

T.C
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
ARKEOLOJİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
KÜLTÜR VARLIKLARINI KORUMA VE ONARIM ANABİLİM DALI
KÜLTÜR VARLIKLARINI KORUMA VE ONARIM YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DENİZLİ MÜZE MÜDÜRLÜĞÜ KURTARMA KAZILARINDAN ELE GEÇEN
BAKIR VE BAKIR ALAŞIMI ETÜTLÜK ESERLERİN BOZULMA
DURUMLARININ İNCELENMESİ

AHMET SANSAR

EYLÜL 2018
DENİZLİ

**T.C
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
ARKEOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

**Yüksek Lisans Tezi
Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Anabilim Dalı
Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Programı**

**DENİZLİ MÜZE MÜDÜRLÜĞÜ KURTARMA KAZILARINDAN
ELE GEÇEN BAKIR VE BAKIR ALAĞIMI ETÜTLÜK ESERLERİN
BOZULMA DURUMLARININ İNCELENMESİ**

Ahmet SANSAR

**Danışmanlar
Dr. Öğr. Üyesi Evin CANER
Doç. Dr. Cem GÖK**

**Eylül 2018
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Anabilim Dalı öğrencisi Ahmet SANSAR tarafından Dr. Öğretim Üyesi Evin CANER ve Doç. Dr. Cem GÖK yönetiminde hazırlanan “**Denizli Müze Müdürlüğü Kurtarma Kazılarında Ele Geçen Bakır ve Bakır Alaşımı Etütlük Eserlerin Bozulma Durumlarının İncelenmesi**” başlıklı tez aşağıdaki jüri üyeleri tarafından 17.09.2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavında başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN

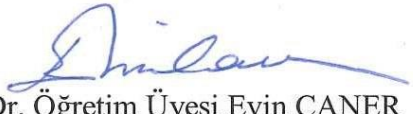
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Şenol SERT


Jüri Üyesi


Prof. Dr. Kadir PEKTAŞ

Jüri Üyesi


Dr. Öğretim Üyesi Evin CANER

Jüri Üyesi


Doç. Dr. Cem GÖK

Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Arkeoloji Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25/9/2018 tarih ve .../24/198... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Müdür
Prof. Dr. Celal ŞİMŞEK

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmaların yapılması ve bulguların 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 atıfta bulunulduğunu beyan ederim

Ahmet SANSAR



ÖNSÖZ

Bu çalışmada bronz eserler üzerinde oluşan korozyon tabakalarındaki bileşiklerin tespiti ile bu bozulma ürünlerinin oluşma nedenleri hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Denizli Müze Müdürlüğü' ne bağlı kurtarma kazılarında elde edilen etütlük olarak tanımlanan bronz eserlerin analizleri yapılmıştır. XRF (X-ışını Floresans Spektrometresi) yöntemi ile yapılan analizler neticesinde bronz olarak tanımlanan numunelerin birçoğunun bakır, pirinç ve bakır alaşımı olduğu, yalnızca iki eserin bronz olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda çalışma kapsamı genişletilerek, bakır ve bakır alaşımlı eserlerin karakterizasyonu, yapısı ve bozulma durumlarını anlamak için: XRF, SEM-EDX (Taramalı Elektron Mikroskopu-Enerji dağılımlı X-ışını), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR) analiz yöntemlerinin sonuçları karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılarak yorumlanıp, eserlerin bozulma durumu hakkında bilgi edinilmiştir.

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Arkeoloji Enstitüsü Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Anabilim dalında Yüksek Lisans Tez konusu olarak çalışılmıştır.

Yüksek Lisans tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen tüm bilgi ve birikimi ile tez danışmanlığımı yapan değerli hocam, Dr. Öğr. Üyesi Evin CANER'e ve eş danışmanım Doç. Dr. Cem GÖK'e yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Yüksek Lisans tezimin değerlendirilip, çalışmanın daha nitelikli olması için bilgi birikimleriyle katkıda bulunup, tezimin tamamlanmasında yardımcı olan değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Kadir PEKTAŞ'a, Doç. Dr. Şenol SERT'e ve Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılmasında kullanılan etütlük metal eserlerin incelenmesine izin veren Denizli Müze Müdürü Hasan Hüseyin BAYSAL' a, kurtarma kazıları ile ilgili bilgi edinmemi sağlayan Arkeolog Elvan ALTINTAŞ'a ve Arkeolog Meral TARHAN'a, eserlerin incelenmesi için yardımcı olan Restoratör Esmâ İVRENDİ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışma 2017ARKE001 numaralı proje ile Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi (PAUBAP) tarafından desteklenmiştir. PAUBAP'a sağladığı desteklerden dolayı teşekkür ederim.

ÖZET

DENGLİĞ MÜZE MÜDÜRLÜĞÜ KURTARMA KAZILARINDAN ELE GEÇEN BAKIR VE BAKIR ALAĞIMI ETÜTLÜK ESERLERİN BOZULMA DURUMLARININ İNCELENMESİ

SANSAR Ahmet

Yüksek Lisans Tezi

Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Anabilim dalı
Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Programı

Tez Yöneticisi: Dr. Öğr. Üyesi Evin CANER

Eş Danışman: Doç. Dr. Cem GÖK

Eylül 2018, 93 Sayfa

Konservasyon, eserlerin özgün niteliklerine bağlı kalarak estetik bütünlüğünü bozmadan yapısını, teknolojik ve maddesel özelliklerini korumak, bozulmasına sebep olan nedenler ile etkenlerin belirlenerek en uygun method ve yöntemler kullanılarak korunmasıdır. Konservasyonun en önemli aşamalarından biri eserin malzemesinin karakterizasyonu, bozulmalarının ve nedenlerinin belirlenmesidir.

Bakır ve Bakır alaşımlarının bozulmalarının ve nedenlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışması 6 bölüm olarak ele alınmıştır. “Giriş” bölümünde; problem ortaya konulmuş, araştırmanın amacı, kapsamı ve gerekçesi, çalışmanın sınırlamaları-sınırlılıkları belirtilmiş ve literatür de yer alan çalışmalarla ilgili bilgi verilmiştir. “Tarihsel Gelişim ve Yapım Teknikleri” bölümünde; bakır ve bakır alaşımlarının tarihsel süreci kronolojik olarak anlatılmış, yapım (üretim) teknikleri ve teknolojileri hakkında bilgi verilmiştir. “Bakır ve Bakır Alaşımları” bölümünde; bakır ve bakır alaşımlarının tanımlaması yapılmış, fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgilere yer verilmiştir. “Bakır ve Bakır Alaşımlarının Bozulmaları” bölümünde; korozyon oluşum süreci, korozyon oluşumunun nedenleri ve korozyon ürünleri hakkında bilgilere yer verilmiştir. “Materyal” bölümünde; tez çalışma kapsamında ele alınan kurtarma kazıları hakkında bilgi ve incelenen eserlerin ölçekli fotoğrafı tabloda kodlandırılarak verilmiştir. “Eserlerin Karakterizasyonu ve Bozulma Durumlarının İncelenmesi” bölümünde; bakır ve bakır alaşımlı numunelerin XRF, SEM-EDX, FTIR spektroskopisi yöntemi ile analiz sonucu elde edilen bulgulara yer verilmiştir. “Sonuç ve Değerlendirme” bölümünde; elde edilen analiz verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek eserlerin bozulma durumu ve nedenleri hakkında elde edilen bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bakır, Bakır alaşımı, Bozulma, Korozyon, Korozyon ürünleri, XRF, SEM-EDX, FTIR spektroskopisi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF DETERIORATION OF COPPER AND COPPER ALLOY ARTEFACTS UNCOVERED IN SALVAGE EXCAVATIONS BY DENIZLI MUSEUM DIRECTORATE

SANSAR Ahmet

Master Thesis

**Department of Conservation and Restoration of Cultural Heritage
Program of Conservation and Restoration of Cultural Heritage**

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Evin CANER
Co-Supervisor: Assoc.Prof.Dr. Cem GÖK

September 2018, 93 Pages

Conservation is to preserve the structure, technological and material properties of an object based on its authentic features without deforming its aesthetic unity, to identify the reasons and effects underlying the deterioration and accordingly conserve it using the most suitable methods. One of the most important stages in conservation process is the identification of characterization features of the object's material and of deteriorations.

This thesis covering the identification of deteriorations in copper and copper alloys is arranged in six chapters. In the "Introduction" the problem is determined, the aim, scope and reasons of the study as well as the limitations and restrictions of the study are expressed and major studies in the literature are presented. In the chapter titled "Historic Development and Production Techniques" existence of copper and copper alloys is given chronologically through history and information is given on production techniques and technology. In the chapter "Copper and Copper Alloys" copper and copper alloys are defined, their physical and chemical properties are given and the changes in the copper alloy proportions are explained. In the chapter of "Deterioration of Copper and Copper Alloys" the concepts of deterioration and corrosion are explained, and information is given on the formation of corrosion, reasons for corrosion and corrosion products. Chapter "Material" covers information on the salvage excavations mentioned within the thesis and the artefacts studied are given with photos to scale in a table. The chapter of "Analyses of Deterioration" presents the data obtained from XRF, SEM-EDX and FTIR spectroscopy analyses of the specimens taken from the concerned copper and copper alloy artefacts. The chapter of "Assessment and Conclusion" deals with the analysis results thus obtained and compared, and deterioration statuses of the objects studied are thus attained.

Keywords: Copper, Copper alloy, Deterioration, Corrosion, Corrosion products, XRF, SEM-EDX, FTIR spectroscopy

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	i
ETİK	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
GİRİŞ	1
Problemin İfadesi	1
Amaç – Kapsam – Gerekçe	2
Sınırlamalar – Sınırlılıklar	2-3
Literatür Araştırması	3-5

BİRİNCİ BÖLÜM

TARİHSEL GELİŞİM ve YAPIM TEKNİKLERİ

1.1 Tarihsel Gelişim	6-9
1.2 Yapım Teknikleri	10
1.2.1 Dövme Tekniği	10
1.2.2 Döküm Tekniği	11-13
1.2.3 Birleştirme Tekniği	13-14
1.2.4 Süsleme	14-15

İKİNCİ BÖLÜM

BAKIR ve BAKIR ALAŞIMLARI

2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları	16-22
-------------------------------------	-------

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLARININ BOZULMALARI

3.1 Korozyon	23-24
3.2 Korozyon Oluşum Süreci	24-26
3.3 Korozyon Oluşumunun Nedenleri	27-31
3.4 Bakır ve Bakır Alaşımlarının Korozyon Ürünleri	31-32
3.4.1 Oksitler ve Hidroksitler	33-34
3.4.2 Karbonatlar	34-36
3.4.3 Bakır Klorürler	36-37
3.4.4 Bakır Sülfatlar	37-38

3.4.5 Bakır Sülfürler	38-39
3.4.6 Bakır Fosfatlar ve Bakır Nitratlar	39-40
3.4.7 Bakır Silikatlar	40
3.4.8 Bakırın Organik Tuzları	40-41

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL

.....	42-43
5.1 Kocadere Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	43-45
5.2 Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı	45-47
5.3 Ovacık Köyü Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	47-49
5.4 Kaklık Lahiti Kurtarma Kazısı	49-50

BEĞİNCİ BÖLÜM

ESERLERİN KARAKTERİZASYONU VE BOZULMA

DURUMLARININ İNCELENMESİ

5.1 XRF Analiz Sonuçları ve Değerlendirme	51-53
5.2 SEM-EDX Analizi Sonuçları ve Değerlendirme	53-71
5.3 FTIR Spektroskopi Analiz Sonuçları ve Değerlendirme	71-76

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

.....	77-79
KISALTMALAR DİZİNİ	80
KAYNAKÇA	81-87
İNTERNET KAYNAKLARI	88
ŞEKİLLER DİZİNİ	89-90
TABLolar DİZİNİ	91
RESİMLER DİZİNİ	92
ÖZGEÇMİŞ	93

GGRGg

Geçmiş toplumların yaşayışının temel belgesini/yapısını oluşturan kültür varlıklarının korunması ve bozulmadan gelecek kuşaklara aktarılması bugün insanlığın ortak bir sorunu olarak kabul edilmekte ve üzerinde önemle durulmaktadır. Kültür varlıklarının gelecek kuşaklara aktarılması için koruma ve onarım uygulamalarında tercih edilecek yaklaşımların doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Bundan dolayı malzemenin karakterizasyonu, yapısı ve bozulma durumunun tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan metaller, geçmişten günümüze günlük yaşamı kolaylaştıran eşyaların yanı sıra birçok alanda yer almıştır. Savaş araç gereçleri, ekonomik işleyişin temelini oluşturan para, sanat eserleri, süs eşyaları ve diğer birçok benzer alanda nesnelerin üretiminde metaller kullanılmıştır. Bu bağlamda metal eserler üretildikleri dönemin teknik, ticari, dini, sanat ve kültürü hakkında bilgi veren malzemeler olmuşlardır.

Problemin Gfadesi

Arkeolojik kazılarda sıklıkla elde edilen metal eserlerin görsel tanı ile malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi ve kayda alınması yanlış yorumlamalar yapılmasına sebep olabilmektedir.

Bakır ve bakır alaşımlı eserler, malzemenin yapısına, yapım tekniğine ve bulunduğu çevresel koşullara bağlı olarak bozulmaktadır. Bozulma sürecinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda eserlerin yüzeyinde yıkıcı veya koruyucu özelliğe sahip korozyon tabakaları oluşmaktadır. Bu tabakaların görsel analiz yapılarak tanımlanması sonucunda, bilinçsizce yapılan koruma ve onarım müdahaleleri, esere daha fazla zarar vererek geri dönüşü olmayan tahribatlar oluşturmakta ya da eserin yok olmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle eserler üzerinde oluşan korozyon tabakalarındaki bileşiklerin karakteristik özellikleri, koruma uygulamalarında hangi yöntemin kullanılması gerektiğini belirlemekte büyük önem taşımaktadır.

Amaç – Kapsam – Gerekçe

Metal Eserler buldukları ortam koşullarında, oksijen ve nemin etkisiyle korozyona uğrayarak tahrip olmaktadır. Arkeolojik kazılarda ele geçen metal eserler, gömülü kaldıkları süreçte toprağın nemi, pH derecesi, içerisindeki organik malzemeler, tuzlar, toprağın elektrik iletkenliği ve toprağın jeolojik yapısına bağlı olarak korozyona uğrayarak bozulmaktadır. Korozyon metal eserlerin yüzeyinde başlayıp içyapısına kadar ilerleyerek eserleri tahrip etmektedir. Bu bozulma süreçlerinin ve nedenlerinin belirlenmesi koruma bilimi kapsamında ele alınmaktadır.

Bu çalışma bakır ve bakır alaşımlı eserlerin karakterizasyonu, bozulmasında etkili olan nedenler, bozulma sürecinde oluşan korozyon ürünlerinin tanımlanması, korozyon ürünlerinin koruyucu ya da yıkıcı özelliklerinin saptanması ve doğru koruma uygulamaları için gerekli bilginin oluşturulmasını amaçlamaktadır.

Çalışmanın kapsamını Denizli Müze Müdürlüğü'ne bağlı: Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı, Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı, Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı, Kaklık Lahiti Kurtarma Kazısı'ndan elde edilen bakır ve bakır alaşımlı etütlük eserlerin X-ışını Floresans Spektrometresi (XRF), Taramalı Elektron Mikroskopu-Enerji dağılımlı X-ışını (SEM-EDX), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR) analiz yöntemlerini kullanarak karakterizasyon ve bozulma durumlarının belirlenmesi oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, bakır ve alaşımlı eserlerin bozulma durumlarının belirlenmesi için 4 farklı kurtarma kazılarından etütlük eserlerden numuneler alınarak analizler yapılmıştır. Değişik kazılardan numuneler alınarak hem farklı özelliklerde eserlerin bulunduğu hemde bozulmuşluk durumları farklı örnekler çalışılması amaçlanmıştır.

Sınırlamalar – Sınırlılıklar

Bu çalışmada Denizli Müze Müdürlüğü'nün yaptığı kurtarma kazılarında ele geçen etütlük bakır ve bakır alaşımlı eserlerden 8 adet numune alınmıştır. Alınan numuneler XRF, SEM-EDX ve FTIR analizleri kullanılarak incelenmiştir.

Tez çalışmasının konusu bakır ve alaşımlı eserlerin karakterizasyonu, bozulma durumları, korozyon ürünlerinin tespiti ve bozulma nedenlerinin tespit edilmesiyle sınırlandırılmıştır.

Literatür Araştırması

Bakır ve bakır alaşımlarının bozulma durumlarının analizi ile ilgili literatürdeki yapılan ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmalar incelendiğinde, bu konuyla ilgili ilk bilimsel çalışmayı Davy'nin 1826 da yaptığı görülmektedir. Davy yaptığı çalışmada bronz miğferin elementel oranını belirlemiş ve üzerindeki oluşan bozulmaları, korozyon katmanlarında oluşan bileşiğin türüne ve rengine göre sınıflandırıp tanımlamıştır¹.

1895'de Wilhelm Conrad Röntgenin X-ışınını keşfetmesi, malzemelerin kimyasal özelliklerinin daha kapsamlı ve detaylı incelenmesine olanak sağlamıştır². 1934'de Collins'in British Museumda X-ışını analiz yöntemini bronz eserlerin bozulmalarının teşhisinde kullanarak, malzemelerin bozulma durumunun daha iyi tespit edilmesini sağlamıştır³.

X-ışını analizi zamanla geliştirilerek XRF, XRD, EDX ve X-ışını radyografi gibi farklı yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler bakır ve bakır alaşımlı eserlerin kimyasal özellikleri, fiziksel yapısı ve bozulma nedenleri ile ilgili daha detaylı bilimsel çalışmalar yapılmasına olanak sağlamıştır. Bilimdeki gelişmeler ile X-ışını analizlerinin yanı sıra Raman spektroskopisi, SEM, FTIR ve Mikroskopik analiz yöntemleri gibi farklı yöntemlerde kullanılmaya başlanmıştır.

X-ışını Floresans Spektrometresi (XRF) analiz yöntemi, yapılan çalışmalarda eserlerin karakterizasyonunu belirlemek için kullanılmıştır. Scott, heykel üzerinde yaptığı çalışmada, heykelin yüzeyinin kalay oranının oldukça yüksek olduğunu belirlemiştir⁴. Figueiredo, 36 tane metal eser incelemiş analizler sonucunda eserlerin % 10-15 arasında kalay (Sn) ve çok düşük miktarlarda kurşun (Pb), Arsenik (As) ve demir (Fe) içeren bronz olduğunu tespit etmiştir⁵. Morcillo, bakır numunenin bozulma durumunu belirlemek için elementel kompozisyonunu incelemiş ve numunenin safsızlık oranının oldukça yüksek olduğunu bulmuştur (Cu, Sb, Pb, Ni, S, Ag, Al, Cr, Mn)⁶. Bu

¹ Davy 1826, 55-59.

² Köktaş 2009, 3.

³ Collins 1934, 69-79

⁴ Scott 1994, 1-23

⁵ Figueiredo 2013, 26-31.

⁶ Morcillo et al. 2017, 146-155.

analiz yöntemi ile eserlerin elementel içeriği belirlenip, alaşım oranları tespit edilerek nitel ve nicel özellikleri tespit edilmiştir⁷.

Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) analiz yöntemi, yapılan çalışmalarda eserlerin elementel kompozisyonunun incelenmesinde, karakterizasyonunun belirlenmesinde ve korozyon ürünlerinin kimyasal bileşiminin tanımlanmasında kullanılmıştır⁸. İngo, yaptığı çalışmada yüksek kalaylı ve kurşunlu bronzların karakterizasyonunu tespit etmiş ve korozyon tabakasının elementel oranlarını belirlemiştir⁹. Chiavari, atmosferik koşullara maruz kalan bronz anıtın bozulma durumunu anlamak için EDX analizi ile patinanın elementel kompozisyonunu tespit etmiştir¹⁰.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz yöntemi, yapılan çalışmalarda mikro anlamda görüntüleme ile inceleme yapılarak, eserin üzerinde oluşan korozyon tabakasının morfolojik ve topografik yapısı hakkında bilgi edinilmiştir¹¹. Quaranta, yaptığı çalışmada arkeolojik bronzların korozyon, yapısını ve gelişimini belirlemiştir¹². Rahmouni, SEM analizi ile bronz eserler üzerinde oluşan yıkıcı ve koruyucu korozyon tabakalarının oluşum şekli ve yapısal özelliklerini tespit etmiştir¹³.

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR) analiz yöntemi, yapılan çalışmalarda eserlerin bozulma durumunda üzerinde oluşan korozyon ürünlerinin oluşturduğu bileşiklerin tanımlanması için kullanılmıştır¹⁴. Carlo, bakır eserler üzerinde oluşan atakamit ve klinoatakamitin, FTIR analizi ile kristal kafeslerindeki etkileşimine bağlı olarak ayrımını yapmıştır¹⁵. Morcillo, bakır numune üzerinde oluşan korozyon ürünlerinin FTIR analizi ile kuprit, azurit, antlerit ve brokhantit olduğunu belirlemiştir¹⁶.

Bakır ve alaşımı eserlerin, bozulması sonucunda meydana gelen korozyon ürünlerinin kimyasal ve yapısal teşhisi yüzyıldan fazla bir süreçte araştırma konusu

⁷Gorghinian et al. 2013, 268-271; Bachler et al. 2016, 163-170; Ashkenazi et al. 2015, 195-208; Koval'chuk et al. 2015, 703-717.

⁸İngo et al. 2004, 199-203; Ghoniem 2011, 95-108; Ospitali et al. 2012, 1596-1603. Mazzeo et al. 2012, 261-271

⁹İngo et al. 2001, 337-342

¹⁰Chiavari et al. 2007, 7760-7769.

¹¹İngo et al. 2001, 337-342; İngo et al. 2004, 199-203; Rosales et al. 2010, 3212-3224; Morcillo et al. 2017, 146-155.

¹²Quaranta et al. 2014, 283-291

¹³Rahmouni et al. 2009, 5206-5215.

¹⁴Mazzeo - Joseph 2005, 5-6; Carlo et al. 2017, 123-124; Joseph 2009, 76-77; Morcillo et al. 2017, 150; Berger 2012, 245-251; Vasilache et al. 2011, 123.

¹⁵Carlo et al. 2017, 123-124.

¹⁶Morcillo et al. 2017, 150.

olup, bu konuyla ilgili bilimsel çalışmalar günümüzde hala devam etmektedir. Gelişen teknoloji ve metodlar bu konunun araştırılmasına kolaylık sağlamıştır.

BÖLÜM

TARİHSEL GELİŞİM ve YAPIM TEKNİKLERİ

1. Tarihsel Gelişim

Dünya üzerinde insanlar, varoluşlarından itibaren temel ihtiyaçlarını gidermek için sürekli bir arayış halinde olmuştur. Yaşamı nitelikli, daha sürdürülebilir bir hale getirmek için yapılan bu arayışlar tarih öncesi devirlerden bugüne kadar devam etmiştir. Başlangıçta ahşap ve taştan yararlanılmış, zamanla metalin keşfedilmesiyle ihtiyaç duydukları her türlü nesneyi başarıyla üretebilmişlerdir¹⁷.

Metallerin geçmişten günümüze nasıl geldiğini anlamak için Anadolu madencilik tarihini incelemek gerekmektedir. Anadolu madencilik tarihi incelendiğinde birçok gelişme aşamaları görülmektedir. İnsanlar madenleri keşfetmeden önce; başlangıçta parlak renkli mineralleri toplayıp, boya malzemesi olarak kullanmışlardır. Bakır ile tanışmaları M.Ö. 9000 yılların sonuna denk gelmektedir¹⁸. Yüzeye yakın alanda elde ettikleri doğal bakır (nabit), taş ve mineralleri toplayıp yerleşim alanlarına getirerek şekillendirmeyi denemişlerdir. Bunun sonucunda bakırı döverek şekillendirmeyi başarmışlardır. Ancak soğuk bakır dövülerek şekillendirildiğinde çatlayarak kırılıp kopmaktadır. Bundan dolayı bakırı daha iyi şekillendirebilmek için ateşi kullanmışlardır. Ateşte tavlansak yapılan dövme işleminde bakırın plastik özelliğinin arttığını ve daha kolay şekil aldığını keşfetmişlerdir¹⁹. Böylelikle bakırı tavlansak dövme yöntemiyle levha haline getirip boncuklar, iğne gibi delici aletler ve olta uçları gibi nesnelerin üretimi yapmışlardır. Bu bilgiler ışığında insanların ilk defa teknolojik bir alet yapmak için ateşi kullanmış oldukları anlaşılmaktadır²⁰.

Çanak Çömlekli Neolitik Dönem’de yalnızca metal olarak doğal bakır kullanılmıştır²¹. Çatalhöyük, Hacılar ve Niğde Tepecik’te doğal bakırdan yapılmış nesnelere bulunmuştur. Bu nesnelere M.Ö. 6000 yılına tarihlendirilmektedir²². Malakit ve azurit gibi parlak renkli bakır mineralleri bu dönemde boncuk yapımında kullanılmıştır. Bu durumdan da anlaşılacağı üzere insanlar, bakır minerallerini nasıl kullanacağını bu

¹⁷ Başak 2008, 18-19.

