksitler hem süs eşyası hem de boyama amacıyla Prehistorik dönemde sıklıkla kullanılmıştır (Rosenberg 1994; Özdoğan ve Özdoğan 1999).

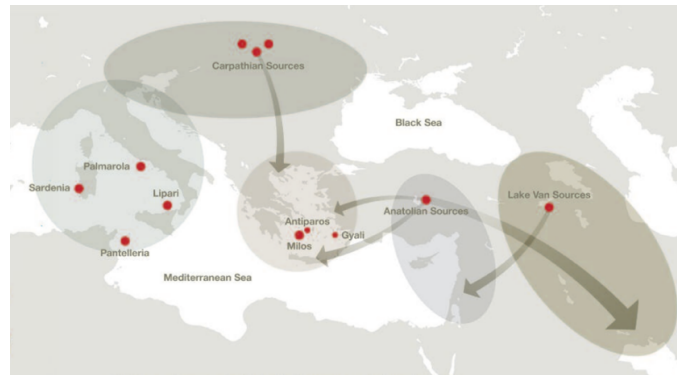


Şekil 2.1: a) Lascaux mağarası b) Altamira mağarası c) Aşiboyası olarak kullanılan doğal oluşumlar d) aşı boyası (okra)

Paleolitik dönemin ilerleyen aşamalarında insan, bir çok mineralin farklı özelliklerini keşfederek, başlangıçta doğal şekilleri ile kullandığı kayalara zamanla şekil verme becerisi geliştirmiştir. Neolitik olarak adlandırılan bu dönemde, kayalar üzerinde daha kompleks şekillendirme işlemleri gerçekleştirilmiş ve alet çeşitliliği artmıştır. Özellikle obsidyen ve mikrokristalen kuvars, alet üretiminde önemli birer hammadde kaynağı olarak kullanılmıştır (Rapp, 2009).

Felsik bileşimli ve yüksek silisyum içeriğine sahip volkanik ergiyiklerin hızlı soğuması sonucu oluşan obsidyenler; camsı yapıları, konkoidal kırılarak keskin yüzeyler oluşturmaları ve sertlikleri nedeniyle, Prehistorik dönemde bıçak, ok ucu, biz gibi kesici ve delici aletlerin üretiminde sıklıkla kullanılmıştır (Rapp 2009). Volkanik bölgelere özgü bir malzeme olduğundan hammadde kaynakları sınırlı olan obsidyenler üzerinde yapılan araştırmalar, Prehistorik dönemde dahi bu malzemelerin kaynağından binlerce kilometre uzak bölgelere taşındığını göstermektedir (Cauvin ve diğ., 1998) (Şekil 2.2).

Ülkemiz coğrafyası orta Anadolu'da Hasan dağ ve Erciyes dağı; doğu Anadolu'da ise Süphan, Nemrut, Ağrı dağları gibi tersiyer ve kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde Neolitik dönemde işletilmiş ve birçok bölgeye yayılmış obsidyen kaynaklarına sahiptir. Özellikle Niğde Göllüdağ ve Kaletepe mevkiindeki obsidyen yatakları üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda bu yatakların; İran, Afganistan ve Suriye gibi değişik bölgelerde ki kazılarda bulunan obsidyenlere hammadde kaynağı olduğu düşünülmektedir (Balkan-Atlı ve diğ, 2008; Özdoğan, 2008; Healey, 2007; Wright, 1969; Châtaignier ve diğ., 1998) (Şekil 2.3).

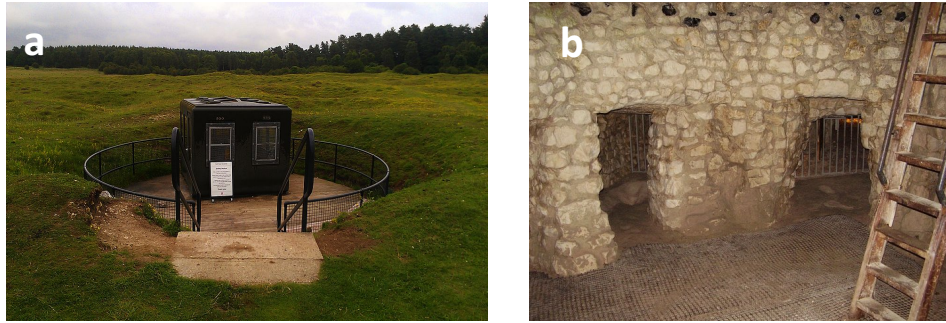


**Şekil.2.2:** Anadolu obsidyenlerinin Prehistorik dönemdeki yayılışı (Milos Mining Museum)



Şekil.2.3: a) Niğde Kaletepe prehistorik obsidyen atölyesi b) Atölye içerisindeki obsidyen kalıntıları

Paleolitik dönemde, volkanik aktivitelerin ve dolayısıyla obsidyen kaynaklarının uzağında kalmış bölgeler için, bir diğer önemli hammadde kaynağını da mikrokristalen yapıdaki silisik kayalar oluşturmuştur. Literatürde genellikle çakmaktaşı(ing. flintstone) olarak tanımlanan bu kayalar da obsidyenler gibi sertlikleri ve kırınım yüzeyleri nedeniyle günlük yaşamda kullanılan aletlerin üretilmesinde sıklıkla kullanılmıştır (Rapp 2009). Bu anlamda, günümüzden yaklaşık 5000 yıl öncesine tarihlenen İngiltere'deki Grime's Graves çakmaktaşı madeni ve galerileri bu kayaların önemini gösteren en ünlü örneklerden birisidir (Şekil 2.4a,b)



Şekil.2.4: a) Grimes Grave's prehistorik çakmaktaşı madeni b) Maden galerileri, İngiltere

Paleolitiğin ileri aşaması olan Neolitik dönemde insanlığın tanıştığı ilk metaller bakır ve altındır. Ayrıca tartışmalı da olsa çok az sayıda demir buluntusu mevcuttur. Fakat madencilik ve metalürji teknikleri açısından incelenen bu buluntuların, nabit bakır, nabit altın ile meteorik demir gibi saf yakın hammaddelerin, tavlama ve soğuk dövme gibi basit işlemlerden geçirilmesiyle üretilmiş olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Neolitik döneme tarihlenen metal buluntular incelendiğinde, metalin bu

dönemde daha çok ritüellerde ve süs eşyası amacıyla kullanılan bir malzeme olduğu görülmektedir. Bu yönüyle, paleolitik dönemde bir prestij malzemesi olma özelliği gösteren metal objelere, kutsal anlamlar yüklenmiştir. Ayrıca bakır ve altının taşlara göre çok daha yumuşak malzemeler olması nedeniyle bu metaller araç-gereç ve savunma aletleri gibi bir çok objenin üretiminde kullanılamamıştır. Bu nedenle kalkolitik öncesi dönem, metallerin günlük yaşantıda çok daha az kullanıldığı ve nadir görülen malzeme ler olduğu bir dönem olma özelliği göstermektedir.

Neolitik dönemin son aşamalarında insan, Anadolu ve Yakın Doğu coğrafyasında metaller ile tanışarak, kademeli ve görece yavaş bir gelişim süreci ile birlikte Kalkolitik dönemi başlatmıştır.

### **2.1.2 Kalkolitik Dönem**

Kalkolitik dönemle birlikte insan, ateşi kullanmakta iyice ustalaşmış ve çanak-çömlek üretimi ile birlikte metal üretiminde de ateşi daha aktif kullanarak ekstraktif metalürji uygulamalarına başlamıştır . Ekstraktif metalürji uygulamalarının ilk defa Anadolu ve Yakın Doğu'da kullanıldıkları düşünülmektedir (Rapp 2009; Yalçın 2016). Bakırın gitgide çok daha etkin olarak kullanıldığı bu dönemle birlikte Neolitik yerini Kalkolitik (bakır taş çağı) döneme bırakmıştır.

Neolitik dönemin çanak-çömleksiz aşamalarından itibaren metal, ilk olarak bakır ile insanın hayatına girmiştir (Yalçın 2016). Anadolu'daki Çayönü Tepesi ve Aşıklı Höyük'ten çıkarılan ve MÖ. 9000 sonlarına tarihlenen buluntular bunun ilk kanıtlarıdır. Söz konusu buluntu grubunu, nabit bakır kullanılarak soğuk dövme tekniğiyle ve ateş kullanılıp tavlansak işlenmiş süs eşyaları ile iğne, kanca gibi araç-gereçler oluşturmaktadır (Yalçın ve Pernicka 1999). Ayrıca Anadolu'da prehistorik bakır madenciliğine dair örneklerde mevcuttur. Çorum ili Bayat ilçesi Derekütüğün köyünde bulunan ve Prof. Dr. Ünsal Yalçın başkanlığında kazılan antik bakır madeni, günümüzden yaklaşık olarak 5500 yıl öncesine tarihlenmiştir (Şekil 2.5).

Altının insanın hayatına girmesi bakıra göre daha geç gerçekleşmiştir. Bu durumun başlıca sebebinin, yeryüzünde altın kaynaklarının bakıra oranla daha kısıtlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Günümüzde bilinen en eski altın

buluntuları yaklaşık 7000 yıl öncesine tarihlenen ve Bulgaristan'daki Varna yakınlarında günyüzüne çıkarılan buluntular oluşturmaktadır (Tekin 2015).



Şekil.2.5: Derekütüğün prehistorik bakır madeni ve galerileri, Çorum

### 2.1.3 Tunç Çağı

Tunç çağı ile birlikte metallerin işlenmesinde kullanılan teknikler daha kompleks bir yapı kazanmış ve insanoğlu alaşımları üretmeye başlamıştır. İlk kullanılan metalin bakır olmasının doğal bir sonucu olarak, üretilen ilk alaşımlar da bakır alaşımları olmuştur. Bu durumun, bakır cevherlerine ait mineral parajenezlerinin çeşitliliği ve eser miktarda da olsa alaşım oluşturabileceği farklı elementleri bünyesinde barındırması nedeniyle gerçekleşmiş olabileceği, jeokimyasal açıdan bakıldığında doğal bir sonuç olduğu düşünülmektedir (Tekin 2015).

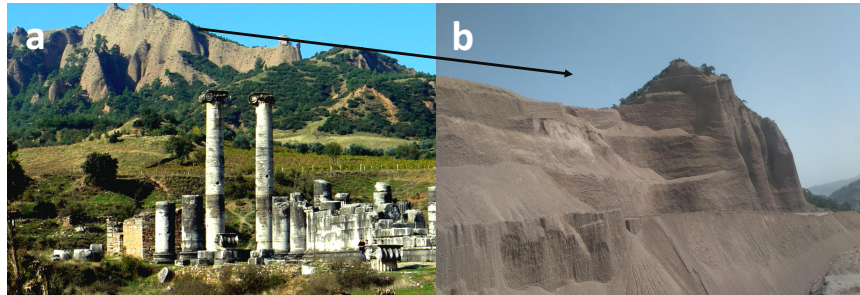
Alaşımların ortaya çıkışı ile ilgili bir çok teori ortaya atılmaktadır. Bu teorilerin en güçlüsü, polimetalik cevherlerin ergitilmesi sırasında cevherin doğasında olan farklı elementlerin birbiri ile reaksiyona girerek kontrolsüz şekilde ortaya çıktıklarıdır. Örneğin bilinçli bir arsenikli bakır alaşımının elde edilmesi için arsenik oranının %2'den fazla olması gerekmektedir (Hauptmann ve Palmieri 2000). Fakat erken dönem örneklerinde yapılan çalışmalar, malzemelerin bir çoğunda bu oranın altında arsenik içeriklerine işaret etmektedir. Başlangıcı tesadüf sonucu olsada, daha sonraları bilinçli şekilde alaşımlar üretildiği açıktır (Tekin 2015). Metalik elementlerin farklı elementlerle farklı oranlarda karıştırılması sonu elde edilen alaşımlarla bir çok yeniliğinde önü açılmıştır. Örneğin bakır-arsenik karışımının bakırın sertliğini

arttırdığı keşfedilmiş ve tek başına dirençsiz bir malzeme olan bakır, ilk defa silah üretiminde kullanılmaya başlanmıştır (Tylecote 1976).

Zamanla arsenik dışında kalay, çinko ve gümüş gibi elementlerin de bakırla alaşımlar oluşturabildiği keşfedilmiş ve farklı amaçlarla kullanılmıştır (Tylecote 1976). Bakır- çinko karışımı olan pirinç ve bakır- kalay karışımı olan tunç (bronz) bu alaşımlar içerisinde en önemli olanlarıdır. İki malzemede bakıra göre daha sert malzemeler olma özelliği göstermelerinin yanı sıra, daha farklı avantajlara da sahiptir. Pirinç, çok sert olmasının yanı sıra renk ve parlaklığından dolayı altına benzediğinden, tunç ise bakıra oranla daha düşük ıslarlarda çalışma imkanı verdiğinden geçmiş dönemlerden bugüne kadar kullanılagelen bakır alaşımları olmuşlardır (Tekin 2015). Kalkolitik dönemi takip eden bu dönem, yine bu alaşımlardan birisi olan tunçtan ismini alarak Tunç Çağı olarak adlandırılmıştır.

Arkeolojik anlamda bir diğer önemli alaşım ise altın-gümüş karışımı olan elektrumdur. Altına göre daha sert ve mat bir malzeme olan elektrumun da bakır alaşımlarında olduğu gibi tesadüf eseri üretilen bir alaşım olduğu düşünülmektedir (Tekin 2015). Altın ve gümüş cevherlerinin sıklıkla bir arada bulunduğu göz önünde bulundurulursa, cevher kimyası açısından elektrumun oluşması için gerekli ortamın izabe(ergitme) işlemi ile yaratılması oldukça mümkün gözükmektedir.

Elektrum ve bronz araç-gereç üretimi dışında sikke yapımında da sıklıkla kullanılan iki alaşımdır. Sardis'te ilk parayı basan Lidya'lılara ait sikkeler üzerinde yapılan araştırmalar ilk sikke örneklerinin elektrumdan yapıldığını göstermektedir (Balmuth, 1971) (Şekil 2.6a,b).



Şekil 2.6: a) Sardis antik kenti b) Günümüzde de işletilmekte olan plaser altın yatağı



Tunç çağı boyunca, çanak-çömlek üretimindeki gelişime paralel olarak metal eserlerde de artış meydana gelmiştir. Bu artışın doğal bir sonucu olarak Tunç çağının sonlarına doğru metal, bir çok alanda kullanılan bir malzeme özeliği kazanarak günlük kullanımda kendisine yer edinmiştir (Tylecote 1976). Metalin sağladığı avantajlar, genellikle sel yataklarına yakın bölgelerde sulama tarımı ile uğraşan ve maden kaynaklarından uzakta yaşayan tarım topluluklarının, hareket halinde yaşayarak devamlı yeni kaynaklar bulan göçebe topluluklara karşı savunmasız ve teknolojik olarak geride kalmalarına sebep olarak sosyal yaşamı da etkilemiştir (Şenel 1995).

Eksraktif metalürji ve alaşımların getirdiği yenilikler Tunç çağı boyunca etkisini hissettirmiştir. Fakat demirin keşfedilerek kullanılmaya başlaması ile birlikte bakır ve tunç giderek yerini demire bırakmıştır.

#### **2.1.4 Demir Çağı**

Demir çağı ile birlikte metaller sosyal hayatta kendilerine iyice yer edinerek sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Fakat bu metallere demir, yüksek ergime sıcaklığı nedeniyle insanın hayatına çok daha geç bir dönemde girmiş ve hızlı bir şekilde insan yaşatısında dominant bir metal konumuna gelmiştir.

Levant bölgesinde yapılan arkeolojik araştırmalar, Yakınoğu'nun M.Ö. 1000 civarında Demir Çağı'na girdiğini göstermektedir (Gubel, 2000; Muscarella, 1988). Yakınoğu'da M.Ö. 12. yüzyılda savunma amaçlı araç gereçlerin %3'ü demir, geri kalanı tunç kullanılarak üretilirken, M.Ö. 10. yüzyılda demir kullanımı oranı %50'yi geçmiştir (McEvedy, 2005). Bu erken aşamada demir, tunçtan çok daha kıymetli bir malzeme iken, gelişen metalürjik teknikler ve yüksek talep nedeniyle giderek ucuzlamıştır. Bu durumun başlıca sebeplerinden birisi; demir elementinin yer kabuğunda %7 civarında bulunması –bakırın 10.000 katı- ve cevher kaynaklarının çok daha yaygın olmasıdır. Ayrıca, demirin yüzeye yakın bölgelerde de cevherleşebilmesi ve tuncun hammaddesi olan bakıra kıyasla daha kolay ulaşılabilmesi de diğer etkenlerdir (Michler ve diğ., 1990).

Demir çağı itibariyle gelişim sürekli olarak devam ederek günümüz metalürjisinin temelleri geliştirilerek kullanılmıştır. Günümüzde dahi kullanılan

birçok teknik, yüzyıllardır değişmeden uygulanarak metal üretimi amacıyla faydalanılmaktadır (Şekil 2.7).

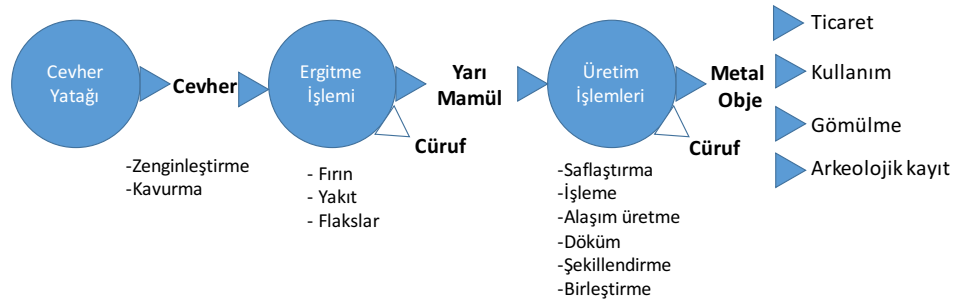


Şekil 2.7: Günümüz ilkel Afrika kabilelerinde metal üretimi a) Ergitme işlemi b) Luppe

## 2.2 Antik Dönem Metalürjisi

Antik dönem metalürji uygulamaları günümüzdekine benzer fakat daha ilkel araç gereçler ile gerçekleştirilmiştir. Cevheri, metal objeye dönüşüm süreci günümüzdekinden çok daha fazla zaman ve emek gerektirdiğinden, metal objeler günümüzdekinden çok daha fazla kıymetli olmuştur.

Metal üretim süreci ilk olarak hammadde kaynağı olan cevher yatağının bulunması ile başlamaktadır. Yataktan çıkarılan cevher, zenginleştirme ve kavurma gibi işlemlerden geçirilerek daha az enerji ile ergitmeye hazırlanarak yarı mamul haline getirilmiş ve sonrasında metal ustaları tarafından çeşitli işlemlerden geçirilerek metal objelere dönüştürülmüştür (Şekil 2.8).



Şekil.2.8: Antik dönem metalürjik işlem zinciri (Hauptmann, 2014'ten değiştirilerek)

## 2.2.1 Cevher Hazırlama

Üretim amacı ile toplanan cevherlerin, hem enerjiden hem de zamandan tasarruf edilmesi adına bir dizi işlemde geçirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin antik dönemde, cevherlerin uzağa taşınmasının getireceği ekstra işgücünden dolayı genellikle cevher yatağının yakınındaki alanlarda gerçekleştirildiği bilinmektedir (Yalçın, 2016) (Şekil 2.9). Antik dönemde başlıca cevher hazırlama işlemleri cevher zenginleştirme ve kavurma işlemleri olmuştur.



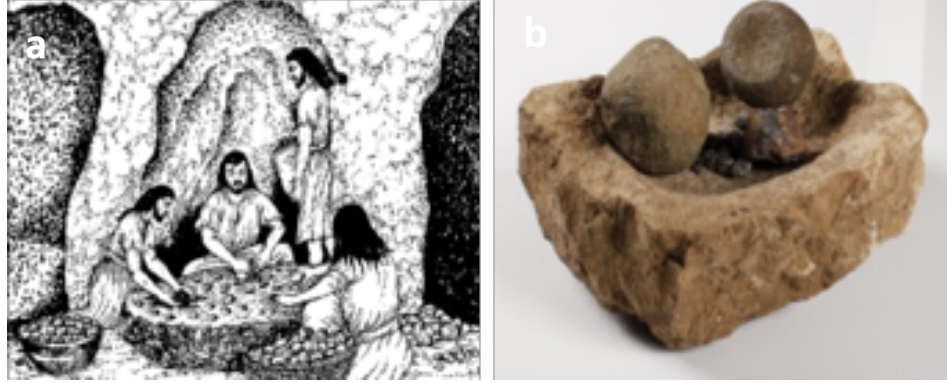
Şekil.2.9: Antik dönem maden ve işçilik alanı illüstrasyonu (Yalçın 2016)

### 2.2.1.1 Cevher Zenginleştirme

Genellikle heterojen bir bileşime sahip olan cevherler, metalik bileşenlerin yanında gang minerali olarak adlandırılan metalik olmayan bileşenlerde içermektedir. Metalik cevherlerde, gang mineralleri çoğunlukla silikatlar ve karbonatlardır (Serneels ve Perret, 1993; Craddock, 2010).

Zenginleştirme amacıyla, cevher öncelikle parçalanarak daha küçük tanelere bölünür. Sonrasında, bu taneler içerisinde metalik bileşenler, elle ayrıştırılarak gang minerallerinden uzaklaştırılır (Craddock, 2010). Elle seçmenin dışında hava akışı yada suyla yıkama gibi tanelerin yoğunluk farkından faydalanılarak gerçekleştirilen daha sofistike yöntemlerde kullanılmıştır (Craddock, 2010).

Zenginleştirme işlemi cevherin türüne göre farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin plaser tipteki bir cevher yatağında sadece yıkama ve ayırma işlemi yeterli zenginleştirme için yeterli olurken, saçınımlı tipteki bir yatakta öğütme yapmak taneleri öğütmek gerekebilmektedir (Craddock, 2010). Bu farklılıklar zenginleştirme işleminde kullanılan araç-gereçlerinde çeşitlilik göstermesine sebep olmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil.2.10: a)Antik dönem cevher zenginleştirme işlemi illüstrasyonu (Kaptan, 1995) b) Cevher öğütme havanı (Yazar, MTA Madencilik Müzesi)

#### 2.2.1.2 Kavurma (Sinterleme)

Zenginleştirilen cevherin düşük sıcaklıkta (300°-600°C) birkaç gün ısıtılarak kavrulması belirli avantajlar sağlamaktadır (Joosten, 2004). Sinterleme olarak da adlandırılan kavurma işlemi sayesinde, metallere bileşik halinde bulunan sülfür (ör. pirit:  $FeS_2$ ) ve karbonatlar (ör. siderit:  $FeCO_3$ ) gibi bileşenler serbestleşerek oksitlere dönüşür (Craddock, 2010).

Kavurma işlemi ile aynı zamanda, cevher içerisinde bulunan su uzaklaştırılır (ör. limonit:  $FeO(OH).nH_2O$ ) ve nemden arınmış cevher daha az enerji ile ergitilebilir. Tüm bu süreçler aynı zamanda cevheri daha gözenekli ve dolayısı ile daha kırılabilir hale getirmekte ve öğütme işlemini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle kavurma işlemi bazen öğütmenin daha kolay yapılabilmesi için cevher zenginleştirme işlemi öncesinde yapılabilmektedir (Şekil 2.11).



Şekil.2.11: Kavurma işlemi uygulaması

## 2.2.2 Ergitme (İzabe) İşlemi

Metalürjide izabe olarak da adlandırılan ergitme işlemi, cevherden metal elde etmenin ilk basamağıdır. Zenginleştirme işlemi ile gang minerallerinden kabaca ayrılan metalik bileşenler bu aşamada, yüksek sıcaklık ve termokimyasal reaksiyonların yardımı ile rafine edilerek yarı mamul haline dönüştürülmektedir.

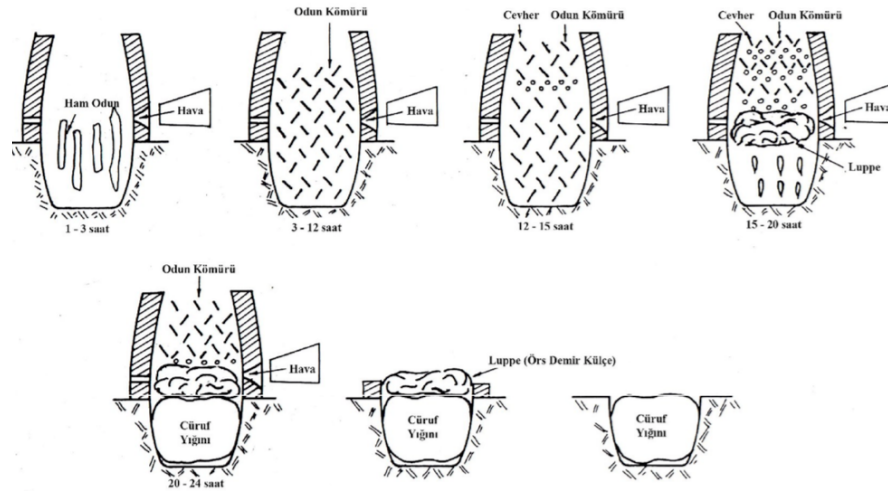
Antik dönemde ergitme işlemi için farklı araçlar ve malzemeler kullanılmıştır. Fakat fırın, yakıt ve flakslar (ergitici) ergitme işlemi için gerekli en önemli ihtiyaçlardır.

### 2.2.2.1 Fırın

Antik dönemde ergitme işlemi için değişik tipte fırınlar kullanılmıştır (Coghlan, 1956). Bu farklılığın başlıca sebebi, üretilen metallerin ve dolayısı ile cevherlerin farklı ergime sıcaklıklarına sahip olmasıdır. Örneğin kalay gibi düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için basit şekilde yapılan açık ocak tipi bir fırın yeterli iken, bakır ve demir gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller için daha büyük ve kompleks fırınlar gerekebilmektedir.

İnsanoğlu uzunca bir süre ilkel fırınlar kullanmıştır. Demirin insanın hayatına diğer metallere göre çok daha geç girmesinin başlıca nedenide bu ilkel fırınlardır. İlkel fırınlar ile demir üretimi için gerekli 1150-1200 °C sıcaklığa M.Ö. 2000'lere değin ulaşamamıştır (Tylecote, 1976).

Ergitme işlemi sırasında odun veya odun kömürü ile yakılan fırına eklenen cevherler, hem indirgenme tepkimeleri hem de flaksların eklenmesi ile fırın içerisinde ergiyip ayrışarak metalce zengin yarı mamul ve gang mineralleri ile metal oksitlerce zengin cürufklar olmak üzere ayrılırlar (Serneels ve Perret, 2003) (Şekil 2.12).



Şekil.2.12: Yüksek tipli kapalı izabe fırını ve cüruf oluşumu

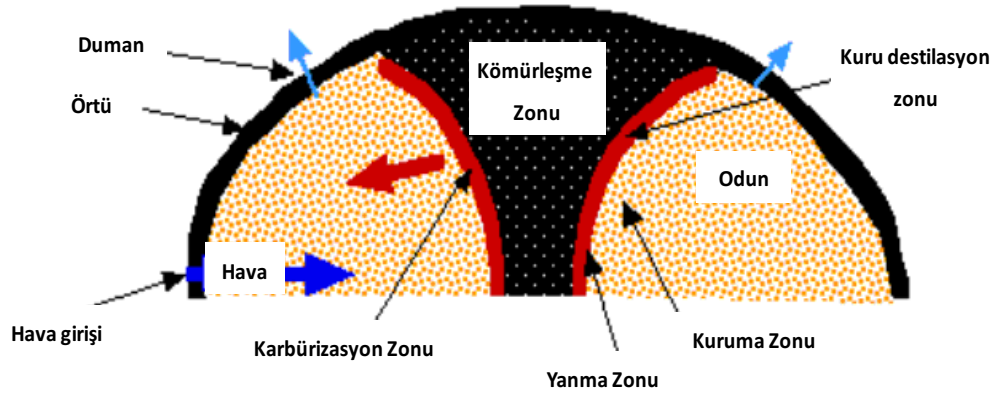
### 2.2.2.2 Yakıt

Metalürjik işlemler, başlangıcından son aşamasına kadar ısıl işlemler gerektirmektedir. Antik dönemde kömür henüz bilinen bir malzeme olmadığından işçilik ocaklarında yakıt olarak odun ve odun kömürü kullanılmıştır (Coghlan, 1956; Healy, 1978). Meşe, çam, kayın, kestane gibi ağaçlar, hem sert yapıları hem de yüksek kaloride ısı üretebildikleri için en çok kullanılan yakıtlardır (Craddock 1995; Healy, 1978).

Her konuda olduğu gibi zaman içerisinde yakıt konusunda da uzmanlaşan insan, başlangıçta direk olarak kullandığı odunun, belirli işlemlerden geçirildiğinde daha verimli olduğunu keşfetmiş ve koklaştırma işlemi ile odundan odun kömürü

üretmeyi başarmıştır. Daha yüksek kaloride ısı sağlayan odun kömürü, antik dönemde metalürjik uygulamalarda sıklıkla kullanılmıştır.

Odun kömürü üretimi için kullanılan ocaklara 'torluk' adı verilmektedir. Torluklar, kesilen kuru odunların düzenli bir şekilde istiflenip, üzerleri çamur benzeri örtü tabakası ile kaplanarak ve hava akışı için kanallar oluşturularak kontrollü şekilde yakıldığı kubbe biçimli ocaklardır (Şekil 2.13). Bu işlem ile odunun içerisindeki nem iyice uzaklaştırılarak odun kömürleştirilir ve bu işlem sonucunda odun %70 oranında hacim ve ağırlığını kaybeder (Healy, 1978).