¹⁸ Yalçın 2013, 20.

¹⁹ Yalçın 2016, 6.

²⁰ Bilgi 2004, 8.

²¹ Yalçın 2013, 22.

²² Yalçın 2013, 22.

dönemde tam olarak bilmemektedirler. Mineralleri yalnızca boya yapımında ve boncuk yapımında kullanmışlardır²³.

Bakırın, minerallerden arıtılarak elde edilmesi M.Ö. 5000 lerde gerçekleşmiştir. Mersin Yumuktepe’de yapılan kazı çalışmalarında ele geçen balta, keski ve rulo başlı iğne gibi aletlerin arkeometalurjik incelemeleri yapıldığında aletlerin bakır minerallerinden arıtılarak elde edilen bakırdan döküm yöntemiyle yapıldığı anlaşılmış ve eserler M.Ö. 5000 ve 4900 yıllarına tarihlendirilmiştir²⁴.

M.Ö. 4000’lere gelindiğinde, bu dönemde Anadolu’daki yerleşim yerlerinde madencilik faaliyetlerinin büyük bir gelişim gösterdiği, yerleşim alanlarındaki maden işlikleri ve atölyelerinden anlaşılmaktadır²⁵. Ancak bronz keşfedilmediğinden dolayı uzun yıllar Anadolu’da yaygın olarak bakır kullanılmıştır²⁶.

İnsanlar saf bakırın döküm için uygun olmamasının yanı sıra yumuşak ve mekanik dayanımının az olmasından dolayı bakırı daha sert ve mekanik dayanımını daha iyi duruma getirmek için alaşımlar kullanmışlardır²⁷. İlk yapılan alaşım arsenikle bakırın ergitilerek yapıldığı alaşımdır²⁸. Anadolu’da arsenik madeni zengin oranda bulunduğu için bakır alaşımı yapımında uzun bir süre yaygın olarak kullanılmıştır. Malatya-Arslantepe ve Bafra-İkiztepe’de yapılan kazılarda bulunan çok sayıda silah, eşya, takı, alet ve sembolik nitelikteki nesnelerin tamamına yakını arsenik katkılı bakır alaşımından yapılmıştır. Bütün bu bulgular incelendiğinde Anadolu madencilik sanatını ile tekniğinin gelişimi hakkında detaylı bilgiler elde edilmektedir²⁹.

Arseniğin, bakırla alaşım yapılma işleminin açık havada gerçekleştiği düşünülmektedir. Çünkü alaşım yapılması esnasında arsenik havaya mavimtırak bir alev ile sarımsak kokusu gibi bir koku ortaya çıkarmaktadır³⁰. Bu koku zehirli olduğundan kapalı ortamda canlıların bu kokuyu soluması ölümlerine yol açacak etkidir. “*Bu özelliğinden dolayı tarih öncesi dönemlerdeki durumu bilinmese de Strabon, antik çağlarda arsenik çıkarmak için esirlerin çalıştırıldığını söylemektedir. Ünlü tarihçi*

²³ Yalçın 2016, 6.

²⁴ Yalçın 2016, 8.

²⁵ Başak 2008, 22.

²⁶ Başak 2008, 21-22.

²⁷ Ehsani-Yazıcı 2016, 45-46.

²⁸ Özbal 2003, 10.

²⁹ Belli 2004, 9-11.

³⁰ Fidan 2016, 52.

Strabon, bu esirlerin zehirli gaz nedeniyle öldüklerinden ve bu sebeple de bir devir daim sistemiyle ölen esirin yerine, maden ocağına yenilerinin geldiğinden bahsetmektedir”³¹.

M.Ö. 3000 yıllarında Anadolu’da bakır ve kalay alaşımlanarak bronz kullanılmaya başlanmıştır³². Kalay kasiterit cevherinden elde edilmektedir³³. Bu dönemde Anadolu’da kalay madeninin var olup olmadığı tam olarak bilinmemektedir. Kalay bu dönemde az bulunmasından dolayı çok değerlidir. Bakır alaşımında arseniğin yerini kalayın alması ise birden bire olmamıştır. Arsenik ve kalay bakır alaşımı yapımında birlikte kullanılmıştır. Bunun örnekleri “*Anadolu’da yapılan kazılarda Mahmatlar, Kusura, Yortan, Kayapınar, Mersin-Yumuktepe, Alişar Höyük, Horoztepe, Alacahöyük, Ahlatlıbel, Polatlı, Acemhöyük ve Tarsus-Gözlükule’ de*” ortaya çıkmıştır³⁴.

M.Ö. 2000 yılı başından itibaren bakır alaşımı yapımında arseniğin yerini kalayın aldığı ve bronz nesnelere yapıldığı görülmektedir³⁵. Kalay, arseniğe göre daha kaliteli ve sağlam bir malzemedir. Kalayın bronz yapımında kullanılması Anadolu’da maden endüstrisinin ve ticaretinin büyük oranda gelişmesine katkıda bulunmuştur³⁶. Kültepe kazılarında ele geçen 20.000’i aşkın çivi yazılı kil tabletler, Anadolu ticareti hakkında bilgi vermektedir. Asurlu tüccarların bronz yapmak için kalayın Anadolu’ya tam kaynağı belirtilmese de doğudan geldiğini ima etmişlerdir³⁷. Büyük bir olasılıkla Afganistan’dan kervanlarla 80-90 yıl içinde 100 ton kalay taşımışlardır. Asurlu tüccarların yapmış oldukları bu kalay ticareti neticesinde Anadolu kalay açısından bolluk dönemine girmiştir. Kalayın Anadolu’ya gelmesiyle Kültepe ve birçok kentte silah, takı, alet ve çeşitli eşyaların üretildiği bronz işlikleri kurulmuştur. Bu da Anadolu’nun sosyal, ekonomik ve kültürel gelişimi açısından önemli bir etken olmuştur³⁸.

³¹ Fidan 2016, 53.

³² Başak 2008, 22.

³³ Kaptan 1992, 15.

³⁴ Belli 2004, 15.

³⁵ Belli 2004, 19.

³⁶ Belli 2004, 21.

³⁷ Belli 2004, 23.

³⁸ Belli 2004, 24.

M.Ö. 1200 yıllarına gelindiğinde bronzun yerini demir almıştır. Demir, cevher olarak doğada bol miktarda bulunmaktadır³⁹. Bundan dolayı bronz yapımda kullanılan bakır ve kalaya göre daha ucuz olmasıyla birlikte, işlenmesinin bronza göre kolay olması demirin yaygın olarak kullanılmasında etkili olmuştur⁴⁰. Arkeolojik kazılara göre demirden nesnelere M.Ö. 3000’lerde yapıp kullanılmasına karşın, yaygın olarak kullanılmamasının sebebi maden teknolojisinin bunun için uygun olmamasının yanı sıra demirden yapılan nesnelere bronza göre dayanıksız olması ve çabuk oksitlenip korozyona uğraması olarak düşünülebilir⁴¹. Buna ek olarak kesici aletler ve silahların yapımında işlevsellik olarak bronzun daha uygun olması demirin arka planda kalmasına neden olmuştur.

Arkeolojik değerlendirmelere bakıldığında M.Ö. 1000’li yıllarda bronzun pahalı olmasından dolayı, pirinç eser üretiminin yaygınlaşmaya başladığı görülmektedir. Pirinç eserlerinin bilinçli olarak üretilmesine demir çağından önce rastlanılmamıştır. Pirinç eserlerin renk ve parlaklık özelliği, altına çok benzediğinden keşfedildikten sonra yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanılmıştır⁴². Pirinç, bakır ve çinkonun eritilerek alaşımlanması sonucunda oluşan metaldir. Bronz gibi mekanik dayanımı yüksek ve serttir. Soğukken işlenmeye uygun bir malzeme değildir. Ancak döküm için oldukça uygun ve elverişli bir malzemedir⁴³. Pirinç üretimi için kullanılan çinko, kalamın cevherinden arıtılarak elde edilmektedir. Orta çağın sonlarına kadar arıtma işlemi yapılamadığından, bakır ile kalamın cevheri karıştırılarak pirinç üretimi yapılmıştır⁴⁴.

³⁹ Başak 2008, 27.

⁴⁰ Tarhan 2009, 9.

⁴¹ Baykan 2016, 63.

⁴² Tekin 2015, 137.

⁴³ Erginsoy 2008, 975.

⁴⁴ Erginsoy 2008, 978.

2. Yapım Teknikleri

Madenler, kullanım alanına göre, ihtiyaç doğrultusunda geçmişten bu yana çeşitli teknikler kullanılarak şekillendirilmiştir. Bu teknikler; dövme, döküm, birleştirme ve süsleme teknikleri olarak dört başlık altında toplanmıştır⁴⁵.

2.1 Dövme Tekniği

Metallerin yapım teknikleri arkeolojik veriler ışığında değerlendirildiğinde; ilk olarak doğada bulunan doğal bakırdan elde edilen metal nesnelerin dövme tekniği ile şekillendirildikleri ortaya çıkmaktadır⁴⁶. Başlangıçta soğuk dövme olarak yapılan bu işlem, metalin ateşte ısıtılarak tavlanması keşfedilmesi neticesinde daha kolay şekillenerek işlenmesini sağlamıştır⁴⁷. Dövme tekniği, metalin kütük ya da örs üstünde çekiçle dövülerek şekillendirilmesidir. Çökertme tekniği ile içten çekiçlenerek, yükseltme tekniğiyle de dıştan çekiçlenerek yapılmıştır⁴⁸.

Arıtma: Metal teknolojisinin tam anlamıyla gelişmeye başlaması, ısısız işlem ile cevherlerin arıtılmasıyla başlamıştır⁴⁹. Doğada yaygın olarak bulunan bakır cevherlerinin ısısız işlemle arıtılması bunun ilk örneğidir. Cevherlerin arıtma işleminin yapılabilmesi için kapalı bir fırın gerekmektedir⁵⁰. Arıtma yapılacak olan fırında odun kömürünün yakıt olarak kullanılması ve fırındaki yakıt yakıldığında ısının artması için dışarıdan içeriye hava akımı verilmesi gereklidir. Fırındaki ısı 800 °C ye ulaştığında cevherlerdeki metalik bileşikler fırının dibine akmaktadır. Bu nedenle cevherlerin bir pota içerisine konularak fırında arıtılmasıyla yakıt ve cevher birbirine değmediği için daha temiz bir metal elde edilebilmiştir⁵¹. Madenlerin ergitilebilmesi için fırına hava akımının sağlanabilmesi çok önemlidir. Bu nedenle hava akımının sağlanabilmesi için hayvan derisinden yapılmış el ve ayak körükleri kullanılmıştır⁵².

⁴⁵ Tekin 2015, 72.

⁴⁶ Bilgi 2004, 8.

⁴⁷ Yalçın 2016, 6.

⁴⁸ Erginsoy 2008, 975.

⁴⁹ Başak 2008, 20.

⁵⁰ Erginsoy 2008, 976.

⁵¹ Erginsoy 2008, 976.

⁵² Tekin 2015, 59-62.

2.2 Döküm Tekniği

Döküm tekniği, metalürjinin gelişmesindeki en önemli aşamalardan biridir. Bunun sebebi daha önce taş, ahşap ve kemikten yapılan 3 boyutlu nesnelere metalden yapılmasına olanak sağlanmış olmasıdır⁵³. Metaller cevherlerden arıtılıp, potalarda eritme işleminden geçirildikten sonra döküm tekniği kullanılarak nesnelere yapılabilmiştir⁵⁴. Döküm, taş ya da kilden hazırlanmış kalıplara eritilen madenin dökülmesi ile istenilen şekilde nesnelere yapılması işlemine denir. Dökümde kullanılan taş kalıplar kil kalıplara göre daha dayanıklıdır; fakat taş kalıpları şekillendirebilmek için daha fazla iş gücü ve süre gerekmektedir⁵⁵. Kil kalıplar ise dayanıksız olmalarına rağmen şekillendirebilme süreleri kısa ve iş gücü ihtiyacı azdır. Yapım kolaylığının yanı sıra fırınlandığında madenlerin erime derecesinden daha yüksek sıcaklıklara kadar dayanabildiğinden dolayı taş kalıptan daha çok kil kalıplar tercih edilmiştir⁵⁶.

2.2.1 Tek Parçalı Kalıpta Döküm Yöntemi

Döküm için ilk kullanılan kalıplar tek parçalı üstü açık kalıplardır. Bu şekilde yapılan dökümde kullanılan madenin birden soğuması ile hava kabarcıklarının madenin içerisinde kalması sonucu başarısız bir döküm gerçekleşebilir. Dökümün başarılı olabilmesi için madenin yavaş soğuması gereklidir. Kalkolitik çağda üstü açık kalıpların olumsuz sonuçlar verdiğini fark eden insanlar kalıpların üstünü taş veya kilden yaptıkları kapakla kapatarak dökümden olumlu sonuçlar elde etmişlerdir⁵⁷. Tek parçalı kalıplarla yapılan dökümlerden elde edilen eserlerin hepsinin içi dolu olur. Bu yöntemle içi boş eserler yapmak imkânsızdır. İçi dolu döküm tekniği ile balta, keski, keser gibi dikdörtgen veya kare kesitli basit formda aletler üretilmektedir. Bu yöntemle ağır silah ve eşyalar da yapılmıştır. Bu nesnelere oldukça dayanıklıdır⁵⁸.

⁵³ Tekin 2015,78.

⁵⁴ Bilgi 2004, 9.

⁵⁵ Çatal 2009, 17.

⁵⁶ Çatal 2009, 17.

⁵⁷ Erginsoy 2008, 976-977.

⁵⁸ Tekin 2015, 83.

2.2.2 Ğki Parçalı Kalıpta Döküm Yöntemi

M Ö 3.000 civarında döküm için çift parçalı kapalı kalıp yöntemleri kullanılmaya başlanılmıştır⁵⁹. Bu yöntemlerle tek parçalı yöntemlerle yapılamayan, silindir gibi köşesiz nesnelerin üretilmesi mümkün olmuştur. Yapılacak kalıpların oluşturulmasında, yapılan konturların karşılıklı milimetrik olarak aynı boyutta işlenebilmesi gereklidir. Bu deliklerin içine konulan perçinler ile kalıbın hareket etmesi engellenmiştir. Yapılan bu işlem döküm yapmak için oldukça önemlidir⁶⁰.

2.2.3 Özlü Döküm Yöntemi

İçi boş nesnelerin yapılması için özlü döküm yöntemi kullanılmıştır⁶¹. Bu yöntemle kap veya çan biçimli nesnelerin modeli kil kalıp içerisine yerleştirilerek şeklinin alması sağlanmıştır. Sonrasında model kalıp içinden çıkartılarak, bu alana yerleştirilmek için; kilden bir öz yapılması gerekmiştir. Öz oluşturulurken üretilmesi istenen nesnenin cidar kalınlığı dikkate alınarak hazırlanmıştır. Özün boyutu kalıpla oluşturulmuş eserin dış yüzünden daha küçük olmuştur. Kalıp ile öz sağlam metal çubuklarla sabitlenmiştir. Bu çubuklar kalıp ile öz arasına dökülecek ergiyik metalin sıcaklığından ve akışkanlığından etkilenmeyecek şekilde hazırlanmıştır⁶².

2.2.4 Balmumu Ğle Döküm Yöntemi

Dökümcülüğün gelişmesiyle maden ustaları daha karmaşık metal nesnelere üretebilmek için balmumu veya donyağı gibi kolay şekillendirilen hammaddeleri kullanarak içi boş veya dolu döküm yapmışlardır⁶³. Genellikle küçük çapta nesnelere üretmek için, içi dolu döküm yöntemi kullanılırken, büyük çapta nesnelere üretebilmek için ise içi boş döküm yöntemini kullanmışlardır⁶⁴.

Ği dolu döküm: Bu yöntemde, balmumu veya donyağı ile üretilmek istenen nesnenin modeli yapılıp, şekillendirilerek kalıp olarak kullanılmıştır⁶⁵. Hazırlanan modelin yüzeyi kil ile sıvanıp, bu işlem yapılırken, sonrasında kilin içerisindeki hammaddenin

⁵⁹ Erginsoy 2008, 976-977.

⁶⁰ Tekin 2015, 84-85.

⁶¹ Tekin 2015, 86.

⁶² Tekin 2015, 87.

⁶³ Tekin 2015, 88.

⁶⁴ Güldür 2013, 54.

⁶⁵ Tekin 2015, 88.

akması ve ergitilmiş metalin dökülmesi için bir delik açılmıştır. Ardından kalıp, delik alt kısma gelebilecek şekilde ateşe tutularak ısının etkisiyle içerisindeki hammaddenin akması sağlanmıştır⁶⁶. Böylelikle üretilmek istenen nesnenin kilin içerisinde modelinin oluşması gerçekleşmiştir. Daha sonra kil fırınlanıp, sertleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda hazırlanan kalıba ergitilen metal dökülüp, soğuması beklenmiştir. Metal içinde soğuduktan sonra kalıp kırılarak, nesne ortaya çıkartılmıştır⁶⁷.

Ğci boĞ döküm: Bu yöntem ile üretilmesi istenen nesnenin modeli ve şekline uygun kilden bir çekirdek hazırlanmıştır. Hazırlanan çekirdeğin üzeri balmumu veya donyağı gibi hammaddeler kullanılarak kaplanıp uygun model oluşturulmuştur⁶⁸. Ardından modelin yüzeyi kil ile sıvandıktan sonra hazırlanan kalıpta çekirdeğin ve kilin arasındaki hammaddenin akması ve ergitilmiş metalin dökülebilmesi için uygun deliklerin yapılması sağlanmıştır. Bu yöntemler doğrultusunda hazırlanan kalıp delikler alt kısma gelecek şekilde ateşte ısıtılarak içerisindeki hammaddenin akıtılması gerçekleştirilmiştir⁶⁹. Böylelikle üretilmek istenen nesnenin içi boş modelinin kalıbı hazırlanmış olur. Hazırlanan kalıp fırınlanıp sertleştirildikten sonraki aşamada ise kalıba delikten ergitilen metal dökülerek soğuması beklenmiştir. Metal soğuduktan sonra kalıp kırılır ve çekirdek parçalanarak nesnenin içi boşaltılmıştır⁷⁰.

2.3 Birleğtirme Tekniği

Metal parçaların birbirine bağlayarak daha büyük ve karmaşık nesnelere yapılması için kullanılan teknikler birleştirme tekniği olarak adlandırılmıştır. Perçin, lehim ve kaynak yöntemi kullanılarak birleştirme yapılmaktadır⁷¹.

Perçin: Birleştirilmek istenilen metal üst üste getirilerek, perçin çivilerinin geçeceği delik bir matkap ile açılmaktadır. Perçin delikleri döküm esnasında da yapılabilmektedir. Delinmiş metal parçalar düzgün bir şekilde üst üste getirilerek, bu esnada delikten bir ucu daha geniş baş kısmına sahip bir çivi geçirilir. Çivin geniş baş kısmı aşağıya gelecek şekilde örs üzerine yerleştirilir. Ardından çivinin diğer uç kısmı

⁶⁶ Çatal 2009, 19.

⁶⁷ Tekin 2015, 88.

⁶⁸ Tekin 2015, 89.

⁶⁹ Çatal, 2015, 19.

⁷⁰ Erginsoy 2008, 977.

⁷¹ Tekin 2015, 91.

çekiç ile sert darbelerle ezilerek yüzeyi kaplaması sağlanır. Yapılan bu işlemlerin tamamına perçinleme denilmektedir⁷².

Lehim: İki metal parçasının birleştirilmesi için kullanılan ergime noktası düşük maden veya alaşımdır. Birleştirilmek istenen iki metal parçası yan yana getirilir. Ek yeri üzerine erimiş lehim sürülür. Ardından ateşte tutulur, ısınan lehim sıvılaşarak ekin içine akmasıyla kendini metal parçalarıyla alaşımlayarak parçaların birleşmesini sağlar⁷³.

Kaynak: Metal parçalarının birleştirilmek istenen kısımlarının üst üste getirilip yüksek ısı veya basınç uygulanarak bağlanmasıdır⁷⁴.

2.4 Süsleme

Süsleme, bir nesneyi kullanım amacı dışında, göze daha güzel göstermek için çeşitli teknikler kullanılarak yapılan estetik çalışmaların genel adı olarak tanımlanabilir⁷⁵.

Kazıma ve çalma: Madeni nesnelerin yüzeyini derin çizgiler ve yivlerle bezeme tekniğidir. Kazıma tekniğinde keskin kalemler ya da keskinler kullanılarak yivler açılır. Bu yöntemle yivin içindeki maden oyularak dışarı atılır. Çalma tekniğinde ise ucu küt kalemler kullanılır⁷⁶. Bu yöntemle kalemin ucu yivi açarken maden yan duvarlara itilir. Kazıma olduğu gibi oyulup dışarı atılmaz. Kazıma ve çalma tekniğinde kullanılacak olan kalemlerin bronzdan daha sert bir madenden yapılmış olması gerekmektedir⁷⁷.

Kabartma: Çeşitli biçimlerde uçları olan kalemler ve çekiçler kullanılarak madeni nesnenin yüzeyine kabartma bezemeler yapılmasıyla oluşan süsleme tekniğidir⁷⁸. Bu teknikle kabartmalar, madeni nesneyi içten veya dıştan ya da hem içten hem dıştan çekiçle döverek oluşturulur⁷⁹.

⁷² Tekin 2015, 91.

⁷³ Tarhan 2009, 126.

⁷⁴ Tekin 2015, 96.

⁷⁵ Arslan 1987, 3.

⁷⁶ Erginsoy 2008, 975.

⁷⁷ Erginsoy 2008, 975.

⁷⁸ Tarhan 2009, 132.

⁷⁹ Tarhan 2009, 132.

Delik iGi: Madeni nesnelere üzerine kesici veya delici aletler kullanılarak delikli süsleme oluşturma tekniğine delik işi denir⁸⁰. Bu teknikle süsleme yapılacak nesnenin yüzeyinin düzgün olması gerekmektedir. Süslemenin uygulanacağı yüzeye tasarlanan motif ana hatlarıyla çizilir. Ardından yardımcı aletler kullanılarak motifin dışındaki alan kesilerek, elde edilmek istenen motif oluşturulur⁸¹. Bronz gibi metallerin ve kısmen kalın cidarlı nesnelere süslemesinde kesme işlemi zor olduğundan, bazen bu motifler döküm sırasında yapılmaktadır⁸².

Kakma: Madeni nesnelere üzerinde açılan yivlerin veya oyukların içerisine ya da zemine farklı tür ve renkte madenler veya taşlar yerleştirilerek oluşturulan süsleme tekniğidir. Bu teknikte önemli olan nesnelere, maden ile kontrast oluşturacak ve nesnelere renklendirecek malzemelerin kullanılmasıdır⁸³.

Kaplama: Madeni bir nesnenin yüzeyinin başka bir maden ile kaplanması tekniğine denilmektedir. Bu teknikle daha az kıymetli olan madeni nesnenin yüzeyi, daha kıymetli bir metal ile kaplanmaktadır⁸⁴. Kaplama nesnenin tamamına uygulanabildiği gibi, lokal olarak da uygulanabilmektedir. Yapılan bu işlemler esnasında kaplamada kullanılan madenin oldukça ince olması gerekmektedir⁸⁵.

⁸⁰ Güldür 2013, 58.

⁸¹ Tekin 2015, 100.

⁸² Tekin 2015, 100.

⁸³ Güldür 2013, 61.

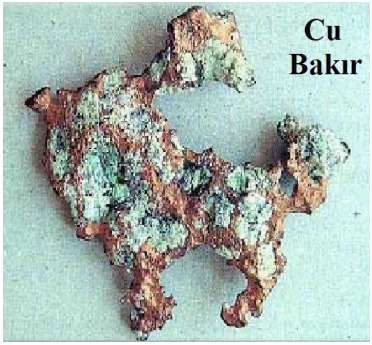
⁸⁴ Tekin 2015, 104.

⁸⁵ Tekin 2015, 104.

ĞKĞNCĞ BÖLÜM

BAKIR VE BAKIR ALAĞIMLARI

Bakır yumuşak ve bu sebeple kolay işlenebilen, kırmızımsı renkli bir madendir⁸⁶. Isı ve elektrik iletkenliğinin iyi olmasından dolayı, günümüzde de yaygın bir şekilde kullanılan madenler arasında yer almaktadır⁸⁷. Doğada saf veya cevher halde bulunur⁸⁸. Bakır, okside olan bir metaldir. Saf halde bakır parçalarının yüzeyi atmosferik koşullar altında oksitlenerek, morumsu yeşil rengini almaktadır. Saf halde bakır doğada az miktarda bulunurken, cevher halde bakır doğada yaygın ve bol miktarda bulunmaktadır⁸⁹. Genellikle bakırın elde edildiği cevherler Tablo-1’de gösterilmiştir. Kristal veya tozumsu biçimde mineraller olan bakır cevherleri yaşlı ve sert kayalarda damarlar halinde görülmektedir. Bu bakır cevherlerinden ısı yoluyla ergitilerek metalik bakır elde edilmektedir⁹⁰. Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri Şekil-1’de gösterilmiştir.

Kimyasal Formülü:	←→	Cu	
Atom Numarası:	←→	29	
Yoğunluk:	←→	8,93 gr/cm ³	
Ergime Noktası:	←→	1083 °C	
Kaynama Noktası:	←→	2300 °C	
Kristal Yapısı:	←→	Kübik	
Sertlik:	←→	3.0	

Şekil-1 Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri⁹¹

Bakır kopmadan şekil değişikliğine uğrayabilen en esnek madenlerden biridir. Ham dayanıklılığı ile sertliği yüksek değildir. Hava ve deniz suyunun etkilerine karşı

⁸⁶ Güldür 2013, 51.

⁸⁷ Scott, 2002, 398.

⁸⁸ Tarhan 2009, 35.

⁸⁹ Tarhan 2009, 36.

⁹⁰ Tarhan 2009, 36.

⁹¹ Harman 2010, 8; <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/bakir> (19.05.2017).

dirençlidir; ancak uzun zaman açık havada bulunduğunda, yüzeyinde yeşil renkli, ince koruyucu bakır karbonat (patina) tabakası oluşur⁹².

Tablo-1 Başlıca bakır cevherleri⁹³

Adı	Kimyasal formül	Çerdiği bakır oranı %	Kristal sistemi	Renk	Sertlik
Kuprit	Cu ₂ O	89	Monoklinik	Metalik gri siyah	3,5
Azurit	2CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	55	Monoklinik	Cam mavisi	3,5-4
Malahit	CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	58	Monoklinik	Soluk yeşil	3,5-4
Kalkosit	Cu ₂ S	80	Hekzagonal	Metalik siyahımsı gri	2,5-3
Kovellit	CuS	66	Hekzagonal	Metalik mavi	1,5-2
Kalkopirit	CuFeS ₂	34	Tetragonal	Pirinç sarısı kahverengi alacalı	3,5-4
Bornit	Cu ₅ FeS ₄	63	Kübik	Bakır kırmızısı, bronz, morumsu	3
Atakamit	Cu ₂ (OH) ₃ Cl	60	Ortorombik	Cam yeşili	3-3,5

Bakır yumuşak bir maden olması nedeniyle alet ve silah gibi nesnelere üretimi için uygun bir malzeme niteliğinde değildir⁹⁴. Bunun yanı sıra mekanik dayanımının az olması ve döküm için uygun olmaması bakırın alaşımlanmasını gerektirmiştir⁹⁵. Ergime yolu ile iki ya da daha fazla maddenin birleştirilmesine alaşım denir⁹⁶. Bakırın en önemli alaşımları arsenik, kalay ve çinko ile yapılmıştır. Genellikle bu alaşımlara belli amaçlar doğrultusunda kurşunda ilave edilmiştir⁹⁷.

Bakır alaşımları bronz ile pirinç olarak özel isimlerle adlandırılıp kullanılmıştır. Bakırın kalay ile oluşturduğu alaşımlar bronz, çinko ile oluşturduğu alaşımlar ise pirinç olarak adlandırılmıştır. Tarihi eserler ve sanat nesnelere incelendiğinde bakır alaşımlarının genellikle bronz olduğu görülmüştür. Pirinç alaşımı bronz kadar yaygın

⁹² Savaş 2006, 7.

⁹³ Akkaş 2011, 6. ; Scott 2002, 82, 102, 123, 227; Tarhan 2009, 36; Artioli 2010, 324.

⁹⁴ Özbal 2013,32.

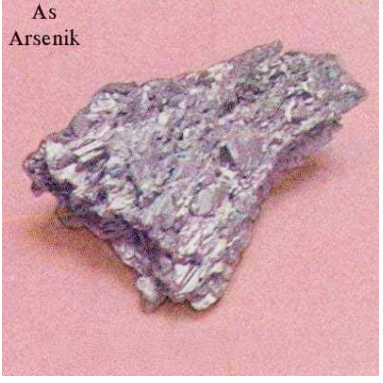
⁹⁵ Erginsoy 2008, 977.

⁹⁶ Hasol 2012, 28.

⁹⁷ Scott 2002, 398.

değildir. Malzemenin mekanik dayanımını arttırmak, döküm işlemini kolaylaştırmak ve sertleştirmek gibi amaçlarla bakıra çinko, arsenik, kalay ve kurşun katılarak farklı bakır alaşımları yapılmıştır⁹⁸.

İlk bakır alaşımı, bakır ve arsenik kullanılarak yapılan bakır alaşımıdır⁹⁹. Arsenik, bakır alaşımı içerisinde % 2-20 oranı arasında kullanılmıştır¹⁰⁰. Arsenik içeren bakır alaşımı, saf bakıra göre mekanik özellikleri daha iyi durumdadır; daha sert, ergime derecesi düşük ve daha kolay döküm yapılabilir¹⁰¹. Katı, gevrek yapıda parlak kurşuni renge sahip bir elementtir. Tek başına bulunan bir element değildir. Arsenik ve bileşikleri zehirli olup bulunduğu alanlar kısıtlıdır¹⁰². Çekiçle dövüldüğünde ve ısıtıldığında etrafa sarımsak gibi koku yaymaktadır¹⁰³. Genellikle volkanik kayalar ve termal sularla ilgili olarak, antimon ve kurşun cevherleriyle birlikte bulunmaktadır. Arseniğin yaygın olarak bulunduğu cevherler; realgar (AsS) kırmızı zırnık, orpimet (As₂S₃) sarı zırnık, arsenopirit (FeAsS), arenolittir (As₂O₃)¹⁰⁴. Arseniğin fiziksel ve kimyasal özellikleri şekil-2’te gösterilmiştir.

Kimyasal Formülü:	↔	As	
Atom Numarası:	↔	33	
Yoğunluk:	↔	5,72 gr/cm ³	
Ergime Noktası:	↔	613 °C	
Kaynama Noktası:	↔	817 °C	
Kristal Yapısı:	↔	Trigonal	
Sertlik:	↔	3.5	

Şekil-2 Arseniğin fiziksel ve kimyasal özellikleri¹⁰⁵

İlk bakır alaşımı, arsenikli bakır alaşımıdır. Ancak bakır ve kalay alaşımı olan bronz daha çok tercih edilip, kullanılmıştır. Bakır ve kalay alaşımları, bakır cevherleriyle birlikte kasiterit cevherinin birlikte artırılmasıyla elde edilmiştir.

⁹⁸ Knotkova-Kreislova 2007, 108-109.

⁹⁹ Scott 2002, 3.

¹⁰⁰ Tekin 2015, 135-136.

¹⁰¹ Özbal 2013, 32.

¹⁰² Fidan 2016, 53.

¹⁰³ <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/Arsenik> (19.05.2016).

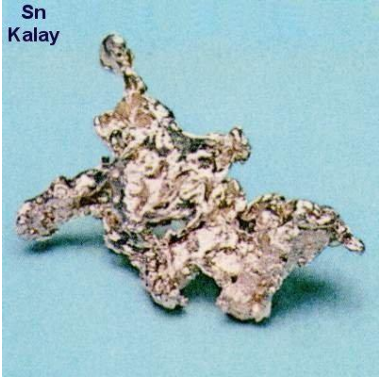
¹⁰⁴ Tekin 2015, 124.

¹⁰⁵ Tekin 2015, 123; <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/Arsenik> (19.05.2017).

Cevherlerden madenlerin metalik hale getirilmesinin tam olarak bilinmemesinden dolayı uzun zaman kontrollü bronz nesnelere yapılamamıştır¹⁰⁶.

Bronz döküm için çok elverişli ve ideal olduğundan dolayı ergiyik hale geldiğinde hava kabarcıkları oluşturmadığından kalıbın en ince detayına kadar nüfus edebilmiştir. Bronz dökümden sonra kalıp içinde soğurken hacim kaybedip büzülmesinden dolayı kalıptan çıkarılması daha kolay olmuştur¹⁰⁷.

Kalay, bronz içerisinde %3-40 oranı arasında üretilmek istenen nesnenin niteliğine ve amacına göre kullanılmıştır. Gümüş beyazlığında, yumuşak, zehirsiz sünek ve dövülerek şekillendirilebilen bir madendir¹⁰⁸. En kaliteli bronz yapımı için kalay oranı %13,2 dir¹⁰⁹. Yüksek korozyon dayanımı ile değişik metallerle alaşım oluşturabildiği için yaygın olarak kullanılmıştır. Kalay kasiterit cevherinden (SnO_2) elde edilmektedir¹¹⁰. “Kasiterit doğada alüvyon yataklarında ve damarlar şeklinde maden yataklarında bulunmaktadır”¹¹¹. Kalayın fiziksel ve kimyasal özellikleri şekil-3’de gösterilmiştir.

Kimyasal Formülü:	←→	Sn	
Atom Numarası:	←→	50	
Yoğunluk:	←→	7,30 gr/cm ³	
Ergime Noktası:	←→	232 °C	
Kaynama Noktası:	←→	270 °C	
Kristal Yapısı:	←→	Tetragonal	
Sertlik:	←→	5.0	

Şekil-3 Kalayın fiziksel ve kimyasal özellikleri¹¹²

İçerisindeki kalay oranının değişmesiyle farklı amaçlarda kullanılan bronzlar üretilmiştir. Bunlar;

¹⁰⁶ Erginsoy 2008, 977.

¹⁰⁷ Erginsoy 2008, 977.

¹⁰⁸ Savaş 2006, 9-12.

¹⁰⁹ Brown 1976, 26.

¹¹⁰ Gürü-Yalçın 2012, 179.

¹¹¹ Tekin 2015, 181.

¹¹² Gürü-Yalçın 2012, 179 ; <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kalay/>, (19.05.2017).

- 1- % 3-8 oranında kalay ile bakır alaşımlanarak elde edilen bronz, soğuk olarak şekillendirilebilmektedir. Madalya ve para üretiminde kullanılmıştır. Yıpranmaya karşı dayanıklı olan bu bronzlar parlaklığını korumaktadır. Ayrıca mücevhercilikte veya süslemede kullanılan çubuklar ve tellerin yapımında kullanılmışlardır¹¹³.
- 2- %8-12 oranında kalay ile bakır alaşımlanarak elde edilen bronzlar, deniz suyunun etkilerine veya belli kimyasal ortam koşullarına direnç sağlayabilecek mekanik parçalar, dişliler ve her türlü eşyanın üretiminde kullanılmışlardır¹¹⁴.
- 3- %13-18 oranında kalay bakır ile alaşımlanarak elde edilen bronzlar, sürtünmelere karşı çok dirençlidir. Makine parçaları ve musluk üretiminde kullanılmışlardır¹¹⁵.
- 4- %18-30 oranında kalay ile bakır alaşımlanarak elde edilen bronzlar, kolay ergidikleri için döküm işlerinde ve ayrıca iyi ses verdikleri için çan, gong, müzik aleti üretiminde kullanılmışlardır¹¹⁶.
- 5- %30'dan daha fazla kalay ile bakır alaşımlanarak elde edilen bronzlar, çok kırılğan olduklarından alaşıma kurşun eklenerek hem bronzun kırılğanlığı azaltılır, hem de ergimiş metal çok akıcı hale gelir, böylelikle ince detaylı döküm yapılabildiğinden mimari bronz olarak kullanılmışlardır¹¹⁷.
- 6- %30-40 oranında kalay ile bakır alaşımlanarak elde edilen bronzdan, sert ve kırılğan yapıda olan aynaların üretiminde kullanılmışlardır¹¹⁸.

Pirinç, renk özelliği altına çok benzediğinden keşfedildikten sonra yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. “*Pirinç, bakır ile çinkonun bir cevheri olan kalamın ile karıştırılarak elde edilmektedir*”¹¹⁹. Kalamın cevherinden, arıtma işlemi ileri metalürji bilgisi gerektirdiği için, pirinçten nesnelere üretimi diğer madenlere (altın, gümüş, bakır ve demir) göre daha geç zamanda başlamıştır¹²⁰. Sert ve sağlam bir mekanik özelliğe sahip olan pirinç, içindeki çinko oranı azaltıldığında; dövülgenlik özelliği artarak istenilen şekilde nesnelere üretimi gerçekleştirilebilir. Ancak pirinç

¹¹³ Savas 2006, 9.

¹¹⁴ Savas 2006, 10.

¹¹⁵ Uluengin 2006, 29.

¹¹⁶ Uluengin 2006, 29.

¹¹⁷ Uluengin 2006, 29.

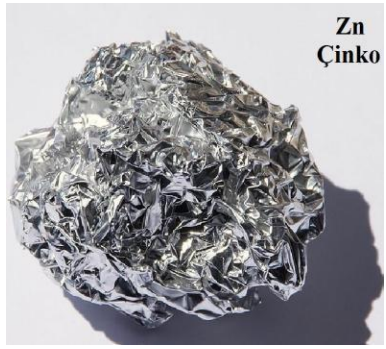
¹¹⁸ Savaş 2006, 10.

¹¹⁹ Tekin 2015, 137.

¹²⁰ Tekin 2015, 137.

alaşımı içindeki çinko oranı azaltıldığında, sağlamlığı ve parlaklığı da aynı oranda azalmaktadır¹²¹.

Çinko pirinç yapımında % 4 - 45 oranı arasında kullanılmıştır¹²². Mavi-beyaz renkte kırılmalı yapıya sahip bir elementtir¹²³. Çinko cevherleri bakır ve kurşun cevherleri ile birlikte magmatik kayalar ve karbonatlı kayaların içerisinde bulunmaktadır. Çinkonun yaygın olarak bulunduğu cevherler; Sfalerit ((Zn Fe)S), Kalamın (Zn (OH)2.Zn3Si2O7.H2O), Zinkit (ZnO), Vurzit sonit (ZnCO3) ve Hemimorfit (H2Zn2SiO5)'tir. Çinkonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Şekil-4'te gösterilmiştir¹²⁴.

Kimyasal Formülü:	←→	Zn	
Atom Numarası:	←→	30	
Yoğunluk:	←→	7,14 gr/cm3	
Ergime Noktası:	←→	420 °C	
Kaynama Noktası:	←→	907 °C	
Kristal Yapısı:	←→	Heksagonal	
Sertlik:	←→	2.5	

Şekil-4 Çinkonun fiziksel ve kimyasal özellikleri¹²⁵

Kurşun grimsi veya gümüşsü beyaz renkli, yumuşak olmasının yanında yoğunluğu çok yüksek bir metaldir. Korozyona karşı dayanımı oldukça yüksektir¹²⁶. Kurşun bakır alaşımlarında daha güzel renkte nesnelere üretmek amacıyla %3 - %18 oranlarında kullanılmıştır. Bakır alaşımında kurşun kullanılmasının diğer amacı ise alaşımı daha kolay eritilebilir, akıcı hale getirilmesini sağlamaktır. Ancak kurşun bakır alaşımı nesnelere, kolay kırılmalı özellik kazandırdığından dolayı silah vb. nesnelere

¹²¹ Tekin 2015, 137.

¹²² Uluengin 2006, 29.

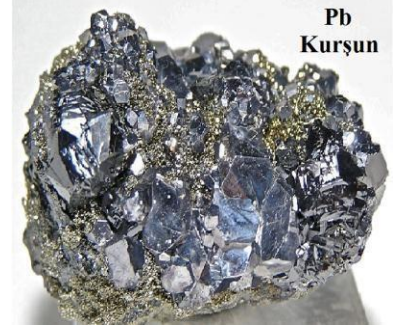
¹²³ Friese2012, 49.

¹²⁴ Greenwood-Ernshaw 1997, 1205.

¹²⁵ Tekin 2015, 150; <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/cinko> (19.05. 2017)

¹²⁶ Savaş 2006, 10.

yapımında kullanılmamıştır.¹²⁷ Kurşunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Şekil-5'te gösterilmiştir.

Kimyasal Formülü:	↔	Pb	
Atom Numarası:	↔	82	
Yoğunluk:	↔	11,35 gr/cm ³	
Ergime Noktası:	↔	327 °C	
Kaynama Noktası:	↔	1744 °C	
Kristal Yapısı:	↔	Kübik	
Sertlik:	↔	4.1	

Şekil-5 Kurşunun fiziksel ve kimyasal özellikleri¹²⁸

¹²⁷ Savaş 2006, 35.

¹²⁸ Greenwood-Ernshaw 1997, 372-373; <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kursun> (19.05.2017).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLARININ BOZULMALARI

Metaller, genellikle doğada oksidasyona uğramış cevher halinde bulunan maden minerallerinden artılarak elde edilmektedir¹²⁹. Bu nedenle metaller doğada bulunduğu kararlı mineral formuna geri dönme çabası içerisinde. Bu dönüşüm sürecinde metal yüzeyini örten toz mineral birikintileriyle kaplanarak, parlaklığını yitirerek bozulmaya uğramaktadırlar¹³⁰. Metallerin mineral formuna dönme isteği, yapısına ve bulunduğu ortam koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. “*Metaller, reaktivliklerini belirleyen elektromotor özellikleri ve etkileşim içinde oldukları unsurların özelliklerine bağlı olarak; ya denge reaksiyonuna ulaşarak korunmakta; ya da yüzlerce yıl devam eden süreçler sonunda tamamen mineral forma dönüşerek doğaya karışmaktadır*”¹³¹.

Bozulma bilimsel olarak bir malzemenin tasarlandığı işlevini yerine getirememesi olarak tanımlanabilir. Bozulma asıl olarak kimyasal bir değişimi gösterse de fiziksel de olabilmektedir. Metallerin kimyasal bozulması korozyon olarak tanımlanmaktadır¹³².

3.1 Korozyon

Korozyon, Latince “corrodere” kelimesinden gelmektedir. Yazılı kaynaklar tarihsel süreç içerisinde değerlendirildiğinde: Korozyon ile ilgili ilk yazılı tanımı Plato (M.Ö. 427-347) çalışmalarında, korozyonu metalden ayrılan toprağımsı bileşen olarak tarif etmiştir¹³³. Pliny, antik bronzlar üzerindeki gözlemlenen renkli korozyon oluşumunu, aerugo (bakır pası) olarak tanımlamıştır. Bunun yanı sıra Pliny, metali koruyan aerugo nobilis (asil korozyon) ve metali tahribata uğratan virus aerugo (yıkıcı korozyon) olarak korozyon ürünlerinin ayrımını yapmıştır¹³⁴. Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği (NACE), bakır ve bakır alaşımları üzerindeki korozyon ürünlerinin

¹²⁹ Wharton-Kökten Ersoy 2002, 2.

¹³⁰ Yüceil 2016, 42.

¹³¹ Yüceil 2016, 42.

¹³² Uluengin 2006, 14.

¹³³ İşdaş 2012, 45.

¹³⁴ Weil 2007, 61.

belirlenmesi ile ilgili Nisan 1959'da kapsamlı bir bilimsel çalışma yapıp yayınlamıştır¹³⁵.

Korozyon, metal ve alaşımlarının içinde buldukları çevrenin etkisiyle, kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler sonucunda fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin değişmesi sonucu uğradığı bozulma olarak tanımlanır¹³⁶.

Metaller atmosferik ve gömü koşullarında stabil durumda değildir. Bu yüzden metalin bulunduğu ortam koşulları ile oluşturduğu reaksiyonlar; metalin yapısında, görünüşünde ve özelliklerindeki değişime sebep olarak korozyon oluşumunu sağlamaktadır¹³⁷. Korozyon oluşumu sürecinde, metalin yapısına ve ortam koşullarına bağlı olarak gerçekleşen iyonik ve elektron transfer mekanizmaları, oluşan korozyon tabakasının pasif veya kararsız olup olmadığını belirlemektedir. Pürüzsüz yoğun tabakalar veya hacimli bozulmuş korozyon tabakaları oluşabilmektedir. Korozyon tabakaları, metal nesnelere kaplayarak koruyabileceği gibi, yıkıcı ve yok edici nitelikte de olabilmektedir¹³⁸.

Bakır ve alaşımlarının oluşturduğu korozyon ürünlerini tanımlamak için patina terimi kullanılmaktadır¹³⁹. Patina “*Korozyon sebebiyle metal (genellikle bronz) üzerinde oluşan yeşil renkli kabuklanma. Atmosfer etkileriyle meydana gelen ve objenin toprak, sualtı gibi ortamlarda gömülü kalmasıyla hızlanabilen ya da şekillenen kimyasal reaksiyonlar neticesinde yüzeyde oluşan renk değişimi*” olarak tanımlanmaktadır¹⁴⁰.

3.2 Korozyon Oluşum Süreci

Korozyon, metal ve alaşımlarının yapısına, bulunduğu ortam koşullarındaki meydana gelen reaksiyonlara bağlı olarak oluşan, bozulma sürecidir¹⁴¹. Korozyonun oluşumunu sağlayan tepkimelerin türü; kimyasal ve elektrokimyasal olarak değerlendirilmektedir. Kimyasal korozyon (kuru korozyon): Metal ve alaşımlarının gaz ortam koşullarında oluşturduğu reaksiyonlar sonucunda oluşan bozulma sürecidir.

¹³⁵ Nilsen 1977, 22.

¹³⁶ Doruk 2014, 1.

¹³⁷ <http://www.englishheritage.org.uk/content/learn/conservation/2543455/2543024/guidelines-for-the-storage-and-display-of-archaeological-metalwork.pdf> (10.09.2017).

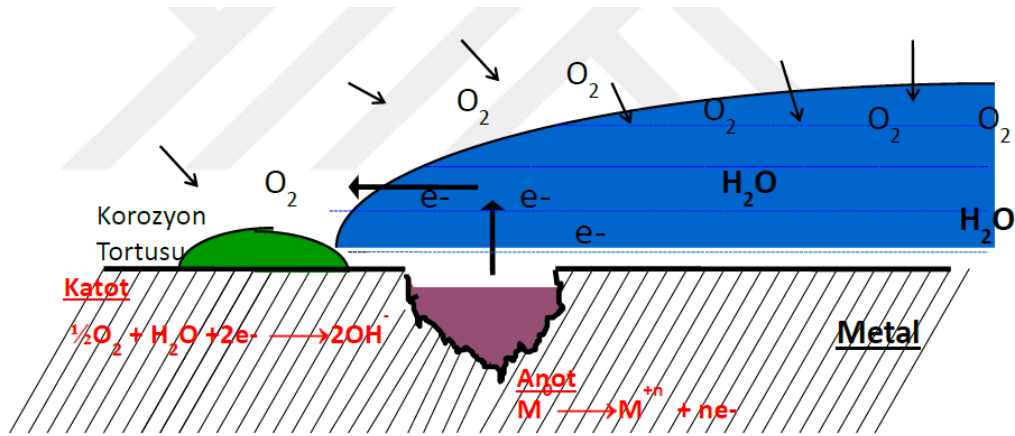
¹³⁸ Watkinson 2010, 3310.

¹³⁹ Chase 1991, 86.

¹⁴⁰ Chilvers 2004, 527.

¹⁴¹ İşdaş 2012, 45.

Elektrokimyasal korozyon (ıslak korozyon): Metal ve alaşımlarının sulu ortam koşullarında oluşturduğu reaksiyonlar sonucunda oluşan bozulma sürecidir¹⁴². Korozyon oluşumu anot ve katot bölgelerinde meydana geldiği için genellikle süreç elektrokimyasal açıdan değerlendirilmektedir¹⁴³. Metal ve alaşımlarında korozyon oluşumu için elektrik akımının olması gerekmektedir. Bu akımın meydana gelmesi için pozitif ve negatif yüklü iyonlar içeren elektrolitlerin olması gerekmektedir¹⁴⁴. Metalin yapısına veya elektrolitte bulunan farklılıklar sebebiyle potansiyel bir fark oluşabilir. Bunun sonucunda metal yüzeyinde anot ve katot bölgeleri oluşmaktadır. Anot ve katot bölgeleri arasındaki elektron akımı elektrolit aracılığıyla gerçekleşir. Meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonda anot(-) da metal kaybı olurken, katot (+) da metal kaybı olmaz¹⁴⁵. Anot ve katot tepkimeleri, Aşağıdaki şekilde detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil-6 Çukur oluşumu ve tepecik korozyonu¹⁴⁶

Anodik tepkime ile üretilen elektronlar katodik tepkime ile eş zamanlı olarak tüketilir (Şekil-6). Korozyon olayı metalin oksidasyonu ile anotta oluşur. Anotta metal elektron vererek çözünür, çukurlaşma ve tepecik şeklinde bozulma meydana gelir. Bu

¹⁴² Doruk 2014, 1.

¹⁴³ Scott 2002, 14.

¹⁴⁴ Üneri 1988, 293.


¹⁴⁵ Gürü – Yalçın 2012, 199-200.

¹⁴⁶ Yüceil 2016, 52.

bozulma sürecinde katotta tüketilen elektron sayısı anotta oluşan korozyon oranını belirlerken, elektron tüketme hızı ise korozyon hızını belirlemektedir¹⁴⁷.