Şekil.2.13: Torluk uygulaması ve şematik gösterimi (Harris, 1999)

### 2.2.2.3 Flakslar

Flakslar, ergitme işlemi sırasında termokimyasal indirgeme tepkimeleri ile oksitleri bağlayarak metallerin daha kolay serbestleşmesini sağlayan ergitme ajanlarıdır (Tylecote, 1976). Aynı zamanda, cevherin ergime ısısını düşürdüklerinden, daha az enerji ile metallerin oksitlerden ve gang bileşenlerden ayrılmasını sağlamaktadırlar (Tylecote, 1976) (Tablo 2.1). Silisyumca zengin kumlar, killer, karbonatlı kayaçlar ve metal oksitler antik dönemde flaks olarak sıklıkla kullanılan malzemeler olmuşlardır (Serneels ve Perret, 2003; Tylecote 1976).

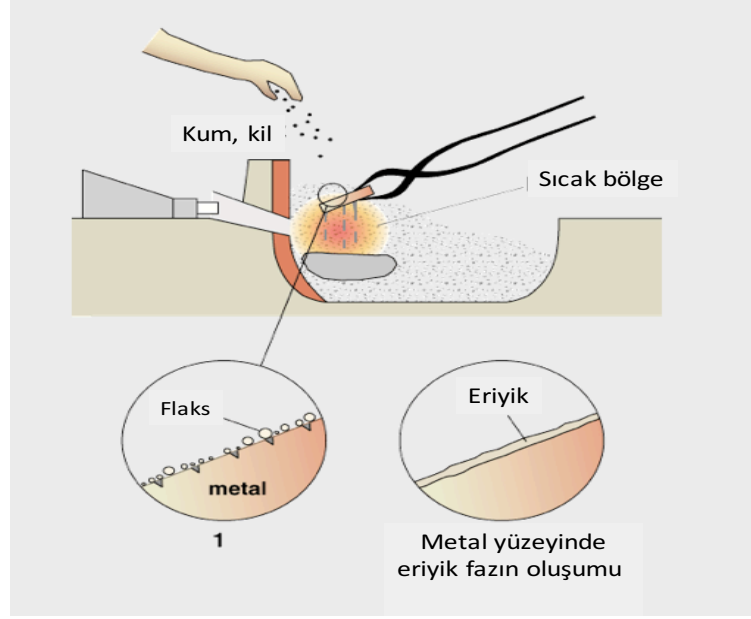
Ergitme işlemi sırasında, gang mineralleri ile metalik bileşenlerin birbirinden verimli bir şekilde ayrılması için yüksek viskozite istenmediği gibi, gang mineraller ile birlikte metal bileşenleri de kaybetmemek adına düşük viskozite de istenmez. Flakslar aynı zamanda eriyiğin viskozitesini etkileyerek ergitme işleminin daha efektif şekilde yapılmasına da yardımcı olmaktadır (Dennis, 1971).

**Tablo 2.1:** Kullanılan flaksların oranlarına göre ergime sıcaklığında meydana gelen değişim (Tylecote, 1976)

Bileşim %			Ergime sıcaklıkları °C
FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	
78	22	0	1180
70	30	0	1200
62	38	0	1180
60	40	0	1400
59	29	12	1115
40	40	20	1150
35	35	30	1200
30	30	40	1500
0	50	50	1540

Flakslar, ergitme işlemi dışında üretim aşamasında da kullanılmaktadır. Metalin oksitlenmesini ve soğumaya bağlı çatlakları engellemek önlemek amacıyla üretim sırasında kil, kum gibi silisyumca zengin malzemeler kullanılarak metalin yüzeyinde ince bir tabaka oluşturularak metalin korunması sağlanmaktadır (Serneels ve Perret, 2003) (Şekil 2.14).





Şekil.2.14: Flaksların metal yüzeyinde tabaka oluşurması (Serneels, 2003)

Ergitme ve üretim işlemi sonrasında flaksların bir kısmı metal bileşenlerin yapısında kalırken, büyük çoğunlukları gang mineralleri ile birlikte cürufkların yapısına girerler (Serneels ve Perret, 2003).

#### 2.2.2.4 Yarı Mamuller

Ergitme işlemi sonrasında cevher yarı mamul haline getirilerek hafifletilir. Yarı mamul halindeki metal, henüz yeterince saflaştırılmadığından bir dizi işlemde daha geçirilerek rafine edilmesi gerekebilir. Rafine işleminden sonra, ara ürün olarak farklı objelerin üretiminde kullanılmak üzere levha, bar ya da külçe haline getirilir.

Bu aşamada, gang minerallerinden ayrılarak rafine edilen yarı mamul, ağırlık ve hacimce daha küçüldüğünden nakliye için uygun hale gelmiştir. Antik dönemde metal üretimi de ergitme işlemi benzer şekilde maden ocağı yakınında yapılabildiği gibi, yarı mamul olarak uzak bölgelere de gönderilebilmekte olduğu bilinmektedir (Şekil 2.15). Bu anlamda en iyi örneklerden birisi Uluburun gemisine ait batıkta bulunan bakır külçelerdir (Gale, 2015).



**Şekil.2.15:** Mısır hiyeroglifinde bakır külçe ve antik bakır külçe örneği (MTA Madencilik Müzesi)

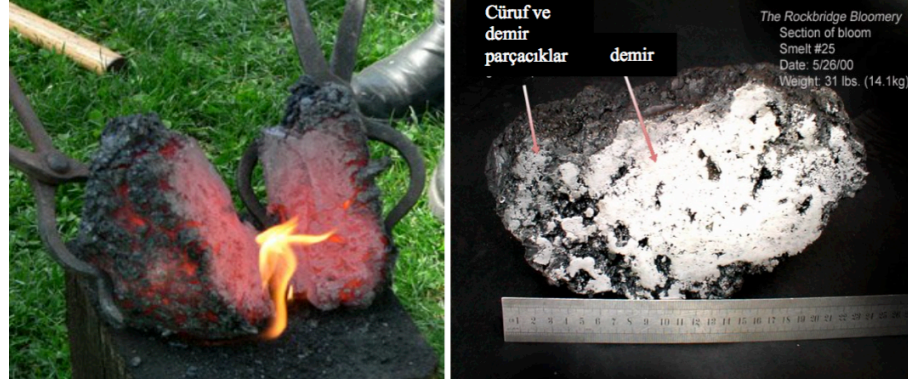
Yarı mamul haline getirilen metal, bu aşamadan sonra metal ustalarına ulaştırılarak işçilik alanlarında metal objelere dönüştürülmek üzere bir dizi işlemden geçirilir.

### 2.2.3 Üretim İşlemleri

#### 2.2.3.1 Saflaştırma

Antik dönemde doğrudan gerçekleştirilen ergitme süreci, modern ergitme prosedürlerinden çok daha az verimlidir. Özellikle demir üretiminde yarı mamul olarak elde edilen luppeler, çok miktarda cüruf ve kömür kalıntısı içermektedir (Blakelock ve diğ., 2009; Craddock, 2010) (Şekil 2.16).

Luppeler heterojen şekilde dağılmış bol miktarda gözenek ve cüruf inklüzyonları içermeleri nedeniyle oldukça kırılgan bir yapıya sahiptir (Blakelock ve diğ., 2009). Cürufu sıkıştırmak ve gözenek boşluklarını azaltmak için, luppe yaklaşık 1000 ° C'lik bir sıcaklıkta tekrar ısıtılır ve dövülür (Blakelock ve diğ., 2009; Craddock, 2010). Bu işlem sonrasında metalik demir büyük ölçüde saflaştırılarak üretim için uygun hale getirilir. Bu ısıtma ve çekişleme işlemi birkaç kez tekrarlanır. Luppeyi saflaştırmak ve saf bir metal kütlesine dönüştürmek zaman alan bir işlemdir (Blakelock ve ark., 2009; Craddock, 2010).



Şekil.2.16: Akkor halindeki luppe ve soğuduktan sonraki görünümü (Tarhan, 2009)

Saflaştırma işlemi sonucunda luppe yabancı malzemelerden arındırılarak örs demir olarak adlandırılan metalik demir elde edilir ve üretimde kullanılır.

### 2.2.3.2 İşleme

Saflaştırılan metaller obje üretimine hazır hale getirilmeden önce levha ya da bar haline getirilerek yapılacak objenin niteliğine göre hazırlanır. Örneğin bir kap üretmek için metali öncelikle levha haline getirmek gerekirken, çivi üretmek için çubuksu barların hazırlanması gerekmektedir.

### 2.2.3.3 Alaşım Üretme

İki farklı metalin ergitilip belirli oranlarda karıştırılması ile alaşımlar üretilir. Alaşımlar metallere farklı özellikler kazandırabildiğinden sıklıkla tercih edilen malzemelerdir. Örneğin yumuşak bir metal olan bakır, 9'da 1'i oranında kalay ile alaşım haline getirildiğinde tunç oluşur ve bakırdan daha sert bir malzeme olan tunç farklı amaçlar için kullanılabilir (Tekin, 2015).

### 2.2.3.4 Döküm

Ergitilen metalin kalıplara dökülerek soğutulup belirli bir form alması işlemdir. Antik dönemde ergime noktası düşük olan bakır, altın, gümüş, kurşun, kalay

gibi malzemeler sıvı hale getirilebildiğinden sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Fakat demir için aynı durum söz konusu değildir (Tekin, 2015).

### **2.2.3.5 Şekillendirme**

#### **2.2.3.5.1 Soğuk Dövme**

Genellikle altın, gümüş, bakır gibi yumuşak metallerin ısıtılma işlemi uygulanmadan çekiç ve örs yardımıyla şekillendirilmesi işlemidir (Tekin, 2015).

#### **2.2.3.5.2 Sıcak Dövme**

Demir gibi sert metallerin soğuk dövme ile şekillendirilmesi güç olduğundan ısıtılması gerekmektedir. Isıtılan metalin yine çekiç ve örs yardımıyla şekillendirilmesi işlemine sıcak dövme denilmektedir (Tekin, 2015).

### **2.2.3.6 Birleştirme**

#### **2.2.3.6.1 Perçin**

İki metal parçanın, çivi benzeri başka bir metal yardımıyla birleştirilmesi işlemidir. Genellikle levhaların birleştirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Birleştirilecek metallerin içerisinden geçirilen çivi benzeri metal dövülmesiyle gerçekleştirilir (Tekin, 2015).

#### **2.2.3.6.2 Lehim**

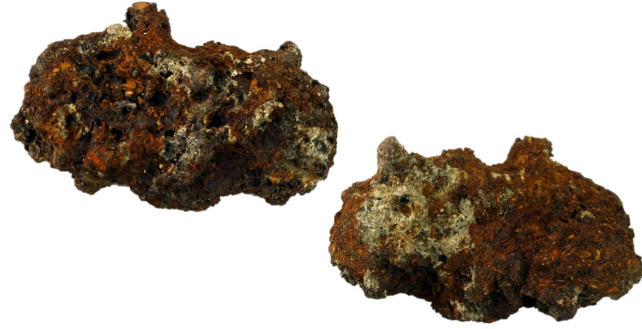
İki metal parçanın, ergime noktası daha düşük olan başka bir metal yardımıyla birleştirilmesi işlemidir (Tekin, 2015).

### **2.2.3.6.3 Kaynak**

Metal levhaların birbirleri üzerine katlanarak basınç yardımıyla birleştirilmesi işlemidir (Tekin, 2015)

### 3. CÜRUFLAR

Cürüflar, metalürjik faaliyetlerden geriye kalan atık malzemelerdir (Bachmann, 1982). Geç neolitik dönemden itibaren arkeolojik kazılarda metalürji faaliyetleri ile ilişkili cürüflara sıklıkla rastlanmaktadır (Hauptmann, 2014). Arazide genellikle volkanizma ürünü doğal malzemelerle karıştırılan cürüflar insan aktivitesinin ürünleri ve bölgedeki metalürjik faaliyetlerin göstergesidir (Bachmann, 1982) (Şekil 3.1).



Şekil.3.1: Cüruf

Cürüflar, seramik ve metal objelerin aksine çıplak gözle tanımlanması zor olan malzemelerdir (Hauptmann, 2014). Makroskopik gözlemler ve petrografik özellikleri bazı durumlarda yardımcı olsa da, cürüfların doğru tanımlanabilmesi için mikro yapılarının incelenerek, analitik tekniklerinden faydalanılması gerekmektedir (Hauptmann, 2014).

Maden ocağından çıkarılan cevherin, işlenerek metal bir objeye dönüşmesi süresince birkaç farklı aşamada oluşabilen cürüflar, oluşmasına neden olan metalürjik işlemin kayıtlarını bünyesinde saklayan ‘fossil’ malzemelerdir. Metal objelerden elde edilmesi mümkün olmayan pek çok termokimyasal veri cürüflardan elde edilebilmektedir (Hauptmann, 2014). Bu durum, ‘üretim zinciri’ olarak adlandırılan işlem basamaklarının ve niteliklerinin tanımlanmasına imkan vermektedir.

### 3.1 Cürufların Morfolojisi

Cüruflar; heterojen bileşimli, bol gözenekli ve belirli bir şekle sahip olmayan malzemelerdir (Bachmann, 2003). Ayrıca, bozunma ve mekanik deformasyonlara bağlı olarak gerçekleşen kimyasal ve fiziksel deformasyonlar karakterize edilmelerini olumsuz yönde etkilemektedirler. Gözle tanımlanmaları zor olsa da fiziksel özellikleri ve sundukları makro yapılardan yola çıkılarak üzerlerinde sınırlı yorumlar yapılabilmektedir (Hauptmann, 2014).

Metal üretim zincirindeki farklı adımlar değişik tipte cüruf türlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Genel olarak, ergitme cürufları üretim cüruflarına kıyasla daha homojen bir kimyasal ve mineralojik yapı göstermektedirler. Ergitme cüruflarının şekli fırın tipine göre değişiklik göstermektedir. Eğer cüruf fırının tabanında toplanır ve katılırsa, karakteristik bir şekle sahip olmayan büyük bir cüruf kütlesi oluşur (Bachmann, 1982). Cüruf fırının dışına akıtılır ve katılırsa, cürufun üst tarafında akış dokularının, alt kısmında ise genellikle toprak döküntüsünün gözlenmesi ile karakterize edilebilmektedirler (Bachmann, 1982).

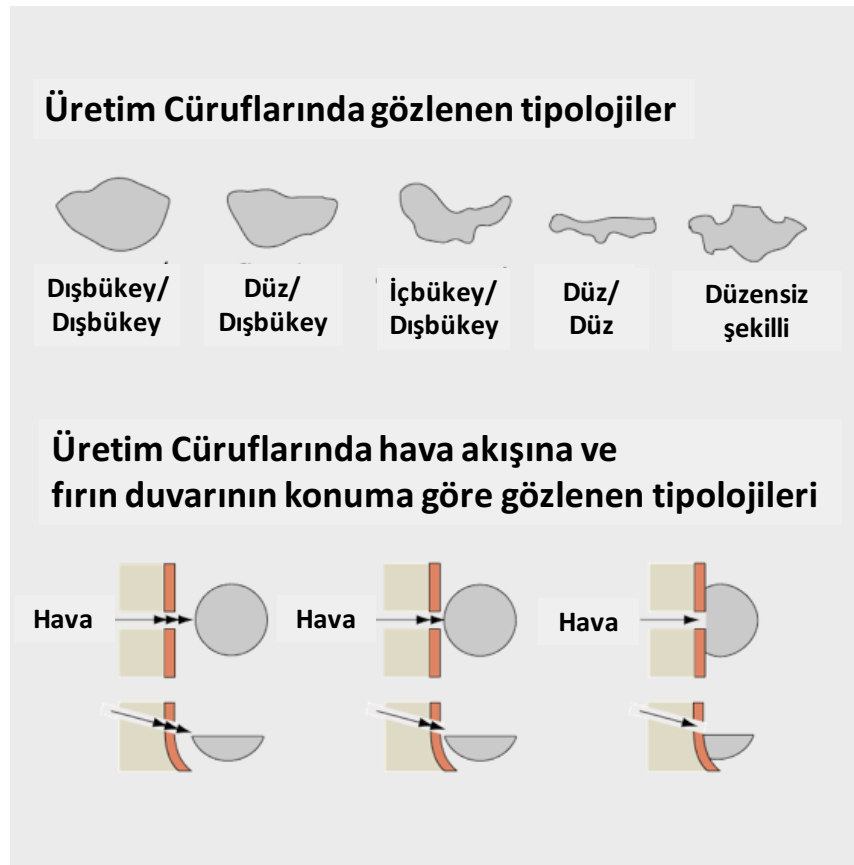
Üretim cüruflarının morfolojileri kullanılan ham demirin kalitesi, uygulanan teknikler ve üretilen metal objeye bağlı olduğundan, ergitme cüruflarına göre çok daha fazla çeşitlilik gösterirler (Serneels ve Perret, 2003). Üretim cüruflarını ergitme cüruflarından morfolojik olarak ayıran en önemli özellik, üretim cüruflarında fırının tabanı ile temas eden yüzeyin ocak zemininin ya da içinde bulunduğu odun kömürü yatağının şeklini alırken; üst yüzeylerinin üfleç ya da körükten gelen hava akımının pozisyonuna göre aldıkları dış bükey, düz ya da iç bükey şekilleri olduğu düşünülmektedir (Serneels ve Perret, 2003).

Ayrıca, üretim cürufları kesildiğinde körüğe bakan yüzeye yakın bölgelerin daha uzun süre daha yüksek sıcaklıklara maruz kalması nedeniyle daha az gözenekli ve daha yoğun olduğu; diğer bölgelerin ise daha gözenekli olduğu görülebilmektedir (McDonnell, 1991).

Ergitme ocağı ürünü yarı mamuller olan luppelerin formları da genellikle üretim cüruflarına benzemektedir. Luppelerin ergime işlemi sırasında fırın çeperine yapışması durumunda bir kenarları üretim cüruflarındaki gibi düz olabilmektedir.

Aynı zamanda hacim ve ağırlıkça da üretim cürufları ile benzerlik göstermeleri nedeniyle tanımlamalarda hatalar yapılabilmektedir. Luppeler, bünyesinde bulundurduğu bölgesel metal kütleleri ile demirci ocağı cüruflarından ayrılabilirler (Güder, 2015).

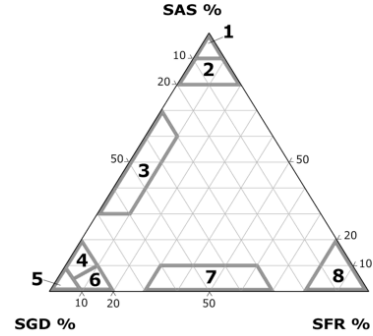
Serneels ve Perret (2003) üretim cüruflarını şekillerine ve bileşenlerine göre sınıflayarak üretim cüruflarının morfolojileri üzerinden bir diyagram önermişlerdir (Şekil 3.2 ve 3.3).



**Şekil.3.2:** Üretim cüruflarının tipolojileri ile tipolojilerinin hava akışı ve fırın duvarının konumuna bağlı değişimi (Serneels ve Perret, 2003)



Sınıf		% SAS	% SGD	% SFR
1	SAS	100		
2	SAS-M	80 to 90	10 to 20	10 to 20
3	SAS-SGD	50	50	
4	SGD-B	10 to 20	80 to 90	
5	SGD		100	
6	SGD-SFR	0 to 10	70 to 90	10 to 20
7	SFR-M		50	50
8	SFR			100



Şekil.3.3: Serneels ve Perret (2003)'ün önerdiği morfolojik sınıflama diyagramı

### 3.2 Cüruf Kimyası ve Mineralojisi

Önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanan metal üretim zincirindeki, ergitme ve üretim aktivitelerinin her aşamasında görülebilen cüruflar, ısıl işlemlerle ilişkili olarak oluşmaktadırlar (Tylecote, 1976).

Cürufların bileşimi; ergitilen cevherin türü, gang mineralleri, kullanılan flakslar, fırının yapımında kullanılan materyal, fırın tipi, kullanılan yakıt, işleme sıcaklığı, soğuma koşulları ve gömülmeye bağlı olarak gerçekleşen bozunma gibi birçok etkenden doğrudan etkilenmektedir (Bachmann 1982). Bu etki, kimyasal ve mineralojik farklılıklardan yararlanarak cürufların sınıflandırılmasını ve karakterize edilmesini mümkün kılmaktadır (Bachmann, 1982; Hauptmann, 2014; Serneels ve Perret, 2003).

Antik cüruflar incelenirken, günümüz modern cüruflarının aksine aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Antik dönemde fırınlar çok sık olmamakla birlikte en fazla 1300-1400 °C sıcaklığa ulaşırken bu sıcaklık genelinde daha düşük olmuştur,

- Isıtma işlemleri için kömür kullanılmamıştır, sadece odun ve odun kömürü kullanıldığı bilinmektedir,
- Flaks seçiminde kullanılan malzemeler sınırlıdır, cevhere ait gang mineralleri olan demir ve manganez oksitler ile karbonatlar, silikatlar ve belki de kalsiyum florit kullanılmış olması muhtemeldir,
- Fırın yapımında kullanılan malzemeler genellikle yakın bölgedeki kaynaklardan elde edilmiştir. Antik dönemde yüksek kalitede fırına rastlamak zordur (Bachman, 1982).

Cüruf kimyasına bakıldığında demir cüruflarına benzer şekilde, bakır, kalay cüruflarında da ana bileşenler FeO, CaO ve SiO<sub>2</sub>'dir; bazı cüruflarda sisteme Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>' de dahil olabilmektedir. Ayrıca cüruflar farklı miktarlarda MgO, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve alkali oksitler ile metal inklüzyonları içermektedirler (Bachmann, 1982).

Cürufların kimyasal içeriği ile soğuma sonrasında bileşiklerin kazandığı form arasındaki ilişkilerin anlaşılması için, faz diyagramlarından faydalanılmaktadır (Bachmann, 1982; Hauptmann 2007). Bu anlamda en sık kullanılan diyagramlar FeO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile FeO-SiO<sub>2</sub>-CaO diyagramlarıdır (Bachmann 1982; Hauptmann 2014). Bu diyagramlar sayesinde, cürufların kimyasal bileşenlerinden yola çıkarak oluşum koşulları hakkında bilgiler edinilebilmektedir.

Cüruflar içerisinde major oksitler haricinde iz elementlerde bulunmaktadır. Bu elementler cürufu oluşturan cevher hakkında yorumlar yapılabilmesine olanak sağlayarak, metal hammaddesi olarak kullanılan cevherin kökenine ilişkin bilgiler sunabilmektedir. Fakat cürufların kimyası birçok farklı etkene bağlı olduğundan bu anlamda kesin sonuçlara ulaşmak zordur (Bachmann, 1982).

Cürufların mineralojisine bakıldığında, ana bileşenlerin silikatlar olduğu görülmektedir (Bachmann, 1982). Bunların yanında oksit minerallerine, sülfürlere ve metalik oluşumlara rastlanmaktadır (Bachmann, 1982). Cüruflar içerisindeki başlıca minerallere ve özelliklerine aşağıda kısaca değinilecektir.

### Silikat Mineralleri

Metalik cüruflardaki ana silikatlar metal oksitlerin silisyum içeriğine oranı ile sınıflanabilmektedir (Bachmann, 1982).

<u>Metal Oksit/SiO<sub>2</sub></u>		<u>Silikat Mineralleri</u>
2 / 1	Fayalit	: 2 (Fe, Zn, Mg, Mn)O. SiO <sub>2</sub>
2 / 1	Montisellit	: (Fe,Zn, Mg, Mn)O.CaO.SiO <sub>2</sub>
1.5 / 1	Akermanit	: (Fe,Zn, Mg, Mn)O.2CaO.2SiO <sub>2</sub>
1 / 1	Piroksen	: (Fe,Zn, Mg, Mn)O.CaO.2SiO <sub>2</sub>

Kuvars ve yüksek sıcaklık modifikasyonu olan kristobalit, fayalit, montisellit, piroksen grubu mineralleri, vollastonit, melilitler cüruflarda en sık gözlenen silikat grubu mineralleridir. Cüruflar içerisinde feldspatlara doğadakinin aksine az rastlanmaktadır. Özellikle demir cüruflarında zaman zaman anortitler gözlenebilmektedir. Ayrıca amorf yapıdaki silislerde cüruflarda sıklıkla karşılaşılan yapılarıdır (Bachmann, 1982).

### Metal Oksitler

Silikatlardan sonra cüruflar içerisindeki en önemli bileşenler metal oksitlerdir ve genellikle demir oksitlerden oluşmaktadırlar.

Vüstit, manyetit, hematit gibi demir oksitlere demir cüruflarında sıklıkla karşılaşılrken; bakır cüruflarında küprit gibi bakır oksitlerle sıklıkla karşılaşılmaktadır (Bachmann, 1982).

### Sülfür Mineralleri

Sülfür minerallerine genellikle sülfürlü cevherlerin kullanıldığı cüruflarda rastlanılmaktadır. Sülfür mineralleri en çok bakır ve demir cevherleri ile ilişkilendirilmektedir.

Cüruflarda gözlenen başlıca sülfür mineralleri; kovellit, kalkosit, bornit, kalkopirit, pirotin gibi minerallerdir (Bachmann, 1982).

Yukarıda bahsedilen mineraller haricinde bir çok farklı mineral de cürufların yapısında gözlenebilmektedir. Kullanılan cevher ve üretilen metaldeki farklılıklar ile üretim sırasında kullanılan malzemeler ve ortam koşulları cüruf minerallerini dar bir çerçeveye indirmeyi zorlaştıran en büyük etkendir.

Ayrıca, arkeolojik cüruflar içerisinde uzun süreli gömülmeye ve bu süreçteki bozunmalara bağlı olarak ikincil mineral oluşumları gözlenebilmektedir. Örneğin demir oksitler gömülme ortamının nem durumuna bağlı olarak demir hidroksitlere, sülfürler sülfatlara dönüşebilmektedir (Bachmann, 1982).

Cürufların mineralojik yapılarını daha iyi anlamak ve sınıflandırabilmek için metalürjik süreçlerin ve cürufların oluşum ortamlarına göre değerlendirmek gerekmektedir. Bu anlamda cürufları, ergitme ve üretim cürufları olarak iki farklı oluşum ortamına göre değerlendirmek mümkündür.

### **3.2.1 Ergitme (İzabe) Cürufları**

İzabe cürufları, cevherin ergitilerek metalin gang minerallerinden ayrıştırılması sırasında oluşan cüruflardır. Ergitme cüruflarının mineralojisini etkileyen faktörleri anlamak için oluşum koşullarını ve işlem sırasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonları anlamak önemlidir.

Demirin erime sıcaklığı 1538 °C'dir. MS 19. yüzyıla kadar bu sıcaklık fırınlarda elde edilememiştir (Tylecote, 1987). Bu nedenle antik dönemde demiri cevherinden eritmek mümkün olmamıştır. İnsanlığın demir üretimine, muhtemelen bir tesadüf sonucunda, bakır eritme işleminin bir yan ürünü olarak, demir oksitleri serbest metalik demire indirgeyebileceklerini keşfetmeleri ile başladığı düşünülmektedir (Cleere, 1976; Tylecote, 1987; Craddock, 2010).

Demir ve oksijenin kimyasal açıdan birbirlerine karşı yüksek afiniteye sahiptir. Bu nedenle, demir cevherini indirgeyerek oksijenden ayırmak için yüksek enerji ve güçlü bir redüksiyon maddesi gereklidir. Kömür, yüksek kaloriye ve oksijene karşı

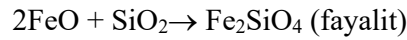
güçlü bir afiniteye sahip olması nedeniyle, demir cevherini indirgemek için kullanılacak en iyi malzemedir (Cleere, 1976; Rehder, 2000). İndirgeme işlemi sırasında kömür yakılarak, yaklaşık 700 °C'de karbon monoksiti oluşturan indirgeme işlemi için termal enerji sağlanmış olur (Eschenlohr ve Serneels, 1991). İşlem sırasında karbon monoksitin demiri indirgemek yerine serbest oksijene bağlanmasını engellemek adına atmosferik hava akımının azaltılması önemlidir (Cleere, 1976).

Ergitme sırasında demir indirgenirken, Si, Al, Mn, Mg ve Ca indirgenmez ve bu nedenle indirgenmiş demirin bu bileşenlerden mekanik işlemlerle ayrılması gerekir. 1100-1200 °C civarında bir sıcaklıkta metalik olmayan bileşenler -gang mineralleri, fırın astarı ve odun kömürü- sıvılaşır. Bu durumda, ergiyik haldeki bu cüruf kütlesi bünyesine bir miktar demir ve oksijeni de alarak metalik demirden ayrılır (yaklaşık 1200 °C'de) ve daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip olan fayalit ( $Fe_2SiO_4$ ) mineralini oluşturacak şartlar sağlanır (Cleere, 1976; Eschenlohr ve Serneels, 1991; Craddock, 2010). Aynı zamanda cüruf kütlesi, fırının tabanına doğru akar ve indirgenen demir parçacıklarının hareket edebileceği, bir araya toplanabileceği ve luppeyi oluşturabileceği bir ortam sağlar. Bu aşamada, cüruf kütlesinin fırındaki varlığı, indirgenmiş demiri yeniden oksitlemekten de korumaktadır. Cüruf kütlesi, fırının tabanında toplanır ve yavaşça katılaşır. Fırın tabanına temas ettiğinden dolayı bir yüzeyinde fırın astarına ait malzemeyi de bünyesine katar. Bazı durumlarda cüruf fırının dışına akıtılarak uzaklaştırılır. Eğer cüruf dışarıya akıtılmış ise yüzeyinde lav akıntısına benzer izleri taşıyan akma cürufları oluşur.