Metaller içereğindeki elementlerin türüne bağlı olarak farklı şekilde anodik ve katodik davranış sergilemektedir. Bu davranışlar elementlerin elektrot potansiyellerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Elektrot potansiyelleri kuvvet serisi oluşturarak elementlerin anodik ve katodik davranışlarını belirlemektedir¹⁴⁸. Metallerin standart elektrot potansiyelleri Tablo-2 de gösterilmiştir¹⁴⁹.

Tablo-2 Metallerin standart elektrot potansiyelleri

	Metal	Elektrot Potansiyeli, V
Anot  Katot	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3 \bar{e}$	-1,66
	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2 \bar{e}$	-0,76
	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3 \bar{e}$	-0,74
	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \bar{e}$	-0,44
	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2 \bar{e}$	-0,25
	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2 \bar{e}$	-0,14
	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2 \bar{e}$	-0,13
	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2 \bar{e}$	0,00
	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \bar{e}$	0,34
	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \bar{e}$	0,80
	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{4+} + 4 \bar{e}$	1,20
	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3 \bar{e}$	1,50

Yukarıdaki tabloda metallerin standart elektrot potansiyelleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu tabloya göre iki metalden hangisinin anot hangisinin katod davranış gösterebileceği elektrot potansiyeline göre tespit edilebilmektedir. Örneğin: Cu-Zn alaşımının oluşturacağı reaksiyonda Cu katot davranış sergileyerek korunurken, Zn anot davranış sergileyerek korozyona uğramaktadır.

¹⁴⁷ Yüceil 2016, 42.

¹⁴⁸ Onaran 1995, 296.

¹⁴⁹ Onaran 1995, 296.

3.3 Korozyon Oluşumunun Nedenleri

Korozyon, metal eserin kullanım ömrü sürecinde, gömü ortamında kaldığı süreçte ve kazıdan çıkartıldıktan sonraki süreçte oluşabilmektedir. Metalin yapısına ve bulunduğu ortam koşullarına bağlı olarak korozyon oluşumu farklılık göstermektedir. Korozyon etkisi küçük bir yüzey değişiminden metalin tamamen kaybına kadar değişebilmektedir.

Korozyon oluşumunun kaynağı farklı elektrokimyasal davranışları sebebiyle birbirlerinden farklılaşarak anot ve katot tepkimeleri meydana getiren genellikle mikro boyutlu birbirine yakın alanlardır. Bu farklılaşmaya sebep olan nedenleri iç nedenler ve dış nedenler olarak iki başlık altında inceleyebiliriz¹⁵⁰.

İç Nedenler

Bakır ve alaşımlarının yapısı, alaşım ve element oranları, yapım tekniği metallerin bozulmasında iç nedenler olarak değerlendirilebilir.

“Metaller katı halde iken kristal yapıdadır. Metal atomları bu kristal yapısı içinde düzgün olarak dağılmaktadır”¹⁵¹. Metallerin kristal yapıları korozyon oluşumuna sebep olmaktadır. Bakır ve alaşımlarının üretilmesi sürecinde ergitilerek soğumaya bırakılması sonucunda birbirine bitişik çekirdeklerden meydana gelen kristaller şeklinde katılaşmaktadırlar. Çok sayıda kristalin oluşturduğu taneler, sınır çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır. Taneler arasında oluşan dar alanlarda kristal yapı düzensiz bir yapıya sahiptir. Bu alanlar bakır ve alaşımlarının korozyona en dayanıksız olduğu yerlerdir. Taneler arasında bulunan herhangi bir safsızlık, alaşımların oranlarının fazla veya eksik bulunması da korozyon oluşumuna sebep olmaktadır¹⁵².

Homojen alaşımlar fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonu değişmediği/düzenli olduğu için tek fazlı yapıdan oluşmaktadır. Buna bağlı olarak homojen alaşımlar korozyon oluşumuna karşı dirençlidir. Homojen yapıda olmayan alaşımlar da ise düzensiz tane yapılarının oluşmasından dolayı, alaşımlarda farklı

¹⁵⁰ Doruk 2014, 10.

¹⁵¹ Gürü-Yalçın 2012, 208

¹⁵² Gürü-Yalçın 2012, 208

fazların; yani çok fazlı yapıda alaşımların oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden homojen olmayan alaşımlar korozyon oluşumuna karşı dirençli değildir¹⁵³.

Bakır alaşımlarının element oranları, iyonik ve elektron transfer mekanizmalarına bağlı olarak korozyon sürecinde, oluşan korozyon ürünlerinin pasif veya kararsız olup olmadığını belirlemektedir¹⁵⁴.

Pirinç içerisinde çinko oranı ne kadar artarsa alaşımın korozyona dayanıklılığı o kadar azalmaktadır. Pirinç içerisinde bulunan çinkonun korozyona uğrayıp çözünerek uzaklaşması sonucunda alaşımın yapısında gözeneklilik oluşularak bozulmaktadır. Pirinç alaşımı içerisinde çinko %15 altında bulunuyorsa eser korozyona karşı daha dirençlidir. Pirinç alaşımı içerisine %1 oranında katılan kalay mekanik dayanımını ve korozyona karşı dayanımını arttırmaktadır¹⁵⁵.

Bronz içerisindeki kalay oranı ne kadar artarsa alaşımın korozyona dayanıklılığı o kadar artmaktadır. Ancak alaşım sert ve kırılğan bir yapıya sahip olmaktadır¹⁵⁶. Bronz içerisinde bulunan kalay, korozyon oluşum sürecindeki reaksiyonlar sonucunda alaşımın yüzeyini homojen bir tabaka halinde örtmektedir. Bu tabaka stabil ve homojen olduğu için eserin yapısını muhafaza etmesinin yanı sıra çevresel koşullara karşı korunmasını da sağlamaktadır¹⁵⁷.

Bakır ve alaşımlarının yapım tekniğinden kaynaklı bozulma nedenleri¹⁵⁸:

1. Metal eserlerin üretiminde kullanılan tekniklerin doğru bir şekilde yapılmaması
2. Dökümde temiz potaların kullanılmaması
3. Metalin ergime seviyesine tam ulaşılmaması sonucu hava boşluklarının kalması
4. Yanlış tasarım ve birleştirme hataları
5. Homojen yapıda olmaması

DıĞ Nedenler

Bakır ve alaşımlarının bozulmalarında, korozyon oluşum sürecinde buldukları çevre koşulları etkili olmaktadır.

¹⁵³ <https://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/alasimlarin-yapisi/> (15.07.2018)

¹⁵⁴ Watkinson 2010, 3310.

¹⁵⁵ Gürü-Yalçın 2012, 211-212.

¹⁵⁶ Onaran 1995, 325.

¹⁵⁷ Scott 2002, 11.

¹⁵⁸ M.E.B 2006, 3 ; Uluengin 2006, 16, 18.

Gömu koşullarında bakır ve alaşımları toprak mineralleri, kuvars tanecikleri, organik kalıntılar ve benzeri etkenlere bağlı olarak korozyon ürünleri oluşmaktadır. Topraktaki nem içeriği, hava boşluk yüzdesi, pH, hacim yoğunluğu, klorür iyonu, toprağa bağlı havalandırma derecesi, kalsiyum içeriği, bikarbonat-iyon aktivitesi, katyon değişim kapasitesi gibi parametreler korozyon oluşum sürecini etkilemektedir¹⁵⁹.

Bakır ve alaşımları gömü ortamında havalandırılmış ve nemli bir toprakta döngüsel olarak su ve oksijene maruz kalmaktadır. Bunun sonucunda oluşan reaksiyonlar, korozyon oluşmasına sebep olmaktadır. Bol miktarda kil, çakıl bakımından zengin kaba taneli ve ince taneli tortu şeklindeki toprak yapılarında hava ve nem ile temas çok az olmaktadır. Bu tür toprak yapıları bakır ve alaşımları için dengeli bir ortam sunarak, toprağın daha az zarar verici nitelikte olmasını sağlamaktadır. Asit ve tuzlar bakımından zengin toprak tabakaları metallerin aşınması üzerinde etkili olmaktadır. Topraktaki düşük pH değerleri dış korozyon katmanlarının (oksitler ve hidroksitler) termodinamik istikrarsızlığına neden olmaktadır¹⁶⁰. Farklı gömü koşullarında metal eserlerin korunmuşluk durumuyla ilgili bilgi Tablo-3 de gösterilmiştir.

Tablo-3 Metal eserlerin bulunduğu farklı gömü koşullarından örnekler¹⁶¹

GÖMÜ ORTAMI	ORTAM ęARTI	KORUNMUğLUK DURMU
Çok Asitli pH 5,5 veya aşağısı Oksik	Step iklim, bozkır ve kurak alanlar	Metal eserler bu ortam şartlarında yüksek oranda korozyona uğrarlar.
Asidik ve doğal ortam arası pH 5.5-7,0 Oksik	Killi arazi ve ovalar	Metal eserler iyi korunmuşluk durumuna sahip olarak ele geçebilir.
Bazik ortam pH 7,0 ve yukarısı	Kireçtaşı ve kalkerli ortamlar	Metal eserler iyi korunmuş olarak ele geçebilir.
Asitik, nemli ve anoksik ortam	Nemli araziler ve bazı kapalı şehir ortamları	Bazı durumlarda iyi korunmuş olarak ele geçebilirler.

¹⁵⁹ Scott 2002, 35.

¹⁶⁰ Reale et al. 2010, 1-2.

¹⁶¹ [https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/investigative-conservation/investigative-conservation.pdf/\(10.02.2018\)](https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/investigative-conservation/investigative-conservation.pdf/(10.02.2018)).

Atmosferik koşullar bakır ve alaşımlarının korozyon oluşumuna neden olmaktadır. Atmosferde bulunan zararlı gazların yağmur ve nemle birlikte oluşturduğu asitler bakır ve alaşımları ile reaksiyona girerek korozyon oluşumunu sağlamaktadır¹⁶². Atmosferdeki SO₂ ve NO₂ gazlarının sebep olduğu asit yağmurları korozyon oluşumunu sağlayan reaksiyonları hızlandırmaktadır. Duman ve toz benzeri kirleticilerle birlikte asit yağmurlarının bakır ve alaşımlarında zarar verici etkisi daha çok artmaktadır¹⁶³. Atmosferde oluşan bu zararlı koşullarda, bakır ve alaşımları koruyucu korozyon tabakası oluşturamamakta ve daha çok tahrip olmaktadır¹⁶⁴.

*“Ozonun (O₃) 1 mg/L değerini aşması bakır alaşımlarının korozyon hızını 5-10 kat artırdığı bildirilmiştir. Bakır ve alaşımları üzerinde yapılan başka bir çalışmada, ozonun 0.05 mg/L varlığının ise metal yüzeyinde koruyucu oksit tabaka oluşumunu katalizleyerek, korozyona karşı direnci artırdığı bulunmuştur”*¹⁶⁵.

Sıcaklık, korozyon oluşum sürecinde meydana gelen reaksiyonlardaki iyon hareketliliğini etkilemektedir. Ortamdaki hava sıcaklığının 10 °C derecelik artışı reaksiyon hızını iki kat arttırmaktadır. Atmosferde gece ve gündüz hava sıcaklıkları sürekli değişmektedir. Bu yüzden stabil bir ortam olmadığı için ortamdaki koşullara bağlı olarak olarak korozyon reaksiyonlarının oluşumu değişim göstererek gerçekleşmektedir¹⁶⁶.

Bağıl nem (RH) bakır ve alaşımlarının birçok korozyon reaksiyonunun oluşmasının nedenlerinden biridir. Havanın tutabileceği su buharı miktarı bağıl nem olarak ifade edilmektedir. Bağıl nem miktarı ısı koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Sıcak hava, soğuk havadan daha fazla su tutmaktadır. Bu nedenle kapalı bir ortamda sıcaklık düştükçe bağıl nem artmaktadır¹⁶⁷.

Bağıl nem, korozyon reaksiyonlarının oluşmasında önemlidir. Çünkü reaksiyonların oluşumu iyonların hareketini gerektirmektedir. Bağıl nem, elektrolit, iletken bir ortam oluşmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda iyonların serbestçe hareket etmesine izin vererek reaksiyon hızının artmasıyla korozyon oluşumuna neden

¹⁶² Marabelli 2007, 13.

¹⁶³ Tansuğ 2016, 402.

¹⁶⁴ Paola 2007, 22.

¹⁶⁵ Tansuğ 2016, 403.

¹⁶⁶ Tansuğ 2016, 404

¹⁶⁷ <http://www.englishheritage.org.uk/content/learn/conservation/2543455/2543024/guidelines-for-the-storage-and-display-of-archaeological-metalwork.pdf> (10.09.2017).

olmaktadır. Havadaki bağıl nem oranı yüksek olduğunda korozyon reaksiyon hızı artmaktadır. Ancak bağıl nem oranı düşük olduğunda korozyon reaksiyon hızı yavaşlamakta veya durmaktadır¹⁶⁸.

Bağıl nemin korozyon oluşumu üzerindeki etkisini anlamak amacıyla, Scott 1990, Organ 1963 ve Papapelekanos 2010 yıllarında deneysel çalışmalar yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda farklı seviyelerde bağıl nem ortam koşulları oluşturularak bakır üzerindeki korozyon oluşumu gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemler neticesinde bakırın maruz kaldığı nemli ortam koşullarında, şu sonuçlar ortaya çıkmıştır¹⁶⁹:

% 42 üzerindeki bağıl nemin kesinlikle riskli olduğu anlaşılmaktadır.

% 68 üzerindeki bağıl nem ortamında bakır klorürler suyu çektiği için korozyon oluşumu çok hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir.

Korozyon oluşumunun en önemli nedenlerinden biride insanların sebep olduğu etkiler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Arkeolojik alanlarda, yapılan kazılarda bakır ve alaşımlarından üretilmiş metal eserler ile karşılaşılabilir. Kazı esnasında ortaya çıkan eserin uygun tekniklerle çıkarılmaması, kaldırma ve taşınmasının doğru bir şekilde yapılmaması bozulmalara sebep olmaktadır. Metal eserlerin topraktan çıkarıldıktan sonra kapalı torbalara veya hava almayan kaplara yerleştirilmesi, nemin içeride yoğunlaşmasına ve daha ileri korozyon oluşumuna sebep olmaktadır¹⁷⁰.

Bakır ve alaşımı eserlerin restorasyon ve konservasyon uygulamalarının bilinçsiz ve yanlış bir şekilde yapılması ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Eserlerin daha fazla tahribata uğramasını, korozyon hızını ve etkisini arttırmaktadır. Mekanik ve kimyasal temizlik uygulamaları sürecinde yapılan yanlış müdahaleler, tahribat oluşumuna sebep olarak esere daha fazla zarar vermektedir.

¹⁶⁸ <http://www.englishheritage.org.uk/content/learn/conservation/2543455/2543024/guidelines-for-the-storage-and-display-of-archaeological-metalwork.pdf> (10.09.2017).

¹⁶⁹ <http://www.englishheritage.org.uk/content/learn/conservation/2543455/2543024/guidelines-for-the-storage-and-display-of-archaeological-metalwork.pdf> (10.09.2017).

¹⁷⁰ Wharton-Ersoy 2002, 2.

3.4 Bakır ve Bakır Alaşımlarının Korozyon Ürünleri

Metal eserlerin üzerinde, yapım tekniğinden, maruz kaldığı atmosferik koşullardan veya gömü koşullarından kaynaklanan etkenlerden dolayı oluşan bozulmalar sonucu korozyon ürünleri oluşmaktadır¹⁷¹. Bakır ve bakır alaşımlarının bozulma süreçlerinde meydana gelen korozyon ürünlerinin sınıflandırılması Tablo-4 de gösterilmiştir.

Tablo-4 Bakır ve bakır alaşımlarının korozyon ürünleri¹⁷²

Korozyon Türü	Korozyon Ürünü	Kimyasal Formülü	Korozyon Rengi
Oksitler ve Hidroksitler	Kuprit	Cu_2O	Red
	Tenorit	CuO	Black
	Spertiniit	$Cu(OH)_2$	Light Blue
	Kasiterit	SnO_2	Brown
	Hematit	Fe_2O_3	Dark Red
	Zinkit	ZnO	Brown
Karbonatlar	Malahit	$Cu_2(OH)_2CO_3$	Green
	Azurit	$Cu_2(CO_3)_2(OH)_2 + H_2O$	Blue
	Chalconatronite	$Na_2Cu(CO_3)_2 \cdot 3H_2O$	Light Blue
Bakır Klorürler	Nantokit	$CuCl$	Green
	Atakamit	$Cu_2(OH)_3Cl$	Green
	Paratakamit	$(Cu, Zn, Ni, Co)_2Cl(OH)_3$	Green
	Klinoatakamit	$Cu_2(OH)_3Cl$	Green
Bakır sülfatlar	Kalkantit	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Blue
	Brokhantit	$Cu_4SO_4(OH)_6$	Green
	Antlerit	$Cu_3SO_4(OH)_4$	Green
	Posnjakite	$Cu_4SO_4(OH)_6 \cdot H_2O$	Green
	Langit	$Cu_4(SO_4)(OH)_6 \cdot 2H_2O$	Green
Bakır Sülfürler	Kalkosit	Cu_2S	Black
	Kalkopirit	$CuFeS_2$	Olive
	Kovellit	CuS	Black
Bakır Fosfatlar ve Bakır Nitratlar	Kornitit	$Cu_3(PO_4)(OH)$	Light Blue
	Libethenit	$Cu_2(PO_4)(OH)$	Olive
	Gerhardit	$Cu(NO_3)(OH)_3$	Green

¹⁷¹ Scott 2002, 78.

¹⁷² Scott 2002, 82, 102, 123, 148, 227, 242, 251, 253; Rull-Perez 2007, 125, 132, 134, 135; Artioli 2010, 324.

Korozyon ürünleri Tablo-4 de gruplar halinde incelenmiştir. Buna göre korozyon ürünlerinin oluşumu, fiziksel ve kimyasal özellikleri gruplandırılarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

3.4.1 Oksitler ve Hidroksitler

Oksitler ve hidroksitler, metallerin oksijen ve hidrojen ile yaptıkları bileşikler olarak adlandırılır¹⁷³. Oksit (O^-), metalde atomlarının ortamdaki oksijen molekülleri ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşan oksidasyon tabakasıdır. Oksidasyon sürecinde; oksijen atomları metalin içine metal atomları ise metalin dışarısına doğru hareket eder, bu harekete bağlı olarak oksitlerin yapısı oluşmaktadır¹⁷⁴.

Bakır ve bakır alaşımı eserlerin bozulma sürecinde oluşan ilk korozyon tabakası baskınlık özelliğinden dolayı kuprittir (Cu_2O). Klor (Cl) gibi en korozif etkenlerin varlığında bile genellikle ilk tabakada kuprit oluşmaktadır¹⁷⁵. Kuprit tipik olarak koyu kırmızıdan- turuncu kırmızıya kadar değişen renklerde oluşmaktadır. Eğer kristal yapısı çok inceyse portakal sarısı renginde olabilmektedir. Aslında kuprit içindeki safsızlıklar, tam oransızlıklar ve partikül boyuna bağlı olarak değişik renklerde (sarı, turuncu, kırmızı yada koyu kahverengi) oluşabilmektedir. Kuprit suda çözünemeyen bir korozyon ürünüdür. Kubik şeklinde kristal formu oluşturarak alaşımların yüzeyinde korozyon ürünü oluşturmaktadır¹⁷⁶. Kuprit olduğu objenin yüzeyinde epitaksiyal bir ilişki içinde gelişir. Bu gelişim sürecinde oluşturduğu katman bakır alaşımlı objenin korunmasına yardımcı olmaktadır¹⁷⁷.

Bakırın daha az yaygın oksiti tenorittir (CuO). Genellikle soluk siyah renktedir ve suda çözünmez¹⁷⁸. Yüksek ısı koşullarında bakır bileşenlerinin Karbondioksit (CO_2) veya Karbonat (CO_3) iyonlarının etkilerine bağlı olarak tenorit oluşmaktadır¹⁷⁹. Tenorit monoklinik şeklinde kristal formu oluşturarak objelerin yüzeyinde birikinti olarak

¹⁷³ Kumbasar-Aykol 1993, 291.

¹⁷⁴ Scott 2002, 82.

¹⁷⁵ Fink-Polushkin 1936, 112.

¹⁷⁶ Scott 2002, 82.

¹⁷⁷ Chase 1991, 98.

¹⁷⁸ Scott 2002, 95.

¹⁷⁹ Yüceil 2017, 61.

görülmektedir. Bakır ve tenorit arasında oluşan katmanın kristal kafeslerinin farklı olmasından dolayı objenin yapısını korumayı zorlaştırmaktadır¹⁸⁰.

Bakır alaşımlarının içerisinde bulunan, kalay, çinko, arsenik ve kurşunun korozyon ürünlerinin oluşumunda davranışları çok önemlidir. Ancak bu davranışların çok iyi bilindikleri söylenemez¹⁸¹. Alaşım yapan elementler bakırın davranışına etkide bulunarak korozyon ürünleri oluşmaktadır. Örneğin: kalay farklı kristalleşme derecesine sahip oksitlerin formasyonuna bağlı olarak dış korozyon tabakalarında kalay zenginleşmesi sonucu kasiterit (SnO_2) oluşumuna sebep olmaktadır. Kasiterit tetragonal kristal formunda olup, kahverengi siyah veya kırmızımsı kahverengi renklerinde bronz eserler yüzeyinde görülebilmektedir¹⁸². Kasiterit bronz eserlerin yüzeyinde genellikle koruyucu özellikte düzgün su patinası olarak bilinen, parlak yüzey oluşumu sağlayan bir korozyon tabakası oluşturmaktadır¹⁸³.

Çinko içeren pirinç kalay içeren bronz ile kıyaslandığında, bronz nispeten pirinç kararsız hale gelebilmektedir. Bu süreçte çinkonun alaşımdan çözünmesi sonucunda obje üzerinde delikler ve yüzeyinde uniform olmayan korozyon ürünü zinkit (ZnO) oluşmaktadır¹⁸⁴.

$(\text{OH})^-$ içeren hidroksitler yapısal olarak oksitlerden farklıdır. Hidroksitler ayrışma ve bozulma ürünlerini meydana getirmektedirler. Bakır ve bakır alaşımlarında hidroksit oluşumu sürecinde spertiniit $\text{Cu}(\text{OH})_2$ bakır hidroksit oluşmaktadır. Spertiniit kararlı mineral fazda nadiren görülmektedir. Korozyon sürecinde oluşan geçiş ara ürünüdür¹⁸⁵. Genellikle kristal yapısı amorfur ve zayıf özelliktedir. Camgöbeği mavisi rengindedir ve nispeten kolaylıkla diğer bileşiklere dönüşmektedir. Spertinit gemi batıklarındaki alaşımların korozyon ürünü olarak saptanmıştır. Kuruduğu zaman jel benzerinde çöküntü oluşturarak atakamite dönüşmektedir¹⁸⁶.

¹⁸⁰ Scott2002, 95.

¹⁸¹ Scott 2002, 11.

¹⁸² Kumbasar-Aykol 1993, 323-324.

¹⁸³ Schwizer, 1991, 33-34

¹⁸⁴ Rull-Perez 2007, 125.

¹⁸⁵ Scott 2002, 81.

¹⁸⁶ Scott 2002, 98.

3.4.2 Karbonatlar

Karbonatlar $(CO_3)^{-2}$ anyonik gruplarla aynı büyüklükte kationların birleşmesi sonucunda meydana gelmektedirler. *Bu kationlar Mg, Fe, Zn, Ca, Sr, Pb, Ba ve Cu, Zn, Pb v.b.dirler. Ayrıca yapıya $(OH)^{-}$, F, Cl, $(PO_4)^{-3}$ veya $(SO_4)^{-2}$ da girerek değişik bileşikler oluşmaktadır*¹⁸⁷.

Bakır karbonatların korozyon ürünleri genellikle malahit ($CuCO_3.Cu(OH)_2$) ve azurit ($2CuCO_3.Cu(OH)_2$) in oluşturduğu patina tabakalarıdır. Malahit ve azurit gömü koşullarında toprak içinde objelerin üzerinde patinada birincil bileşen olarak oluşabilmektedir¹⁸⁸. Malahit ve azurit bakır alaşımlı eserlerin gömü koşullarında yer altı suları ile veya yüzeyde yoğunlaşarak karbondioksitle (CO_2) yüklenen sularla temasa girdiğinde korozyon ürünü olarak ortaya çıkabilmektedir. Açık hava veya deniz gömülerinde oluşan bu korozyon ürünleri küçük fazlarda görülebilmektedir¹⁸⁹.

Malahit, genellikle gömü koşullarında yaygın olarak objelerin yüzeyinde önemli bir bileşen haline gelebilmektedir. Atmosferik koşullara maruz kalan eserlerin yüzeyinde az miktarda bulunmaktadır¹⁹⁰. Gömü koşullarında eserlerin üzerinde oluşan ilk tabaka kuprittir. Malahitte bunun üzerinde uniform şekilde gelişim gösteren yeşil patina tabakası oluşturmaktadır. Metalin kupritten malahite geçişi doğal bir oluşumdur. Laboratuvar ortamlarında tekrarlanması çok zordur. Bu yüzden malahit tabakasının bu doğal oluşumu eserin orijinal olduğunun göstergesidir¹⁹¹.

Azurit, korozyon ürünü olarak monoklinik sistemde kristal formunda olup mavi renge patina tabakası oluşturmaktadır. Azurit nadiren koherent patina oluşturur ve malahitten daha az yaygındır¹⁹². Korozyon ürünlerinde azurit genellikle malahit ve kupritle ilintilendirilir. Azurit karbonatlı suların diğer bakır minerallerinin üzerine etkimesi veya bakır sülfat ve bakır klorür çözeltilerinin kireç taşı veya kalsitle tepkimesi sonucu oluşabilmektedir¹⁹³.

¹⁸⁷ Kumbasar-Aykol 1993, 323-324.

¹⁸⁸ Scott 2002, 100.

¹⁸⁹ Scott 2002, 106.

¹⁹⁰ Scott 2002, 106.

¹⁹¹ Scott 2002, 106

¹⁹² Scott 2002, 108.

¹⁹³ Scott 2002, 108.

Azurit malahitten daha az kararlıdır. Nem varlığında karbondioksitin ortamda bulunmadığı durumlarda azurit malahite dönüşebilmektedir¹⁹⁴. Azuritin malahite dönüşmesi alkali ortamda sıcaklık artmasıyla hızlandırılabilir¹⁹⁵.

Azurit oluşumu objenin genellikle çözünmeden kaynaklanan yüksek hidrojen karbonat (HCO_3) aktivitesinin varlığında bozulmaya uğradığını göstermektedir¹⁹⁶.

Karbon dioksit bakımından zengin su ile kalsiyum karbonatın, bakır alaşımında bulunan kurşun ile tepkimeye girmesi sonucunda Serusit (PbCO_3) oluşmaktadır¹⁹⁷. Serusit ortorombik kristal formunda olup beyaz, gri, siyah ve yeşil renge olabilmektedir¹⁹⁸.

3.4.3 Bakır Klorürler

Bakır alaşımlarının kararlılığını zorlayan en önemli etkenlerden biri klorürlerdir. Klorürlerin metal yüzeyinde korozyon ürünü olarak bulunması, objenin kararlılığında etkileyebilir. Bronzların yavaş ve progresif korozyonu olarak bilinen bronz kanseri klor iyonlarının varlığı sonucunda gerçekleşmektedir¹⁹⁹. En önemli bakır klorürler: nantokit (CuCl) ve bakır trihidroklorür: atakamit, paratakamit, klinoatakamit ve botallakit olup bunların hepsi $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ in izomeridir²⁰⁰. Bakır trihidroklorürler asıl korozyon ürünü veya dönüşüm ürünü olarak oluşmaktadır. Ancak botallakit nadiren oluşmaktadır. Anarakit $(\text{Cu, Zn})_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ paratakamitin çinkolusu olarak kabul edilmektedir ve zincian paratakamit olarak adlandırılır²⁰¹.

Bronz hastalığı serbest Cl^- iyonlarının Cu^+ ile oluşturduğu reaksiyon sonucu meydana gelen nantokit (CuCl) oluşumudur²⁰². Nantokit kubik kristal formunda olup gri ya da gri yeşil renge oluşan mumsu bir görünüme sahip korozyon ürünüdür²⁰³. Nantokit objenin progresif şekilde bozulmasını sağlamaktadır. Nantokit nem ile

¹⁹⁴ Ghoniem 2011,

¹⁹⁵ Scott 2002, 110.

¹⁹⁶ Ghoniem 2011,

¹⁹⁷ Ghoniem 2011,

¹⁹⁸ Duda; Rejil 1990, 198.

¹⁹⁹ file:///C:/Users/PETA/Downloads/BronzeDiseaseAnElectrochemicalExplanationICCMBulletin1981.pdf, (20.05.2018)

²⁰⁰ Scott 2002, 122.

²⁰¹ Scott, 2002, 123.

²⁰² Özen 1999, 178

²⁰³ Scott 2002, 123.

reaksiyona girinceye kadar pasif kalabilmektedir²⁰⁴. Ancak oksijen bu kararsız bileşiği bakır trihidroklorürlerden birine dönüşümünü sağlamaktadır. Bu süreç bileşiğin hacminin artmasına sebep olarak, objenin üzerinde fiziksel gerilim sonucunda çatlamlar veya kırılmalar meydana gelmektedir. Bu durum objenin yüzeyinde açık yeşil renginde tozumsu kasmalar şeklinde görülmektedir²⁰⁵.

Paratakamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) genellikle objenin yüzeyinde oluşan patinanın ikinci katmanında tozlu olarak bulunur. Paratakamit rombohedral kristal formunda olup açık yeşil renginde oluşmaktadır²⁰⁶. Oksijen seviyesi yüksek ve nemli ortamlarda nantokit (CuCl) paratakamite ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) dönüşmektedir. Ancak oksijenin bulunmadığı ya da az olduğu gömü koşullarında paratakamit oluşumu gerçekleşmez. Reaksiyon oluşmaya başlasa bile oksijen seviyesinin düşük olmasından dolayı, reaksiyon süreci yavaş ilerler ve oksijen bitince reaksiyon durur²⁰⁷.

Atakamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) bakır trihidroklorürlerin en yaygın izomerlerinden biridir. Paratakamit gibi patinanın ikinci katmanında oluşmaktadır. Atakamit ortorombik kristal formunda olup cam yeşili renginde oluşmaktadır²⁰⁸. Paratakamit atakamite benzemektedir fakat farklı yapıya sahiptir. Botallakit ve klinoatakamit atakamitin polimorfudur²⁰⁹.

3.4.4 Bakır Sülfatlar

Bakır alaşımlı eserlerin bulunduğu ortamdaki Sülfat (SO_4)⁻² iyonu, başlangıç korozyon tabakası kuprit' in, sülfat içeren bileşiklere dönüşmesine neden olmaktadır. Bazı bakır sülfatlar özellikle kentsel kirli atmosfere maruz kalan bakır alaşımlarının korozyon ürünleri olarak önemlidir²¹⁰. Açık havada bulunan bronz heykellerin stabil olan patinaları asitli yağmur veya sis tarafından çözülmeye başlayabilmektedir. Bu durumda bronz heykel üzerinde oluşan yeşil renkli korozyon çizgileri aslında bu heykelin çok düşük pH koşullarında artan bir hızla saldırıya uğradığını göstermektedir²¹¹. Sülfatlı bileşiklerin oluşturduğu en yaygın korozyon ürünü,

²⁰⁴ Rotaru 2010, 3.237.

²⁰⁵ Scott 2002, 123.

²⁰⁶ Scott 2002, 124.

²⁰⁷ Özen 1999, 179.

²⁰⁸ Scott 2002, 124.

²⁰⁹ Frost 2002, 1195.

²¹⁰ Lins-Power 1991, 119-120.

²¹¹ Scott 2002, 145-146.

brokchantit ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$), antlerite ($\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$), daha az yaygın olan posnjakit ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve langit'tir ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)²¹².

Brokchantit en stabil ve en yaygın korozyon ürünüdür. Patinada camsı yeşil renğinde olup monoklinik kristal formunda oluşmaktadır. pH seviyesi 4-6 arasında olduğunda stabildir. Ancak pH seviyesi 4'ün altına düştüğünde antlerite dönüşmektedir²¹³.

Antlerit camsı yeşil renğinde olup, ortorombik kristal formunda oluşmaktadır. Antlerit genellikle açık havaya maruz kalan bronzların korozyon kabuğunda var olduğu kabul edilmektedir. Çünkü yağmur suyu 20. yüzyıl ortalarından beri daha asidik hale gelmiştir. Yağmur sularının asidik özelliği bronz üzerinde oluşan koruyucu patinanın çözünmesine neden olarak, antlerit oluşumu için çevre koşullarını uygun hale getirmektedir²¹⁴.

Posnjakite ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) yaygın bir patina bileşeni değildir. Camsı yeşil veya koyu mavi renğinde monoklinik kristal formunda patinada oluşmaktadır. posnjakite genellikle atmosferik koşullara maruz kalan bakır alaşımli eserlerin üzerinde bulunmaktadır²¹⁵.

Gömü koşullarında sülfatlı bileşikler nadiren bulunmaktadır. Gömü koşullarında topraktaki bakterilerin varlığında²¹⁶ ya da kükürt içeren yer altı sularının toprakta bulunması durumunda bakır alaşımli objeler üzerinde sülfatlı bileşikler oluşabilmektedir²¹⁷. Gömü koşullarında sülfat bozulmasında genellikle bakır içeren çözeltiler ile kalsitin etkileşimi sonucunda malahit ortaya çıkmaktadır²¹⁸.

3.4.5 Bakır Sülfürler

Ortamda bulunan sülfür (S^{-2}) anyonunun aktivitesine bağlı olarak bakır alaşımli eserler üzerinde sülfür bileşikli korozyon ürünleri oluşmaktadır. Sülfürlerin korozyon

²¹² Frost 2002, 1196.

²¹³ Frost 2002, 1198.

²¹⁴ Scott 2002, 148-149.

²¹⁵ Scott 2002, 152.

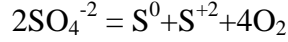
²¹⁶ Yokota 2003, 275.

²¹⁷ Ghoniem 2011, 106.

²¹⁸ Ghoniem 2011, 107.

oluşumu, az oksijenli sulu ortamlarda oluşan patinalardan, müze kirleticilerinin sebep olduğu lekeler kadar değişen bir korozyon yelpazesinde olabilmektedir²¹⁹.

Sülfid bileşikler genellikle deniz gömü koşullarında elde edilen bakır alaşımlı eserler üzerinde oluşabilmektedir. Bu ortamda kovellit (CuS) ve kalkosit (Cu₂S) bileşikler meydana gelebilmektedir. Gömü koşullarında sülfat redüksiyonu durumunda sülfat iyonları aşağıdaki reaksiyonu gerçekleştirir.



Birincil korozyon ürününün sülfür olması, organik maddece zengin bir toprakta sülfat indirgeyen bakterilerin varlığında anaerobik koşullara işaret etmektedir.

3.4.6 Bakır Fosfatlar ve Bakır Nitratlar

Bakır fosfatlar (PO₄)⁻³ genellikle toprağa gömülü kemik ve kuru iklim koşullarında meydana gelmektedir. Korozyon ürünü olarak nadir görülmektedir. En yaygın bulunan türü libetenittir. Libetenit Cu₂(PO₄)(OH) ortorombik kristal formunda, genellikle kremasyon gömülerinde camsı zeytin yeşili renge olup, açık tonlardan koyu tonlara değişen renklerde oluşmaktadır²²⁰.

Bakır fosfat kompleksinin korozyon ürünü olarak sampleit ve zapatalit tanımlanmıştır. Sampleit (NaCaCu₅(PO₄)₄Cl.5H₂O) ortorombik kristal formunda olup, sedefli açık mavi renge görünen kompleks bir bileşik oluşturmaktadır²²¹. Gömü koşullarında yer altı sularından kaynaklı yüksek tuz eriyikli ortamlarda bronz objelerin üzerinde sampleit' in oluştuğu görülmektedir. Zemin suyunda sodyum, klorür ve fosfat gibi karışık iyonların bulunması sampleit oluşumuna yol açmaktadır²²². Zapatalit (Cu₃Al₄(PO₄)₃(OH)₉.4H₂O) tetragonal kristal formunda olup, soluk mavi renge görünen kompleks bir bileşik oluşturmaktadır. Bileşende alüminyum bulunması kirletici olarak elementin bileşiğe giriş yaptığının göstergesidir. Çünkü antik bakır alaşımlarında alüminyum kullanılmamaktadır²²³.

²¹⁹ Scott 2002, 224.

²²⁰ Scott 2002, 240-241.

²²¹ Scott 2002, 241-242.

²²² Scott 2002, 243.

²²³ Scott 2002, 241-242.

Gözü koşullarında bakır alaşımı objelerin kemik gibi fosfor kaynakları ile birlikte bulunması bakır fosfatın objelerin üzerinde korozyon ürünü olarak oluşmasına veya organik malzeme üzerinde mavi-yeşil lekeler oluşmasına sebep olmaktadır²²⁴.

Bakır nitrat (NO₃)⁻ tuzları asidik özelliğinden dolayı suda çözüdüğü için korozyon ürünü olarak çok nadir görülmektedir. Ancak bazı nitratlar korozyon ürünü olarak görülebilmektedir²²⁵. Bakır alaşımlarında bulunan en yaygın bakır nitrat bileşigi masif kuprit depozitlerinde malahit ve atakamit ile ilintilendirilen bazı tuz gerhardittir. Gerhardit Cu₂(NO₃)(OH)₃ ortorombik kristal formunda, koyu yeşilden zümrüt yeşiline değışen renklerde oluşabilmektedir²²⁶.

3.4.7 Bakır Silikatlar

Silikatların (SiO₃) suda çözünlüğü çok düşüktür ve çok farklı koşullar altında korozyon ürünü olarak oluşmaktadır. Bakır silikatların oluşturduğu bileşiklerden krisokolla ((Cu, Al)₂H₂Si₂O₅(OH)₄.H₂O) korozyon ürünü olarak tanımlanmaktadır. Krisokolla monoklinik kristal formunda olup mavi-yeşil renklerinde oluşmaktadır²²⁷.

3.4.8 Bakırın Organik Tuzları

Formik asit, sitrik asit, asidik asit ve tartarik asit gibi organik bileşikler bakırın üzerinde tuz oluşumuna sebep olmaktadır. Bitkisel malzemeler, reçineler ve proteinler ile kompleks bileşikler oluşarak obje üzerinde bozulma ürünleri oluşturabilmektedirler. Bunları karakterize etmek oldukça zordur²²⁸.

Organik bakır tuzlarının en önemli grubu verdigris grubudur. Asıl olarak bakır asetat içeren, çok çeşitli karışımın bileşiminden oluşmaktadır. Kimyasal teknikler kullanılarak oluşturulan patinalamanın veya kötü depolama koşullarının oluşturduğu bozulma ürünü olarak bakır alaşımı objeler üzerinde görülebilmektedir²²⁹. Verdigris bileşikleri karboksilat tuzları karışımı, bazı bakır klorürler, karbonatlar ya da diğler bileşiklerden oluşabilmektedir. Verdigris bileşiklerinin karakterizasyonu Tablo-5' te gösterilmiştir.

²²⁴ Scott 2002, 243.

²²⁵ Scott2002, 250.

²²⁶ Scott 2002, 250-251.

²²⁷ Scott 2002, 252-253.

²²⁸ Scott 2002, 268.

²²⁹ Scott 2002, 299.

Tablo-5 Bakır asetatların karakteristik özellikleri²³⁰

Kimyasal ad	Formül	Renk
Bazik bakır (II) asetat (A)	$[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2]_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mavi
Bazik bakır (II) asetat (B)	$[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2]\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Soluk mavi
Bazik bakır (II) asetat (C)	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2[\text{Cu}(\text{OH})_2]_2$	Mavi
Bazik bakır (II) asetat (D)	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2[\text{Cu}(\text{OH})_2]_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeşil
Bazik bakır (II) asetat (H)	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2[\text{Cu}(\text{OH})_2]_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Mavi yeşil

Bakır format tuzları müze teşhir ve depolama koşullarında formik asit ve formaldehit kirleticilerinin etkilerine bağlı olarak patinada $\text{Cu}(\text{HCOO})(\text{OH})$ bileşikleri olarak bulunmaktadır²³¹. Ahşap malzemeden kaynaklanan format tuzları oluşabilmektedir. Teşhir amaçlı kullanılan ahşap malzemenin, ağacın türüne göre içeriğinde farklı konsantrasyonlarda format tuzlarını barındırdığı tespit edilmiştir. Format tuzları suda tamamen çözünmektedir. Bu durumda bakır ile formik asitin doğrudan tepkimesi sonucu bozulma ürünü oluşmaktadır. Bakır bir obje 200 ppm formik asitli, yüksek bağıl nemli bir ortama maruz bırakıldığı zaman, bakır obje üzerinde koyu yeşil renginde korozyon noktaları oluşmaya başlamaktadır²³².

Müzelerde yapılan araştırmalarda teşhir ve saklama dolaplarındaki asedik asit seviyesi obje üzerinde oluşan korozyon yüzdesi arasında doğrudan bir bağlantı bulunmaktadır. Bu yüzden müzelerde eserlerin daha iyi korunabilmesi için asedik asit gibi bozulmaya etki eden maddelerin konsantrasyon seviyeleri ppb seviyesinde olması gerekmektedir²³³.

²³⁰ Scott 2002, 270.

²³¹ Scott 2002, 269.

²³² Scott 2002, 299.

²³³ Scott 2002, 300.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL

Bu çalışma, Denizli Müze Müdürlüğü'ne bağlı yapılan kurtarma kazılarında ele geçen etütlük bakır ve bakır alaşımı eser örnekleri ile yapılmıştır. Farklı yapıda ve türde malzemeleri incelemek amacıyla; Denizli Müze Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen, farklı kurtarma kazılarında elde edilen etütlük bakır ve bakır alaşımı eserlerinden örnekler seçilmiştir. Seçilen eserler fotoğraflanarak belgelenmiş ve analiz yapılması amacıyla eserlerden numuneler alınmıştır. Numuneler ependorf tüpünün içine konularak saklanmış ve kodlanmıştır.



Şekil-7 Türkiye haritası üzerinde Denizli İlinin konumu²³⁴



Resim-1 Denizli Müze Müdürlüğü'nde numune alma çalışmaları 2017

²³⁴ <https://tr.wikipedia.org/wiki/Denizli>, (10.10.2017).

Örneklerin alındığı kurtarma kazıları ve yılları:

- 1- Kocadere Tümülüsü Kurtarma Kazısı / 2007
- 2- Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı / 2011
- 3- Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı / 2012
- 4- Kaklık Lahiti Kurtarma Kazısı / 2014

Aşağıdaki haritada Denizli Müze Müdürlüğü tarafından yukarıda yer alan yıllara göre yapılmış olan kurtarma kazı çalışmalarının, bulunduğu bölgenin konumları gösterilmiştir.



Şekil-8 Denizli Müze Müdürlüğü'ndeki kurtarma kazı çalışmalarının konumu

4.1 Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı

Kocadere Tonozlu Mezar, Denizli ili, Kocadere köyü, Kösedüzü mevkinde bulunmaktadır. Kocadere Tonozlu Mezar'da yapılan kurtarma kazısı 31.01.2007 ve 02.02.2007 tarihleri arasında Denizli Müze Müdürlüğü tarafından yapılmıştır²³⁵.

²³⁵ Sevinç – Kök 2007.



Resim-2 Tonozlu mezar'ın girişi üzerindeki kapak taşı
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2007)




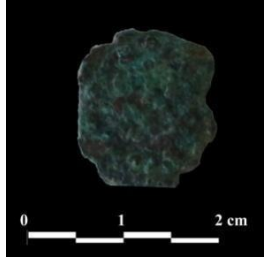


Resim-3 Tonozlu mezar'ın iç görünüşü
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2007)

Tonozlu mezar, 4. ve 7. yüzyıllar arasında Roma ve Bizans döneminde kullanılmıştır. Kocadere tonozlu mezarı, Hierapolis antik kentinin yakın çevresindeki yerleşimlerde, Geç Roma ve Bizans çağında hristiyanlık inancını ve aynı zamanda paganizm geleneğini sürdüren mezar yapısıdır. Hristiyanlık sembolü olan, mezarın tonozunun arkasına kazınmış haç motifi ile buluntu olarak bulunan bronz haç bu görüşü desteklemektedir. Diğer ölü hediyeleriyle tonozlu mezar gömü geleneği, paganizm inancını yansıtmaktadır²³⁶.

Tez çalışması için Kocadere tonozlu mezar kurtarma kazısından alınan ve analizi yapılan bakır / bakır alaşımı eserler Tablo-6'da gösterilmiştir.

²³⁶ Denizli Müze Müdürlüğü Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı Raporu, (27.10.2017)

Tablo-6: Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı, analizi yapılan etütlük eserler

Buluntu:	Kodu:	Fotoğrafi:
Kemer tokası parçası	KDT1	
Sikke 1	KDT2	
Sikke 2	KDT3	
Sikke 3	KDT4	

(Fotoğraf Kaynağı: Ahmet SANSAR, 2017)

4.2 Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı

Pınarkent Nekropol Alanı, Denizli ili, Merkez ilçesine bağlı, Pınarkent Kasabası sınırları içerisinde yer almaktadır. Pınarkent Nekropol Alanı kurtarma kazısı,

06.12.2011 - 16.12.2011 tarihleri arasında Denizli Müze Müdürlüğü tarafından yapılmıştır²³⁷.



Resim-4 Kaya oygu mezar genel görünüm
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2011.)



Resim-5 Tekne tipi mezar iç görünüm
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivinden 2011.)

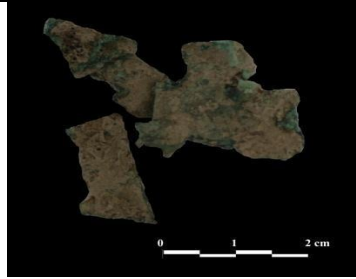
Roma Dönemine tarihlenen Pınarkent nekropol alanında taş örgü mezar, tekne mezar ve kaya oygu mezar olmak üzere 3 türde toplam 7 adet mezar yapısı ortaya çıkarılmıştır. Mezar yapıları ana kayanın dikdörtgen şeklinde oyulup üzerlerine yassı

²³⁷ Karabay – Günaydın 2012, 73.

blok taşların örtülmesiyle oluşturulmuştur. Alanda inhumasyon ile kremasyon gömü uygulamaları yapılmıştır²³⁸.

Tez çalışması için Pınarkent Nekropol alanı kurtarma kazısından kazısından alınan ve analizi yapılan bakır/bakır alaşımı eser Tablo-7’de gösterilmiştir.

Tablo-7: Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı, analiz yapılan etütlük eserler

Buluntu:	Kodu:	Fotoğrafı:
Formsuz metal parçaları	PNK	

(Fotoğraf Kaynağı: Ahmet SANSAR, 2017)

4.3 Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı

Ovacık Tonozlu Mezar alanı, Denizli ili, Honaz İlçesi, Ovacık Köyü Kazanpınarı Borazlık Mevkisinde bulunmaktadır. 19.04.2012 tarihinde mezar içerisinde ve 12.11.2012 tarihinde mezar çevresinde başlayan kurtarma kazı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ovacık köyü tonozlu mezar kurtarma kazısı Denizli Müze Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiştir²³⁹.



Resim-6 Mezarlık genel görünüm
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2012.)

²³⁸ Karabay – Günaydın 2011.

²³⁹ Uyar vd. 2013, 395.



Resim-7 Mezarlık iç görünüm
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2012.)


Erken Doğu Roma Dönemine tarihlenen Honaz-Ovacık mezar yapısı traverten doğal ana kayaya oyulmuştur. Doğal ana kaya şekillendirilerek oluşturulmuş bir koridor ile mezara giriş sağlanmaktadır. Mezarın bulunduğu kaya bloğu; yapım ve kullanımından daha geç dönemde meydana gelen deprem ile oluşmuş fay kırığı ile ikiye ayrılmıştır. Mezar yapısının içinde toplamda 18 adet gömü yapıldığı tespit edilmiştir²⁴⁰.

Tez çalışması için Ovacık köyü tonozlu mezar kurtarma kazısından alınan ve analizi yapılan bakır / bakır alaşımı eserler Tablo-9'da gösterilmiştir.

Tablo-8: Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı, analiz yapılan etütlük eserler

Buluntu:	Kodu:	Fotoğrafi:
Yüzük parçası	ON1	

²⁴⁰ Altıntaş – Günaydın 2012.

Çivi	ON2	
------	-----	---

(Fotoğraf Kaynağı: Ahmet SANSAR, 2017)

4.4 Kaklık Lahit Mezar Kurtarma Kazısı

Kaklık lahit mezarı, Denizli İli, Honaz İlçesi, Kaklık Mahallesi, Sapaca Emir Çayı dere yatağı içerisinde bulunmaktadır. Kaklık lahit mezar kurtarma kazı çalışması, Denizli Müze Müdürlüğü tarafından 13.08.2014 tarihinde başlatılmış ve çalışmalar yaklaşık bir hafta içerisinde bitirilmiştir²⁴¹.



Resim-8 Lahit genel görünüm
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2014.)

²⁴¹ Tarhan vd. 2014.



Resim-9 Lahit iç görünüm
(Kaynak: Denizli Müze Müdürlüğü Arşivi 2014.)

Lahit mezarda yapılan çalışmalar sonucunda; farklı zamanlarda gömülerin yapıldığı, özellikle üst seviyedeki gömünün dağınık ve iskelet parçalarının mezarın orta kısmında toplandığı, ölü hediyelerinin dağınık bir şekilde yerleştirildiği görülmüş olup ele geçen buluntular ışığında mezar Geç Roma Dönemine tarihlenmiştir²⁴².

Tez çalışmasında Kaklık Lahit'i kurtarma kazısından alınan ve analizi yapılan bakır / bakır alaşımı eser Tablo-10'da gösterilmiştir.