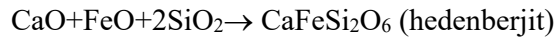
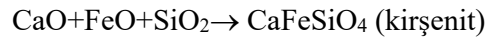
Bu işlem sırasında, fırın sıcaklığında dikey bir tabakalaşma meydana gelir (Eschenlohr ve Serneels, 1991; Joosten, 2004). İşlem için gerekli ısıyı sağlamak üzere fırına hava üflenerek üfleçlere yakın yerlerde sıcaklık 1100 °C ile 1400 °C arasında ve en yüksek sıcaklıktadır. Bu yüksek sıcaklık bölgesinde, kömürün karbonu kısmen karbon monoksit oluşturmak üzere yakılır (Eschenlohr ve Serneels, 1991). Oluşan karbonmonoksit, üç değerlikli ve/veya iki değerlikli demir oksitlerin oksijenini 600 ila 1100-1200 °C arasındaki bir sıcaklıkta bünyesine aldığından, demir için sürekli bir düşük oksidasyon durumuna ve  $CO_2$  oluşumuna neden olup indirgenme işlemi sürekli kılmaktadır (Eschenlohr ve Serneels, 1991). Oluşan  $CO_2$  fırının farklı seviyelerinde karbon ile yeniden reaksiyona girerek 600-1200 °C arasında yeniden CO oluşturur. 600 °C'nin altındaki sıcaklıklarda da, demir hala indirgenmektedir, ancak bu

sıcaklıkta CO<sub>2</sub> yeni CO üretmeyerek ve havada seyrelir (Eschenlohr ve Serneels, 1991). Cüruf 1100 ila 1400 °C arasında bir sıcaklıkta oluşmaya başlar ve fırının tabanına akar. Bu sıcaklıkta demir oksitler indirgenmeye devam eder (Eschenlohr ve Serneels, 1991). İşlem sonucunda metalik demirce zengin luppe, genellikle hava çıkışının olduğu üfleçlerin yakınında bulunan cürufun üzerinde oluşur.

Oluşan cüruf; cevherden ayrılan metalik olmayan bileşenler, fırın astarı ve odun kömürü ile kül gibi malzemelerin karışımıdır ve aynı zamanda çoğunlukla vüstit (FeO) olmak üzere reaksiyona girmemiş demir oksitler içermektedir. FeO, bu işlem sırasında cüruf materyalinin erime sıcaklığını düşürerek aynı zamanda bir flaks olarak çalışır, ve bu sayede cüruf sıvılaşarak luppeden ayrılabilir (Cleere, 1976). Bu durum sonucunda, her silisyum atomu için iki demir atomu cüruf malzemesi içine karışır ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşerek fayalit minerali oluşur.



Fayalitler, bünyesine demirin bir kısmını aldıklarından üretim sürecinin verimini önemli ölçüde azaltırlar. İşlem sırasında eriyik karışımına kireç açısından zengin (kireçtaşı, kalsit) veya Mn bakımından zengin (pirolüsit, MnO<sub>2</sub>) flakslar eklenmesi ile cüruf malzemesinin erime sıcaklığı düşürülerek ve verim artırılabilir (Cleere, 1976; Eschenlohr ve Serneels, 1991; Iles ve Martinon-Torres, 2009; Craddock, 2010). Flaksların sisteme eklenmesiyle cüruf kütlesi içerisindeki bileşenler arasında farklı reaksiyonlar meydana gelerek aşağıdaki denklemlere benzer şekilde farklı mineraller oluşabilir.



Flakslar, ergitme işlemi sırasında silisyum atomlarının demir yerine farklı elementlerle reaksiyona girmesine neden olur ve demir kaybının azaltılarak, üretim veriminin artırılması sağlar.

Antik dönem fırınları, yüksek sıcaklığın etkileri nedeniyle genellikle kısa bir ömre sahiptirler. Bu nedenle, orijinal tasarımlarını tasvir etmek çoğu zaman zordur. Yapılan araştırmalar, fırın boyutlarında ve şekillerde geniş bir çeşitlilik olduğunu

göstermektedir (Craddock, 2010). Cleere (1976), erken demir eritme fırınlarını sınıflandırmaya çalışmıştır. En ilkel fırın türleri, bir ocak fırınının tabanı olup olmadığı tartışılrsa da, çukur kazılarak oluşturulan çanak fırınlar olarak tanımlanmaktadır. Bunun haricinde, ergitme sırasında oluşan cürüfların uzaklaştırılabilmesi için akma boşluğu olan ve olmayan iki yüksek fırın tipi vardır. Akma boşluğu olmayan fırınlarda, cüruf fırının tabanında toplanarak burada katılaştır ve oluşan metalik luppe işlem bittikten sonra cüruftan ayrılarak uzaklaştırılır (Cleere, 1976; Tylecote, 1987). Akma boşluğu olan fırınlarda ise, cüruf fırın dışına akıtılır ve fırının dışında katılaştır (Cleere, 1976; Tylecote, 1987). Akma boşluğuna sahip olan fırınlarda oluşan cürüflar lavlardakine benzer akma yapıları göstererek katılaştır (Şekil 3.4). Bu tip cürüflar akma boşluğu olan fırınlar için karakteristiktir.

Fırın tiplerindeki farklılıklar cürüfların soğuma hızını etkilediğinden, cürüfların kristallenme dereceleri farklılıklar gösterebilir. Örneğin, fırın dışında soğuyan bir cüruf hızlı soğuma nedeniyle daha amorf bir yapı gösterebilecekken, fırın içerisinde yavaş soğuyan bir cüruf daha kristalize bir yapı gösterebilir.



**Şekil.3.4:** Akma yapısı gösteren bir ergitme cürufu

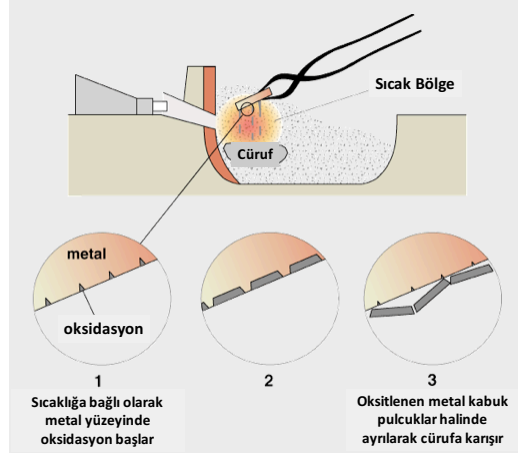
### 3.2.2 Üretim Cürufları

Tez çalışmasında, yarı mamullerin işlenerek metal objeye dönüştürüldüğü aşamalarda oluşan cüruflar üretim cürufları olarak değerlendirilmiştir. Üretim cürufları iki farklı süreçte oluşabilmektedir. Birinci süreç, demir cevherinin ergitilmesi ile elde edilen luppelerin saflaştırılması sırasında. İkinci süreç ise saflaştırılarak rafine edilen demirin işlenerek metal objelere dönüştürülmesi sırasında gerçekleşir.

Demirci işçiliğine getirilen luppeler, ergitme işlemi sırasında bünyelerine aldıkları kömür, fırın astarı, flakslar ve cüruf kalıntıları nedeniyle ikinci bir rafine işlemine tabi tutulurlar (Serneels ve Perret, 2003). Demirci bu aşamada luppeyi tekrar ısıtarak, çekiç ve örs yardımıyla döver ve yabancı malzemeleri uzaklaştırır (Tylecote, 1976). Demirci ustası bu sırada da flaks kullanır. Uzaklaştırılan yabancı malzemeler ve flakslar fırın tabanında yeniden toplanarak demirci ocağı cürufları olarak da tanımlanan birincil demirci cüruflarını oluştururlar (Serneels ve Perret, 2003).

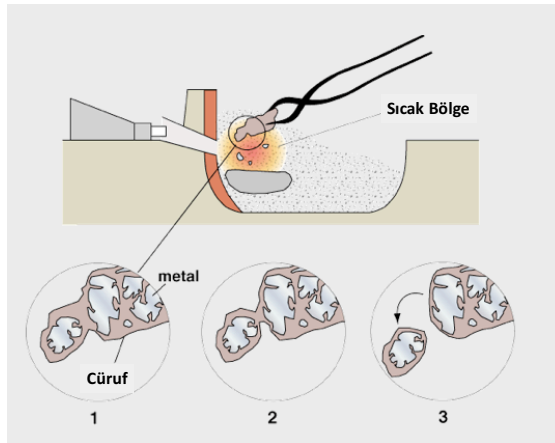
Birincil demirci cürufları üzerinde yapılan mikro incelemelerde ergitme cüruflarından farklı olarak mekanik işlemlere bağlı izler ve demirin dövülmesi sırasında oksitlenmiş halde metalden ayrılan demir pulcukları gözlenmektedir. Bu pulcuklar saflaştırma işlemi sırasında verilen yüksek ısıya ve dövme işlemine bağlı olarak oluşmaktadır. Isı, luppe yüzeyinin tekrar oksitlenmesine neden olur ve çekicinin her darbesinde oksidasyon yüzeyinden metal parçaları ayrılarak demir pulcukları halinde dökülür (Blakelock ve diğ., 2009) (Şekil 3.5). Bu demir pulcukları ve saflaştırma işleminden arda kalan cüruf malzemesi birleşerek birincil demirci cüruflarının yapısına girerler. Bu tip cüruflar genellikle daha yüksek demir içeriği ile karakterize edilmektedir. Ayrıca luppe içerisinde bulunan ergitme cürufu kalıntılarına ve kullanılan flakslara bağlı olarak fayalitler ve farklı silikat fazlarda gözlenebilmektedir (McDonnell, 1991).





**Şekil.3.5:** Üretim işlemi sırasında demirin oksidasyonu ve demir pulcuklarının oluşumu (Serneels, 2003)

İkincil demirci cürüfları ise demirin işlenmesi ve şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkmaktadır. Demirci üretim amacına göre fırın sıcaklığını artırıp azaltabilmektedir. Örneğin bir levha üretmek istediğinde, demir kütlesini inceltmek için daha yüksek sıcaklıklara çıkarması gerekmektedir. Böyle durumlarda bir miktar demiri fırının merkezindeki odun kömürü içerisine bırakarak yüksek sıcaklıklara çıkmasını bekler ve bu sırada bir miktar demiri ocak içerisinde kaybedebilir (Şekil 3.6). Ayrıca demirin oksitlenmesini önlemek amacıyla bu aşamada da yine bol miktarda flaks kullanır. Söz konusu flaks ve kaybedilen demir bileşenler fırın tabanında ikincil demir cürüflarını oluştururlar. İkincil demir cürüflarında genellikle metal oksitler ve üretimin sürecinin ergitme işlemi kadar uzun sürmemesine bağlı olarak, eriyik kristalleşmeden oluşan camsı fazlar gözlenebilmektedir.



**Şekil.3.6:** Üretim işlemi sırasında yüksek sıcaklığa bağlı metal kaybı (Serneels, 2003)

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1 Çalışma Alanının Seçilmesi

Tez çalışmasının ilk aşamasında, bölgedeki farklı arkeolojik kazılar ziyaret edilerek kazı başkanları ile görüşülmüş ve kazı depolarındaki metaurjik buluntular incelenmiştir. Hierapolis, Laodikeia, Stratonikeia gibi antik kentlerde gerçekleştirilen bu ön incelemeler sonucunda; hem buluntu miktarının ziyaret edilen diğer kentlere göre daha fazla olması, hem de buluntuların çıkarıldığı yapıya ilişkin verilerin daha net olması nedeniyle, Tripolis antik kentindeki malzemelerin çalışılmasına karar verilmiştir.

### 4.2 Numune Seçimi

Tripolis Antik Kenti Kazı Başkanlığı ve Kültür Bakanlığı Denizli Müzeler Müdürlüğü'nden gerekli izinler alınarak malzemelerin tasnifi ve belgelenmesi amacıyla kazı deposunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Numune seçimi çalışmaları kapsamında kazı deposunda bekletilen ve tabakalarına göre MS. 4-6. yüzyıla (Geç Roma) tarihlenen madencilik ve metalürji ile ilişkili olduğu düşünülen kalıntılar; kazı tarihlerine, buldukları tabakalara ve buldukları konuma göre tasnif edilmiştir.

Tasnif edilen buluntular arasından, farklı konum ve tabakaları yansıtan 19 adet cüruf örneği analizler için numune olarak seçilmiştir. Numuneler, belgeleme işlemleri öncesinde temizlenmiştir. Korozyon oluşumunu engellemek amacıyla temizlik işlemi yapılırken etil alkol ve tel fırça kullanılmıştır. Kazı deposunda yapılan bu işlemlerden sonra seçilen numuneler analizler için hazırlanmak üzere Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümü Laboratuvarlarına getirilmiştir.

### 4.3 Belgeleme Çalışmaları

Seçilen numuneler parçalanmadan ve analizlere hazırlanmadan önce;

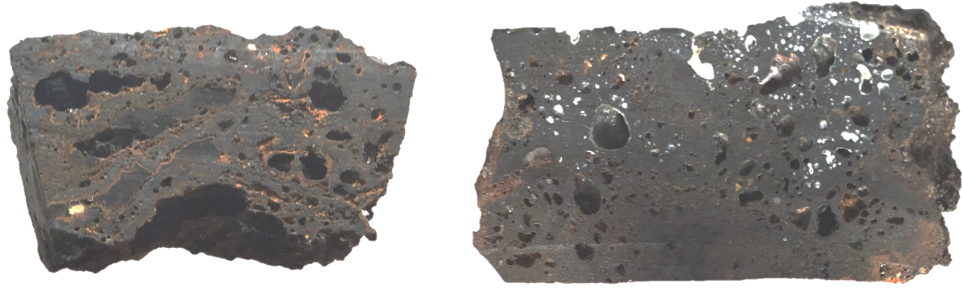
- Hassas terazi ile ağırlıkları,
- Arşimet terazisi ile hacimleri,
- Kumpas ile boyutları,

ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Ayrıca tüm numuneler fotoğraflanarak arşivlenmiştir.

### 4.4 Numunelerin Analizler İçin Hazırlanması

Analiz için seçilen ve laboratuvarlara getirilen numuneler parçalanıp öğütülmeden önce Arşimet terazisi kullanılarak hacim ve yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu işlemin ardından numuneler 24 saat 90°C’de etüvde bekletilerek yüzeylerindeki su uzaklaştırılmıştır.

Numuneler analizlere hazır hale getirilmek için sulu kesim ince testere ile kesilerek dış yüzeyindeki örtü tabakalar alınmış ve numunenin genel yapısını yansıtan bölgelerden analiz için blok kesimleri yapılmıştır (Şekil 4.1).

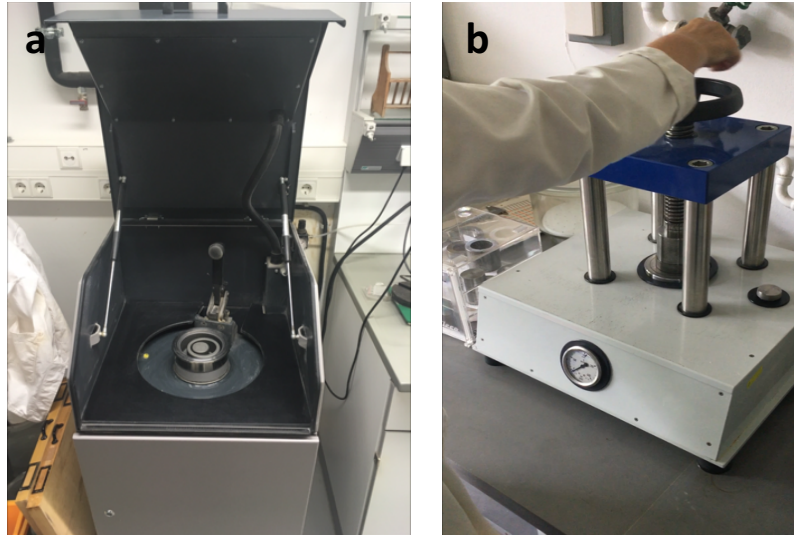


Şekil.4.1: İnce ve parlak kesit hazırlamak için kesilen bloklar

Kesilen blok parçalar; ince kesit, parlak kesit ve SEM-EDS incelemeleri için kullanılmıştır. Üstü açık ve kapalı olacak şekilde her örnekten 2 adet ince kesit, Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği ince kesit laboratuvarında hazırlanmıştır. İnce kesitler için numunelerden alınan bloklar, lama yapıştırılarak yaklaşık 1 mm kalınlığında kesilmiş ve yaklaşık 0,3 mm kalınlığa gelene dek aşındırılarak parlatılmıştır. Optik mikroskopi incelemeleri yapılacak ince kesitlerin üzerleri lamel ile kapatılmış, SEM-EDS incelemelerinde kullanılacak kesitlerin üzerleri kapatılmamıştır.

Metalografi incelemeleri için kullanılan parlak kesitler Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Cevher Hazırlama ve Sıvı Kapanım Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. İnce kesitlerin hazırlandığı bloklardan arda kalan parçalar epoksi içerisine gömülerek, 24 saat süre ile sertleşmeye bırakılmış ve sertleşen bloklar farklı boyutlardaki aşındırıcılar kullanılarak parlatılmıştır.

XRD, XRF ve ICP-OES analizleri için örnekler yaklaşık 20 mikron tane boyutuna ulaşana dek halkalı değirmende öğütülmüştür. ICP-OES ve XRD analizleri için toz halinde kullanılan örneklerden, XRF analizleri için pelletler hazırlanmıştır (Şekil 4.2).



**Şekil.4.2:** Numunelerin öğütülmesi için kullanılan halkalı değirmen ve XRF analizleri için pellet hazırlık aşaması, Darmstadt Teknik Üniversitesi (Almanya)

#### 4.5 Optik Mikroskopi İncelemeleri

Numunelerin ince ve parlak kesitlerine üzerindeki mikroskopik incelemeler Pamukkale Üniversitesi Cevher Hazırlama ve Sıvı Kapanım Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

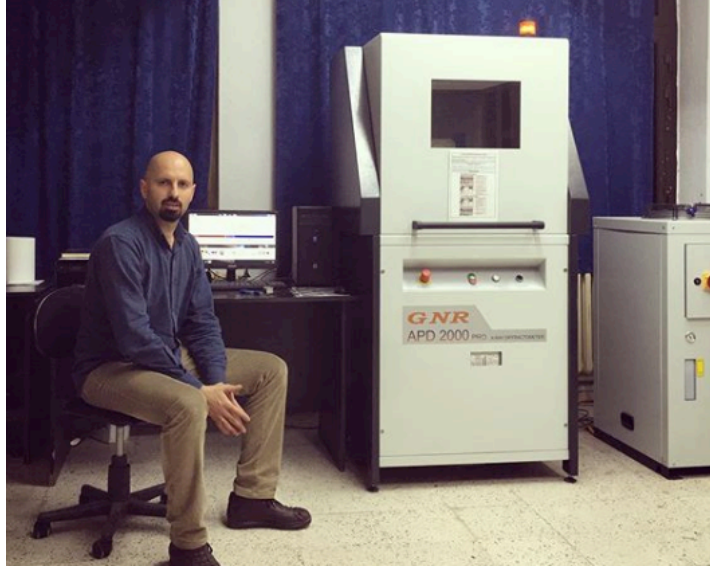
Optik mikroskopi ve metalografi incelemelerinde Olympos BX-51 marka-modelli üstten ve alttan aydınlatmalı 4x, 10x, 40x ve 100x büyütmeeli cevher-metalografi mikroskopi kullanılarak numunelere ait mikro yapılar incelenmiş ve fotoğraflanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Olympos BX51 cevher mikroskopi

#### 4.6 XRD Analizleri

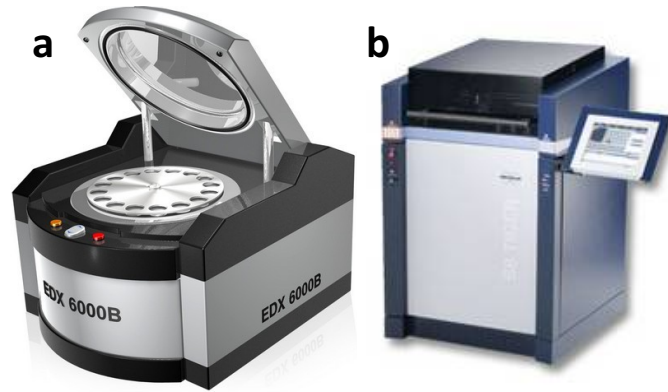
Numunelerin XRD analizleri Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği XRD Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analizler GNR APD 2000 PRO marka ve modeli difraktometre cihazında,  $\text{CuK}\alpha$  , 40 kV ve 30 mA enerji ile '2 $\theta$ :5-70°; adım aralıkları:0.05, entegrasyon süresi: 2sn.' koşullarında yapılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil.4.4: GNR APD 2000 PRO X-ışınları difraktometresi, Pamukkale Üniversitesi

#### 4.7 XRF Analizleri

Numunelerin majör oksit içeriklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen XRF analizleri, örneklerin homojen bir yapı göstermemesi nedeniyle iki farklı set üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Birinci set İstanbul Teknik Üniversitesi Jeokimya Araştırmaları Laboratuvarında Skyray-EDC-6000B marka ve modeli spektrometre ile, ikinci set ise Darmstadt Teknik Üniversitesi (Almanya) XRF Laboratuvarında Bruker S8 Tiger marka ve modeli spektrometre ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil.4.5: a)Skyray-EDX-6000B b) Bruker S8 Tiger X-ışınları flouresans spektrometreleri

#### 4.8 ICP-OES Analizleri

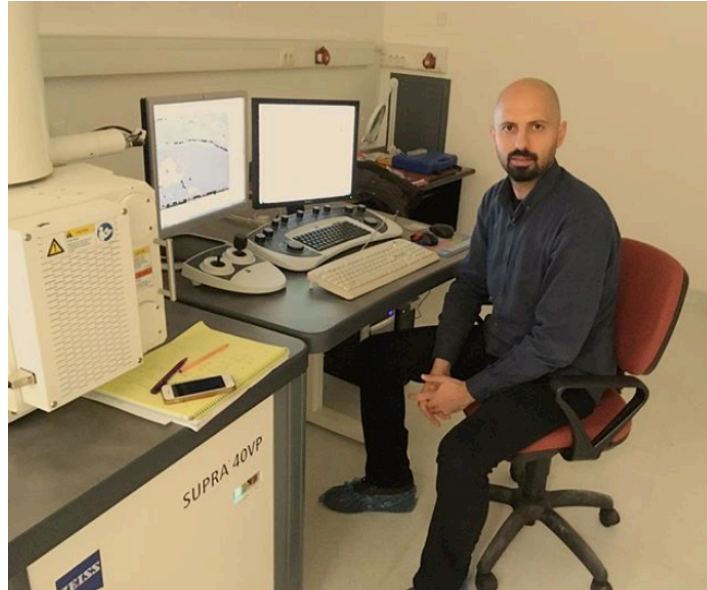
Numunelerin iz element içeriklerinin belirlenmesi amacı ile ICP-OES analizleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarında Perkin Elmer OPTIMA 7000DV marka ve modelli optik emisyon spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil.4.6: Perkin Elmer OPTIMA 7000DV ICP-OES cihazı

#### 4.9 SEM-EDS Analizleri

SEM-EDS analizleri, Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İLTAM) bünyesindeki Zeiss Supra 40 VP marka ve modelli alan emisyon taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).



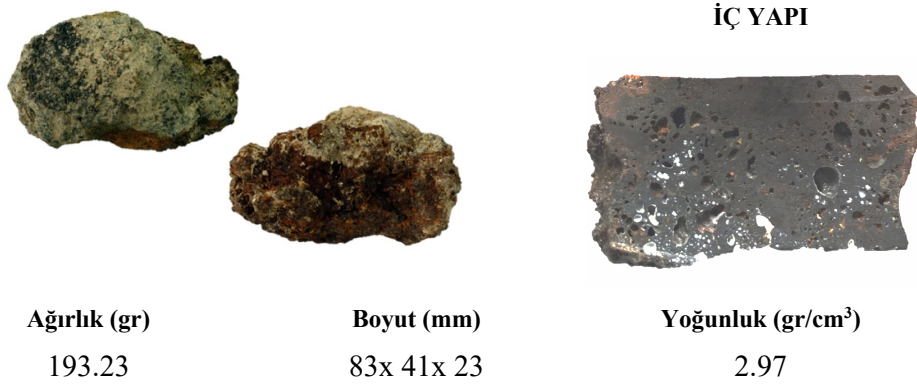
Şekil.4.7: Zeiss Supra 40 VP SEM-EDS cihazı, Pamukkale Üniversitesi

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Petrografik İncelemeler

#### 5.1.1 Morfolojik İncelemeler

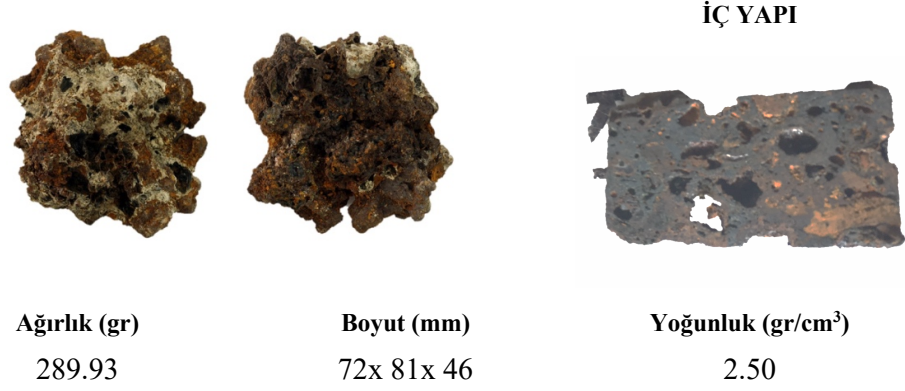
NE- 1 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyi kil ve kum benzeri yapılarla kaplı iken, diğer yüzeyinde korozyona uğramış yapılar ve gözenekler izlenebilmektedir. Örnek homojen olmayan bir iç yapı sergilemektedir. Gözeneklilik alt bölümlerde fazla iken, üst tarafa doğru azalmaktadır. Örnek içerisindeki farklı taneler gözle seçilebilmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan fazladır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: NE-1 numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

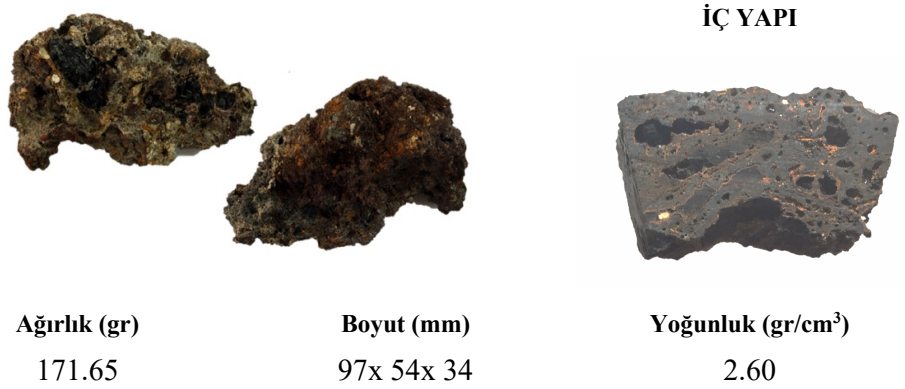
NE-2.1 kod numaralı örnek düzensiz şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyi kil ve kum benzeri yapılarla kaplı iken, diğer yüzeyinde korozyona uğramış yapılar ve gözenekler izlenebilmektedir. İç yapıda homojen olmayan bir yapı sergilemektedir. Gözenekler iri ve küçük boyutlu dağılımlara sahiptir. Örneğin farklı bölgelerinde oksidasyona uğramış alanlar mevcuttur. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan azdır (Şekil 5.2).





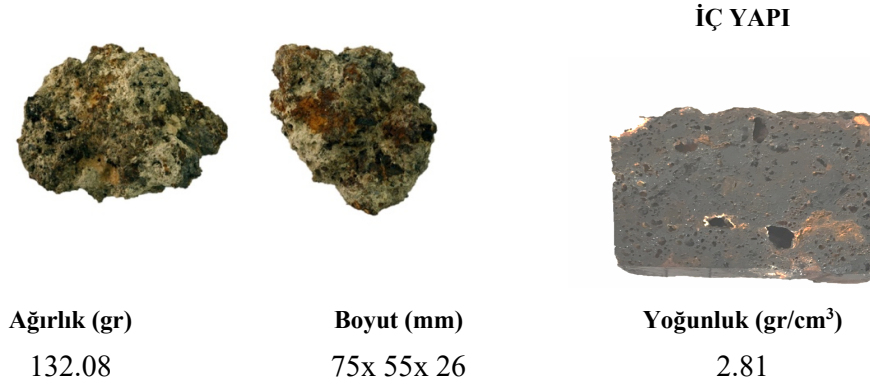
**Şekil.5.2:** NE- 2.1 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NE- 2.2 numaralı örnek içbükey/dış bükey bir tipolojiye sahiptir. Örneğin her iki yüzeyinde de gözenekler ve korozyona uğramış bölgeler izlenebilmektedir. İç yapıda homojen olmayan bir yapı sergilemektedir. Gözenekler heterojen yapıda ve irili ufaklı şekilde izlenebilmektedir. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında kömür parçacıkları ile metalik olmayan bileşenler gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan azdır (Şekil 5.3).



**Şekil 5.3:** NE- 2.2 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NE- 3 numaralı örnek düzensiz şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyi kil ve kum benzeri yapılarla kaplı iken diğer yüzeyinde gözenekler ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda homojen olmayan bir yapı sergilemektedir. Gözenekler heterojen yapıda ve irili ufaklı şekilde izlenebilmektedir. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında kömür parçacıkları ile korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan yüksektir (Şekil 5.4).



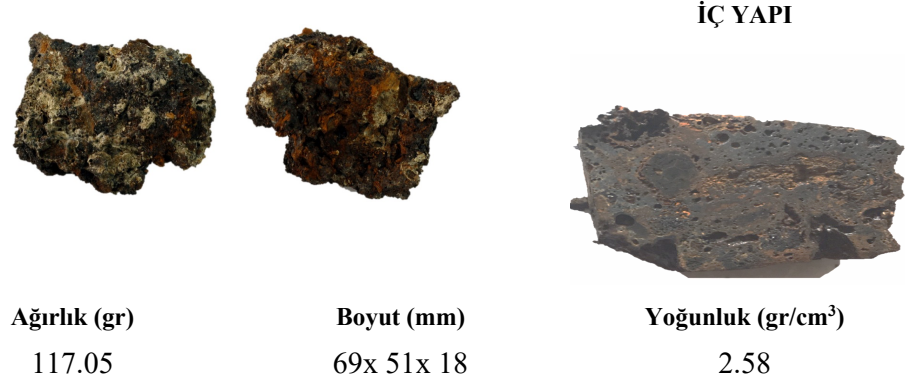
**Şekil 5.4:** NE- 3 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NE- 4 numaralı örnek düzensiz şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin her iki yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda homojen olmayan bir yapı sergilemektedir. Gözenekler heterojen yapıda ve irili ufaklı şekilde izlenebilmektedir. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında kömür parçacıkları ile korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan belirgin şekilde yüksektir (Şekil 5.5).