Tablo-9: Kaklık Lahiti Kurtarma Kazısı, analizi yapılan etütlük eserler

Buluntu:	Kodu:	Fotoğrafi:
Kandil parçası	KL	

(Fotoğraf Kaynağı: Ahmet SANSAR, 2017)

²⁴² Tarhan vd. 2014.

BEĞİNCİ BÖLÜM

ESERLERİN KARAKTERİZASYONU VE BOZULMA DURUMLARININ İNCELENMESİ

Tez çalışmasına konu olan, adı geçen kazılardan alınan numunelerin X-ışını Floresans Spektrometresi, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi, Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı X-ışını yöntemleri ile Karakterizasyon ve Bozulmaların analizi yapılmıştır.

5.1 X-ışını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi

XRF analizi, maddenin elementel içeriğinin belirlenmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde numune, yüksek enerjili X-ışınları ile uygulandığında; yüksek enerji girişi sonucunda atom yörüngelerindeki elektronları uyararak yüksek enerji seviyesine çıkarır. Uyarılan elektronlar ilk enerji seviyelerine geri döndüklerinde sahip oldukları fazla enerjiyi dalga boyu 0,1-50 Å olan X-ışınları olarak geri verirler. Geri verilen X-ışınları dalga boyu her element için farklı ve ayırt edici özelliktedir. Bu özellikler değerlendirilerek elementlerin nitel ve nicel özellikleri belirlenmektedir²⁴³.

XRF analizi, Olympus Delta marka XRF cihazı ile Alloy Plus modunda yapılmıştır. Her numune 5 farklı noktadan analizi yapıp, elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak eserlerin malzeme karakterizasyonu belirlenmiştir. Analiz sonuçları Tablo-10'da gösterilmiştir.

²⁴³ merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-floresans-spektrometresi, (10.03.2018)

Tablo 10: Kurtarma kazılarındaki numunelere ait XRF analizi sonuçları

Kodu	Numunenin Alındığı Kazı	Analiz Yapılan Eser	XRF Analiz Sonuçları
KDT1	Kocadere Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	Kemer tokası parçası	%87,20Cu + % 12,61 Zn + %0,19 Fe
KDT2	Kocadere Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	Sikke 1	%95,83Cu + % 4,17 Pb
KDT3	Kocadere Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	Sikke 2	%98,70 Cu + % 1,3 Pb
KDT4	Kocadere Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	Sikke 3	%88,18 Cu + % 9,63 Zn + % 2,19 Fe
KL	Kaklık Lahit Mezar Kurtarma Kazısı	Kandil parçası 1	%66,35Cu + % 16,17 Pb + % 10,76 Sn + % 6,72 Zn
ON1	Ovacık Köyü Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	Yüzük parçası	%72,74Cu + %23,34Sn + %4,02 Zn
ON2	Ovacık Köyü Tonoğlu Mezar Kurtarma Kazısı	Çivi 1'in parçası	%85,76 Cu + %6,80 Zn+ % 5,74 Sn+ % 1,70 Fe
PNK	Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı	Formsuz bronz parçaları	%95,94 Cu + % 2.35 Fe + % 1,71 Sn

Yukarıda Tablo-10'da verilen XRF analizi sonuç tablosunun renklendirilmesine ait bilgiler Tablo-11'de gösterilmiştir.

Tablo-11 XRF analizi sonuç tablosunun renklendirilmesine dair bilgi

Numunelerin Kodu	Malzeme Türü	Açıklama
KDT2, KDT3, PNK (Kırmızı)	Bakır	Yüksek oranda (%95+) bakır içeren malzemeleri temsil eder.
ON1 (Mavi)	Bronz	Bakır ve kalay içeren bronz malzemeleri temsil eder.
KDT1, KDT4 (Sarı)	Pirinç	Bakır ve çinko içeren pirinç malzemeleri temsil eder.
KL, ON2 (Kahverengi)	Bakır Alaşımı	Bakır, demir, kurşun, kalay ve çinko içeren bakır alaşımı malzemeleri temsil eder.

XRF analiz sonuçları değerlendirildiğinde:

Tabloda ON1 kodlu (mavi renkle gösterilen satır) eserin elementel oranlarına bakıldığında; bakır ve kalayın oluşturduğu alaşımın, bronz olduğu anlaşılmaktadır. ON1 kodlu eserin içeriğindeki çinkonun malzemeye renk vermek amacıyla katıldığı düşünülmektedir. Eserin türünün süs eşyası olarak kullanılan yüzük olması bu görüşü doğrular niteliktedir. Çünkü bu türde nesnelere rengin daha estetik olması amacıyla bronz alaşımına çinko katıldığı bilinmektedir.

Tabloda KDT1 ve KDT4 kodlu (sarı renkle gösterilen satır) eserlerin elementel oranlarına bakıldığında; bakır ve çinkonun oluşturduğu alaşımın, pirinç olduğu anlaşılmaktadır. Pirinç içeriğindeki düşük miktardaki demirin ise topraktan ya da bakırın safsızlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tabloda KDT2, KDT3 ve PNK kodlu (kırmızı renkle gösterilen satır) eserlerin elementel oranına bakıldığında; eserlerin bakır olduğu anlaşılmaktadır. İçeriğindeki düşük miktardaki kurşun, kalay ve demirin topraktan ya da bakırın safsızlığından kaynaklı olarak bünyesinde bulunduğu düşünülmektedir.

Tabloda KL ve ON2 kodlu (kahverengi renkle gösterilen satır) eserlerin elementel oranlarına bakıldığında; bakır, çinko, kalay, kurşun ve demir'in alaşımlanması ile yapılan bakır alaşımı olduğu anlaşılmaktadır. Alaşımın bu türde yapılmasının nedeni, bakır alaşımlarının mekanik dayanımının ve mukavemetinin, bakıra göre daha iyi özellikte olmasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı bakır genellikle alaşımlar halinde kullanılmıştır. Bunun yanı sıra kalayın zor elde edilmesi veya pahalı olmasından kaynaklı bu tarz kompleks alaşımlar yapıldığı varsayılabilir. Çünkü insanlar genellikle ulaşılabildikleri ve daha ekonomik olan malzemeleri tercih ettiği bilinmektedir kalayın pahalı olması ve kolay elde edilememesi bu görüşü destekler niteliktedir.

5.2 Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı X-ıGını (SEM-EDX) Analizi

SEM analizleri ile görüntüleme açısının çok yönlü olması ve edinilen görüntülerin çok iyi çözünürlükte olması, görüntülerin yorumlanmasında oldukça

kolaylık sağlamaktadır²⁴⁴. SEM cihazının çalışma prensibi özetle; yüksek vakum ve voltaj ortamında, odaklanmış bir elektron demeti ile numunenin yüzeyini tarayarak görüntü elde etmektedir. Elektronlar numunede bulunan atomlarla etkileşim içine girerek numune yüzeyinin topografisi ve kompozisyonu hakkında veriler içeren çeşitli sinyaller üretirler. Elektron demeti raster tarama düzeni ile numunenin yüzeyini tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturulur²⁴⁵.

EDX (Enerji dağılımlı X-ışını) analizi, SEM ile elde edilen görüntü X-ışını kırınım sistemlerinde kullanılmaktadır. Analiz sürecinde katottan yayılan elektronlar anot'a çarparak yüksek enerjiye doğru hızlanırlar. Bu esnada ışınlanmış bölgede atomların karakteristik X-ışınları yayılmaktadır. X-ışınları analiz edilerek numunede bulunan atomlar, ortaya çıkarılan X-ışınları sayımı ile atomların konsantrasyonu belirlenebilmektedir. EDX analizi ile elementlerin ve bileşiklerin nitel ve nicel analizi yapılmaktadır²⁴⁶.

SEM-EDX analizi, ZEISS Supra 40VP marka cihazda HV modda SE (ikincil elektron dedektör) ve ASB (geri saçılımlı) dedektörle yapılmıştır. Numuneler metal olduğu için, kaplama yapılmamıştır.

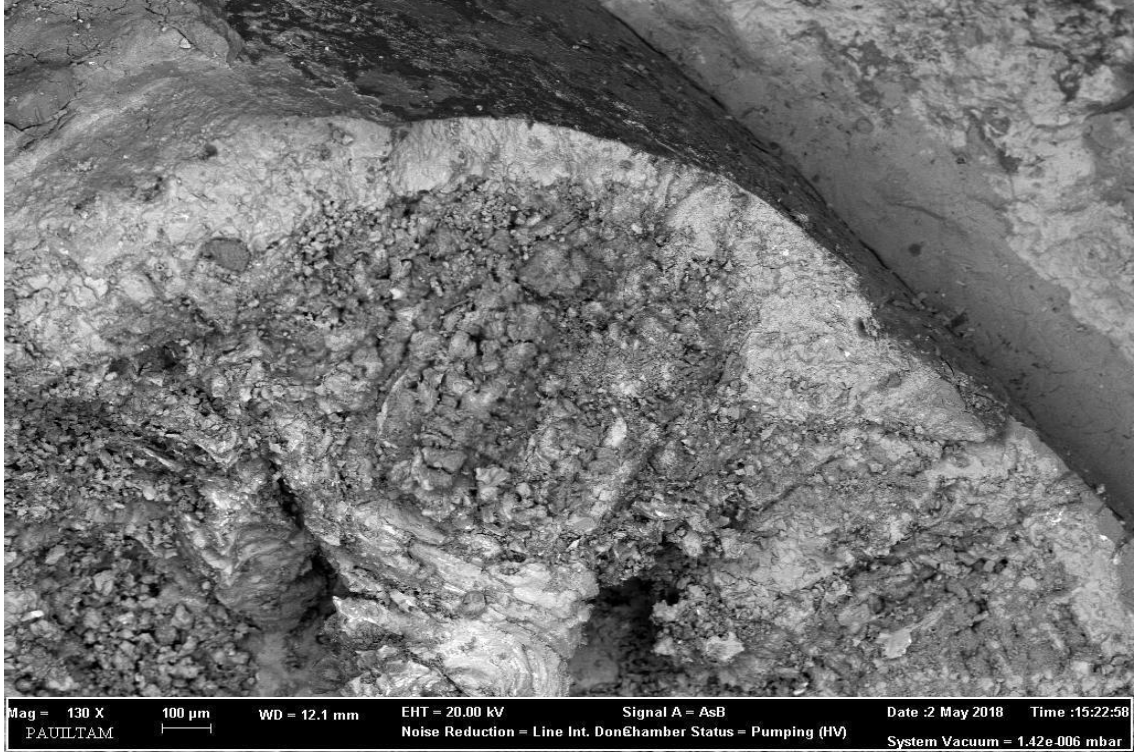
Çalışma kapsamında incelenen bakır ve bakır alaşımı eserlerin bozulma durumu, korozyonun morfolojik yapısı, korozyonun yıkıcı/koruyucu etkileri, malzeme karakterizasyonu ve korozyon tabakasında bulunan elementlerin belirlenmesi için SEM-EDX analizleri yapılmıştır.

²⁴⁴ Amelinckx 1997, 306.

²⁴⁵ Ohring 1992, 266.

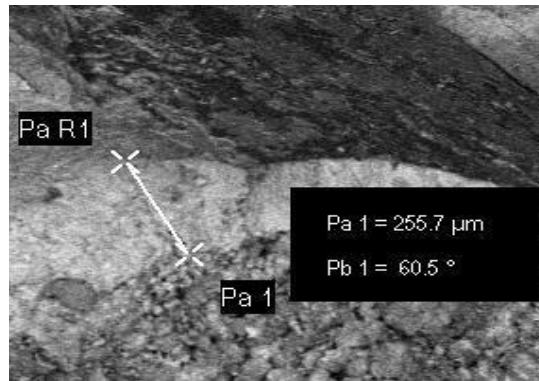
²⁴⁶ Ohring 1992, 268.

KDT1 SEM Analizi Sonuçları ve Değerlendirme



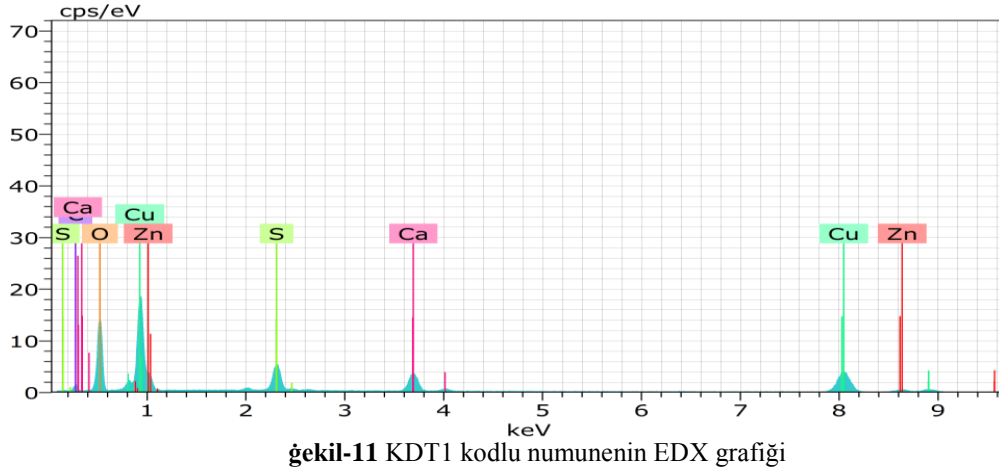
Şekil-9 KDT1 kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

KDT1 kodlu numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metalik özün, alaşımdaki çinko içeriğinden dolayı düzgün bir görüntü sergilemediği görülmüştür. Çünkü çinko anodik tavırla metalik özden ayrıldığı için alaşımın yüzeyinde süngerimsi bir doku oluşturmuştur. Metalin üzerinde oluşan korozyon tabakasına kesitten bakıldığında tek katmanlı olup, dış yüzeyinde düzensiz bir oluşum gözlemlenmiştir (Şekil-9). Korozyon tabakasının kalınlığı yapılan ölçümlere göre yaklaşık 255 mikrometre civarındadır (Şekil-10).



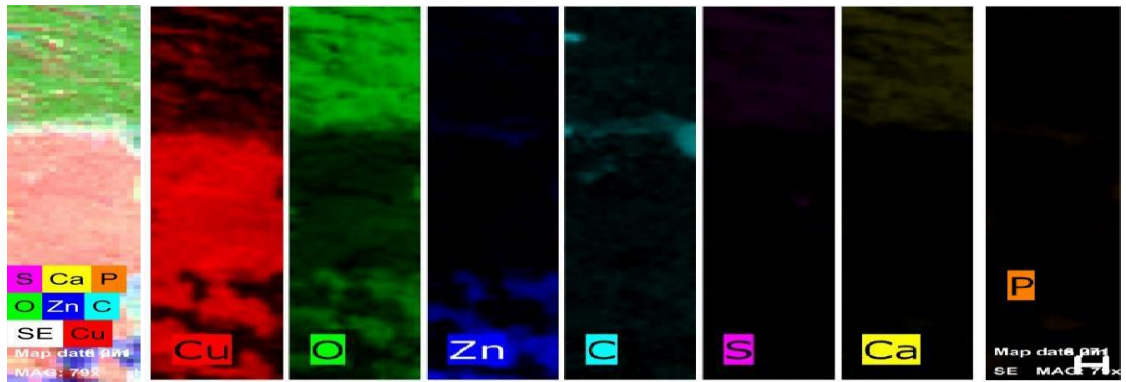
Şekil-10 KDT1 kodlu numunenin korozyon tabakasının görüntüsü

KDT1 EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cu	29	K-series	46.16	48.04	21.47	1.47
O	8	K-series	27.16	28.26	50.16	4.83
Zn	30	K-series	6.87	7.15	3.10	0.39
C	6	K-series	7.34	7.64	18.07	2.61
S	16	K-series	3.97	4.13	3.66	0.22
Ca	20	K-series	3.86	4.01	2.84	0.20
P	15	K-series	0.73	0.76	0.69	0.09
Total:			96.09	100.00	100.00	

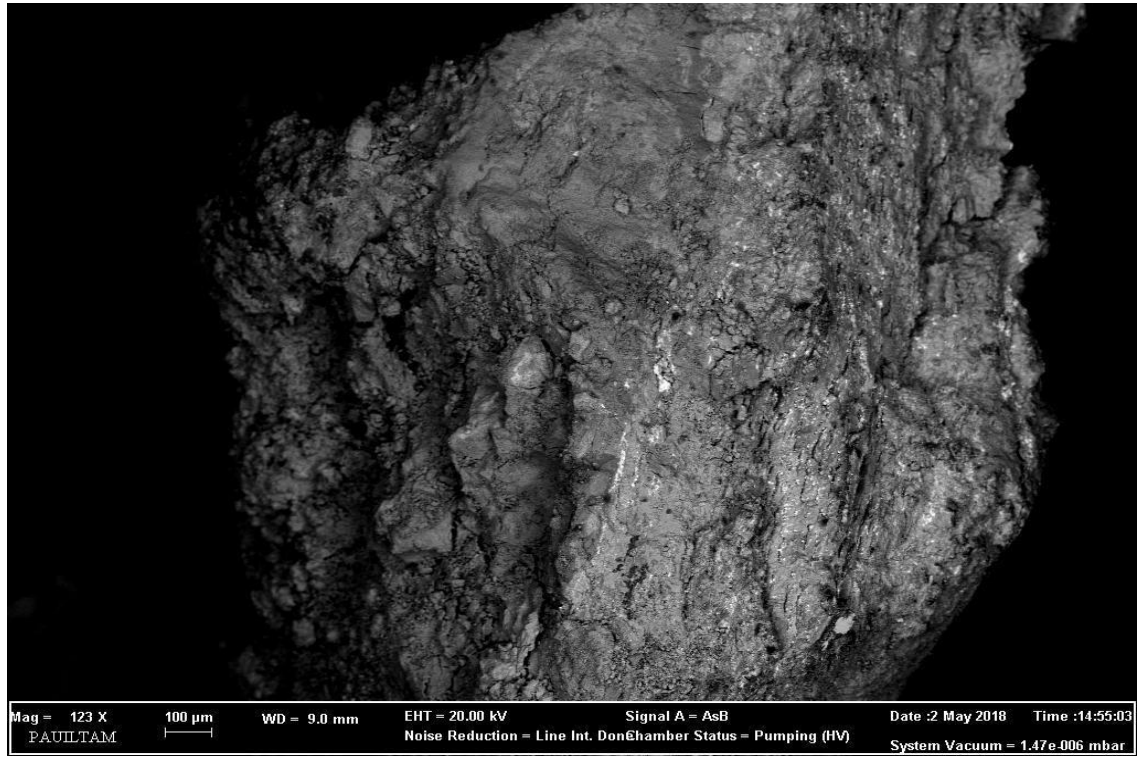
KDT1 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları incelendiğinde, bakır (Cu) ve çinko (Zn)'nin alaşımlanması ile oluşan malzemenin pirinç olduğu tespit edilmiştir. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında kükürt (S), karbon (C), kalsiyum (Ca) ve fosfor (P) elementleri bulunmuştur (Şekil-11). Burda kükürt bulunması şaşırtıcıdır. Çünkü kükürt genellikle atmosferik koşullarda sülfat bileşikleri oluşumunu sağlayan bir elementtir. Gömü koşullarında bulunması topraktaki bakteri varlığından ya da kükürt içeren yer altı sularından meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 12 KDT1 kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

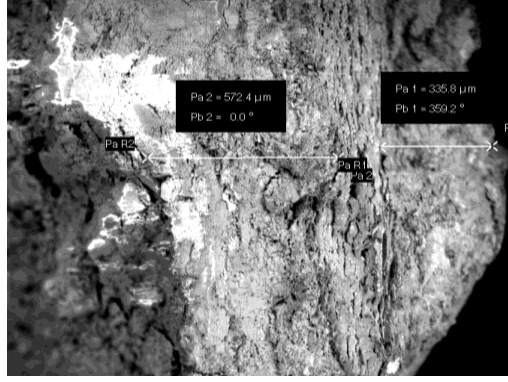
KDT1 kodlu numunenin elementel haritalanması incelendiğinde alaşımın homojen dağılmadığını ve korozyona sebep olan elementlerin metalin yüzeyinde yayılımlarının homojen olmadığı tespit edilmiştir (Şekil-12).

KDT2 SEM Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



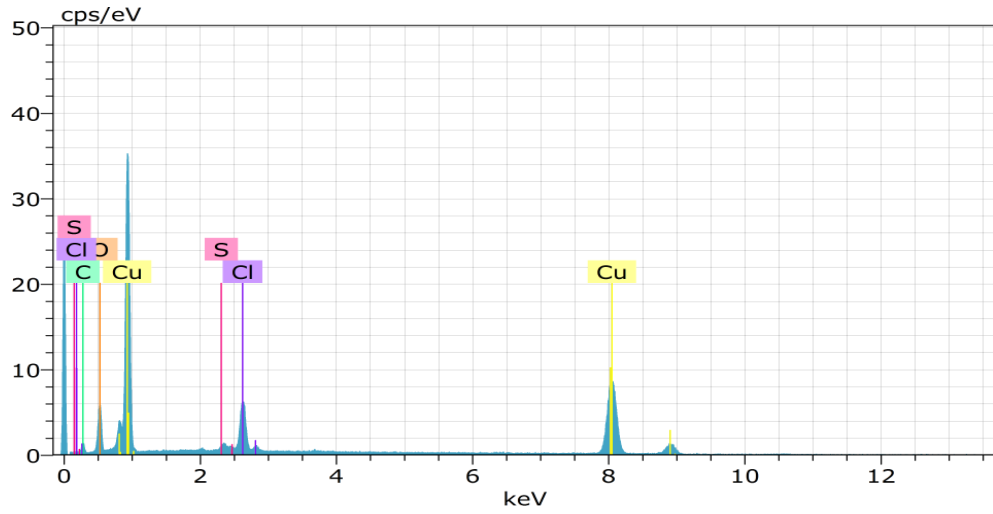
Şekil-13 KDT2 kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

KDT2 kodlu numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metalik özün düzgün bir görüntüye sahip olduğu görülmüştür. Yüksek oranda bakır içeriğinden kaynaklı metalik özün korunduğu ancak korozyon tabakasının metali aşındırdığı anlaşılmıştır. Metalin üzerinde oluşan korozyon tabakası kesitten incelendiğinde tek katmanlı ve çok kalın olup, dış yüzeyinde çukur ve tepelikler şeklinde düzensiz oluşumlar gözlemlenmiştir (Şekil-13). Korozyon tabakasının kalınlığı yapılan ölçümlere göre yaklaşık 453 mikrometre civarındadır (Şekil-14).



Şekil-14 KDT2 kodlu numunenin korozyon tabakasının görüntüsü

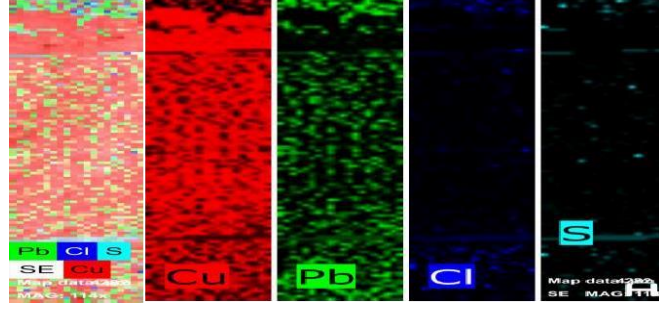
KDT2 EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-15 KDT2 kodlu numunenin EDX grafiği

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Comp. C [wt.%]	norm. Comp. C [wt.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cu	29	K-series	67.60	86.69	75.63	86.69	67.60	1.87
Cl	17	K-series	8.09	10.37	16.22	10.37	8.09	0.31
O	8	K-series	1.38	1.76	6.11	0.00	0.00	0.22
S	16	K-series	0.92	1.18	2.04	2.94	2.30	0.07
C	6	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:			77.98	100.00	100.00			

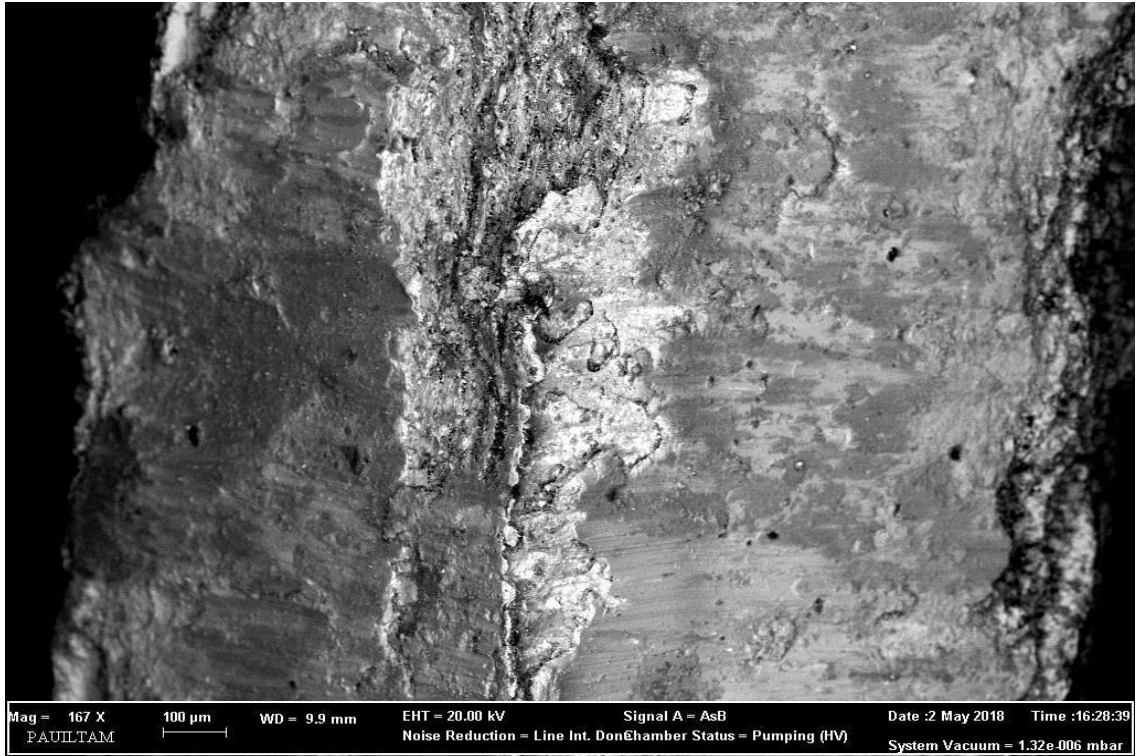
KDT2 kodlu numunenin ŞEDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu) olduğu tespit edilmiştir. EDX analizinde bakırın içeriğinde kurşun (Pb) bulunamamıştır. Ancak elementel haritalama yapıldığında kurşunun varlığı tespit edilmiştir. EDX verilerinde korozyon katmanında klor (Cl), kükürt (S) ve (C) elementleri bulunmuştur (Şekil-15).