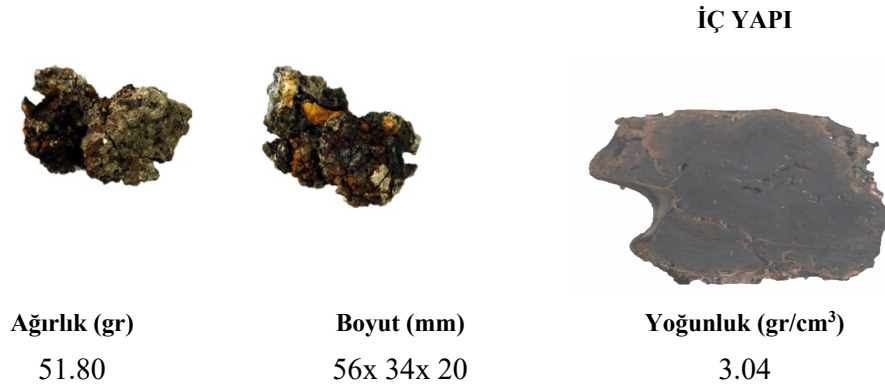
**Şekil 5.5:** NE- 4 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NE- 5 numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvamaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda homojen olmayan bir yapı sergilemektedir. Gözenekler heterojen yapıda ve irili ufaklı şekilde izlenebilmektedir. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında kömür parçacıkları ile korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan düşüktür (Şekil 5.6).



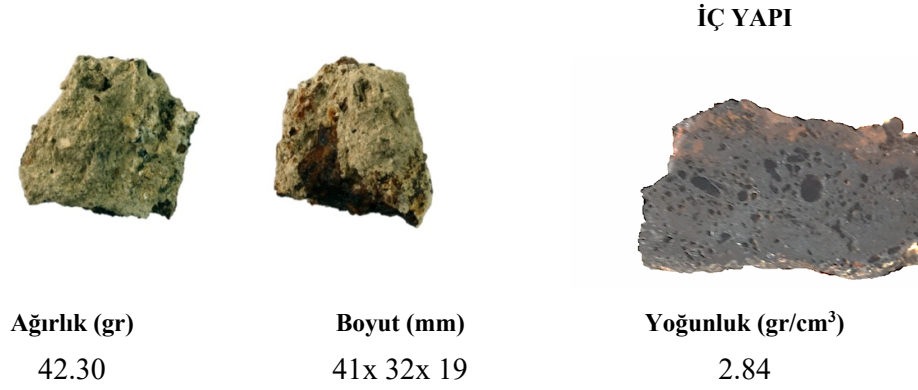
**Şekil 5.6:** NE- 5 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NE- 6.1 numaralı örnek düzensiz şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvamaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda homojen bir yapı sergilemektedir ve gözenekler yok denecek kadar azdır. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan belirgin şekilde yüksektir (Şekil 5.7).



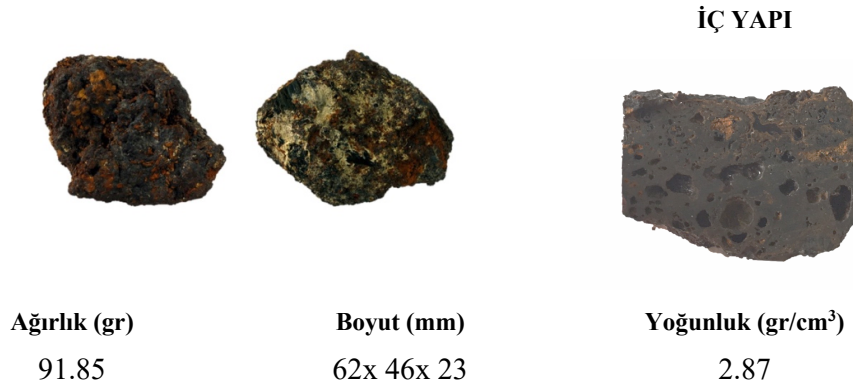
**Şekil 5.7:** NE- 6.1 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NE- 6.2 kod numaralı örnek ortadan ikiye bölünmüş daha büyük bir kütleli parçası izlenimi vermektedir. Kütleli tamamı düşünüldüğünde dışbükey/dışbükey bir tipolojiye sahip olduğu söylenebilir. Örneğin her iki yüzeyinde kil, kum ve çakıl sıvamaları gözlenmektedir. İç yapıda homojen olmayan bir yapı sergilemektedir. Gözenekler heterojen yapıda ve irili ufaklı şekilde izlenebilmektedir. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan yüksektir (Şekil 5.8).



**Şekil 5.8:** NE- 6.2 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NW- 7 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvamaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve gözenekler örneğin alt kısmında daha fazladır. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan yüksektir (Şekil 5.9).



**Şekil 5.9:** NW- 7 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

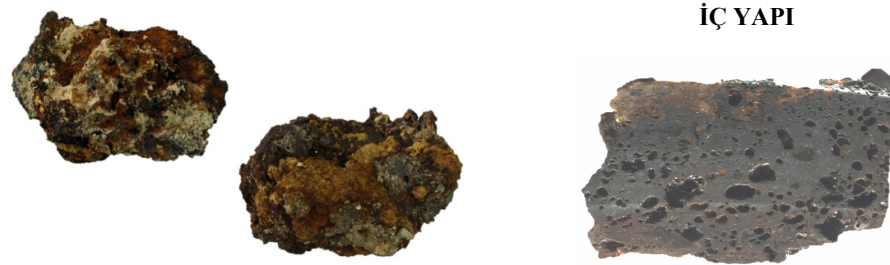
NW- 8 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örnek yüzeyinin küçük bir kısmında kum, kil ve çakıl sıvamaları gözlenirken diğer bölgelerde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve gözenekler yaygındır. Örneğin iç yüzeyinde kömür kalıntıları gözlenmektedir. Örnek yüzeyinde korozyon fazla iken ve iç yapısında korozyon bölgeleri daha az gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan düşüktür (Şekil 5.10).



Ağırlık (gr)	Boyut (mm)	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )
218.40	99x 46x 31	2.56

**Şekil 5.10:** NW- 8 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

NW- 9 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvımaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve gözenekler örneğin alt kısmında daha fazladır. Örnek yüzeyinde korozyon fazla iken ve iç yapısında korozyon bölgeleri daha az gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan yüksektir (Şekil 5.11).

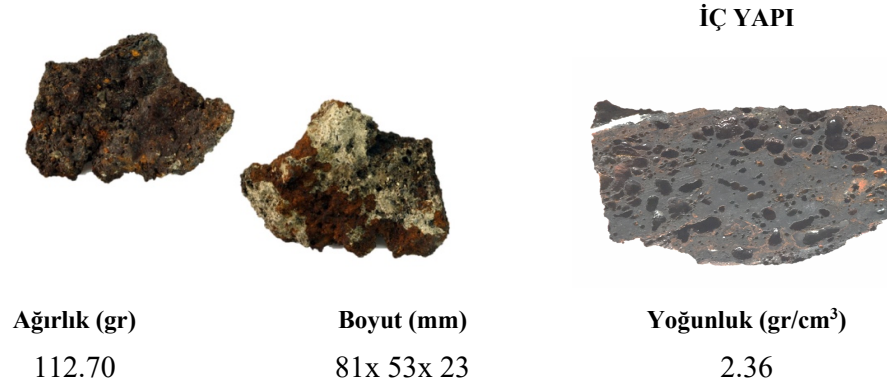


Ağırlık (gr)	Boyut (mm)	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )
186.67	77x 51x 24	2.90

**Şekil 5.11:** NW- 9 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

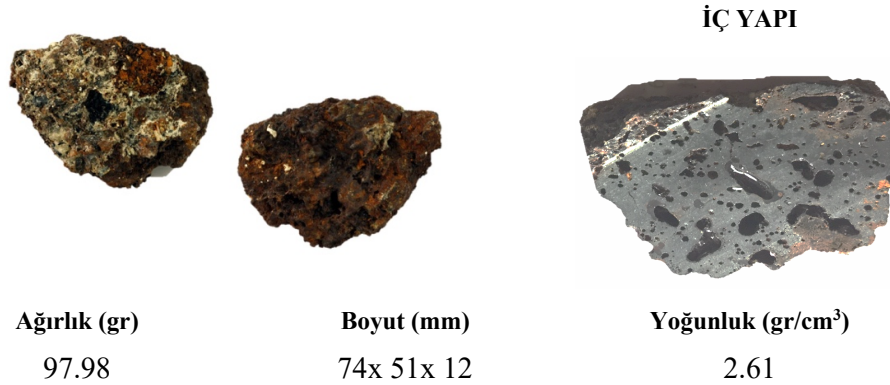
NW- 10 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvımaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve gözenekler örneğin kenar kısımlarda daha fazladır. Örnek yüzeyinde korozyon fazlayken ve iç yapısında korozyon bölgeleri daha

az gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan belirgin şekilde düşüktür (Şekil 5.12).



**Şekil 5.12:** NW- 10 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

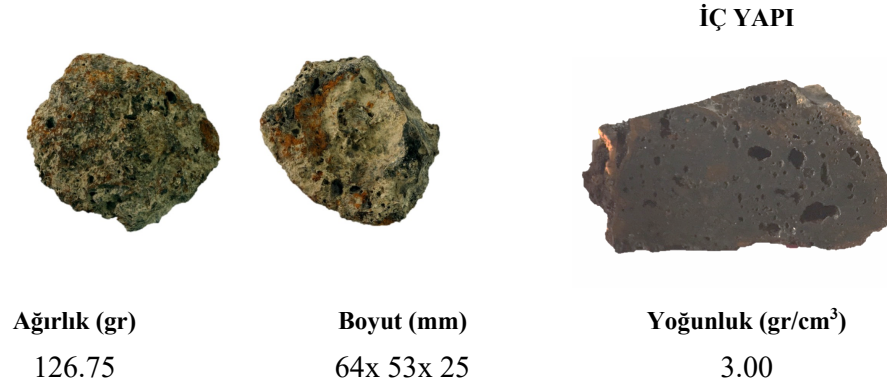
NW- 11 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvamarları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı gözenekler mevcuttur. Örnek yüzeyinde korozyon fazlayken ve iç yapısında korozyon bölgeleri daha az gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan düşüktür (Şekil 5.13).



**Şekil 5.13:** NW- 11 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

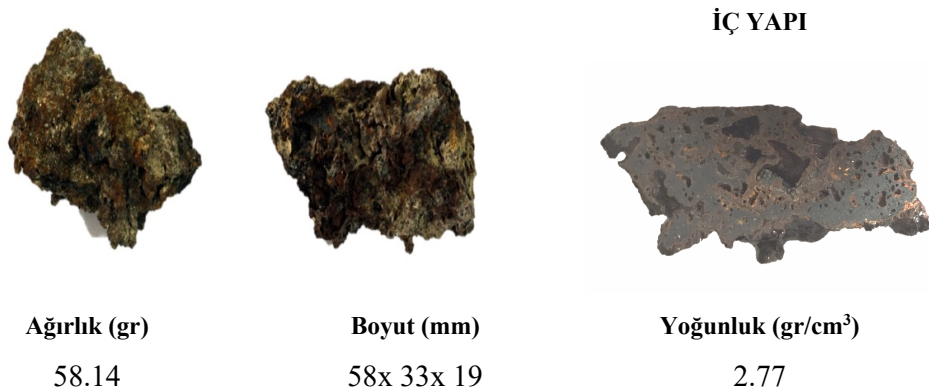
SE- 14.1 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin her iki yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı

gözenekler mevcuttur. Gözenekler örneğin sağ tarafında fazlaiken sol tarafında daha azdır. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında korozyon bölgeleri daha az gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan yüksektir (Şekil 5.14).



**Şekil 5.14:** SE- 14.1 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

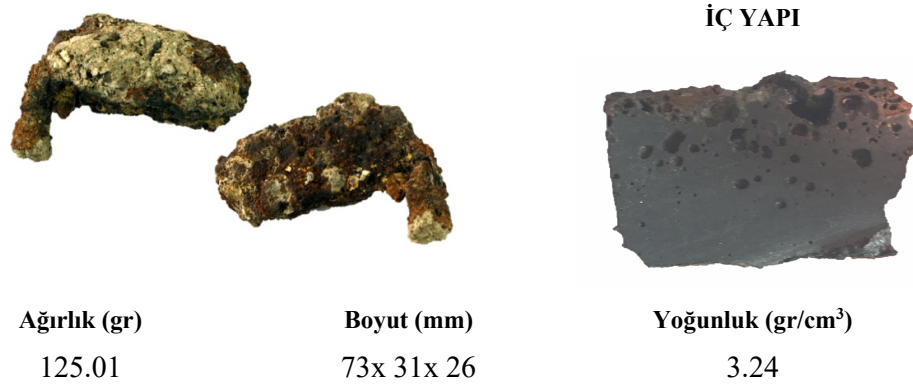
SE- 14.2 kod numaralı örnek içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin her iki yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı gözenekler mevcuttur. Örnek yüzeyinde ve iç yapısında korozyon bölgeleri gözlenmektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan eşittir (Şekil 5.15).



**Şekil 5.15:** SE- 14.2 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

SE- 16 kod numaralı örnek diğer örneklere göre farklı bir tipolojiye sahiptir. İçbükey/dışbükey şekilli gövdenin bir kenarında kanca benzeri bir çıkıntı mevcuttur.

Örneğin bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvamaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı gözenekler mevcuttur. Gözenekler örneğin üst kısmında fazla, alt kısmında daha azdır. Örnek yüzeyinde korozyon yüzeyleri fazlayken ve iç yapısında korozyon gözlenmemektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan belirgin şekilde yüksektir (Şekil 5.16)



Şekil 5.16: SE- 16 numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

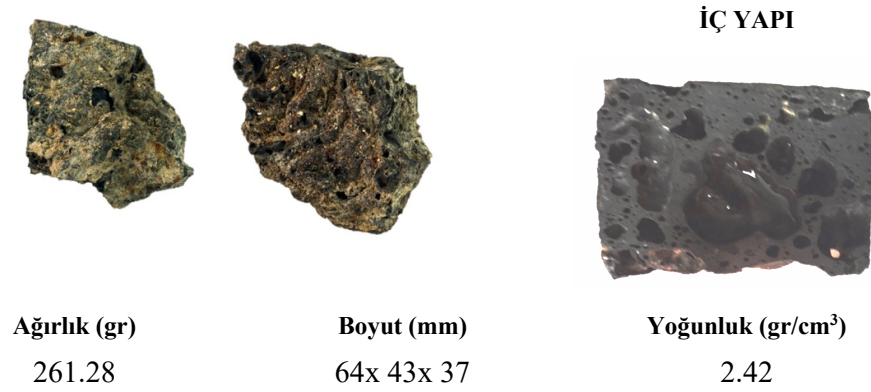
SW- 17 kod numaralı örnek daha büyük bir kütleden kopmuş izlenimi vermektedir. Kütlelenin bütünü düşünüldüğünde içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin her iki yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı gözenekler mevcuttur. Örnek yüzeyinde korozyon fazlayken ve iç yapısında korozyon gözlenmemektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin hepsinden yüksektir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17: SW- 17 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

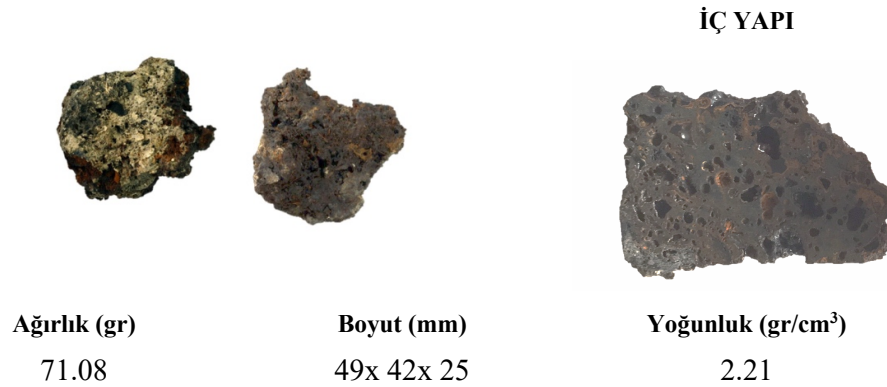


SW- 18 kod numaralı örnek daha büyük bir kütleden kopmuş izlenimi vermektedir. Kütlenin bütünü düşünüldüğünde içbükey/dışbükey şekilli bir tipolojiye sahiptir. Örneğin her iki yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı gözenekler mevcuttur. Örnek yüzeyinde korozyon fazlayken ve iç yapısında korozyon gözlenmemektedir. Örneğin yoğunluğu incelenen diğer örneklerin ortalama yoğunluğundan düşüktür (Şekil 5.18).



Şekil 5.18: SW- 18 kod numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

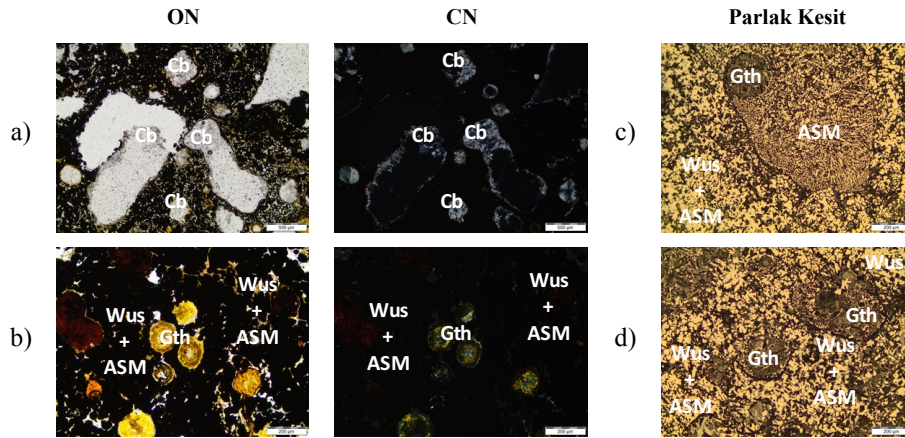
SW- 19 kod numaralı örneğin tipolojisi daha büyük bir kütlenin parçası olduğu izlenimini vermektedir. Kütlenin tamamı düşünüldüğünde örnek dışbükey/dışbükey tipolojiye sahiptir. Bir yüzeyinde kum, kil ve çakıl sıvamaları gözlenirken diğer yüzeyinde gözenekler, kömür parçaları ve korozyon yapıları izlenebilmektedir. İç yapıda heterojen bir yapı sergilemektedir ve irili ufaklı gözenekler mevcuttur. Yüzeyinde korozyon daha fazlayken ve iç yapısında korozyon azdır. Örneğin yoğunluğu incelenen örneklerin hepsinden düşüktür (Şekil 5.19).



Şekil 5.19: SW- 19 numaralı örneğin ve iç yapısının makro görünümü ile fiziksel özellikleri

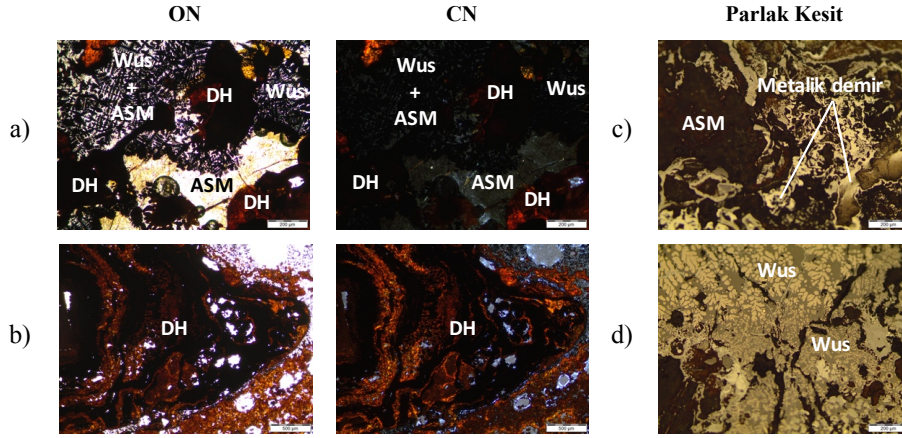
## 5.1.2 Optik Mikroskopi İncelemeleri

NE-1 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesitler üzerinde yapılan optik mikroskopi incelemelerinde amorf matriks üzerinde demir oksit ve hidroksit mineralleri izlenmiştir. Az da olsa dentritik vüstit ( $\text{FeO}$ ) tanelerine, manyetitler ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ile kırmızı-kahverengi lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve nodüler götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) taneleri eşlik etmektedir. Örneğin gözenek çeperlerinde sıvamalar şeklinde karbonat mineralleri gözlenmektedir. Örneğin genelinde benzer mineral dokuları hakimdir (Şekil 5.20).



**Şekil 5.20:** NE- 1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Gözenek çeperlerinde gözlenen karbonat mineralleri b) Nodüler götit taneleri ve demir oksitler c-d) Amorf matriks (koyu gri) üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ve manyetitler ile nodüler götit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift nikol Cb: Karbonat Wus: Vüstit Gth: Götit ASM: Amorf silis matriks )

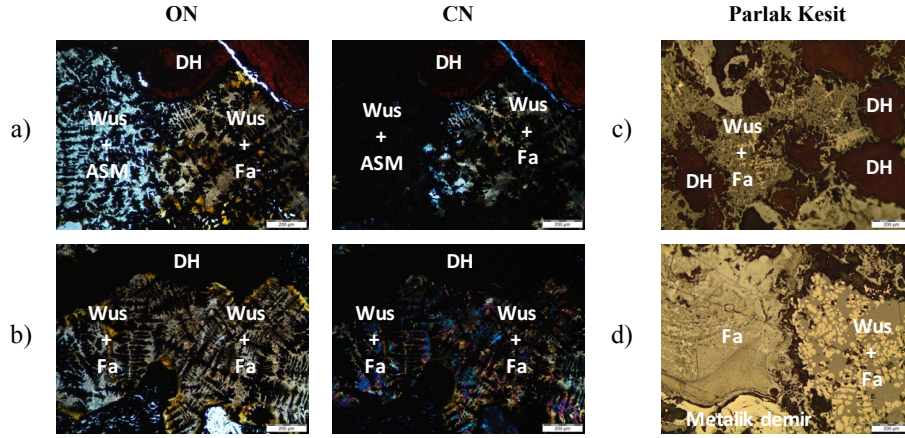
NE-2.1 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesitler üzerinde yapılan optik mikroskopi incelemelerinde amorf matriks üzerinde demir oksit ve hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit ( $\text{FeO}$ ) tanelerine, manyetitler ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ile kırmızı-kahverengi demir hidroksit taneleri eşlik etmektedir. Demir hidroksit taneleri irili-ufaklı ve pulcuklar halindedir. Heterojen bir mikro yapı sergileyen örneğin farklı kesimlerinde metalik demir (ferrit) tanelerine de rastlanılmaktadır. (Şekil 5.21).



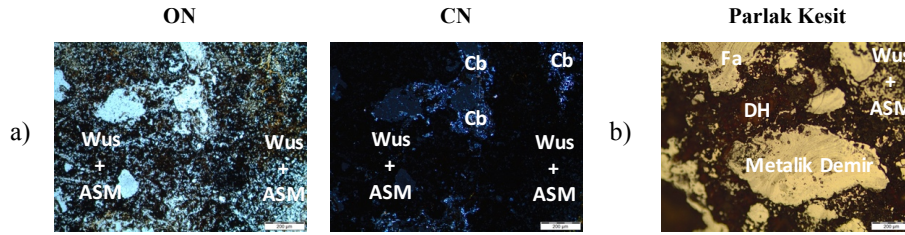
**Şekil 5.21:** NE- 2.1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri ve demir hidroksitler b) Pulcuklar halinde gözlenen demir hidroksitler c) Amorf matriks (koyu gri) üzerinde gözlenen metalik demir taneleri (açık beyaz) ve manyetitler (gri) d) İri ve ufak dentritik vüstit taneleri (açık sarı) ve amorf matriks (koyu gri) ( ON: Tek nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Wus: Vüstit ASM: Amorf silis matriks)

NE-2.2 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesitler üzerinde yapılan optik mikroskopi incelemelerinde fayalitik ve amorf matriks bir arada gözlenmektedir. Her iki matriks üzerinde demir oksit ve hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit ( $FeO$ ) tanelerine, manyetitler ( $Fe_3O_4$ ) ile pulcuklar halinde kırmızı-kahverengi demir hidroksitler eşlik etmektedir. Heterojen bir mikro yapı sergileyen örneğin bazı kesimlerinde metalik demir ve selülozik doku sergileyen kömürleşmiş odun tanelerine rastlanmaktadır (Şekil 5.22).

NE-3 kod numaralı örneğin ince kesitinin -fazla aşındırmadan dolayı- yalnızca belirli kesimlerinden görüntü alınabilmektedir. Örneğe ait ince ve parlak kesitler üzerinde yapılan optik mikroskopi incelemelerinde fayalitik ve amorf matriks bir arada gözlenmektedir. Her iki matriks üzerinde demir oksit ve hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit ( $FeO$ ) tanelerine, manyetitler ( $Fe_3O_4$ ) ile pulcuklar halinde kırmızı-kahverengi demir hidroksitler eşlik etmektedir. Heterojen bir mikro yapı sergileyen örneğin bazı kesimlerinde metalik demir tanelerine rastlanmaktadır. Örneğin gözenek çeperlerinde sıvama şeklinde karbonat mineralleri gözlenmektedir (Şekil 5.23).

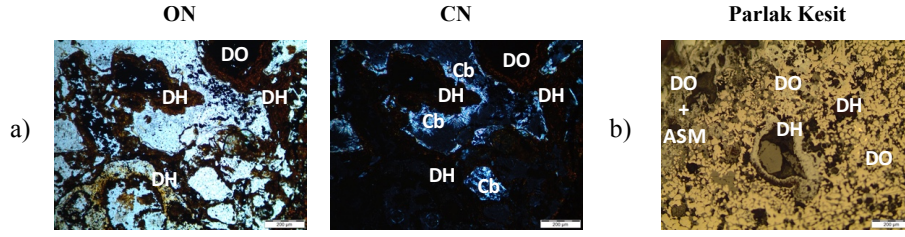


**Şekil 5.22:** NE- 2.2 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik ve amorf matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri b) Fayalitik matriks ve dentritik vüstit mineralleri c) Fayalitik (açık gri) ve amorf matriks (koyu gri) üzerinde gözlenen vüstitler ve demir hidroksit taneçikleri d) Fayalitik ve amorf matriks ile küresel vüstit taneçikleri ve metalik demir(açık beyaz) (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Wus: Vüstit Fa: Fayalit ASM: Amorf silis matriks)



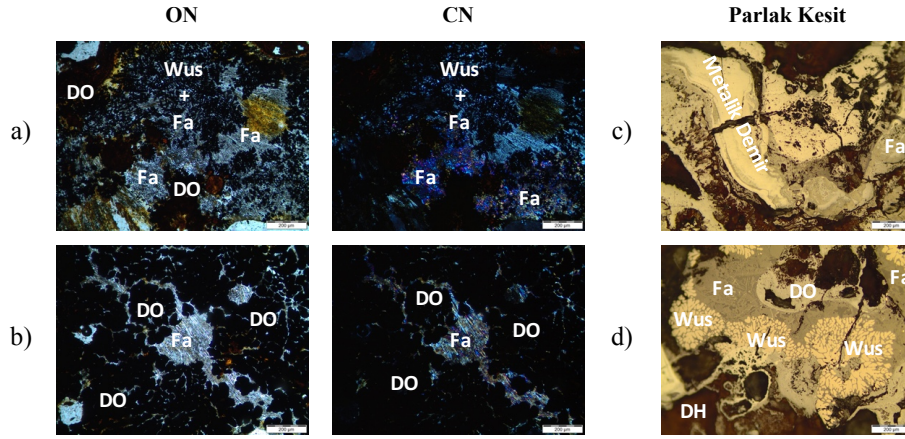
**Şekil 5.23:** NE- 3 kod numaralı örneğin alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde demir oksit taneleri (opak) ve gözenek çeperlerinde gözlenen karbonat mineralleri b) Fayalitik (açık gri) ve amorf (koyu alanlar) matriks ile metalik demir( açık beyaz) ve demir hidroksit taneleri (kahverengi) (ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Cb: Karbonat Wus: Vüstit Fa: Fayalit ASM: Amorf silis matriks)

NE- 4 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesitler üzerinde yapılan optik mikroskopi incelemelerinde amorf matriks üzerinde demir oksit ve hidroksit mineralleri birarada gözlenmiştir. Gözenek çeperlerinde sıvamalar şeklinde karbonat mineralleri izlenebilmektedir. Heterojen bir mikro yapı sergileyen örneğin kesitinde farklı mineral dokularına rastlanmaktadır (Şekil 5.24).



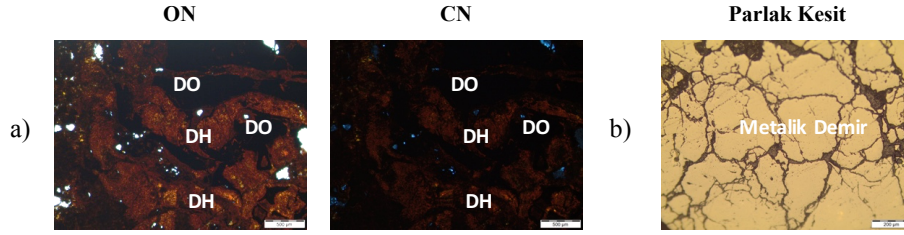
**Şekil 5.24:** NE- 4 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen demir oksit (opak) ve hidroksit (kahverengi) taneleri ile gözenek çeperlerindeki karbonat mineralleri b) Amorf matriks ve demir oksitler (ON:Tek Nikol CN: Çift nikol DH: Demir hidroksil DO: Demir Oksit Cb: Karbonat ASM: Amorf silis matriks)

NE-5 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesitler üzerinde yapılan optik mikroskopi incelemelerinde fayalitik matriksin hakim olduğu gözlenmektedir. Fayalitik matriks üzerinde demir oksit ve hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit ( $FeO$ ) tanelerine, manyetitler ( $Fe_3O_4$ ) ile pulcuklar halinde kırmızı-kahverengi demir hidroksitler eşlik etmektedir (Şekil 5.25). Heterojen bir mikro yapı sergileyen örneğin bazı kesimlerinde metalik demir ve selülozik doku gösteren kömürleşmiş odun tanelerine rastlanmaktadır (bknz. Şekil 5.25).



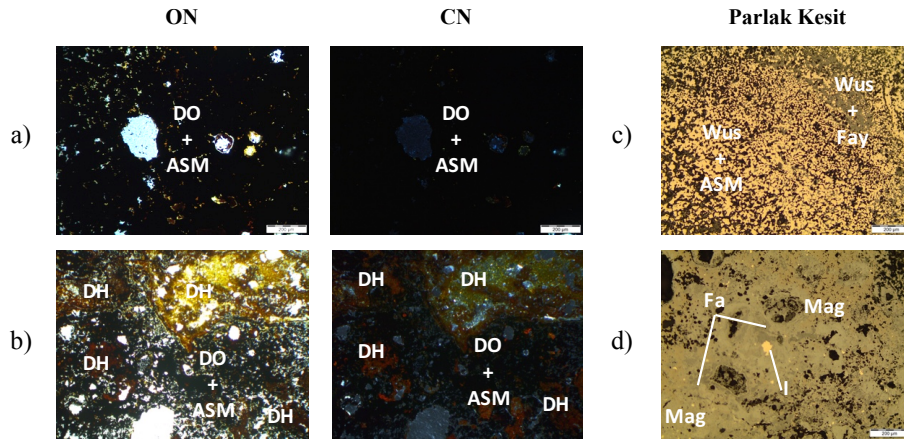
**Şekil 5.25:** NE- 5 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri (opak) ve demir hidroksitler (sarı-kahverengi) b) Fayalitik matriks ve demir oksitler (opak) c) Metalik demir ve mekanik işlemlere bağlı gelişen çatlaklar d) Fayalitik matriks ile vüstit tanecikleri ve demir hidroksitler (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil DO: Demir Oksit Wus: Vüstit Fa: Fayalit ASM: Amorf silis matriks)

NE-6.1 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde örneğin dış sınırına yakın bölgelerde amorf matriks ile demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. Örneğin iç kesimlerinde amorf matrikse genellikle metalik demir eşlik etmektedir (Şekil 5.26).



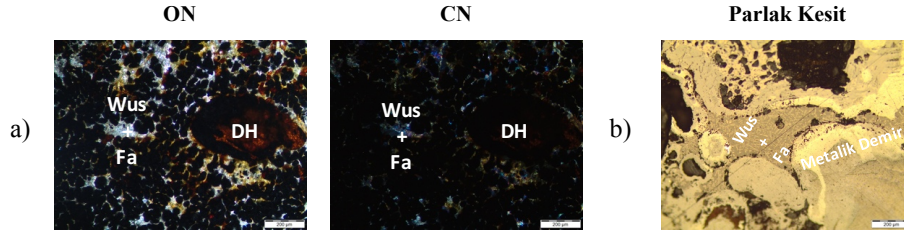
**Şekil 5.26:** NE-6.1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks ile metalik demir (opak) ve demir hidroksitler (kırmızı-kahverengi) b) Ferrit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil DO: Demir oksit)

NE-6.2 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde amorf s ile az miktarda fayalitik matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. Amorf matriks üzerinde irili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve yer yer metalik demir (ferrit) taneleri eşlik etmektedir (Şekil 5.27).



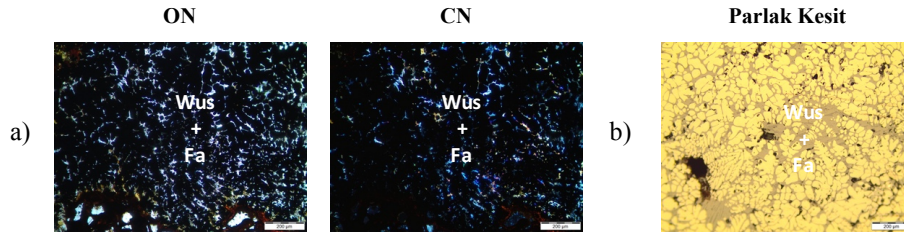
**Şekil 5.27:** NE- 6.2 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen demir oksit taneleri (opak) ve demir hidroksitler (sarı-kahverengi) b) Amorf matriks üzerinde pulcuklar halinde gözlenen demir hidroksitler c) Fayalitik ve amorf matriks üzerinde vüstit taneleri demir ve mekanik işlemlere bağlı gelişen çatlaklar d) Fayalitik matris (koyu gri) manyetit (açık gri) ve ferrit tanecikleri (açık sarı) (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Cb: Karbonat Wus: Vüstit Fa: Fayalit I: Ferrit Mag: Manyetit ASM: Amorf silis matriks)

NW-7 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde fayalitik ve amorf matriks birlikte gözlenmektedir. Matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve manyetitler ile metalik demir (ferrit) tanelerine pulcuklar halinde demir hidroksitler eşlik etmektedir (Şekil 5.28).



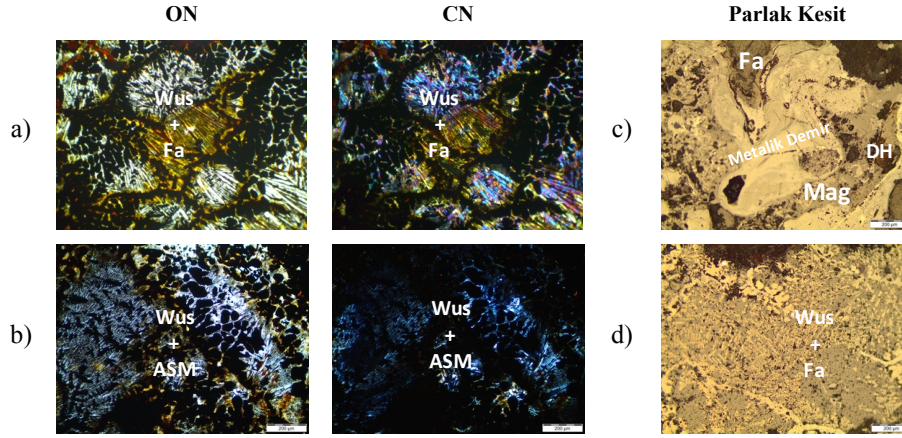
**Şekil 5.28:** NW-7 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik ve amorf matriks ile metalik demir (opak) ve demir hidroksitler (kırmızı-kahverengi) b) Fayalitik matriks(koyu gri) manyetitler (açık gri) ve metalik demir (beyaz-sarı) ile demir hidroksitler (koyu) (ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Wus: Vüstit Fa: Fayalit)

NW-8 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik matriks üzerinde demir oksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak kömürleşmiş odun kalıntılarına ait selülozik dokular gözlenmektedir (Şekil 5.29).



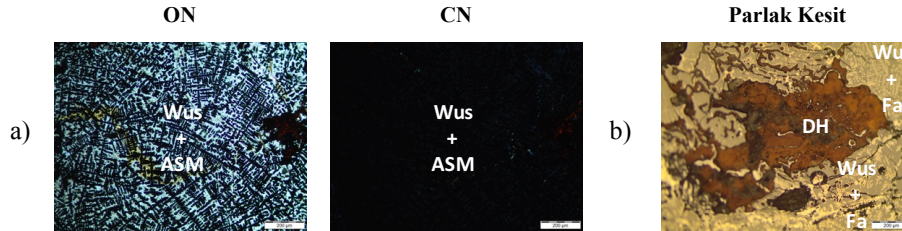
**Şekil 5.29:** NW-8 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde metalik demir ve demir oksitler (opak) ve b) Fayalitik matriks(koyu gri) mayetit (açık gri) ve vüstit taneleri(sarı-beyaz) (ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalit)

NW-9 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik ve amorf matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak yer yer demir hidroksitler gözlenmektedir (Şekil 5.30).



**Şekil 5.30:** NW-9 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen irili-ufaklı vüstit taneleri ve demir oksitler b) Amorf matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler c) Metalik demir ve demir hidroksitler d) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstitler ve metalik demir(ferrit) taneleri (ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Wus: Vüstit Fa: Fayalit Mag: Manyetit ASM: Amorf silis matriks)

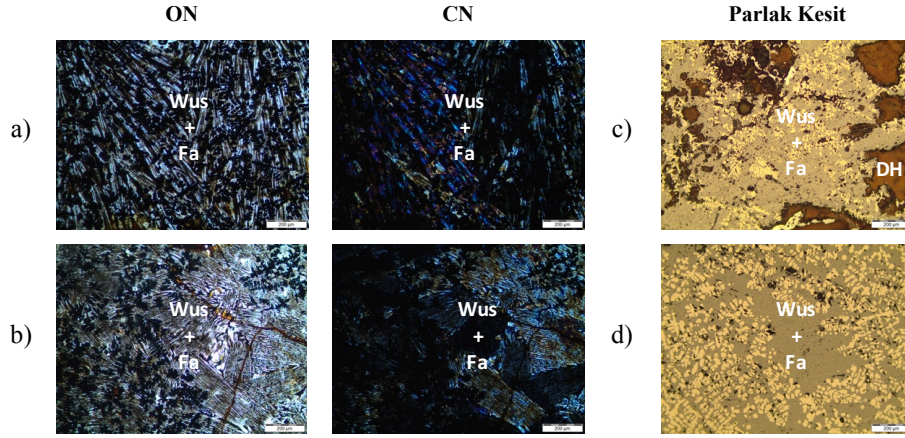
NW-10 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde amorf matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak pulcuklar halinde demir hidroksitler gözlenmektedir. Ayrıca kömürleşmiş odun kalıntılarında ait selülozik dokulara da rastlanılmaktadır (Şekil 5.31).



**Şekil 5.31:** NW-10 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen uzamış dentritik vüstit taneleri b) Pulcuklar halinde gözlenen demir hidroksit taneleri (ON: Tek Nikol CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Wus: Vüstit Fa: Fayalit ASM: Amorf silis matriks)

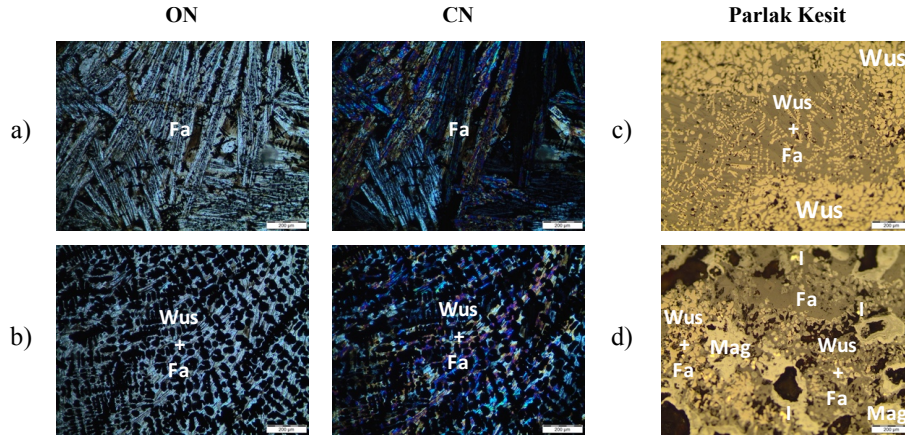
NW-11 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik ve amorf matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak demir hidroksit pulcukları gözlenmektedir (Şekil 5.32).





**Şekil 5.32:** NW-11 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen irili-ufaklı vüstit taneleri ve demir oksitler b) Fayalitik ve amorf matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler c) Metalik demir ve demir hidroksitler d) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstitler ve metalik demir(ferrit) taneleri(ON: Tek nikel CN: Çift Nikol DH: Demir hidroksil Wus: Vüstit Fa: Fayalit)

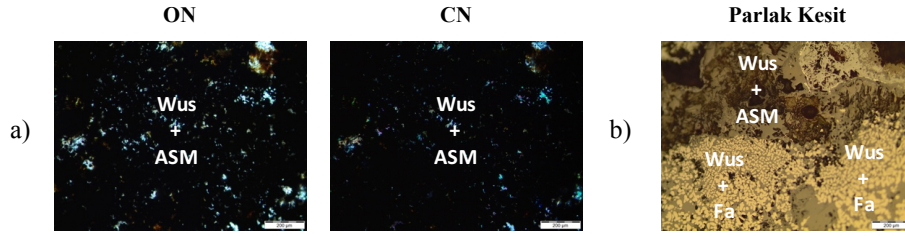
SE-14.1 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik ve amorf matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak demir hidroksit pulcukları gözlenmektedir (Şekil 5.33).



**Şekil 5.33:** SE-14.1 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Kesit üzerinde gözlenen çubuksu fayalitler b) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler c) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen dentritik vüstitler ve metalik demir(ferrit) taneleri d) Fayalitik matriks (koyu gri), manyetitler(açık gri) ve metalik demir taneleri (açık sarı) ile demir hidroksitler (kahverengi) (ON: Tek nikel CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalit Mag: Manyetit I: Ferrit ASM: Amorf silis matriks)

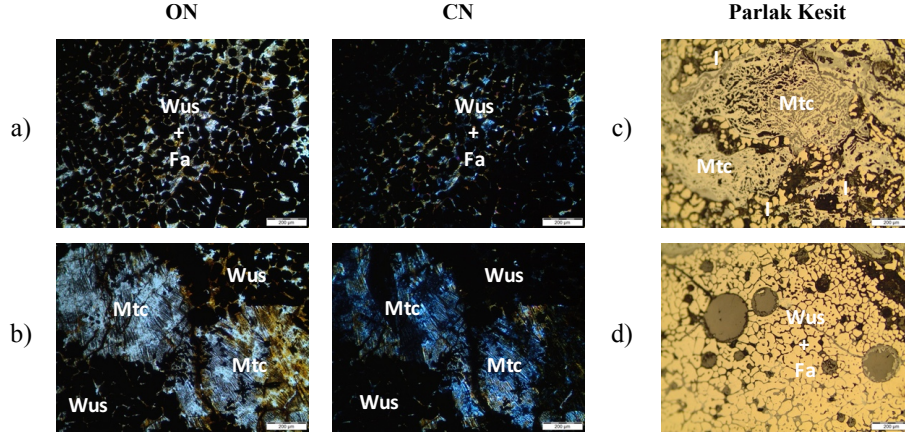
SE-14.2 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde amorf matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri

izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak pulcuklar halinde demir hidroksitler gözlenmektedir (Şekil 5.34).



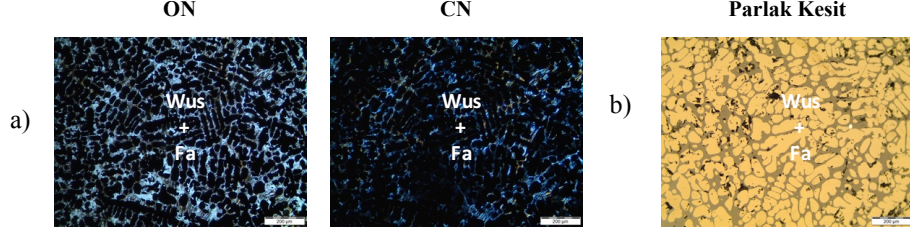
**Şekil 5.34:** SE-14.2 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Amorf matriks üzerinde gözlenen uzamış dentritik vüstit taneleri b) Amorf matriks üzerinde irili-ufaklı dentritik vüstitler ve demir hidroksit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalit ASM: Amorf silis matriks)

SE-16 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik ve amorf matriks üzerinde demir oksit ve demir hidroksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri ve metalik demir tanelerine ek olarak fayalitik matriks içerisinde olivin grubu minerali olan montisellitler ile demir hidroksit pulcukları gözlenmektedir (Şekil 5.35).



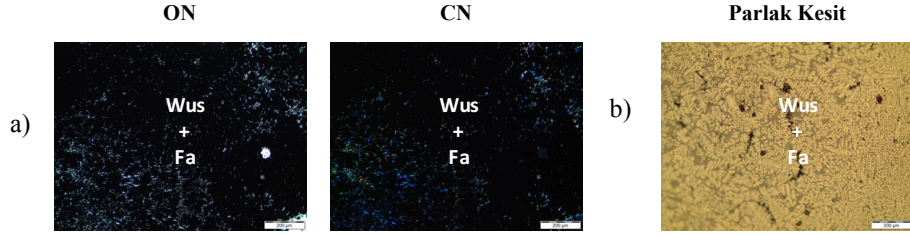
**Şekil 5.35:** SE-16 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a) Fayalitik matriks üzerinde gözlenen vüstitler ve demir oksitler b) Fayalitik matriks içerisinde gözlenen montisellit kristalleri c) Fayalitik matriks içerisinde gözlenen montisellitler ve ferrit taneleri d) Globular vüstit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalit Mtc: Montisellit ASM: Amorf silis matriks)

SW-17 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik matris üzerinde demir oksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri kesit genelinde yoğun olarak gözlenmektedir (Şekil 5.36).



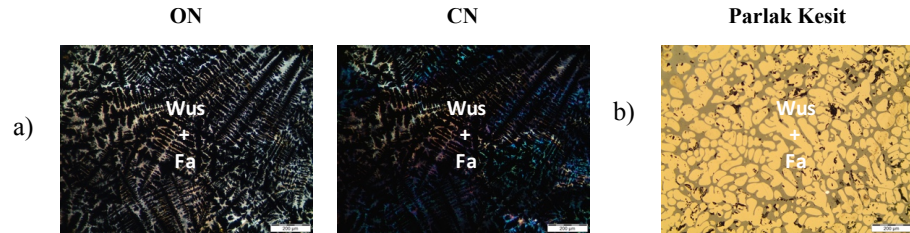
Şekil 5.36: SW-17 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a-b) Fayalitik matris üzerinde gözlenen dentritik ve globular vüstit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalite)

SW-18 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik matris üzerinde demir oksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri kesit genelinde yoğun olarak gözlenmektedir (Şekil 5.37).



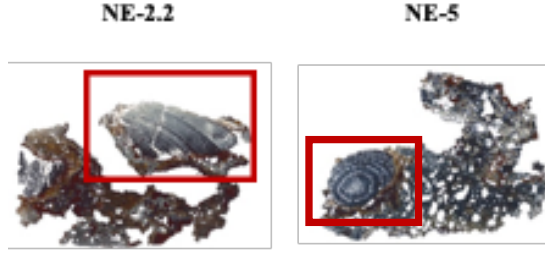
Şekil 5.37: SW-18 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a-b) Fayalitik matris üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalite)

SW-19 kod numaralı örneğe ait ince ve parlak kesit incelemelerinde kesit genelinde fayalitik matris üzerinde demir oksit mineralleri izlenmiştir. İrili-ufaklı dentritik vüstit mineralleri kesit genelinde yoğun olarak gözlenmektedir (Şekil 5.38)



Şekil 5.38: SW-18 alttan ve üstten aydınlatmalı mikroskop fotoğrafları a-b) Fayalitik matris üzerinde gözlenen dentritik vüstit taneleri (ON: Tek nikol CN: Çift Nikol Wus: Vüstit Fa: Fayalite)

Yukarıda bahsedilen mineral fazlara ek olarak, örneklerin bazılarında kömürleşmiş odun kalıntılarına ait selülozik dokulara ait izler gözlenmiştir (Şekil 5.39).

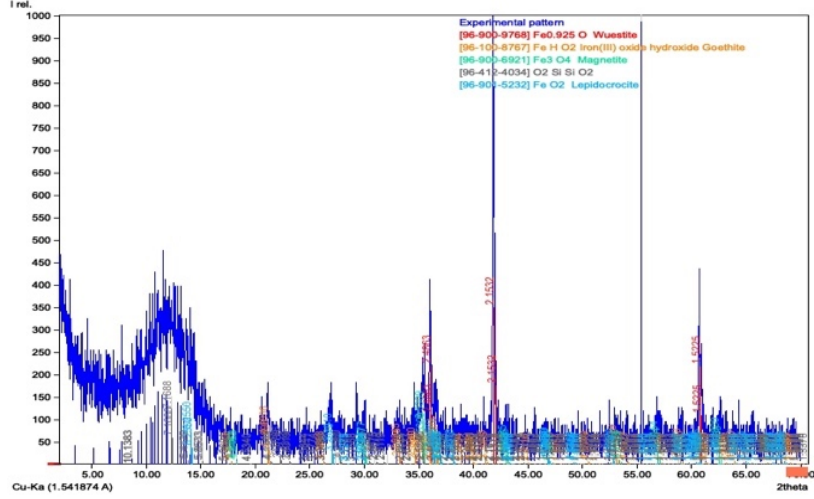


**Şekil 5.39:** Örneklere ait ince kesitlerin mikroskop taramaları üzerinde gözlenen kömürleşmiş odun kalıntılarına ait selülozik dokular (kırmızı çerçeveye içerisinde) (Tek Nikol)

### 5.1.3 X-Işını Difraktometresi (XRD) Analizleri

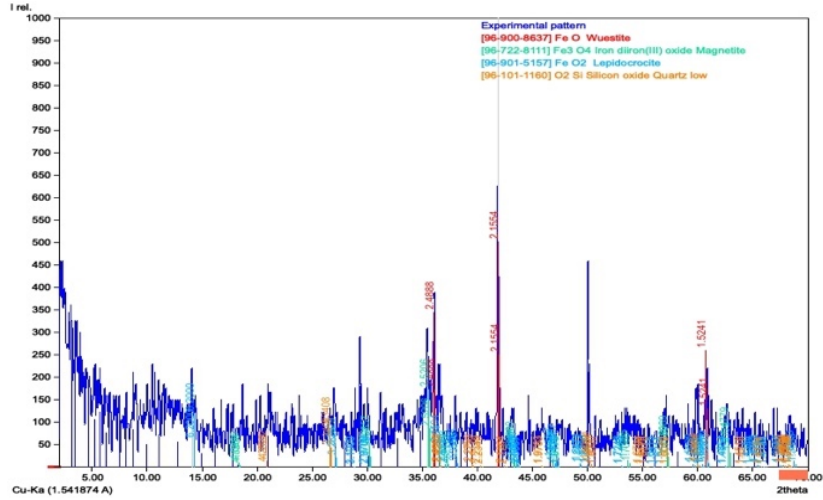
Cüruf örneklerinde yapılan X-ışınları difraktometresi analizlerinde, malzemeler içerisindeki amorf fazların fazlalığı ve yapılan öğütme işlemiyle -optik mikroskopi incelemelerinde de açıkça görülen- kristal yüzeyleri üzerine sıvanmış demir oksitlerin tam anlamıyla ayrıştırılamaması nedeniyle, genellikle demir oksitlerle ilişkili mineral fazları tanımlanabilmiştir. Bu durumun, yüksek absorpsiyon katsayısına sahip bir mineralin, gelen X-ışınını geçmesine izin vermeden daha fazla dağıtarak olduğundan daha baskın şekilde gözlenmesine neden olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir (Mertens, 2009).

NE-1 kod numaralı örneğe ait XRD analizlerinde baskın mineral fazın vüstitler (FeO) olduğu gözlenmektedir. Vüstitlerle birlikte manyetit ( $Fe_3O_4$ ) ve demir hidroksit grubuna ait götit ( $\alpha FeO(OH)$ ) ile lepidokrosit ( $\gamma FeO(OH)$ ) minerallerine ait pikler ile amorf silis fazlara ait pikler tanımlanmıştır (Şekil 5.40).



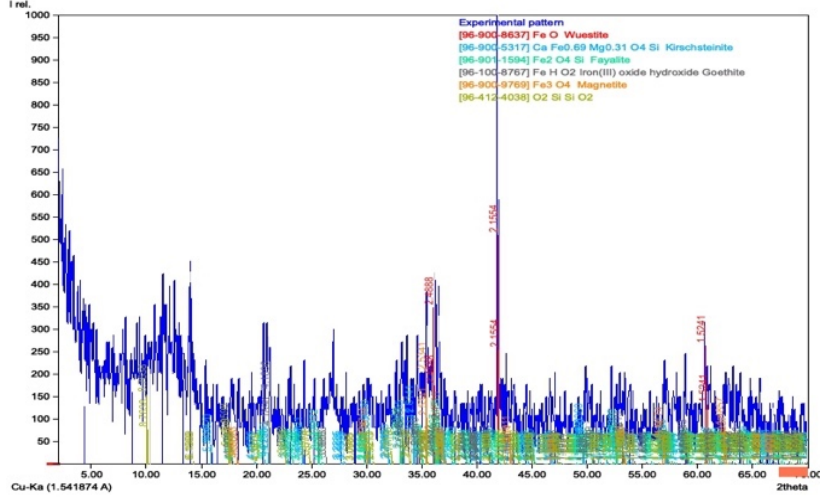
Şekil 5.40: NE- 1 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NE- 2.1 kod numaralı örneğe ait XRD analizlerinde de vüstitler ( $\text{FeO}$ ) baskın fazı oluşturmakta ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) ile kuvarsların vüstitlere eşlik ettikleri görülmektedir (Şekil 5.41).



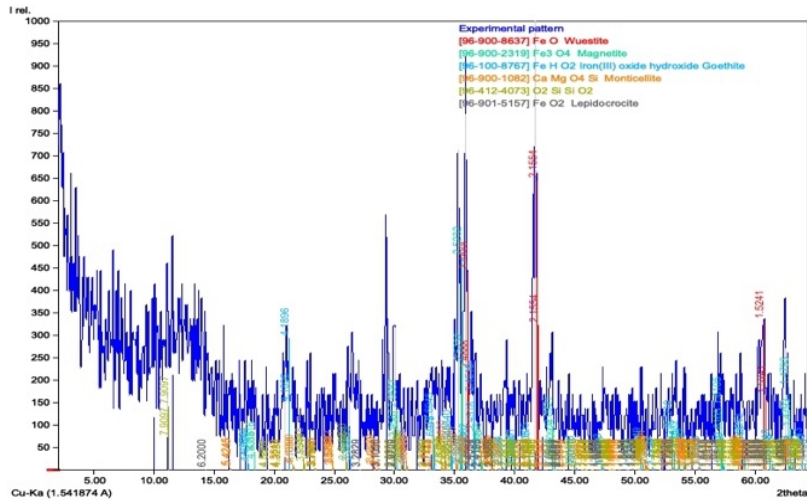
Şekil 5.41: NE- 2.1 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NE- 2.2 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitleri ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca daha düşük şiddetli fayalit ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) ve kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) gibi olivin grubu mineralleri ve amorf silis fazlara ait pikler gözlenmiştir (Şekil 5.42).



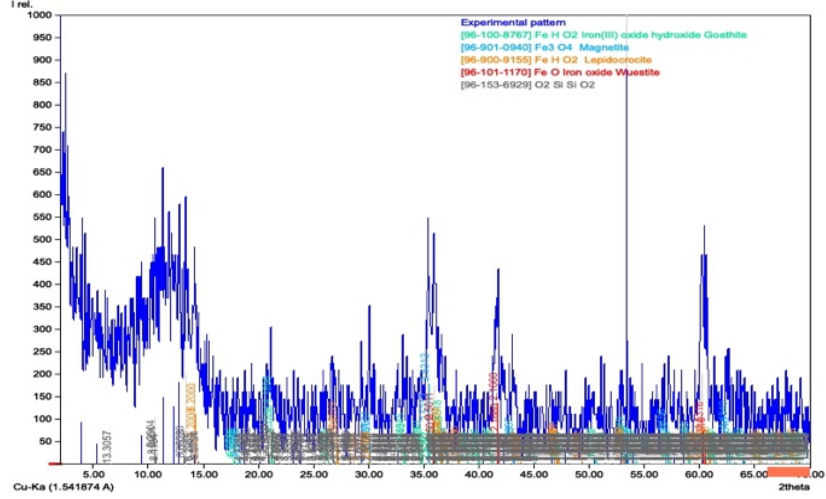
Şekil 5.42: NE- 2.2 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NE- 3 numaralı örneğin XRD analizinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitlerinin baskın fazlar olduğu gözlenmiştir. Bu fazlara yine götit ( $\alpha\text{FeO(OH)}$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO(OH)}$ ) demir hidroksitleri eşlik etmektedir. Ayrıca amor silis fazlara ait pikler ve olivin grubunda yer alan montisellit ( $\text{CaMgSiO}_4$ ) pikleri tanımlanmıştır (Şekil 5.43).



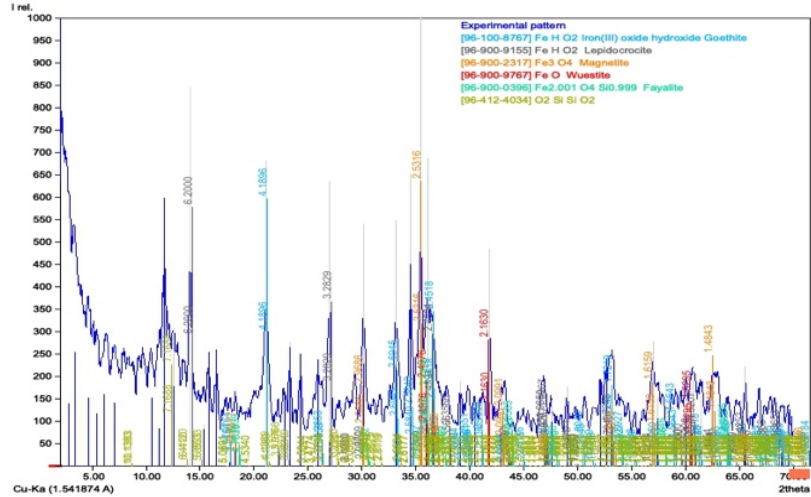
Şekil 5.43: NE- 3 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NE- 4 numaralı örneğin XRD analizinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitlerinin baskın fazlar olduğu gözlenmiştir. Bu fazlara götit ( $\alpha\text{FeO(OH)}$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO(OH)}$ ) demir hidroksitleri eşlik etmektedir. Ayrıca amorf silis fazlara ait ( $\text{SiO}_2$ ) pikler tanımlanabilmektedir (Şekil 5.44).