Şekil-16 KDT2 kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

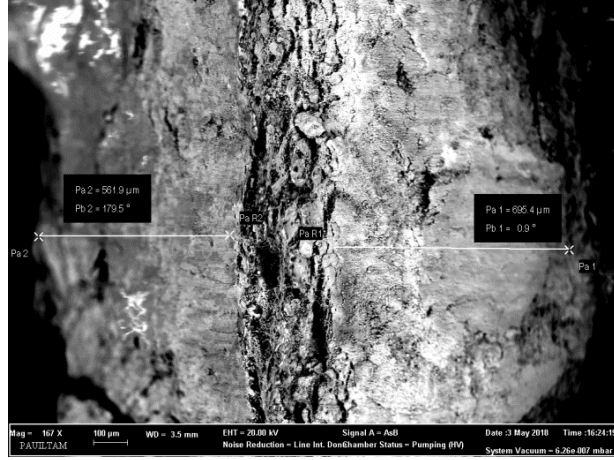
KDT2 kodlu numunenin Şekil-16'daki haritalanması incelendiğinde, bakırın yüzeyinde korozyon katmanında bulunan elementlerin dağılımı görülmüştür (Şekil16).

KDT3 SEM Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



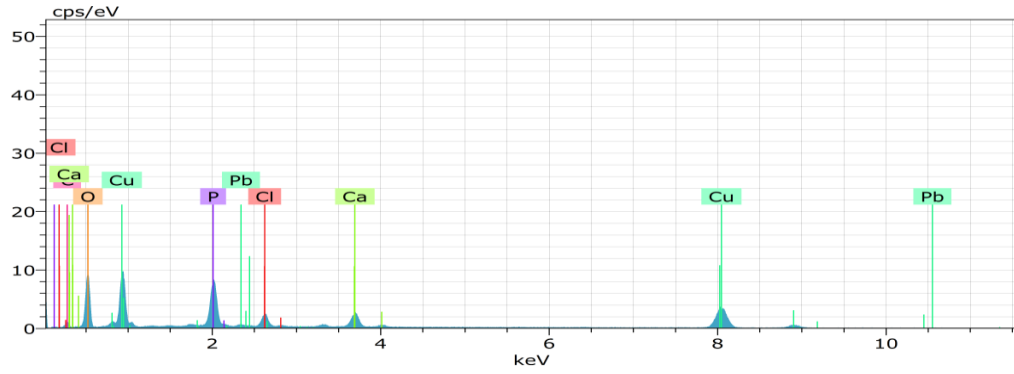
Şekil-17 KDT3 kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

KDT3 kodlu numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metalik özün düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yüksek oranda bakır içeriğinden kaynaklı metalik özün korunduğu ancak korozyon tabakasının metali aşındırdığı anlaşılmıştır. Metalin üzerinde tek katmanlı ve çok kalın şekilde korozyon oluşumu görülmüştür (Şekil-17). Korozyon tabakasının kalınlığı yapılan ölçümlere göre yaklaşık 629 mikrometre civarındadır (Şekil-18).



Şekil-18 KDT3 kodlu numunenin korozyon tabakasının görüntüsü

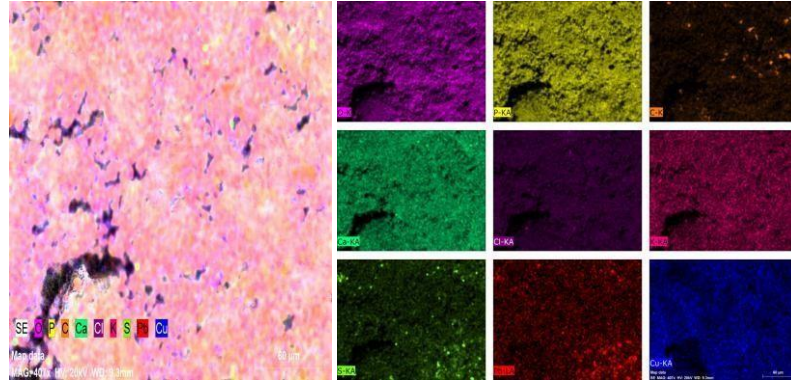
KDT3 EDX Analizi Sonuç ve Değerlendirme



Şekil-19 KDT3 kodlu numunenin EDX grafiği

El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error (1 Sigma) [wt. %]
Cu	29	K-series	31.96	34.44	13.41	0.93
O	8	K-series	31.92	34.40	53.18	4.37
P	15	K-series	11.80	12.72	10.16	0.50
C	6	K-series	7.77	8.37	17.24	1.76
Ca	20	K-series	4.64	5.00	3.08	0.18
Cl	17	K-series	3.72	4.01	2.80	0.17
Pb	82	L-series	0.99	1.06	0.13	0.13
Total:			92.79	100.00	100.00	

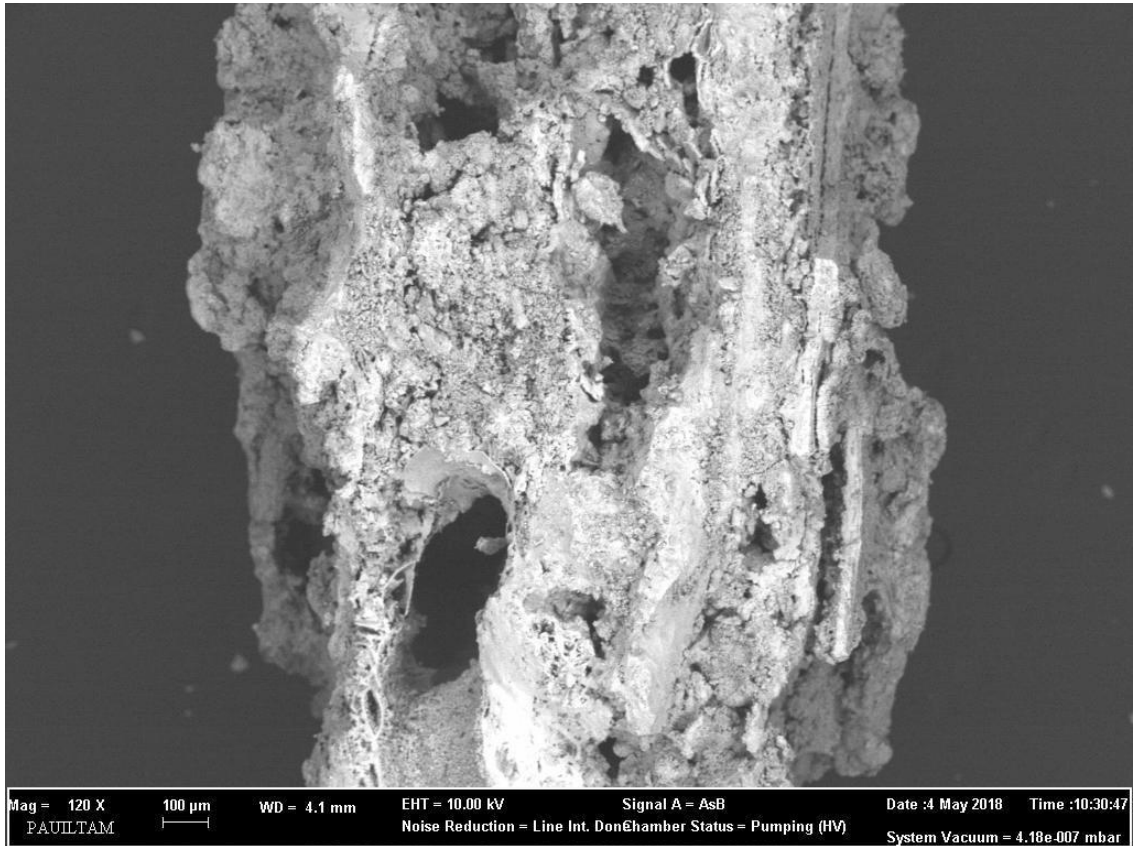
KDT3 kodlu numunenin EDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu) olduğu tespit edilmiştir. Bakırın içeriğinde çok düşük miktarda kurşun (Pb) bulunmuştur. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında, potasyum (P), karbon (C) kalsiyum (Ca) ve klor (Cl) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir (Şekil-19).



Şekil-20 KDT3 kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

KDT3 kodlu numunenin haritalama görüntüsü incelendiğinde, bakırın korozyon katmanında bulunan elementlerin dağılımı görülmüştür (Şekil-20).

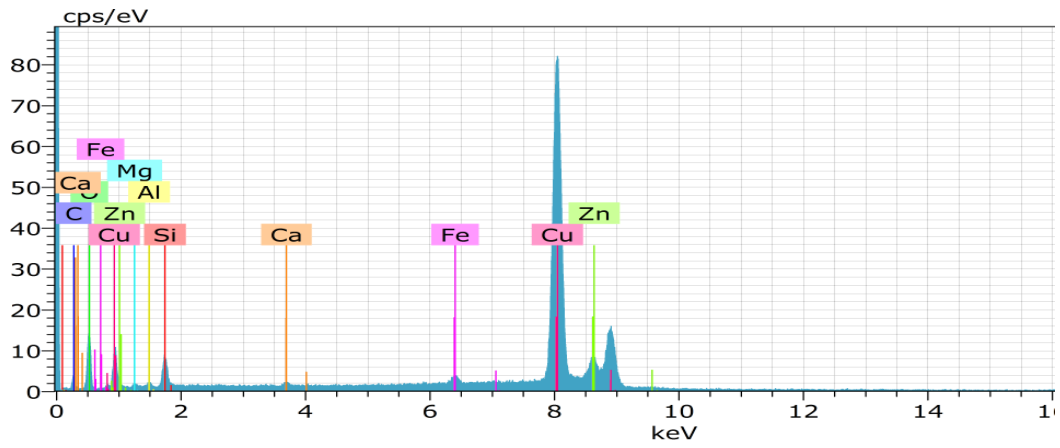
KDT4 SEM Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-21 KDT4 kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

KDT4 kodlu numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde metalik özün yok olduğu ve metalin yapısal olarak tamamen bozulduğu görülmüştür. Alaşım içinde bulunan çinkonun metalin bu şekilde bozulmasında etkisinin oldukça fazla olduğu düşünülmüştür. Çünkü çinko uniform olmayan düzensiz korozyon tabakaları şeklinde gelişen bozulmalara sebep olmaktadır. SEM görüntülerinde de bu düzensiz korozyon tabakalarının oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil-21).

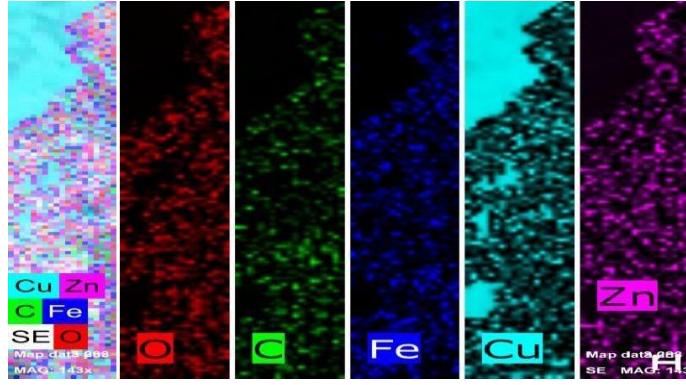
KDT4 EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-22 KDT4 kodlu numunenin EDX grafiği

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cu	29	K-series	54.61	73.61	54.01	1.50
Zn	30	K-series	7.51	10.12	7.22	0.25
Si	14	K-series	3.57	4.81	7.98	0.20
O	8	K-series	3.00	4.04	11.78	0.49
C	6	K-series	2.49	3.36	13.05	0.56
Mg	12	K-series	1.04	1.40	2.69	0.11
Fe	26	K-series	0.78	1.06	0.88	0.05
Al	13	K-series	0.71	0.95	1.64	0.08
Ca	20	K-series	0.48	0.64	0.75	0.05
Total:			74.19	100.00	100.00	

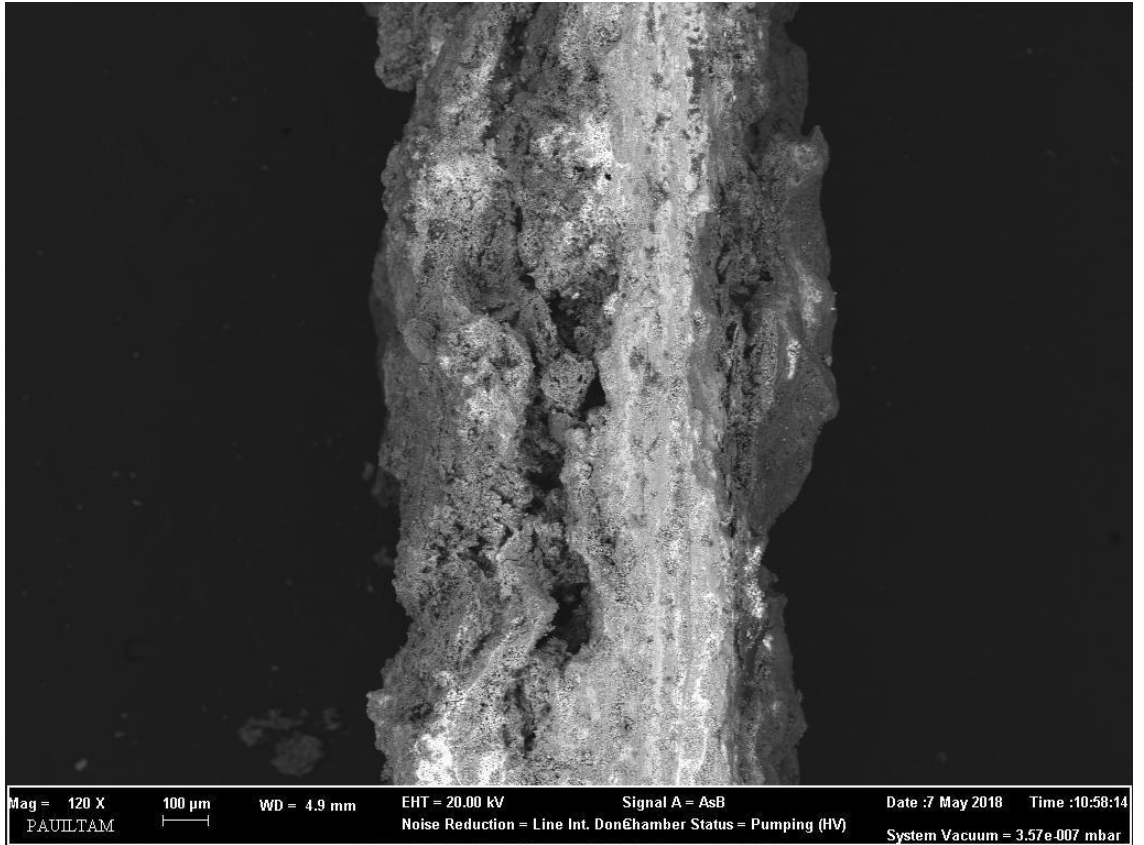
KDT4 kodlu numunenin EDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu) ve çinko (Zn) alaşımının oluşturduğu pirinç olduğu tespit edilmiştir. İçeriğinde düşük oranda demir (Fe) bulunmuştur. EDX analizinde düşük oranda bulunan Alüminyum (Al) metalin içeriğinde değilde gömü koşullarındaki toprağın kirletici etkilerinden kaynaklandığını düşündürmüştür. Çünkü eserin dönemine bakılacak olursa Roma dönemindeki eserlerde alüminyum kullanımı yoktur. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında karbon (C), silisyum (Si), alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) elementleri bulunmuştur (Şekil-22).



Şekil-23 KDT4 kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

KDT4 kodlu numunenin elementel haritalanması incelendiğinde alaşımın içinde bulunan elementlerin homojen dağılmadığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra haritalandırmada korozyon katmanındaki elementlerin alaşımın yüzeyindeki dağılımı görülmüştür (Şekil-23).

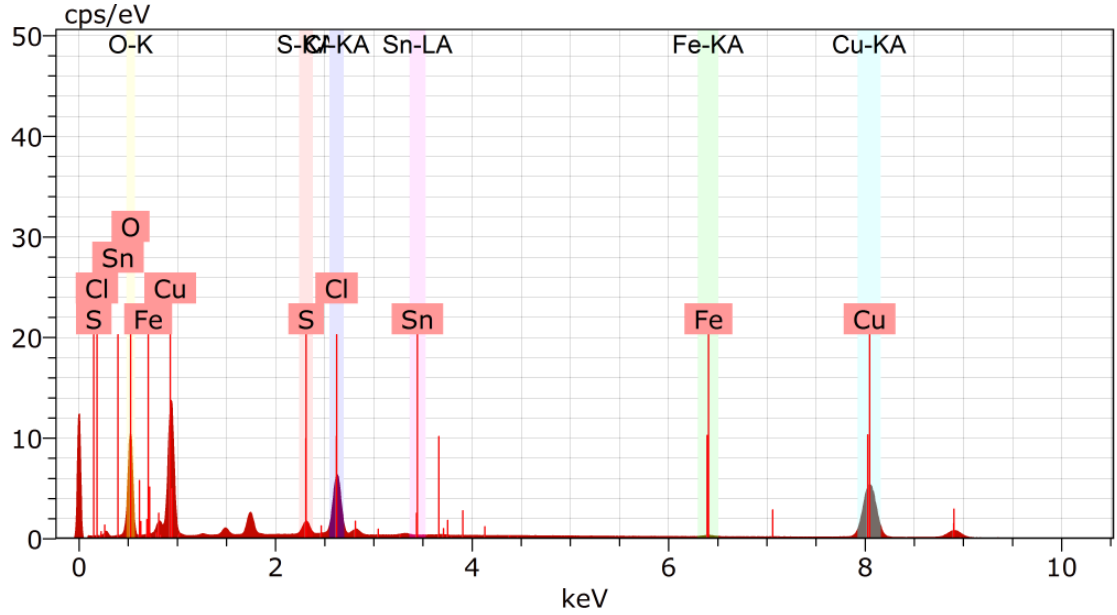
PNK SEM Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-24 PNC kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

PNK kodlu numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde metalik özün tamamen yok olduğu ve metalin yapısal olarak tamamen bozulduğu görülmüştür. Numune bakır olduğundan dolayı korozyon katmanları metalin yüzeyinde uniform şekilde gelişim göstermiş ve malzemenin içlerine doğru ilerlemiştir. Bu durumun eserin gömü koşullarındaki ortamından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil-24).

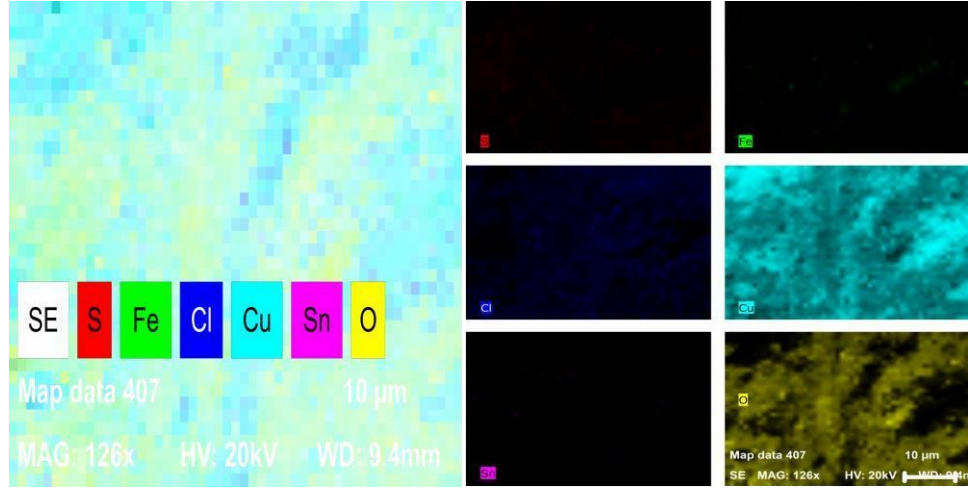
PNK EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-25 PNK kodlu numunenin EDX grafiği

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cu	29	K-series	43.98	60.38	32.68	1.22
O	8	K-series	18.55	25.46	54.74	2.37
Cl	17	K-series	6.31	8.66	8.40	0.25
S	16	K-series	1.82	2.50	2.69	0.10
Fe	26	K-series	1.40	1.92	1.18	0.07
Sn	50	L-series	0.78	1.07	0.31	0.06
Total:			72.83	100.00	100.00	

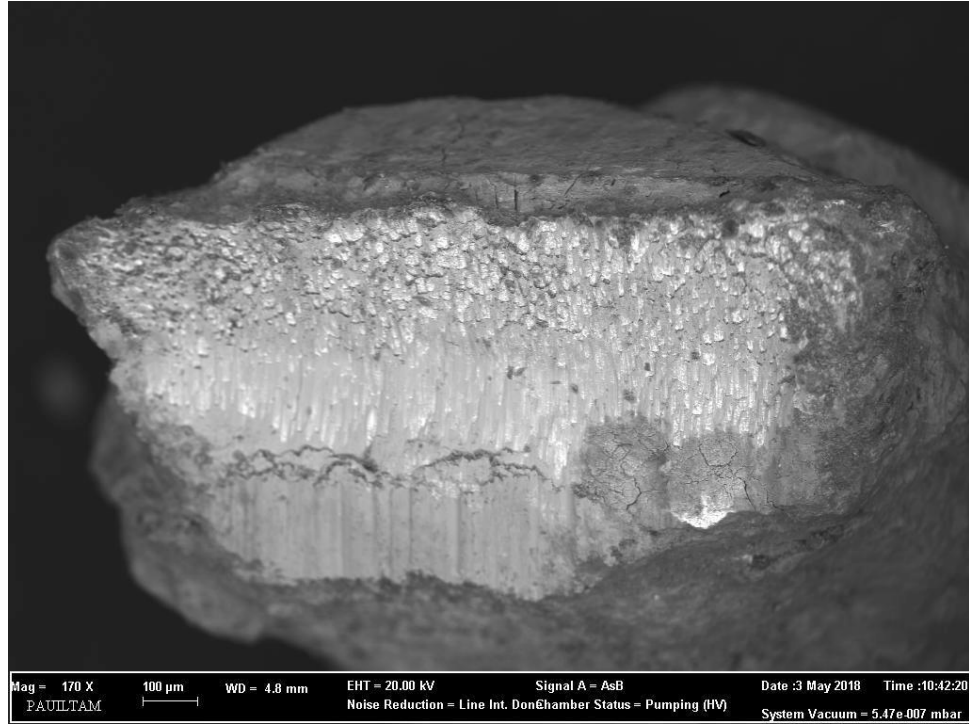
PNK kodlu numunenin EDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu) olduğu anlaşılmıştır. EDX analizinde bulunan demir (Fe) ve kalay (Sn)'ın bakırın içeriğinde çok düşük oranda bulunduğu tespit edilmiştir. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında klor (Cl) ve kükürt (S) elementleri bulunmuştur (Şekil-25).



Şekil-26 PNK kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

PNK kodlu numunenin elementel haritalanması incelendiğinde, korozyon katmanında bulunan elementlerin yayılımı görülmüştür (Şekil-26).