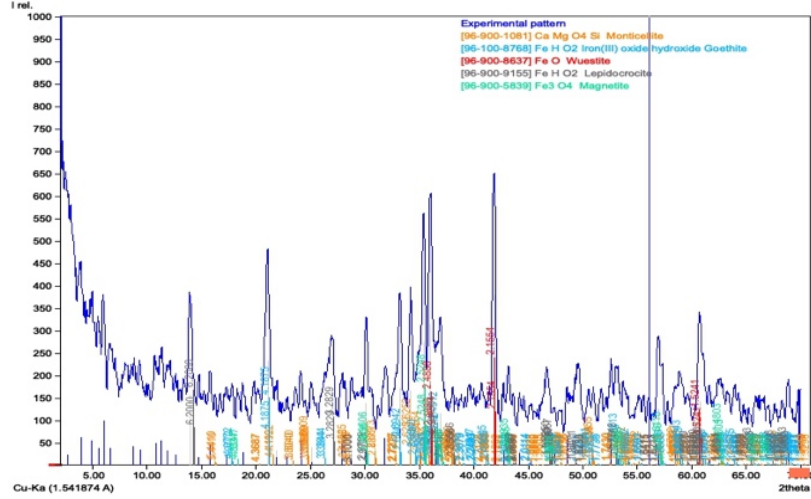
Şekil 5.44: NE- 4 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NE- 5 numaralı örneğin XRD analizinde fayalitlerin ( $\text{FeSiO}_4$ ) baskın fazlar olduğu gözlenmiştir. Bu fazlara manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitleri ve götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitleri eşlik etmektedir. Ayrıca amorf silis fazlara ait ( $\text{SiO}_2$ ) pikler tanımlanmıştır (Şekil 5.45).



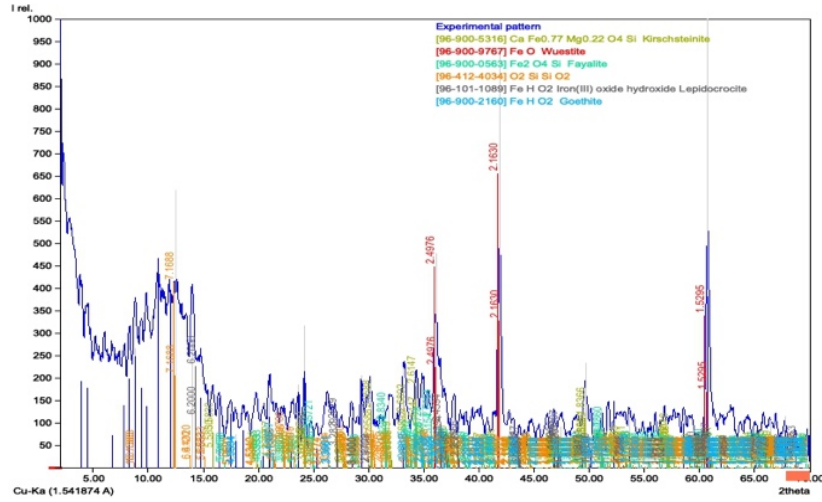
Şekil 5.45: NE- 5 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NW- 7 numaralı örneğin XRD analizinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitlerinin baskın fazlar olduğu gözlenmiştir. Bu fazlara götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitleri eşlik etmektedir. Ayrıca amorf silis fazlara pikler ( $\text{SiO}_2$ ) ve olivin grubunda yer alan montisellit ( $\text{CaMgSiO}_4$ ) pikleri tanımlanmıştır (Şekil 5.46).



Şekil 5.46: NW- 7 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NW- 8 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit (FeO) demir oksitleri ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca daha düşük şiddetli fayalit ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) ve kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) gibi olivin grubu minerallerine ait pikler gözlenmiştir (Şekil 5.47).

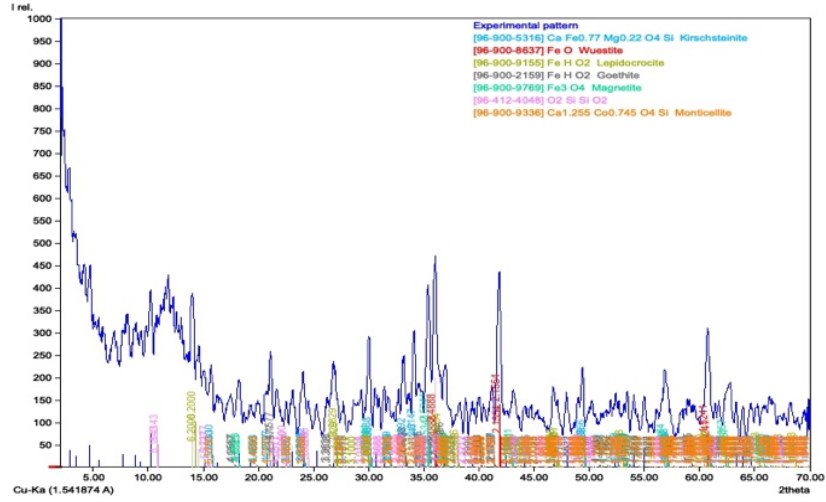


Şekil 5.47: NW- 8 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

NW- 9 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit (FeO) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitleri ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca daha düşük şiddetli montisellit

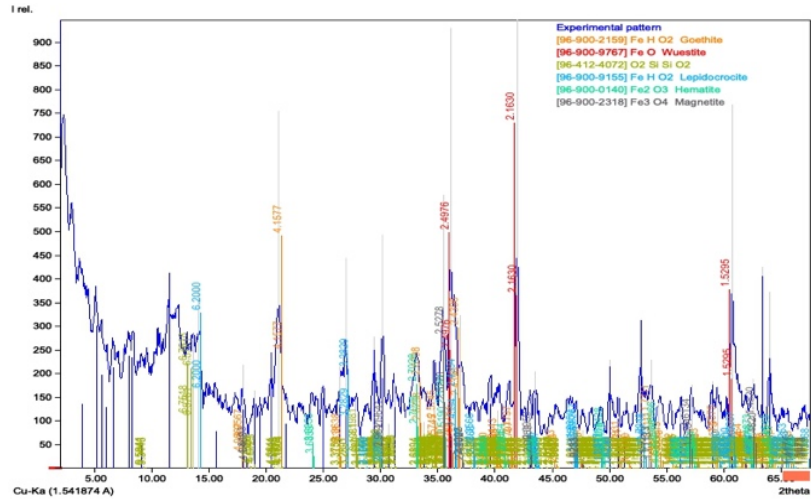


(CaMg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), kirşenit (CaFe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) gibi kalsiyumlu olivin grubu minerallerine ve amorf silis fazlara ait pikler gözlenmiştir (Şekil 5.48).



Şekil 5.48: NW- 9 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

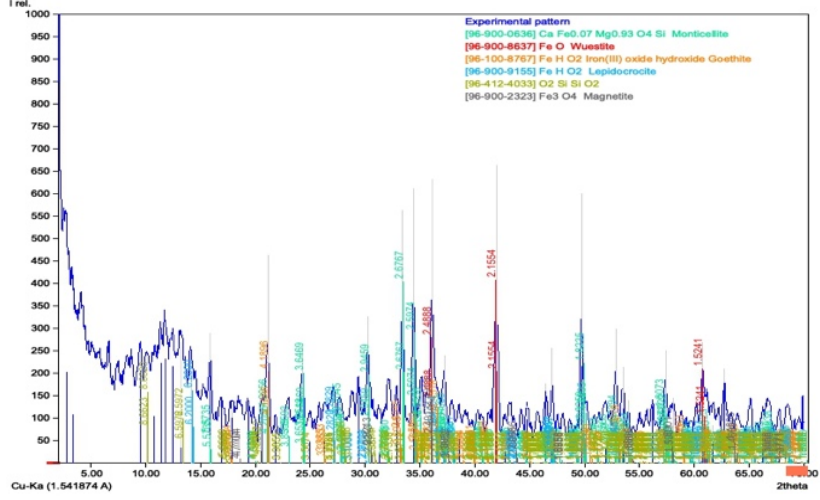
NW- 10 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit (FeO), manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ve hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) demir oksitleri ile götit ( $\alpha$ FeO(OH)) ve lepidokrosit ( $\gamma$ FeO(OH)) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca amorf silis fazlara ait daha düşük şiddetli pikler gözlenmiştir (Şekil 5.49).



Şekil 5.49: NW- 10 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

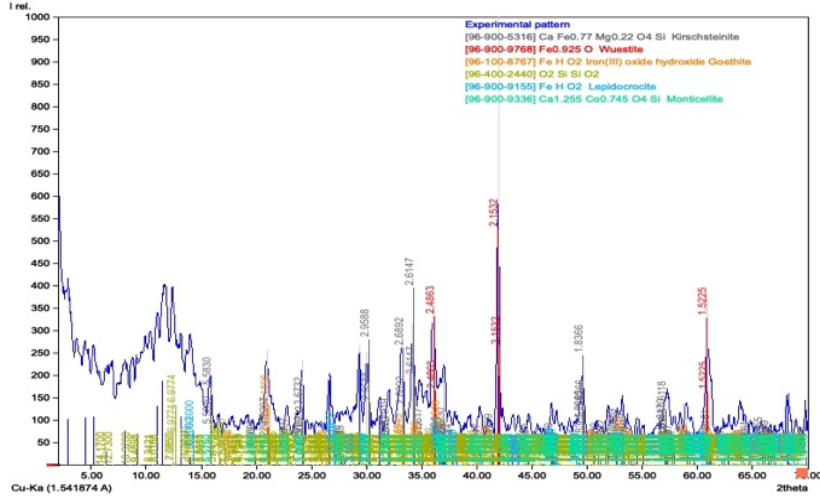
NW- 11 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit (FeO) ve manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) demir oksitleri ile götit ( $\alpha$ FeO(OH)) ve lepidokrosit ( $\gamma$ FeO(OH)) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca olivin grubundaki

montisellit( $\text{CaMg}_2\text{SiO}_4$ ) minerali ile amorf silis fazlara ait daha düşük şiddetli pikler gözlenmiştir (Şekil 5.50).



Şekil 5.50: NW- 11 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

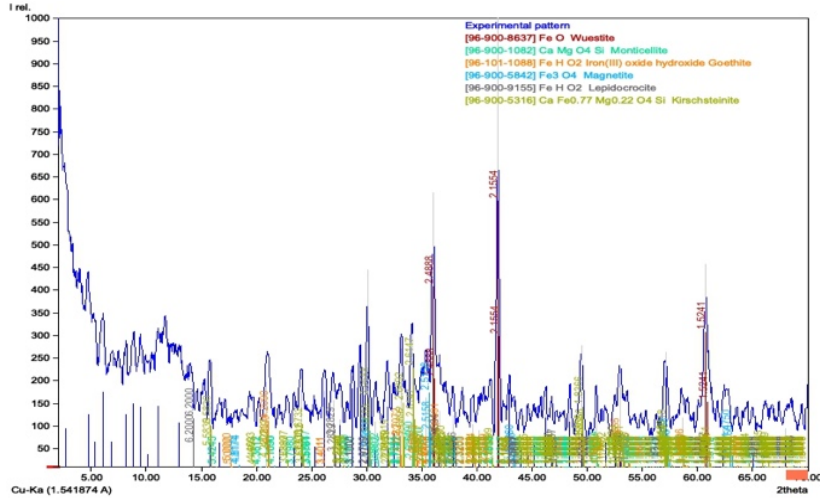
SE- 14.1 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) demir oksitleri ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca montisellit ( $\text{CaMg}_2\text{SiO}_4$ ) ve kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) gibi kalsiyumlu olivin grubu minerallerine ait pikler ile amorf silis fazlara ait pikler gözlenmiştir (Şekil 5.51).



Şekil 5.51: SE- 14.1 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

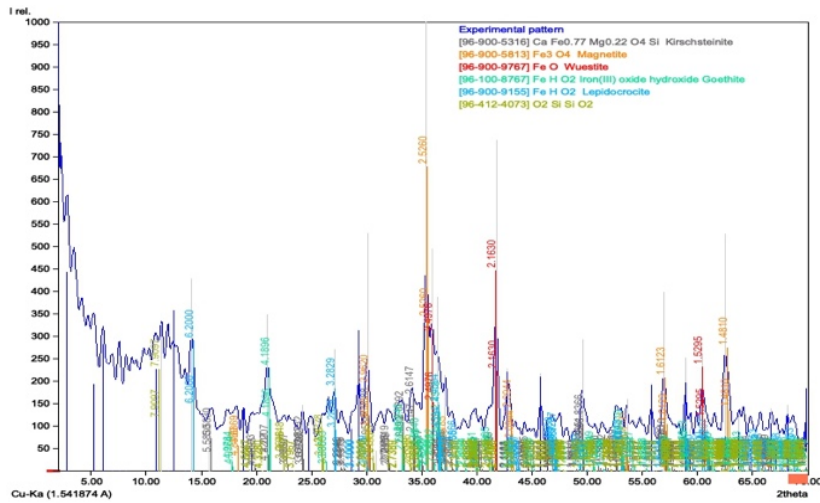
SE- 14.2 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitleri ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca daha düşük şiddetli

montisellit ( $\text{CaMg}_2\text{SiO}_4$ ) ve kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) gibi kalsiyumlu olivin grubu minerallerine ait pikler ile amorf silis fazlara ait pikler gözlenmiştir (Şekil 5.52).



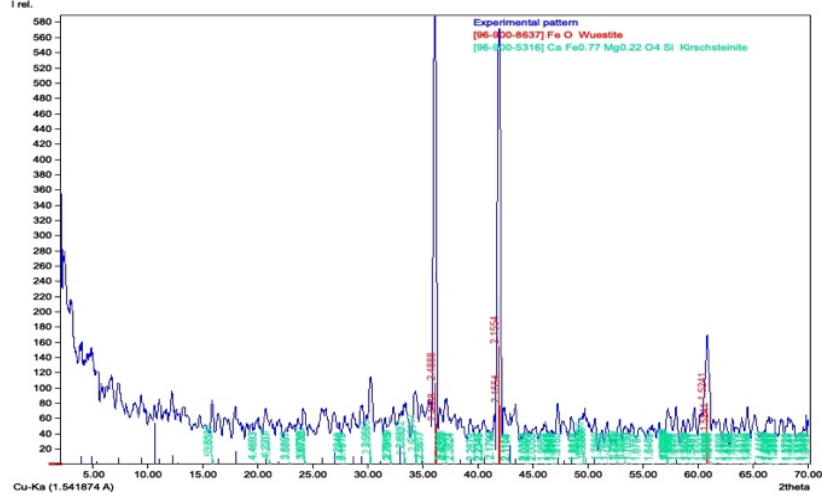
Şekil 5.52: SE-14.2 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

SE-16 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD incelemelerinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitleri ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır. Ayrıca daha düşük şiddetli kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) gibi kalsiyumlu olivin grubu minerallerine ait pikler ile amorf silis fazlara ait gözlenmiştir (Şekil 5.53).



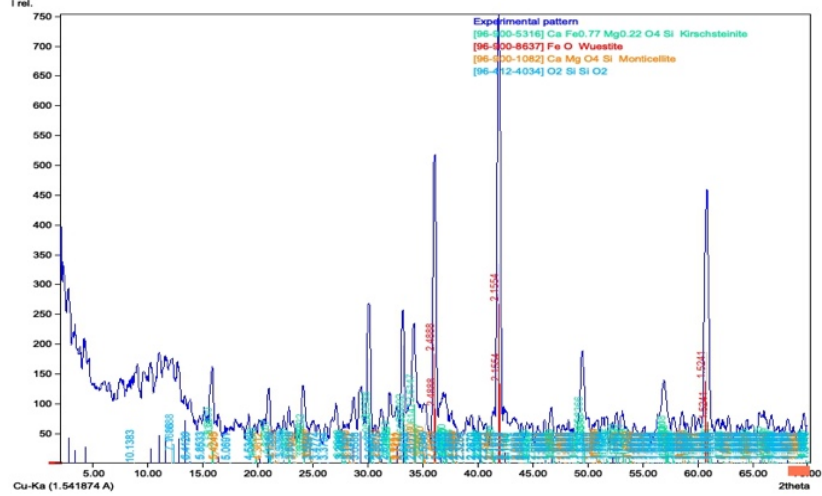
Şekil 5.53: SE-16 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

SW-17 kod numaralı örneğe ait XRD analizlerinde vüstit ( $\text{FeO}$ ) ve kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) fazlarına ait pikler baskın şekilde gözlenmiştir. Diğer fazlara ait pikler amorf fazlara ait arka plan ile karıştığından tanımlanamamıştır (Şekil 5.54).



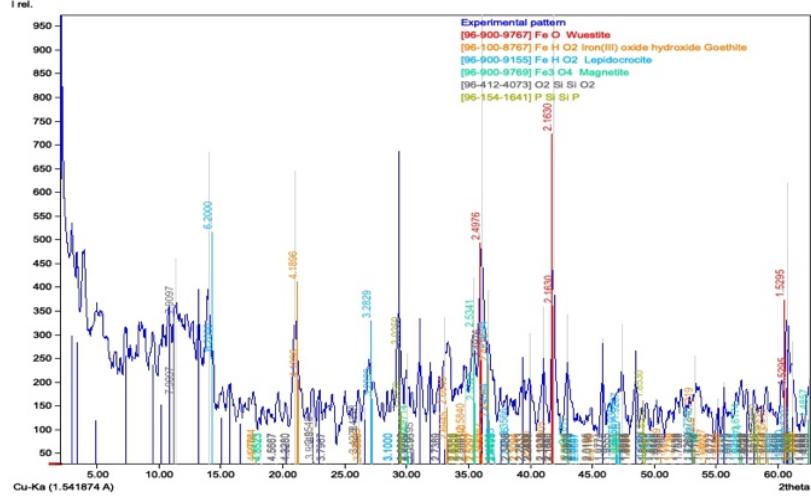
Şekil 5.54: SW- 17 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

SW- 18 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD analizlerinde vüstit (FeO) demir oksitleri ile kalsiyumlu olivin grubu mineralleri olan montisellit ( $\text{CaMg}_2\text{SiO}_4$ ) ve kirşenit ( $\text{CaFe}_2\text{SiO}_4$ ) minerallerine ait pikler tanımlanmıştır. Diğer fazlara ait pikler amorf fazlara ait arka plan ile karıştığından tanımlanamamıştır (Şekil 5.55)



Şekil 5.55: SW- 18 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

SW- 19 kod numaralı örnek üzerinde yapılan XRD analizlerinde vüstit (FeO) ve manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) demir oksitlerine ait pikler ile götit ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ve lepidokrosit ( $\gamma\text{FeO}(\text{OH})$ ) demir hidroksitlerine ait pikler tanımlanmıştır (Şekil 5.56). Ayrıca amorf silis fazlara ait pikler gözlenmiştir.



Şekil 5.56: SW- 19 kod numaralı örneğe ait XRD grafiği ve faz tanımlamaları

#### 5.1.4 SEM-EDS Analizleri

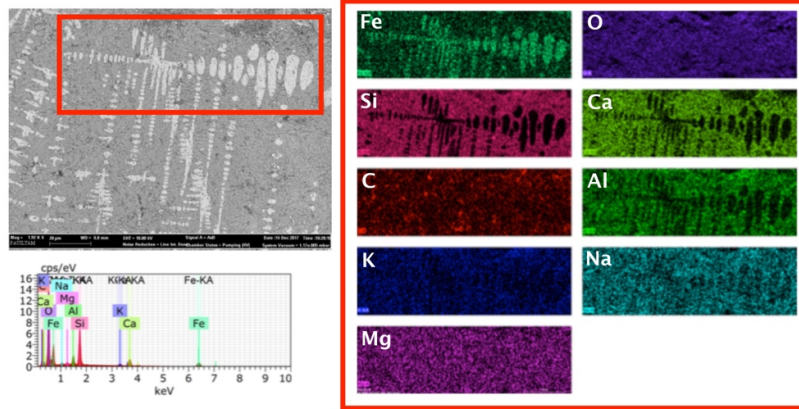
SEM-EDS analizlerinde optik mikroskopi analizlerinde farklı dokular sergileyen örnekleri temsil eden 3 adet cüruf örneğine ait bloklar incelenmiştir. Optik mikroskopi çalışmalarında elde edilen bulguların desteklenebilmesi amacıyla farklı kristal fazları temsil eden bölgeler üzerinde noktasal analizler ve elementer haritalama çalışmaları gerçekleştirilerek fazlara ait mineralojik yorumlar güçlendirilmiştir.

SEM-EDS analizleri kapsamında NE-2.2, SE-16 ve SW-17 kod numaralı cüruf örnekleri incelenmiştir. Optik mikroskopi incelemelerinde gözlenen fayalitik ve amorf matriks ile diğer kristal fazların farklı bölgelerinden kimyasal bileşimin belirlenmesi amacı ile noktasal ve bölgesel element analizleri yapılarak geri saçınımlı mikroskop görüntüleri alınmıştır.

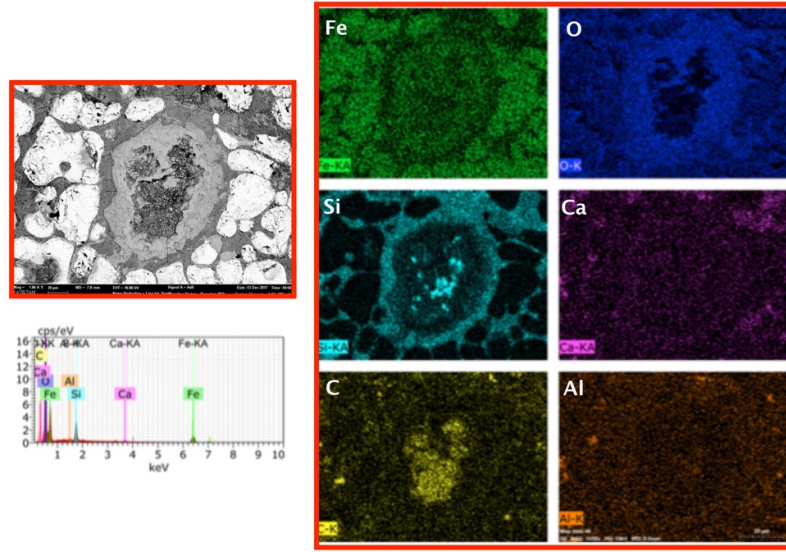
NE-2.2 kod numaralı örnek üzerinde yapılan incelemelerde inceden iri taneliye doğru geçiş yapan bir dentritik vüstit minerali üzerinde elementer haritalama çalışması gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonucunda vüstit mineralinin ve üzerinde yer aldığı matriksin kimyasına yönelik bilgilere ulaşılmıştır. Vüstit mineralinin bulunduğu bölge beklendiği üzere Fe ve O atomlarınca baskınken, söz konusu bölgede eser miktarda C, Al, K, Mg ve Na elementleri de gözlenmiştir. Matriks genelinde optik mikroskopi ve XRD incelemelerinde de görülen fayalitlerle ilişkili Fe, Si ve O atomlarının yanında montisellit ile kirşenit gibi kalsiyumlu olivin grubu minerallerine ait olabileceği

düşünülen Ca, Mg atomlarına da rastlanmıştır. Matriks üzerinde gözlenen Al, K, Na elementlerinin, optik mikroskopi ve XRD incelemelerinde gözlenmeyen fakat cürufklar içerisinde zaman zaman gözlenebilen anortit, forsterit, mikroklin gibi mineral fazları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.57).

SE-16 kod numaralı örnek üzerinde yapılan incelemelerde farklı fazlara ait yapıların bir arada gözleendiği bölgelerden yapılan analizlerde de Fe ve O elementlerinin fazlar içerisinde baskın olduğu gözlenmiştir. Yumrusal demir oksitler haricinde kalan ve optik mikroskopi incelemelerinde gözlenen vüstit taneciklerinin üzerinde yer aldığı fayalitik matriks genelinde beklendiği üzere Fe, Si ve O elementleri yoğunken bu elementlere bazı bölgelerde yoğunlaşan Ca, Al elementleri eşlik etmektedir. Ayrıca örneğin bazı bölgelerinde gözlenen amorf fazlarında benzer kimyasal bileşimde olduğu fakat gözlenmiştir. Matriks içerisinde yer alan ve özellikle belli bölgelerde yoğunlaşan Ca ve Al elementlerinin yine kirşenit ve anortit gibi cüruf kalıntılarında beklenen mineral fazları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.58).

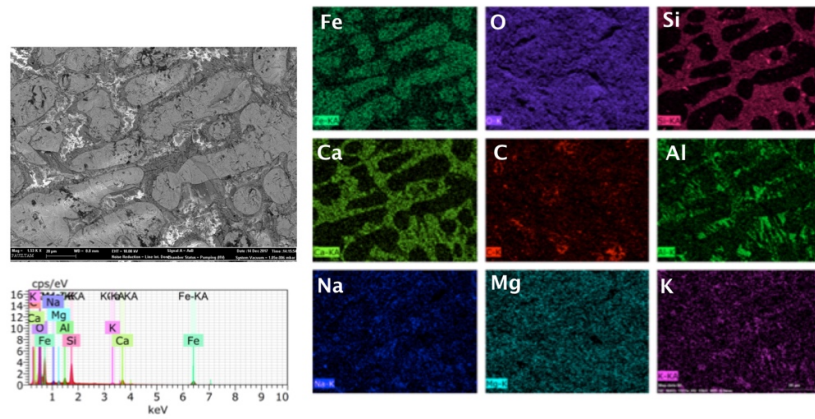


**Şekil 5.57:** NE-2.2 kod numaralı örneğe ait geri saçımmlı elektron mikroskopi görüntüsü ile örnekte gözlenen vüstit minerali ve matriksin (kırmızı çerçeve ile sınırlanan alan) elementer dağılım görüntüsü



**Şekil 5.58:** SE-16 kod numaralı örneğe ait geri saçınımlı elektron mikroskobu görüntüsü ile örnekte gözlenen demir oksitler ve matrikste gözlenen yapıların elementer dağılım görüntüsü

SW-17 kod numaralı örnekte de diğer iki örnekteki analizlere benzer bulgular elde edilmiştir. Demir oksit tanelerinin üzerinde yer aldığı matriks genelde fayalitik bir element kimyası göstermekle birlikte forsterit, montisellit, kirşenit ve anortit fazlarına ait olabilecek elementer dağılımlar sergilemektedir (Şekil 5.59).



**Şekil 5.59:** SW-16 kod numaralı örneğe ait geri saçınımlı elektron mikroskobu görüntüsü ile örnekte gözlenen demir oksitler ve matrikste gözlenen yapıların elementer dağılım haritaları

## 5.2 Kimyasal İncelemeler

### 5.2.1 XRF Analizleri

Cüruf lar heterojen mineralojik ve kimyasal özellikler sergilediklerinden, XRF analizleri için örneklerin iç kısımlarından alınan ve öğütülen numunelerden iki ayrı set hazırlanarak iki farklı laboratuvar da analizler gerçekleştirilmiştir.

Örneklere ait numuneler adlandırılırken İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yapılan analizler için örnek kodları olduğu şekli ile kullanılmış, Darmstadt Teknik Üniversitesi'nde yapılan analizlerde örneklerin kod numaralarının sonuna 'D' harfi eklenmiştir.

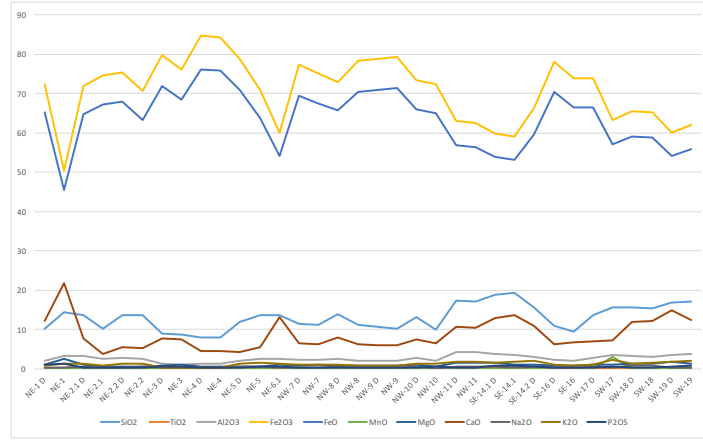
XRF analizleri sonucunda tüm örneklerde en yüksek majör oksit  $Fe_2O_3$ 'tür.  $Fe_2O_3$  içeriği %84,6- 50,41 arasındadır.  $Fe_2O_3$ 'ün ardından örneklerin genelinde en yüksek majör oksit içeriği  $SiO_2$ 'ye aittir. %19,38- 7,81 arasında değişen  $SiO_2$ 'yi sırasıyla CaO ve  $Al_2O_3$ , %21,84- 3,72 ve %4,24- 1,06 oranları ile takip etmektedir (Tablo 5.1).

**Tablo.5.1 :** Cüruf örneklerine ait XRF analizi majör oksit değerleri

% Majör Oksit	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5
Örnek No											
NE-1 D	10,16	0,08	1,88	72,4	65,14	0,03	0,98	12,13	0,18	0,84	0,96
NE-1	14,25	0,14	3,17	50,41	45,35	0,03	2,44	21,84	0,27	1,33	1,3
NE-2.1 D	13,7	0,15	3,14	71,94	64,73	0,03	0,99	7,77	0,39	1,21	0,32
NE-2.1	10,25	0,12	2,53	74,65	67,17	0,02	0,6	3,72	0,22	0,87	0,23
NE-2.2 D	13,71	0,1	2,61	75,33	67,78	0,02	0,51	5,42	0,35	1,23	0,25
NE-2.2	13,5	0,09	2,6	70,68	63,14	0,02	0,52	5,2	0,39	1,17	0,25
NE-3 D	8,84	0,05	1,29	79,79	71,79	0,12	0,85	7,64	0,37	0,34	0,41
NE-3	8,62	0,04	1,06	76,14	68,51	0,11	0,89	7,33	0,15	0,32	0,41
NE-4 D	7,98	0,08	1,26	84,6	76,12	0,03	0,58	4,52	0,21	0,29	0,21
NE-4	7,81	0,08	1,22	84,13	75,7	0,02	0,59	4,46	0,19	0,29	0,21
NE-5 D	11,87	0,05	2,06	78,68	70,79	0,08	0,52	4,29	0,53	1,2	0,27
NE-5	13,6	0,06	2,4	70,9	63,79	0,1	0,62	5,33	0,41	1,42	0,4
NE-6.1 D	13,52	0,11	2,6	59,97	53,96	0,24	1,08	13,13	0,29	1,36	0,56
NW-7 D	11,43	0,1	2,16	77,18	69,44	0,04	0,86	6,47	0,29	0,97	0,22
NW-7	11,08	0,09	2,11	74,95	67,44	0,04	0,92	6,22	0,28	0,96	0,21
NW-8 D	13,73	0,08	2,49	72,95	65,64	0,03	0,84	8,03	0,4	0,93	0,3
NW-8	11,09	0,06	2,09	78,2	70,36	0,04	0,75	6,22	0,36	0,75	0,18
NW-9 D	10,54	0,08	2,09	78,65	70,76	0,07	0,83	6	0,24	0,85	0,37
NW-9	10,15	0,07	1,9	79,31	71,36	0,08	0,83	5,86	0,18	0,83	0,35
NW-10 D	13,06	0,15	2,77	73,37	66,01	0,03	0,93	7,39	0,38	1,23	0,31
NW-10	9,77	0,15	2,01	72,24	65	0,01	0,47	6,45	0,12	1,24	0,52
NW-11 D	17,31	0,22	4,16	63,06	56,74	0,03	1,46	10,66	0,61	1,79	0,28
NW-11	16,99	0,2	4,24	62,48%	56,21	0,03	1,5	10,38	0,62	1,78	0,28
SE-14.1 D	18,88	0,23	3,68	59,73	53,74	0,11	1,43	12,79	0,55	1,49	0,73
SE-14.1	19,38	0,26	3,57	59,05	53,13	0,15	0,94	13,49	0,32	1,64	0,81
SE-14.2 D	15,62	0,1	3,08	66,15	59,52	0,05	0,97	10,87	0,43	1,88	0,5
SE-16 D	10,78	0,1	2,21	78,08	70,25	0,28	0,63	6,2	0,33	0,91	0,26
SE-16	9,41	0,07	1,98	73,93	66,52	0,19	0,8	6,73	0,32	0,73	0,23
SW-17 D	13,48	0,09	2,67	73,88	66,47	0,03	0,96	6,92	0,57	0,97	0,25
SW-17	15,52	0,12	3,48	63,28	56,93	3	0,89	7,28	0,33	2,31	0,51
SW-18 D	15,52	0,1	3,11	65,46	58,9	0,04	1,36	11,77	0,69	1,36	0,32
SW-18	15,31	0,1	3,04	65,29	58,74	0,04	1,32	12,09	0,69	1,39	0,35
SW-19 D	16,85	0,2	3,45	60,09	54,06	0,05	1,75	14,77	0,35	1,7	0,53
SW-19	16,98	0,23	3,69	61,91	55,7	0,06	1,28	12,36	0,27	1,98	0,74



Örneklerin major oksit dağılım grafiklerine bakıldığında  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerikleri ile  $\text{CaO}$  içerikleri arasında negatif korelasyon gözlenmektedir (Şekil 5.60). Bu durumun, flaksların üretim sırasındaki kontrollü kullanımının bir sonucu olabileceği düşünülmektedir.



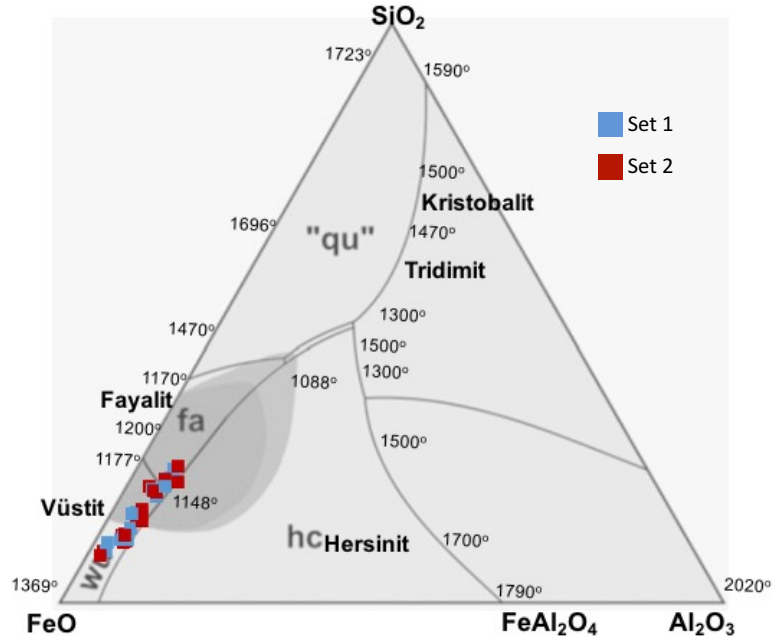
Şekil 5.60: Cüruf örneklerine ait major oksit değerlerinin dağılım grafiği

Üçlü diyagramlar genellikle cüruf sistemlerinin termokimyasal davranışlarını modellemek için kullanılır (Bachmann 1982).  $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{FeO-SiO}_2\text{-CaO}$  diyagramları, bu oksitler cürufların ana bileşenleri olduğundan çoğunlukla kullanılmaktadırlar (Charlton ve diğ. 2010). Bu diyagramlar, akışkan cüruf kütlelerini üretmek için gerekli minimum ısı miktarını göstermektedirler (Charlton ve diğ. 2010). Cürufların mineralojik ve kimyasal bileşimleri arasındaki ilişkiler ile üretim sıcaklıklarının yorumlanabilmesi adına XRF analizlerinden elde edilen major oksit içerikleri, söz konusu diyagramlara yerleştirilmiştir.

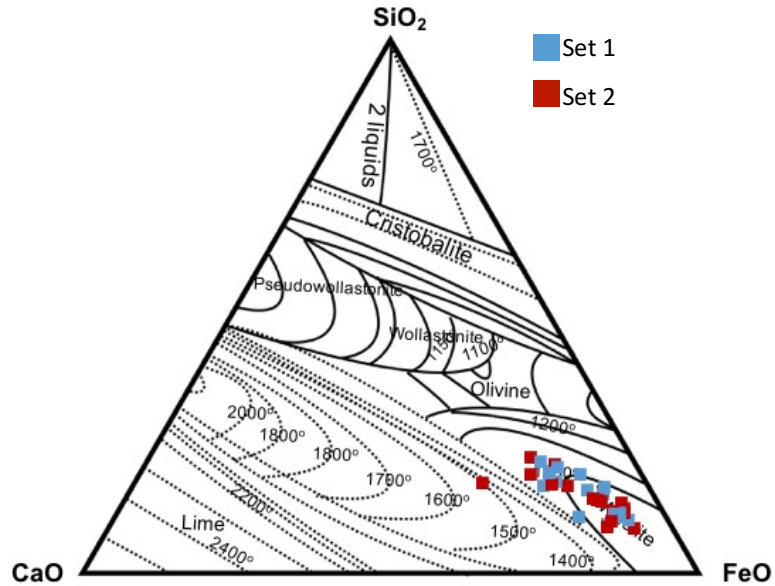
$\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  diyagramında örneklerin tümü fayalit ve vüstit ile ilişkili bölgenin sınırları içerisinde kalmıştır. NE-3, NE-4, NW-9, SE-16 kod numaralı örnekler vüstit fazına ait bölgede; NE-2.2, NE-5, NE-6.1, NW-11, SE-14.1, SE-14.2, SW-17, SW-18, SW-19 kod numaralı örnekler fayalit fazına ait bölgede; NE-1, NE-2.1, NW-7, NW-8, NW-10 kod numaralı örnekler ise vüstit-fayalit sınırına yakın bölgelerde yer almıştır (Şekil 5.61).

$\text{FeO-SiO}_2\text{-CaO}$  diyagramında da tüm örnekler vüstit fazına ait bölgede yer almıştır (Şekil 5.62). Yalnızca NE-1 nolu örneğe ait 2. Set numunesi bu alanın dışında yer almıştır. Fakat bu duruma örneğin makro yapısında da gözlenebilen ve ergiyiğin

kimyasına katılmadığı açıkça görülen karbonat taneciklerinin sebep olduğu düşünüldüğünden değerlendirmeler de dikkate alınmamıştır.



Şekil 5.61: FeO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diyagramı ve major oksit içeriklerine göre örneklerin diyagramdaki konumu



Şekil 5.62: FeO-SiO<sub>2</sub>-CaO diyagramı ve major oksit içeriklerine göre örneklerin diyagramdaki konumu

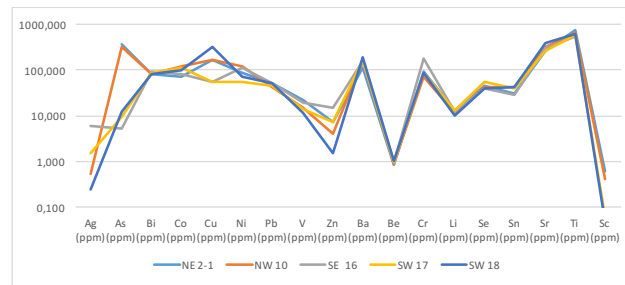
## 5.2.2 ICP-OES Analizleri

ICP-OES analizleri 5 örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cürufları oluşturan kaynak cevherin türüne ve işlem sürecine ilişkin ipuçlarına ulaşmak adına yapılan çalışmalarda; NE-2.1, NW-10, SE-16, SW-17, SW-18 kod numaralı örnekler incelenmiştir (Tablo 5.2).

Tablo.5.2: Cüruf örnekleri iz element içerikleri (ppm) (ND: Tespit edilemedi)

Element(ppm)	Örnek No				
	NE-2.1	NW-10	SE-16	SW-17	SW-18
Ag	ND	0,538	5,891	1,550	0,254
As	369,538	329,109	5,346	9,684	12,054
Bi	79,472	79,639	91,213	87,360	79,636
Co	70,316	117,184	80,187	113,123	97,975
Cu	165,032	162,093	54,341	56,779	318,117
Ni	87,603	121,646	110,626	56,379	73,344
Pb	52,629	43,795	51,988	43,940	52,853
V	22,595	15,431	19,194	13,848	11,480
Zn	7,161	4,149	14,588	7,234	1,573
Ba	115,058	158,929	153,397	164,678	190,464
Be	0,867	0,913	0,995	1,000	1,023
Cr	95,807	70,007	175,143	88,010	84,618
Li	12,869	11,797	12,158	13,452	9,926
Se	45,525	42,160	39,767	55,375	40,381
Sn	30,667	41,550	28,001	40,051	43,170
Sr	269,895	325,987	294,330	265,897	401,595
Ti	736,942	676,480	539,767	571,334	608,733
Sc	0,634	0,407	ND	0,065	0,049

Analiz sonuçlarına göre örnekler içerisinde en fazla yer alan iz element titanyum olarak belirlenmiştir. Cürufların genelinde element içerikleri benzer dağılımlar gösterirken arsenik elementine ait değerler de marjinal farklılıklar göze çarpmaktadır (Şekil 5.63). Ayrıca örneklerin tümünde vanadyum elementine rastlanmıştır.



Şekil.5.63: Örneklerin iz element içeriği değişimleri

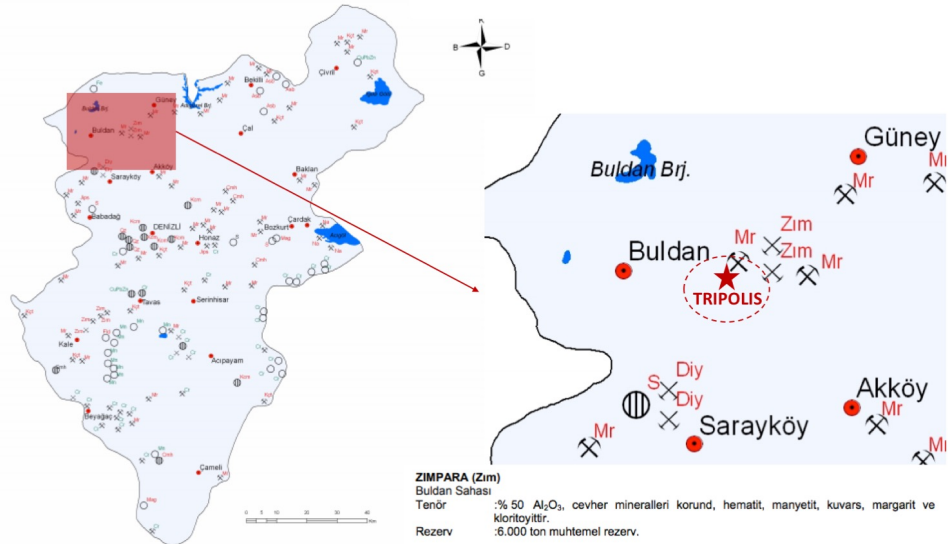
## 5.3 Tartışma

### 5.3.1 Tripolis Antik Kentindeki Üretim Türü

İncelenen tüm örneklerin mineralojik, petrografik ve jeokimyasal analiz sonuçları, Tripolis antik kentinde demir üretimi yapıldığını göstermektedir. Örnekler üzerinde yapılan mineralojik, petrografik ve jeokimyasal incelemelerde, demir üretimi dışında ki bir metal ya da alaşım ile ilişkili herhangi bir veriye rastlanılmamıştır.

### 5.3.2 Demir Üretiminde Kullanılan Potansiyel Hammadde Kaynağı

Tez kapsamında incelenen kalıntıların çıkarıldığı Kemerli Agora içerisinde herhangi bir cevher kalıntısı bulunmamıştır. Bu nedenle demir üretiminde hammadde olarak kullanılan cevher ya da cevherlerin potansiyel kaynakları için Tripolis antik kenti yakın bölge jeolojisi içerisinde demir cevherlerinin bulunduğu sahalar araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda antik kente çok yakın bir bölgede MTA raporlarında da bahsedilen bir zımpara taşı sahasında demir cevherleşmelerinden bahsedildiği görülmüştür (MTA, 2010) (Şekil 5.64).



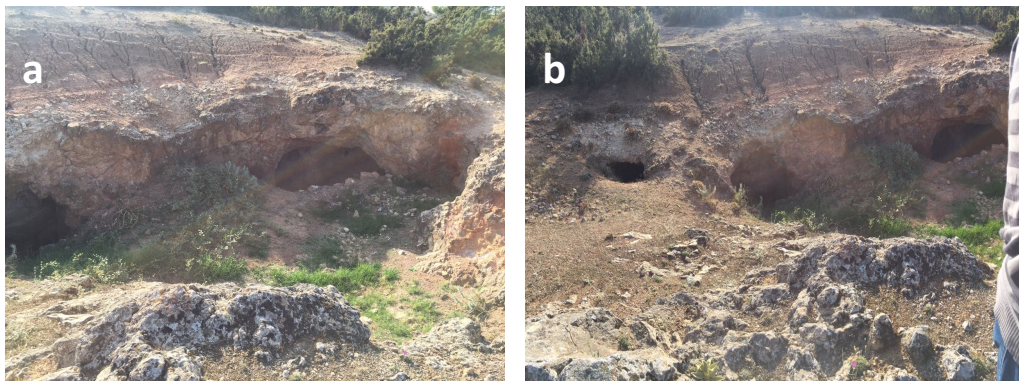
Şekil 5.64: MTA Denizli ili maden haritası ve Tripolis Antik kenti yakınındaki maden yatakları

Tripolis Antik kentinin yaklaşık 1,5 km. kuzey doğusunda yer almakta olan saha MTA raporlarında, daha önceden işletilen fakat şu an da aktif üretimin olmadığı hematit ve manyetit cevherleşmelerinin görüldüğü bir bölge olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.65).



Şekil 5.65: Tripolis antik kenti ve potansiyel cevher kaynağının konumlarına ait uydu görüntüsü

Söz konusu cevher sahası, özel bir işletmenin ruhsatlı sahası olduğundan ve gerekli izinler alınmadığından herhangi bir örnekleme ve analiz çalışması gerçekleştirilememiştir. Ayrıca yapılan literatür taramalarında saha ile ilişkili herhangi bir bilimsel çalışmaya rastlanılamamıştır. Fakat Tripolis antik kenti kazı başkanı Doç. Dr. Bahadır Duman ile yapılan yüzyüze görüşmelerde, sahada antik dönem madenciliği ile ilişkili olabilecek galerilere rastlanıldığı bilgisi alınmış ve bu galerilerin fotoğraflarına ulaşılmıştır (Şekil 5.66).



Şekil 5.66: Potansiyel cevher kaynağı sahasında gözlenen galerilerin girişleri (a, b)  
(Kaynak: Doç Dr. Bahadır Duman)

Menderes masifi içerisinde, yer yer diaspor ve zımpara taşı cevherleşmelerinin olduğu bilinmektedir (Schuiling, 1962; Wipperfurth 1964). Ayrıca masif içerisinde muskovit-biyotitli şistler yer almaktadır (Oberhänsli 1997). Bu şistler içerisindeki biyotitler demirce zengin minerallerdir. Cevher yatağının bulunduğu sahanın da, bölgedeki aktif tektonizmaya bağlı olarak, Kızılburun ve Sazak formasyonları içerisinde gözlenen Menderes masifine ait biyotitli şistler ile ilişkili hidrotermal veya sedimanter süreçler sonucu gelişmiş olabileceği düşünülmektedir. Ek olarak iz element analizlerinde farklı örnekler üzerinde görülen benzer dağılımlar, üretimde kullanılan cevherin tek bir kaynaktan gelmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca kalıntılar üzerinde yapılan iz element analizlerinde gözlenen vanadyum elementinin hematit ve manyetit cevherleri ile ilişkilendirilmektedir (Ion ve diğ., 2015).

Tüm bu veriler ışığında, söz konusu zımpara taşı sahasındaki hematit ve manteyit cevherleşmelerinin; (1) cevher sahasının kente olan yakınlığına (2) sahada gözlenen antik dönem galerilerine (3) MTA raporlarında hematit ve manyetit olarak belirtilen demir cevherlerinin, iz element analizlerindeki vanadyum içeriği ile ilişkilendirilmesine dayanılarak, Tripolis antik kentindeki demir üretiminde kullanılmış olabileme potansiyelinin yüksek olduğu düşünülmektedir.

### **5.3.3 Tripolis Antik Kentindeki Demir Üretim Zinciri**

Kemerli Agora içerisinde çıkarılan madencilik ve metalürji kalıntılarının mineralojik, petrografik ve jeokimyasal incelemeleri sonucunda malzemelerin üretim zincirinde hangi aşamaları tespit ettikleri yönünde bilgilere ulaşılmıştır.

#### **5.3.3.1 Ergitme İşlemi**

Cüruf örneklerinin morfolojileri ve kimyasal bileşimleri incelendiğinde hiçbirisinin ergitme cürufu özelliklerini taşımadığı gözlenmiştir. Morfolojik anlamda ergitme cürufları için karakteristik olan akma yapıları hiçbir cüruf üzerinde gözlenmemiştir. Ayrıca ergitme işlemi sonrasında cevherden uzaklaştırılarak ayrıştırılan demir ile gang bileşenlere bağlı olarak cüruflarda düşük demir ve yüksek silisyum ya da alüminyum oranı beklenir. Fakat incelenen örnekler üzerinde yapılan

analizlerde FeO içeriği yüksek (en az %45,35), SiO<sub>2</sub> (en fazla %19,38) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (en fazla %4,24) içeriği düşük olarak bulunmuştur. Bu oranlar ergitme cürufları için beklenemez. Antik dönemde, hem ergitme işleminde kullanılan fırından çıkan gazların kentte yaşayan insanları rahatsız etmesi, hem de nakliye işleminin daha az enerji ile gerçekleştirilebilmesi adına, ergitme işleminin maden sahasına yakın bir bölgede gerçekleştirilip yarı mamul haline getirilen ürünlerin işçilik alanlarına taşındığı bilinmektedir (Strahm, 1994; Yalçın, 2000a). Ergitme cürufları ile birlikte Kemerli Agora içerisindeki kalıntılar arasında hiçbir cevher buluntusuna da rastlanılmamış olması, Tripolis antik kentinde ergitme işleminin yapılmadığını göstermektedir. Ergitme işleminin kent dışındaki ve muhtemelen de cevher sahasına yakın bir alanda gerçekleştirildiği düşünülmektedir.

### 5.3.3.2 Yarı Mamuller

Madencilik ve metalürji kalıntıları üzerinde yapılan incelemelerde, buluntuların bir kısmının demir cevherinin ergitilmesi sonucu elde edilen yarı mamuller olduğu tespit edilmiştir. Luppe olarak adlandırılan bu yarı mamuller, izabe fırınında uzun süre odun kömürü ve flakslar yardımıyla demirin indirgenerek gang bileşenlerden ayrılması sonucu elde edilen zenginleştirilmiş demir kütleleridir. Bu süngerimsi demir kütleleri bol gözeneklidir ve yapısında odun kömürü, cevher kalıntıları, fırın astarı ya da tabanına ait malzemeler bulundurmaktadır (Blakelock ve diğ., 2009; Craddock, 2010). Ayrıca heterojen bir gözeneklilik gösterebilir ve bünyesine aldığı kömür ve cüruf inklüzyonları nedeni ile kırılmandır (Blakelock ve diğ., 2009). İndirgenme işlemine bağlı olarak iç yapılarında oksidasyon azdır fakat yüzeylerinde oksidasyon gözlenebilir (Blakelock ve diğ., 2009). Ergitme işlemi sırasında fırının tabanına ya da duvarına temaslarına bağlı olarak üretim cüruflarına benzer şekiller alabilirler ama kesildiklerinde tespit edilebilen metal kütleleri ile demirci cüruflarından ayırt edilebilirler (Güder, 2015). Mineralojik olarak birincil fazları ile fayalitik matris gözlenmektedir (Eckelers, 2016). Ayrıca fırın içerisinde uzun süre beklediklerinden ve daha yavaş soğuduklarından dolayı kristal fazlar daha rahat tanımlanabilmektedir.

Yapılan incelemeler sonucunda, NE-6.2, NW-7, NW-8, NW-11, SE-14.1, SW-18, SW-19 kod numaralı örnekler morfolojik özellikleri itibariyle üretim cüruflarına benzer şekiller sunmalarına rağmen; (1) dış yapılarında oksidasyon gözlenirken iç yapılarında oksidasyonun çok azdır (2) örnek genelinde birincil demir fazları ile kristalin fazların hakim olduğu fayalitik matris sunmaktadır (3) iç yapılarında metalik kütleler rahatça gözlenebilmektedir.

Söz konusu örneklerin, sundukları bu makro ve mikro özellikler nedeni ile, ergitme işleminden sonra üretimde kullanılmak üzere Tripolis antik kentine taşınan yarı mamullerden arda kalan malzemeler olduğu düşünülmektedir. Bu durum, cevherin başka bir bölgede ergitilip rafine edildikten sonra kente getirilmiş olma ihtimalini güçlendirmektedir.

### **5.3.3.3 Üretim**

#### **5.3.3.3.1 Saflaştırma**

Yarı mamuller olan luppelerin gang bileşenlerden arındırılabilmesi için çekiçle dövülerek saflaştırılması ile ara ürün olan 'örs demir' elde edilmektedir. Örs demir daha kompakt ve az gözeneklilik sunmakla beraber, metalik demirce zengindir. Bu nedenle yoğunlukları daha yüksektir.

Tripolis antik kentindeki kalıntılardan NE-4, NE-6.1, SE-16 ve SW-17 kod numaralı örnekler; yüksek yoğunlukları, morfolojileri ve mineralojik özellikleri ile örneklerden ayrılmaktadır. Örneklerin yoğunlukları 3 gr/cm<sup>3</sup>'ün üzerinde olmakla birlikte, NE-6.1 düzensiz bir morfoloji sergilemekte iken, SE-16 numaralı örnekte içbükey/dışbükey yapının bir kenarında kesilmiş izlenimi veren 3 cm.'lik bir çıkıntı mevcuttur. Mikro yapılarında yoğun metalik demir ve demir oksit mineralleri gözlenmektedir.

Söz konusu kalıntıların demircinin obje üretirken kullandığı örs demirden kopan ve cüruflar arasına karışan saflaştırılmış ara ürün atıkları olduğu düşünülmektedir.



### 5.3.3.2 Demircilik

Demircilik işlemleri ergitme ve saflaştırma işlemlerine benzemektedir. Öncelikle demir daha yumuşak hale getirilmek için yaklaşık 1000-1100 °C'ye ısıtılır (Manning, 1976; Sherby ve Wadsworth, 2001). Ardından demir istenilen şekle gelene kadar bir örs üzerinde dövülür. Bu işlem işlenmemiş demire kıyasla mukavemeti artırır (Sherby ve Wadsworth, 2001). Saflaştırma işlemine benzer şekilde, oksidasyon nedeniyle büyük miktarda demir kaybedilir. Yüzeyde oluşan oksidasyon kabuğu istenmeyen bir durumdur çünkü demirci üretim için temiz bir metal yüzeye ihtiyaç duymaktadır (Blakelock ve diğ., 2009). Bu oksidasyon yüzeyini temizlemek amacıyla demirin dövülmesine bağlı olarak, tabakalar halinde parçalanarak dökülen demir pulcukları cürufların bünyesine karışırlar (Seernels ve Sebastian, 2015). Ayrıca yüzeyi oksidasyondan korumak için flakslar veya kum, kil gibi silisçe zengin koruyucu maddeler kullanılır ve bu malzemelerde cüruf bünyesine girerek fayalitleri oluşturabilir (Blakelock ve diğ., 2009). Bu işlemler sırasında fırın tabanında biriken cüruf kütlesi, bünyesine kömür parçaları ve fırın astarına ait bileşenleri bünyesine alarak, fırın tabanının şeklini alır (Seernels ve Sebastian, 2015).

Yukarıda bahsedilen durumlardan dolayı demirci cürufları morfolojik anlamda iç bükey, dışbükey ya da düzensiz şekiller sergileyebilirler. İç yapıları demir pulcukları, kömür parçaları, flakslar ve kullanılan kum, kil türü malzemeler nedeniyle oldukça heterojen yapılar sergilemektedirler.

Tripolis antik kenti buluntularından NE-1, NE-2.1, NE-2.2, NE-3, NE-5, NW-9, NW-10 ve SE-14.2 kod numaralı örneklerin heterojen iç yapıları ve yüksek oksidasyon sergilemelerinin yanı sıra kömür, flakslar ve kum, kil türü malzemeleri bünyelerinde bulundurmalarından dolayı demircilik işleminin sonrası arda kalan üretim cürufları olduğu düşünülmektedir.

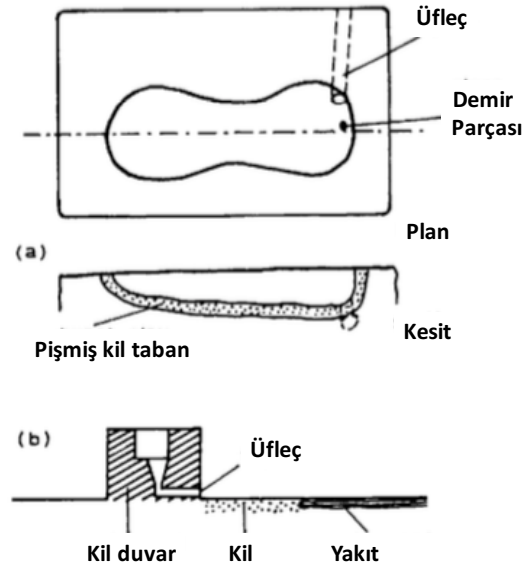
### 5.3.3.4 Üretim Teknolojisi

#### 5.3.3.4.1 Fırın

Üretim cürufların morfolojik yapıları kullanılan fırının tipine yönelik bilgiler sunmaktadır. İncelenen örneklerin genelinde akma yapıları gözlenmemesi, üretimde kullanılan fırının akma boşluğu olmayan bir fırın tipi olduğunu göstermektedir. Ayrıca cürufların yüzeylerine yapışmış olduğu gözlenen kum, kil ve çakıl türü malzemeler fırın tabanının yapısına ilişkin bilgiler sunmaktadır.

XRF incelemeleri sonucunda elde edilen majör oksit değerlerine göre oluşturulan  $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{FeO-SiO}_2\text{-CaO}$  diyagramlarında örneklerin düştüğü bölgeler kullanılan fırının yaklaşık 1100- 1200 °C aralığında bir sıcaklığa çıkmış olduğunu göstermektedir.

Tüm bu veriler ışığında Tripolis Antik kentindeki demir üretiminde kullanılan fırının Roma döneminde kullanılan basit tipte kil, kum ya da çakıl tabanlı ve kil duvarlı bir demirci fırını olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.67).



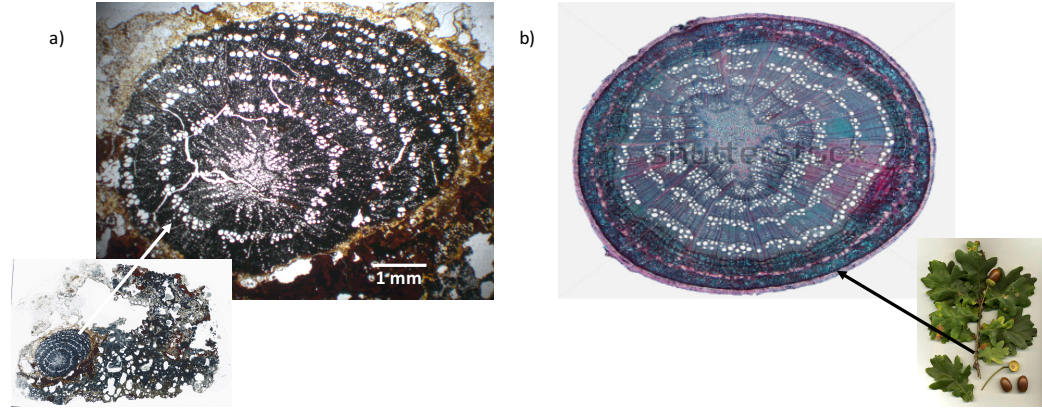
Şekil 5.67: Roma dönemi demirci fırını modeli (Tylecote, 1976)

#### 5.3.3.4.2 Yakıt

Örnekler üzerinde yapılan ince kesit incelemelerinde bazı örneklerde kömürleşmiş odun kalıntılarına ait selülozik dokulara rastlanılmıştır.

Özellikle NE-5 numaralı örneğe ait ince kesit üzerinde yer alan bir doku bütünlüğünü koruması ve bitkisel dokuların rahatça izlenebilmesi ile diğerlerinden ayrılmıştır. Söz konusu dokunun tanımlanması amacı ile Pamukkale Üniversitesi Fen Ede. Fakültesi Biyoloji bölümü Botanik anabilim dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Gürkan Semiz ile görüşülmüştür. Araştırmalar sonucunda söz konusu dokunun Quercus (meşe) cinsine ait dokulara ait olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.68).

Bu somut veri ile, Tripolis antik kentindeki demircilik işlemlerinde yakıt olarak meşe ağaçlarının kullanıldığı kesin olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.68: a) NE-5 kod numaralı örneğin ince kesiti üzerinde gözlenen kömürleşmiş selülozik doku  
b) Meşe ağacına ait kesit görüntüsü

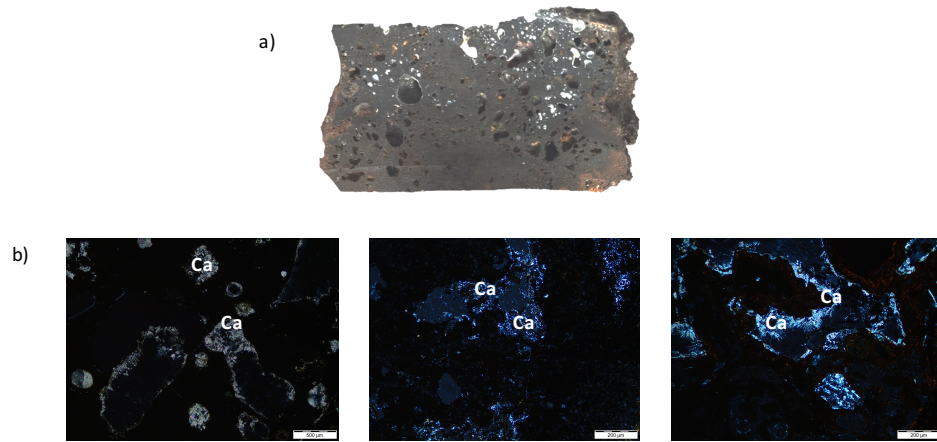
#### 5.3.3.4.3 Flakslar

Ergitme ısısını düşürmek ve oksidasyonu engellemek amacı ile kullanılan flakslara ait izler morfolojik ve mineralojik incelemelerde saptanmıştır.

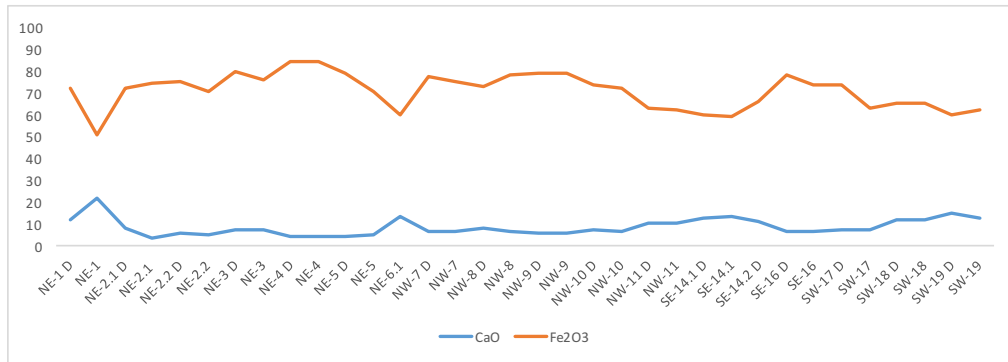
NE-1 kod numaralı örneğin iç yapısında makro olarak da gözlenebilen beyaz tanecikler mevcuttur. Ayrıca örneğin XRF analizlerinde ve mikro incelemelerinde karbonat miktarı fazlalığının da bu tanelerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bunun dışında, bir çok örnekte yapılan mikro incelemelerde gözenek duvarlarına sıvanmış,

kusmalar şeklinde karbonat minerallerine rastlanılmıştır. Bu durumun sonradan eklene malzemenin sistemin doygunluğa ulaşması sonucu tüketilemeden çepelerde soğuması ile meydana geldiği düşünülmektedir (Şekil 5.69). Yine XRF analizlerine bakıldığında örneklerin genelinde karbonat ve demir içeriği arasında gözlenen negatif korelasyon üretim sırasında sisteme karbonatların eklendiğini göstermektedir (Şekil 5.70).

Tüm bu veriler ışığında Tripolis antik kentindeki demir üretimi sırasında flaks olarak karbonatların kullanıldığı düşünülmektedir. Kentin yakın bölge jeolojisine bakıldığında hemen sırtında yer alan ve kentteki yapılarda da kullanılan travertenlerin flaks olarak kullanılan karbonatların kaynağı olma potansiyeli yüksektir.



**Şekil 5.69:** a) NE-1 kod numaralı örneğin iç yapısında makro olarak gözlenebilen karbonat taneleri (beyaz) b) Cürufların gözenek çepelerinde gözlenen karbonat minerallerinin optik mikroskoptaki görünümü (Ca: Karbonat) (Çift Nikol)



**Şekil 5.70:** Örneklerin demir ve karbonat içeriklerinin birbirlerine göre değişim grafiği

## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışması sonucunda, arkeologların üzerinde sınırlı yorumlar yapabildiği antik madencilik ve metalürji buluntuları basit ve ileri mineralojik, petrografik, jeokimyasal teknikler yardımı ile incelenerek Tripolis antik kentindeki metal üretimi faaliyetleri ortaya konularak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Alınan örnekler üzerinde yapılan incelemelerde örneklerin tümünün demir üretimi ile ilişkili olması nedeniyle, Tripolis Antik kenti içerisinde yer alan Kemerli Agora'da bir demir işçiliği olduğu belgelenmiştir.
- Alınan örneklerin yarı mamul olan luppeler ve saflaştırılmış demir kütleleri ile obje üretimi sırasında oluşan demirci cürufları olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Yapılan kazılarda ve incelemelerde hiçbir cevher örneği ile ergitme cürufuna rastlanılmamış fakat ergitme işlemi sonucu elde edilen yarı mamuller olan luppe örnekleri belgelenmiştir. Bu durum sonucunda, kentte ergitme işleminin yapılmadığı ve cevherin başka bir bölgede ergitildikten sonra kente taşındığı düşünülmektedir.
- Yapılan iz element analizleri sonucunda, demir üretimine hammadde olan cevherin tek bir kaynaktan gelmiş olma potansiyelinin yüksek olduğu düşünülmektedir.
- Demir üretiminde kullanılan potansiyel hammadde kaynağının, kentin 1,4 km. kuzeydoğusunda yer alan ve MTA raporlarında hematit ve manyetit gibi demir cevherlerinin de görüldüğü bahsedilen, eskiden işletilmiş bir zımpara taşı madeni sahası olduğu düşünülmektedir. İleride bu sahadan alınacak cevher örnekleri ile kentte üretilen demir objeler içerisinde görülen cüruf inklüzyonları üzerinde yapılacak ayrıntılı izotop ve iz element analizleri ile bu potansiyel saha ile demir üretimi ilişkisinin araştırılması planlanmaktadır.
- İnce kesit incelemelerinde gözlenen kömürleşmiş odun dokusundan yola çıkılarak yapılan araştırmalar ile demir üretiminde meşe ağaçlarının yakıt olarak kullanıldığı belgelenmiştir.
- Kalıntılar üzerinde yapılan XRF analizlerinde elde edilen majör oksit değerleri üretimin yaklaşık 1100-1200 °C sıcaklığa çıkabilen bir fırında

yapıldığını göstermektedir. Yine cürufların morfolojik özelliklerine dayanılarak, fırının Roma döneminde sıklıkla kullanılan çukur tipi üfleçli bir tipte olabileceği düşünülmektedir.

- Mineralojik ve kimyasal incelemeler sonucunda üretimde kullanılan flaksların karbonatlar olduğu ve bu karbonatların potansiyel kaynağının kentin yakın çevresinde yer alan travertenler olduğu düşünülmektedir.

Tripolis ile birlikte Hierapolis, Laodikeia, Collossae gibi antik kentlerinde yer aldığı Lycus vadisinde, madencilik ve metalürji anlamında yapılan ilk araştırma olan bu tez çalışmasına ait sonuçlar ışığında, Tripolis'in antik dönemde bölgenin potansiyel madencilik ve metal üretim merkezi olabileceği sonucuna varılmıştır. İleride yapılacak izotop kimyası ve nadir toprak elementleri analizleri ile potansiyel maden kaynağı olduğu düşünülen sahadan alınan cevher örneklerinin, Tripolis antik kentindeki ve bölgedeki diğer antik kentlerden çıkarılan metaller ile ilişkisinin daha net bir şekilde ortaya konulması amaçlanmaktadır.

## 7. KAYNAKLAR

Alçıçek, H., Varol, B. and Özkul, M., "Sedimentary facies, depositional environments and palaeogeographic evolution of the Neogene Denizli Basin of SW Anatolia, Turkey", *Sedimentary Geology*, 202, 596-637, (2007).

Altunel, E., "Pamukkale Travertenlerinin Morfolojik Özellikleri, Yaşları ve Neotektonik Önemleri", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 118(118), (1996).

Atalay, M. Ü., "Madencilik ve Uygarlık", (eds: A. A. Akyol ve K. Özdemir), *Türkiye'de Arkeometrinin Ulu Çınarları*, İstanbul: Homer Yayınevi, 79-86, (2012).

Bachmann, H. G., "The phase composition of slags from Timna site 39", (eds: B. Rothenberg, R.F. Tylecote and P.J. Boydell), *Chalcolithic Copper Smelting*, IAMS Monograph, 1, 21–23, (1978).

Bachmann, H. G., "Schlacken: Indikatoren archäometallurgischer Prozesse", (ed: H.W. Hennicke), *Mineralische Rohstoffe als kulturhistorische Informationsquelle*, Hagen, 66–103, (1978).

Bachmann, H. G., *"The identification of slags from archaeological sites"*, London: University of London, (1982).

Bachmann, H. G., "Beginnings of Archaeometallurgical Research in Turkey: A Personal Retrospect", (ed: Ü. Yalçın) *Ancient Mining in Turkey and the Eastern Mediterranean*, Ankara: Atılım University, 3-14, (2008).

Balkan-Atlı, N., Binder, D. and Gratuze, B., "Göllü Dağ (Central Anatolia): Obsidian Sources, Workshops and Trade", *Anatolian Metal IV*, 21, Bochum: Deutsches Bergbau-Museum, 203-210, (2008).

Balmuth, M. S., 1971. "Remarks on the appearance of the earliest coins", *World Archaeology*, 6 (3), (1971).

Beaumont, D., "How the Earth's Geology Determined Human History", *Sino-Platonic Papers*, 203, (2010).

Blakelock, E., Martín-Torres, M., Veldhuijzen, H. A. and Young, T., "Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study", *Journal of Archaeological Science*, 36, 1745-1757, (2009).

Bülbül, A., "Kamara ve Çizmeli (Yenice Buldan) sıcak ve mineralli sularının hidrojeolojisi", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2000).

Cauvin, M. C. and Chataigner, C., "Distribution de l'obsidienne dans les sites archéologiques du Proche et Moyen Orient", *BAR International Series*, 738, 325-350, (1998).

Charlton, M. F., Shennan, S. J., Rehren, T. and Crew, P., "Evolutionary analysis of ironmaking slag", *The World of Iron*, London: Archetype Publications Ltd, 288-395, (2015).

Chataigner, C., Poidevin, J. L. and Arnaud, N. O., "Turkish occurrences of obsidian and use by prehistoric peoples in the Near East from 14,000 to 6000 BP", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 517-537, (1998).

Cleere, H., "Ironmaking", (eds: D. Strong and D. Brown), *Roman Craft*, London: Duckworth, 1, 127-141, (1976).

Cleere, H., "Some operating parameters for Roman ironworks", *Bulletin of The Institute of Archaeology*, 13, 233-246, (1976).

Coghlan, H. H., "Notes on prehistoric and early iron in the Old World", *Printed at the University Press*, 8, (1956).

Craddock, P. T., "Early metal mining and production", Edinburgh: Edinburgh University Press, 363, (1995).

Craddock, P. T., "Early metal mining and production", London: Archetype publications, (2010).

Çakır, Z., "Along-strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition; examples from western Turkey", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 8(1), 67-80, (1999).

de Jesus, P., "Metallurgical Practices in Early Anatolia", *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi*, 87, 49-63, (1977).

de Jesus, P., "The Development of Prehistoric Mining and Metallurgy in Anatolia", *International Series 74. British Archaeological Reports*, 151, 235-250, (1980).

Dennis, W. H., "Demirden Gayri Metaller Metalürjisi (Bakır, Kurşun, Çinko, Alüminyum, Kalay)", İstanbul: İTÜ Yayınları, (1971).



Duman, B., "*Son Arkeolojik Araştırmalar Ve Yeni Bulgular Işığında Tripolis Ad Maeandrum*", Cedrus, 1, (2013)

Duman, B., "Tripolis'in Yeri, Önemi ve Kısa Tarihi", (ed: B. Duman), *Tripolis Araştırmaları*, İstanbul: Ege Yayınları, (2017)

Eekelers, K., "Long-Term Developments In The Technology Of Iron Craft Production A Case Study In The Territory Of Sagalassos (Sw-Turkey)", PhD Thesis, *KU Leuven University*, Leuven, (2016).

Erten, H., Sen, S. and Görmüş, M., "Middle and late Miocene Cricetidae (Rodentia, Mammalia) from Denizli Basin (southwestern Turkey) and a new species of Megacricetodon", *Journal of Paleontology*, 88 (3), 504-518, (2014).

Eschenlohr, L. and Serneels, V., "*Les bas fourneaux Mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (Ju, Suisse)*", Société jurassienne d' Emulation et Office du patrimoine historique, (1991).

Fidan, E., "Tarih Öncesi Dönemlerde Anadolu'da Kullanılmış Olan Maden Yatakları", *MT Bilimsel*, 9, 49-59, (2016).

Gale, N. H., "Uluburun'un Bakır Külçeleri. 2. Bölüm: Külçelerden Alınan Karotların Kurşun İzotop Analizleri", (eds: Ü. Yalçın and R. Slotta), *Uluburun Gemisi 3000 Yıl Önce Dünya Ticareti*, İstanbul: Ege Yayınları, (2006).

Giles, D. L. and Kuijpers, E., "Stratiform copper deposit, Northern Turkey ", *Science*, 186, 823-825, (1974).

Gökgöz, A., "Pamukkale- Karahayıt- Gölemezli hidrotermal karstının hidrojeolojisi", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı*, Isparta, (1994).

Göktaş, F., "*Denizli M22-b1, b2, b3 paftalarının jeolojisi*", MTA Raporu, 9114, (1990).

Gubel, E., "Multicultural and multimedial aspects of early Phoenician art, c. 1200-675 BCE. Images as Media. Sources for the Cultural History of the Near East and the Eastern Mediterranean (1st Millenium BCE)", *Orbis Biblicus et Orientalis*, 175, 185-214, (2000).

Güder, Ü., "Anadolu'da Ortaçağ Demir Metalürjisi: Kubad Abad, Samsat, Kinet Höyük, Hisn Al-Tinat ve Yumuktepe Kazı Buluntuları", Doktora Tezi, *ÇOMÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Sanat Tarihi Anabilim Dalı, Çanakkale, (2015).

Hamilton, W. J., "*Researches in Asie Minor*", London, (1840).

Harmand, S., Lewis, J. E., Feibel, C. S., Lepre, C. J., Prat, S., Lenoble, A. and Taylor, N., "3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya", *Nature*, 521(7552), 310, (2015).

Hauptmann, A., "*The Archaeometallurgy of Copper. The Evidence from Faynan Jordan*", Berlin, Heidelberg, New York: Springer Series, (2000)

Hauptmann, A. and Palmieri, A., "Metal Production in the Eastern Mediterranean at the transition of the 4th/3rd millennium: Case Studies from Arslantepe", (ed: Ü. Yalçın), *Anatolian Metal I*, 13, Bochum Bergbau Museum, 75-82, (2000).

Hauptmann, A., "The investigation of archaeometallurgical slag", (eds: B.W. Roberts and C.P. Thornton), *Archaeometallurgy in Global Perspective: methods and syntheses*, New York: Springer, 91-105, (2014).

Healy, J. F., "*Mining and metallurgy in the Greek and Roman World*", Thames and Hudson, 316, (1978).

Healey, E., "Obsidian as an indicator of inter-regional contacts and exchange: three case-studies from the Halaf period", *Anatolian Studies*, 57, 171-189, (2007).

Iles, L. and Martinon-Torres, M., "Pastoralist iron production on the Laikipia Plateau, Kenya: wider implications for archaeometallurgical studies", *Journal of archaeological science*, 36, 2314- 2326, (2009).

Ion, R. M., Radovici, C., Fierascu, R. C. and Fierascu, I., "Thermal and mineralogical investigations of iron archaeological materials", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 121(3), 1247-1253, (2015).

Joosten, I., "*Technology of early historical iron production in the Netherlands*", Vrije Universiteit, Amsterdam, (2004).

Kaptan, E., "Ancient miner's shovel discovered at Anayatak Murgul Mine, Turkey", *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi*, 89, 96-100, (1977).

Kaptan, E., "Ancient miner's shovels and ore carrier discovered in the Espiye-Bulancak area", *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi*, 91, 99-110, (1978).

Kaptan, E., "New findings on the mining history of Turkey around Tokat region", *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi*, 93/94, 150-162, (1982).

Kaptan, E., "New Discoveries in the Mining History of Turkey in the Neighborhood of Gümüşköy, Kütahya", *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi*, 97/98, 60-67, (1984).

Kaptan, E., "Tirebolu-Harşit Köprübaşı Eski Maden Galerisindeki Buluntular", *Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 22, 31-42, (2008).

Kaptan, E., "Göltepe'den Özgün Bir Buluntu", (eds: A. A. Akyol ve K. Özdemir), *Türkiye'de Arkeometrinin Ulu Çınarları*, İstanbul: Homer Yayınevi, 247-252, (2012).

Kartalkanat, A., Songören, A., Songören, T., "Niğde ve Ankara illerinde bulunan eski işletmelerin (Pb-Zn- Cu-Au-Ag-Fe) ara raporu", Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Rapor No: 11436, Ankara: Yayımlanmamış, (2011).

Kastelli, M., "*Denizli vilayeti güneyinin jeoloji incelemesi ve jeotermal alan olanakları*", MTA raporu, 4573, Yayımlanmamış, (1971).

Kaya, S., Baflaran, N., Songören, T. ve Kayadibi, Ö., "*Tokat İli Madencilik Arkeolojisi*", Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Tabiat Tarihi Müze Müdürlüğü, Ankara: Yayımlanmamış, (2012).

Kaymakçı, N., "Kinematic development and paleostress analysis of the Denizli Basin (Western Turkey): implications of spatial variation of relative paleostress magnitudes and orientations", *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2), 207-222, (2006).

Konakçı, E., "Prehistorik Tripolis: Akkaya (Yenice) ve Hamambükü Höyük", (ed: B. Duman), *Tripolis Araştırmaları*, İstanbul: Ege Yayınları, (2017).

Koralay, T., Duman, B., Kadıoğlu, Y. K. ve Akyol, A. A., "Tarihi Harç Ve Sıva Örneklerinin Çoklu Analitik Yöntemler Kullanılarak İncelenmesi: Tripolis (Yenice/Denizli) Örneği", *Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 31, 1-21, (2015).

Koralay, T., "Tripolis Antik Kenti (Yenicekent/Buldan-Denizli) Yapılarında Kullanılan Kayaçların Minerolo-Petrografik Özellikleri", (ed: B. Duman), *Tripolis Araştırmaları*, İstanbul: Ege Yayınları, (2017).

Leakey, R. E. and Lewin, R., "*People of the lake: mankind and its beginnings*", New York: Anchor Press, (1978).

Manning, W.H., "Blacksmithing", (eds: D. Strong and D. Brown), *Roman Crafts*, Duckworth, 256, (1976).

Mcdonnell, G., "A Model for the Formation of Smithing Slags", *Materialy Archeologiczne*, 26, 23-28, (1991).

McEvedy, C., "*İlkag Tarih Atlası*", Sabancı Üniversitesi, (2005).

Michler, G., Barthelt, D., Heißig, K., Kunze, D., Weber, J., "*Grosser Weltatlas*", Köln, (1990).

Muscarella, O. W., "*Bronze and iron: ancient Near Eastern artifacts in the Metropolitan Museum of Art*", Metropolitan Museum of Art, (1988).

MTA, "*Denizli İli Maden Ve Enerji Kaynakları[online]*", ( 3 Ocak 2018), [http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden\\_potansiyel\\_2010/Denizli\\_Madenler.pdf](http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden_potansiyel_2010/Denizli_Madenler.pdf), (2010).

Oberhänsli, R., Candan, O., Dora, O. Ö. and St H. D., "Eclogites within the Menderes massif/western Turkey", *Lithos*, 41(1-3), 135-150, (1997).

Okay, A. İ., "Denizli'nin güneyinde Menderes masifi ve Likya naplarının jeolojisi", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 109, (1989).

Özbal, H., Adriaens, M. A., Bryan, E., "Hacinebi Metal Production and Exchange", *Paléorient*, 25, (1999).

Özbal, H., Pehlivan, N., Earl, B., "Durağan ve Bakır Çay Arsenik Cevherleşmelerinin Jeolojik, Mineralojik ve Kimyasal İncelenmesi", *Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 16, 29-40, (2000).

Özdoğan, M. and Özdoğan, A., "Archaeological evidence on the early metallurgy at Çayönü Tepesi", (eds: A. Hauptmann, E. Pernicka, T. Rehren and Ü. Yalçın), *The Beginning of Metallurgy*, 9, Bochum, 13-22, (1999).

Özdoğan, M., "Obsidian in the Context of Near Eastern Prehistory. A Conspectus on the Status of Research, Problems and Prospects", *Anatolian Metal IV*, 21, Bochum: Deutsches Bergbau Museum, 191-201, (2008).

Özdoğan, M., "50 soruda arkeoloji", İstanbul: Bilim ve Gelecek, (2014).

Özkul, M., Varol, B. and Alçiçek, M. C., "Depositional environments and petrography of Denizli travertines", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 125, 13-29, (2002).

Paréjas, E., "La tectonique transversale de la Turquie", *İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Mecmuası*, (1940).

Przeworski, S., "Die Metallindustrie Anatoliens in der Zeit von 1500-700 vor Chr: Rohstoffe", *Technik*, 36, (1939).

Pehlivan, A.N. ve Alpan, T., "*Niğde Masifi Altın-Kalay Cevherleşmesi ve Ağır Mineral Çalışmaları Ön Raporu*", Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu, Yayınlanmamış, (1986).

Rapp, G., "*Archaeomineralogy*", (ed: B. Hermann and G. A. Wagner), Natural Science in Archaeology, Heidelberg: Springer, (2009).

Rehder, J. E., "*The mastery and uses of fire in Antiquity*", McGill-Queen's University Press, (2000).

Rehren, T. and Pernicka E., "Coins, artefacts and isotopes—archaeometallurgy and archaeometry", *Archaeometry*, 50(2), 232-248, (2008).

Rosenberg, M., "The Hallan Çemi Excavation 1993", *XVI. Kazı Sonuçları Toplantısı I*, 79-94, (1994).

Rosenberg, M., "Pattern, process, and hierarchy in the evolution of culture", *Journal of Anthropological Archaeology*, 13(4), 307-340, (1994).

Ryan, C. W., "A Guide to the Known Minerals of Turkey", Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, (1960).

Schick, K. D. and Toth, N., "*Early Stone Age technology in Africa: a review and case study into the nature and function of spheroids and subspheroids*" (eds: R. S. Corruccini and R. L. Ciochon) *Integrative Paths to the Past: Paleoanthropological Advances in Honor of F. Clark Howell*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 429-449, (1994).

Schuiling, R. D., "Türkiye'nin Güneybatısındaki Menderes Migmatit Kompleksinin Petrolojisi, Yaşı ve Yapısı Hakkında", *MTA Dergisi*, 58, (1962).

Semiz, B. ve Duman, B., "Tripolis'te Bulunan Geç Antik Çağ Unguentariumları'nın Arkeometrik Yönden Değerlendirilmesi", (ed: B. Duman), *Tripolis Araştırmaları*, İstanbul: Ege Yayınları, (2017).

Serneels, V. and Sebastien, P., "Quantification of Smithing Activities Based on the Investigation of Slag and Other Material Remains", *Archaeometallurgy in Europe*, Associazione Italiana di Metallurgia, 469-478, (2003).

Sherby, O. D., and Wadsworth, J., "Ancient blacksmiths, the Iron Age, Damascus steels and modern metallurgy", *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 347-353, (2001).

Sun, S., "Denizli - Uşak arasının jeolojisi ve linyit olanakları", M.T.A. raporu, 9985, (1990).

Şaroğlu, F., Emre, Ö. and Kuşçu, İ., "Türkiye diri fay haritası: Türkiye jeoloji haritası", Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, (1992).

Strahm, C., "Die Anfänge der Metallurgie in Mitteleuropa", *Helv. Arch*, 25, 2-39, (1994).

Şenel, A., "İlkel Topluluktan Uygar Topluma", Ankara: Bilim ve Sanat Yayınları, (1995).

Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y. and Ketin İ., "Remnants of a pre-Late Jurassic ocean in northern Turkey: Fragments of Permian-Triassic Paleo-Tethys?", *Geological Society of America Bulletin*, 91,(10), 599-609, (1980).

Şimşek, C., "10. Yılında Laodikeia (2003-2013 Yılları)", İstanbul: Ege Yayınları, (2014).

Şimşek, Ş., "Aydın-Germencik-Ömerbeyli geothermal field of Turkey", Proc. of UN Seminar on Utilization of Geothermal Energy for Electric Power Production and Space Heating, (1984).

Taner, G., "Denizli bölgesi Neojeni'nin paleontolojik ve stratigrafik etüdü", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 82, (1974).

Tarhan, Ç. M., "Urartu Maden Teknolojisi", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Arkeoloji Anabilim Dalı*, İzmir, (2009).

Tarhan, Ç. M. ve Şenol, F., "Tripolis Kazılarında Koruma Çalışmaları: Bronz Bir Heykel Ayağının Konservasyonu", (ed: B. Duman), *Tripolis Araştırmaları*, İstanbul: Ege Yayınları, (2017).

Tekin, H., "Eski Anadolu Madenciliği", Ankara: Bilgin Kültür Sanat, (2015).

Tylecote, R. F., "A History of Metallurgy", London: The Institute of Materials, (1976).

Tylecote, R. F., "The early history of metallurgy in Europe", London: The Institute of Materials, (1987).

Wagner, G. A., Pernicka, E., Seeliger, T. C., Lorenz, I. B., Begemann, F., Schmidt-Strecker, S., Eibner, C. and Öztunalı, O., "Geochemische und isotopische Charakteristika früher Rohstoffquellen für Kupfer, Blei, Silber und Gold in der

Türkei", *Jahrbuch des Römische-Germanischen Zentralmuseums*, Mainz, 33, 723-752, (1986).

Westaway, R., "Block rotation in western Turkey: 1. Observational evidence", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B12), 19857-19884, (1990).

Westaway, R., "Neogene evolution of the Denizli region of Western Turkey", *Journal of Structural Geology*, 15, 37-53, (1993).

Wipperfurth, J., "Menderes Masifinin Alpidik Dağ Teşekkülü İçindeki Durumu", *MTA Dergisi*, 62, (1964).

Wright, G. A., "*Obsidian Analyses and Prehistoric Near Eastern Trade: 7000 to 3500 BC*", Museum of Anthropology, (1969).

Wright, K., "A classification system for ground stone tools from the prehistoric Levant", *Paléorient*, 53-81, (1992).

Yalçın, Ü., "*Frühe Eisenverwendung in Anatolien*", *Istanbul Mitteilungen*, 48, 79-95, (1998).

Yalçın, Ü., "Anfänge der metallverwendung in Anatolien", (ed: Ü. Yalçın), *Anatolian Metal I*, Bochum: Der Anschnitt, 13, 17-30, (2000).

Yalçın, Ü., "Metallurgie in Anatolien", ( eds: Th. Stöllner, G. Körlin, G. Steffens ve J. Cierny), *Studies in honour of Gerd Weisgerber on occasion of his 65th birthday*, 16, Bochum, 527-536, (2003).

Yalçın, Ü., "Stratejik 'önemi olan' bir metal: Kalay", *TÜBA-AR*, 12, 99-103, (2009).

Yalçın, Ü., "Anadolu Madencilik Tarihine Toplu Bir Bakış.", *MT Bilimsel*, 9, 3-13, (2016).

Yalçın, Ü. and Pernicka, E., "Frühneolithische Metallurgie von Aşıklı Höyük", (eds: A. Hauptmann, E. Pernicka, T. Rehren and Ü. Yalçın) *The Beginning of Metallurgy*, 9, Bochum, 45-54, (1999).

Yener, A., "The Archaeometry of Silver in Anatolia: The Bolkardağ Mining District", *American Journal of Archaeology*, 90 (4), 469-472, (1986).

Yener, K. A. and Vandiver, P., "Tin Processing at Göltepe, an Early Bronze Age Site in Anatolia", *American Journal of Archaeology*, 97, 207-238, (1993).

## 8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer Faruk Özkaya  
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya/ 17.04.1986  
Lisans Üniversitesi : Pamukkale Üniversitesi  
Elektronik posta : omerfozkaya@gmail.com  
İletişim Adresi : Mehmetçik Mah. 2670 Sok. No: 1 Pamukkale  
DENİZLİ