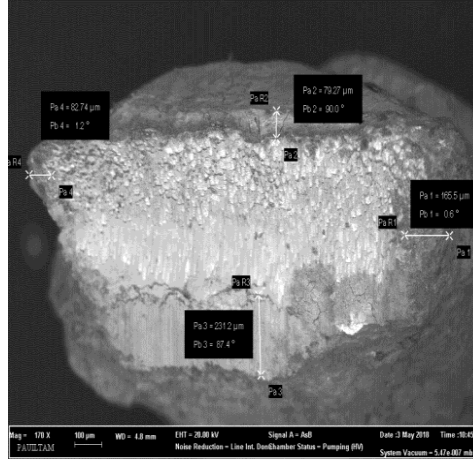
ON1 SEM Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-27 ON1 kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

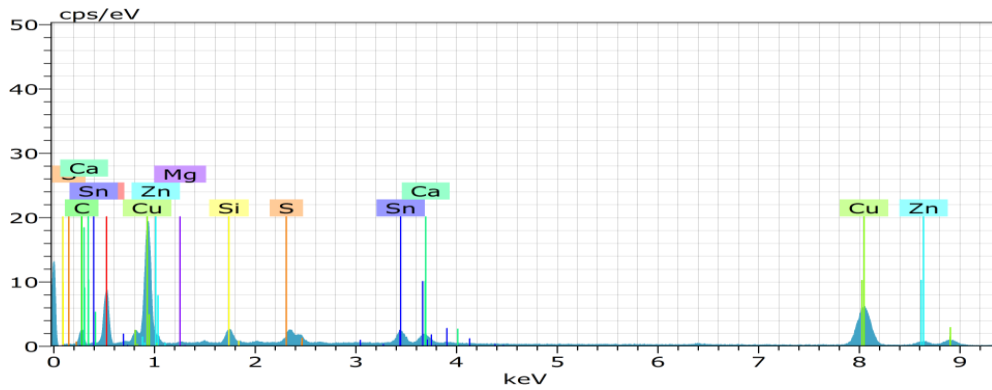
ON1 kodlu numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metalik özün düzgün bir yapıda olduğu ve bozulmadığı görülmüştür. Bronzun içindeki kalayın etkisinden kaynaklı metalik öz bozulmamıştır. Çünkü bronzun içindeki kalay, metalin mekanik

dayanımını arttırarak ve korozyona karşı direnç kazanmasını sağlamıştır. Metalin üzerinde tek katmanlı alt kısmında kalın, diğer kısımlarında ince yapıda korozyon tabakasının geliştiği görülmüştür (Şekil-27). Korozyon tabakasının kalınlığı yapılan ölçümlere göre yaklaşık 136 mikrometre civarındadır (Şekil-28).



Şekil-28 ON1 kodlu numunenin korozyon tabakasının görüntüsü

ON1 EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

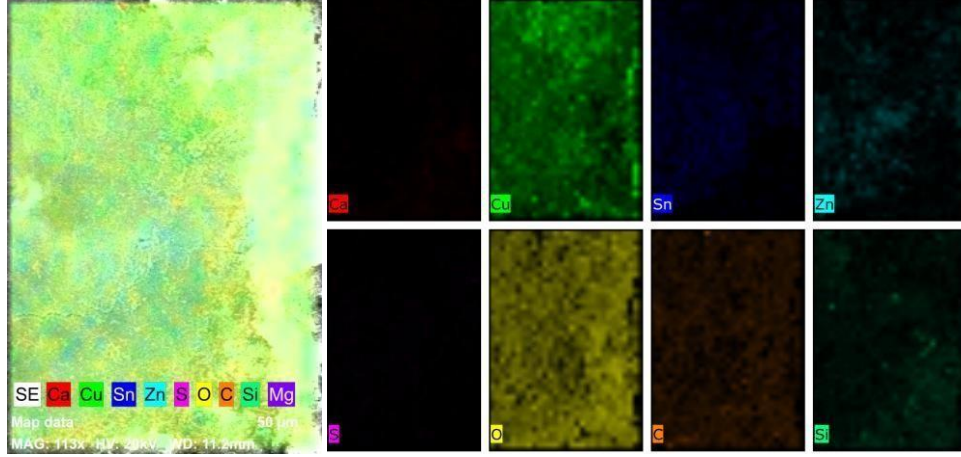


Şekil-29 ON1 kodlu numunenin EDX grafiği

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ca	20	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	29	K-series	11.13	38.60	19.67	1.46
Sn	50	L-series	4.70	16.32	4.45	0.39
Zn	30	K-series	1.07	3.72	1.84	0.46
S	16	K-series	0.44	1.53	1.55	0.21
O	8	K-series	5.93	20.59	41.66	4.34
C	6	K-series	1.59	5.51	14.85	3.26
Si	14	K-series	3.70	12.84	14.79	0.61
Mg	12	K-series	0.26	0.89	1.19	0.23
Total:			28.82	100.00	100.00	

ON1 kodlu numunenin EDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu) ve kalay (Sn)'in oluşturduğu, bronz olduğu görülmüştür. İçerisinde düşük oranda çinko

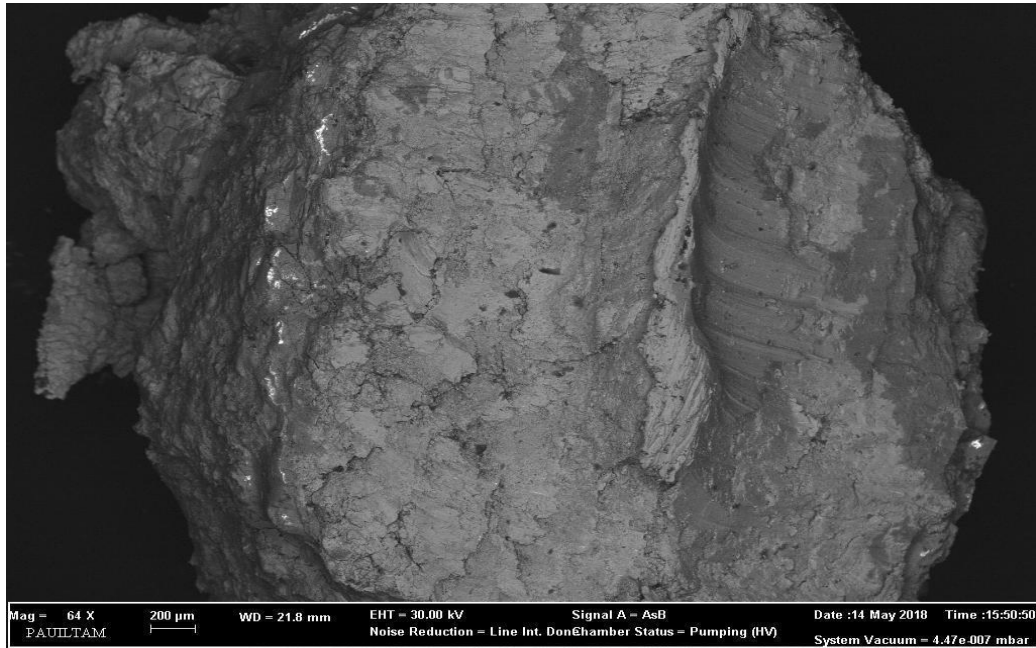
(Zn) da bulunmuştur. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında karbon (C) ve kükürt (S) ise silisyum (Si), magnezyum (Mg) kalsiyum (Ca) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir (Şekil-29).



Şekil-30 ON1 kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

ON1 kodlu numunenin elementel haritalanması incelendiğinde alaşımın homojen yapıda olduğu, ayrıca korozyon katmanında bulunan elementlerin dağılımı görülmüştür (Şekil-30).

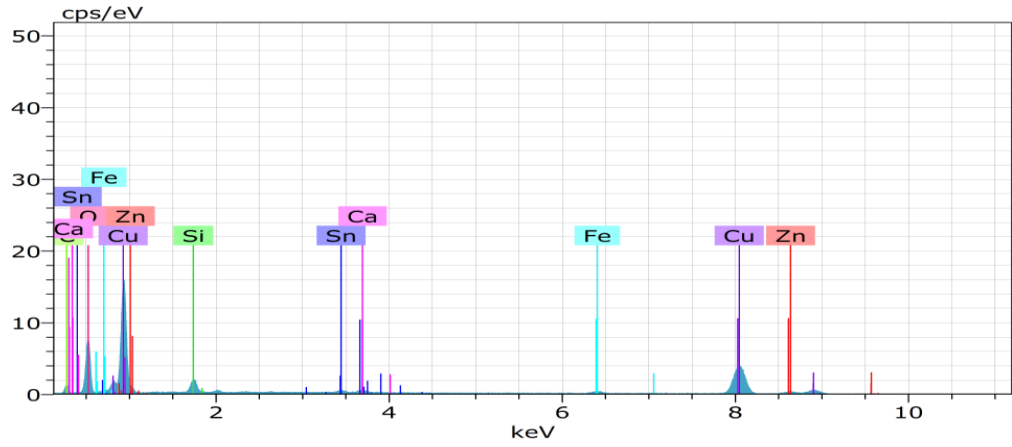
ON2 SEM Analiz Sonuç ve Değerlendirme



Şekil-31 ON2 kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

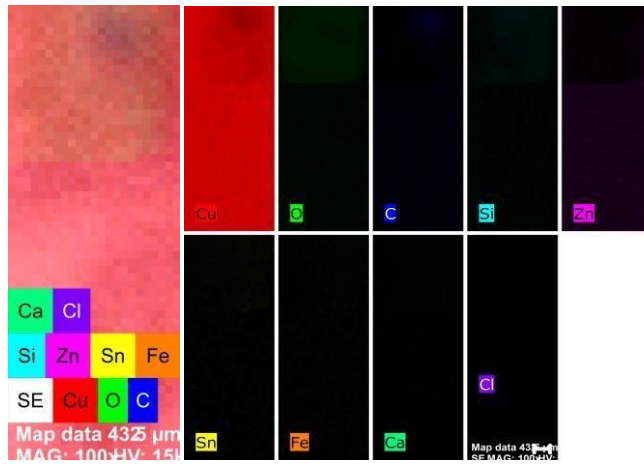
ON2 kodlu numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metalik özün düzgün bir görüntü sergilediği ve korunduğu görülmüştür. Metalin üzerinde oluşan korozyon tabakası çok ince yapıda gelişim göstermiştir (Şekil-31).

ON2 EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-32 ON2 kodlu numunenin EDX grafiği

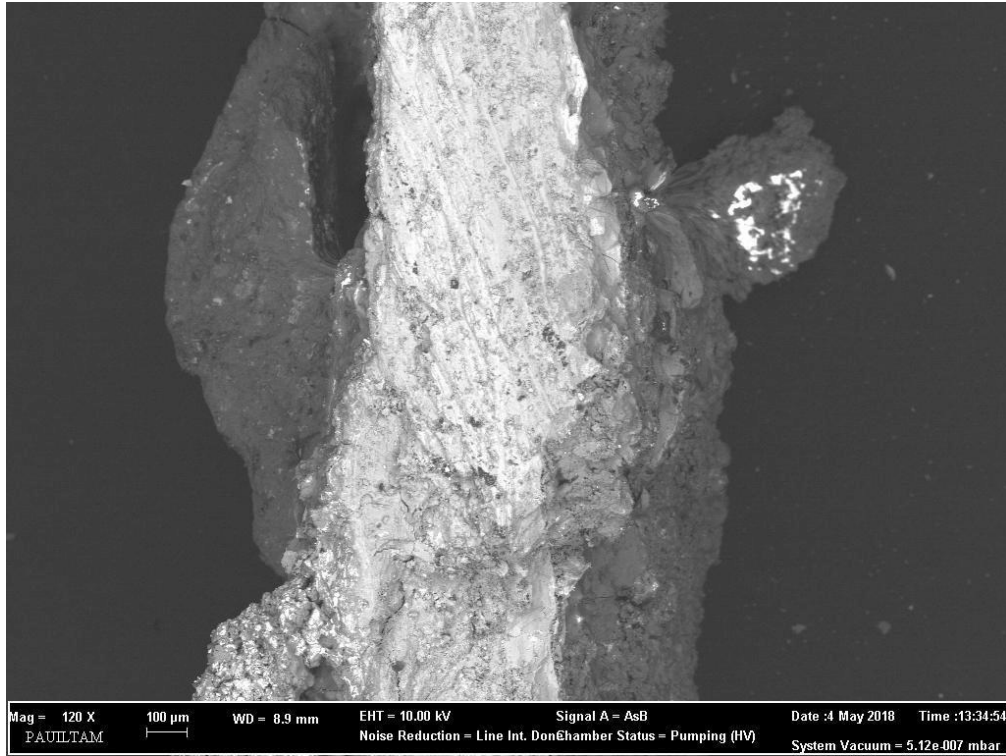
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cu	29	K-series	40.95	50.07	21.69	1.14
O	8	K-series	22.12	27.04	46.53	2.85
C	6	K-series	8.91	10.90	24.97	1.58
Zn	30	K-series	3.81	4.66	1.96	0.16
Si	14	K-series	2.66	3.25	3.18	0.15
Sn	50	L-series	1.52	1.86	0.43	0.08
Fe	26	K-series	1.26	1.54	0.76	0.07
Ca	20	K-series	0.55	0.68	0.47	0.05
Total:			81.78	100.00	100.00	



Şekil-33 ON2 kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

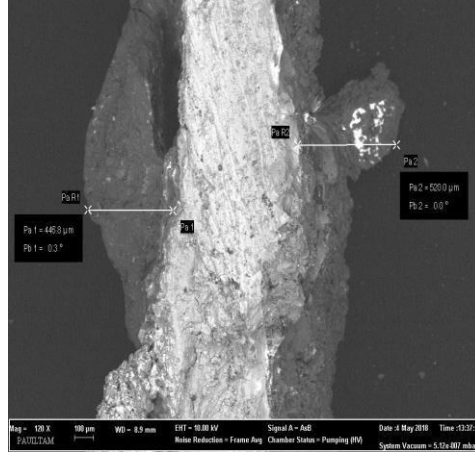
ON2 kodlu numunenin EDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu), çinko (Zn), kalay (Sn) ve demir (Fe)' in oluşturduğu bakır alaşımı olduğu anlaşılmıştır. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında karbon (C), silisyum (Si), ve kalsiyum (Ca) elementleri bulunmuştur (Şekil-32). ON2 kodlu numunenin elementel haritalanması incelendiğinde bakır alaşımının, homojen yapıda olduğu ve korozyon katmanında bulunan elementlerin dağılımı görülmüştür (Şekil33).

KL SEM Analizi Sonuçları ve Değerlendirme



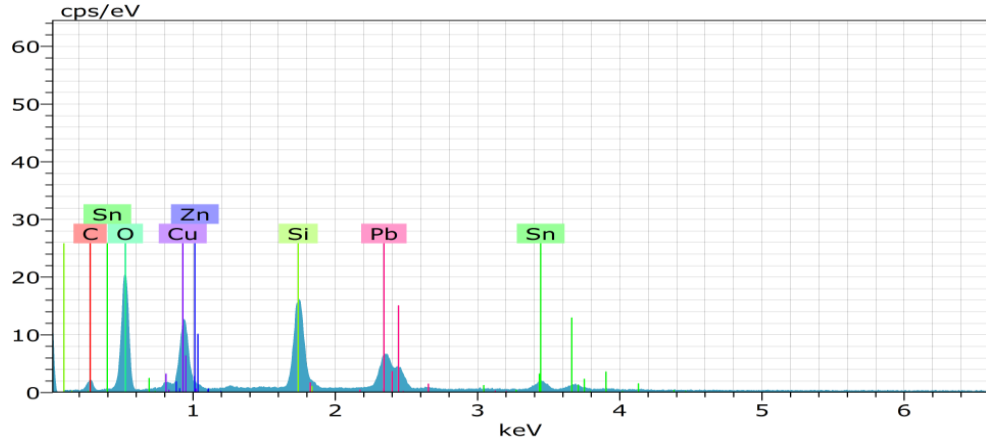
Şekil-34 KL kodlu numunenin SEM analizi ASB görüntüsü

KL kodlu numunenin Şekil-34'deki SEM görüntüsü incelendiğinde metalik özünün homojen düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Metalin üzerinde oluşan korozyon tabakası ince yapıda gelişim göstermiş, metali fazla tahrip etmediği anlaşılmıştır (Şekil-34). Korozyon tabakasının kalınlığı yapılan ölçümlere göre yaklaşık 483 mikrometre civarındadır (Şekil-35).



Şekil-35 KL kodlu numunenin korozyon tabakasının görüntüsü

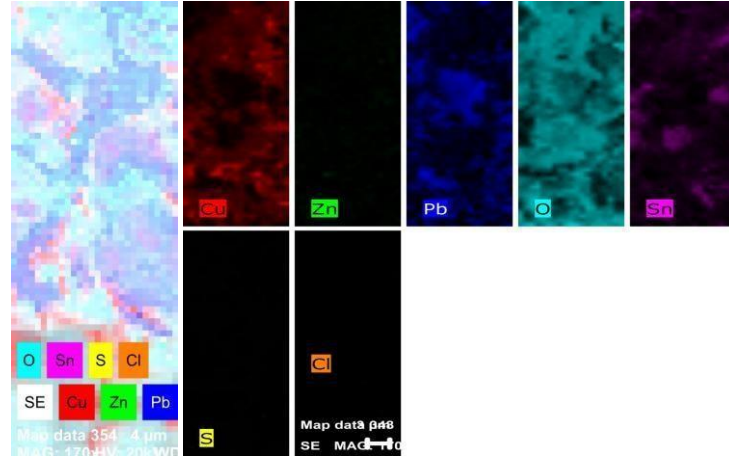
KL EDX Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil-36 KL kodlu numunenin EDX grafiği

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	31.12	42.76	63.42	3.87
Cu	29	K-series	15.21	20.90	7.80	0.46
Pb	82	L-series	7.98	10.97	1.26	0.36
Si	14	K-series	7.38	10.14	8.57	0.34
C	6	K-series	6.41	8.81	17.41	1.18
Sn	50	L-series	3.48	4.78	0.96	0.14
Zn	30	K-series	1.19	1.63	0.59	0.08
Total:			72.77	100.00	100.00	

KL kodlu numunenin EDX analizi sonuçları incelendiğinde bakır (Cu), kurşun (Pb), kalay (Sn) ve çinko (Zn)'nin oluşturduğu bakır alaşımı olduğu görülmüştür. EDX verilerinde numunenin korozyon katmanında karbon (C) ve silisyum (Si) olduğu bulunmuştur (Şekil-36).



Şekil-37 KL kodlu numunenin elementel dağılım haritalaması

KL kodlu numunenin elementel haritalanması incelendiğinde bakır alaşımının, homojen yapıda olduğu ve korozyon katmanındaki elementlerin dağılımı görülmüştür (Şekil-37).

5.4 Fourier Dönüçümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi Analizi

FTIR spektroskopisi temel olarak kızılötesi ışığının analizi yapılan madde tarafından soğurulması sonucuna dayanmaktadır. Soğurulma, moleküllerdeki bağların titreşimleri ve dönüşleri için gerekli miktarda dalga enerjisinin, cihaz tarafından elektromanyetik spektrumunun kızılötesi bölgesinden gönderilmesiyle gerçekleşmektedir²⁴⁷. FTIR spektroskopisi organik veya inorganik bileşiklerin karakterize edilmesi için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemle, Maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimlerinin meydana getirdiği frekanslara karşılık gelen soğurma pikleri ile karakteri (parmak izi) belirlenmektedir²⁴⁸.

FTIR spektroskopisi analizi, Thermo Nicolet 8700 model FTIR spektroskopisi cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin $400-4000\text{ cm}^{-1}$ bant aralığında 4 cm^{-1} ayırıcılıkta 64 tarama sayısında analizi yapılmıştır.

²⁴⁷ <https://merlab.metu.edu.tr/fourier-donusumlu-kizil-otesi-spektrometresi> (20.06.2018)

²⁴⁸ Büyüksırt-Küleşan 2014, 36.

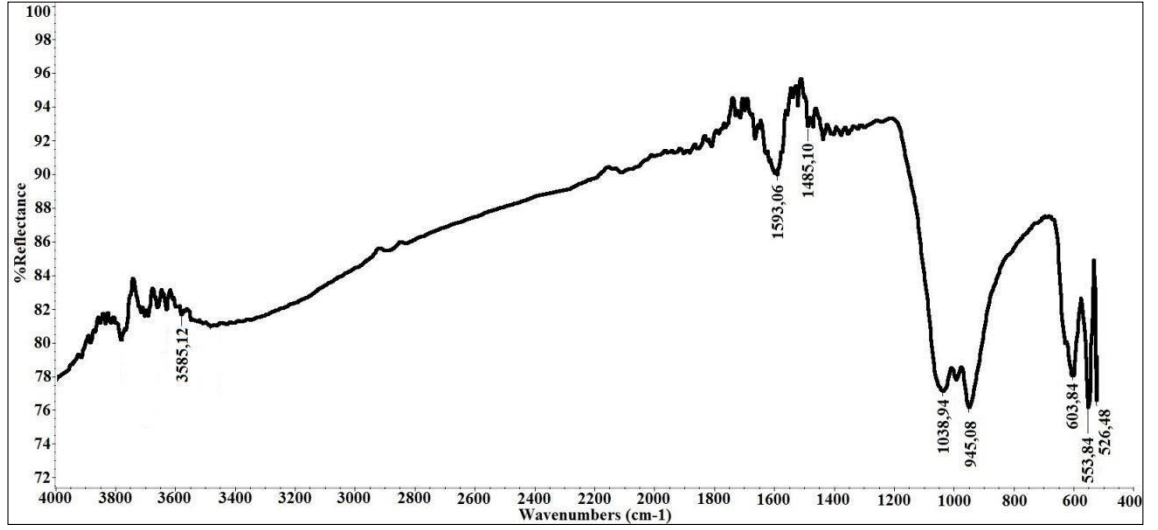
Metal eserlerin FTIR spektroskopi analizi sonucunda elde edilen veriler, numunelerin XRF ve EDX analiz sonuçlarında elde edilen elementel değerlerine bağlı olarak, literatürde ki referans alınan kaynaklardan elde edilen bant değerleri (cm^{-1}) ile karşılaştırılarak korozyon ürünleri tanımlanmıştır. Korozyon ürünlerinin tanımlanması için referans alınan bant değerleri (cm^{-1}) Tablo-12’te gösterilmiştir.

Tablo-12 FTIR spektroskopi analizi korozyon ürünlerinin bant değerleri (cm^{-1})²⁴⁹

Korozyon Ürünü	Kimyasal Formülü	Karakteristik Bant Aralığı (cm^{-1})
Kuprit	Cu_2O	632, 648, 670, 829, 1051, 1409, 1575, 3436
Tenorit	CuO	541, 585, 1385, 1661
Spertinit	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	420, 602, 3323, 3571
Malahit	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	523, 577, 713, 748, 816, 865, 1040, 1098, 1380, 1390, 1400, 1487, 3323, 3410
Antlerit	$\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	418, 459, 492, 517, 611, 640, 665, 754, 802, 852, 887, 984, 1082, 1101, 1109, 1153, 3487, 3576
Brokhanit	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	486, 511, 600, 636, 673, 732, 779, 849, 870, 945, 989, 1086, 1128, 3279, 3381, 3392, 3564, 3587
Posnjakit	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6.\text{H}_2\text{O}$	434, 515, 602, 793, 877, 1072, 1112, 1655, 3282, 3412, 3549
Atakamit	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	821, 842, 893, 910, 940, 947, 984, 3330, 3437
Klinoatakamit	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	827, 863, 892, 906, 923, 987, 3310, 3359, 3444
Libetenit	$\text{Cu}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$	445, 484, 521, 552, 615, 634, 812, 941, 950, 1049, 3468
Pseudomalakit	$\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$	413, 440, 478, 507, 515, 548, 606, 723, 754, 798, 877, 951, 997, 1018, 105, 1031, 3390, 3341
Hematit	Fe_2O_3	475, 535, 537, 571, 3641
Diaptoz	$\text{CuSiO}_3.\text{H}_2\text{O}$	450, 495, 516, 572, 628, 781, 887, 956, 993, 1000, 1120, 1265, 1735, 2858, 2929, 2958, 3260, 3380
Kalsit	CaCO_3	611, 705, 1409, 712, 714, 848, 874, 877, 1425, 1429, 1800, 2513

²⁴⁹ Zhang et al. 2014, 3; Mazzeo - Joseph 2005, 5-6; Bakhtiari 2011, 172-173; Zittlau et al. 2013, 42. Majzlan et al. 2015, 943; Engelbrekt 2014, 72; Carlo et al. 2017, 123-124; Joseph 2009, 76-77; Morcillo et al. 2017, 150; Bayazit 2013, 77; Namduri - Nasrazadani 2008, 2495; Li et al. 2017, 7; Berger 2012, 245-251; Vasilache et al. 2011, 123; Derrick et al. 1999, 116, 193, 196, 199; <http://www.gem-passion.com/dioptase-from-mozambique> (20.06.2018); <http://ruff.info/> (20.06.2018); http://cameo.mfa.org/wiki/Main_Page (20.06.2018); <http://cool.conservation-us.org/jaic/articles/jaic42-02-008.html> (10.07.2017).

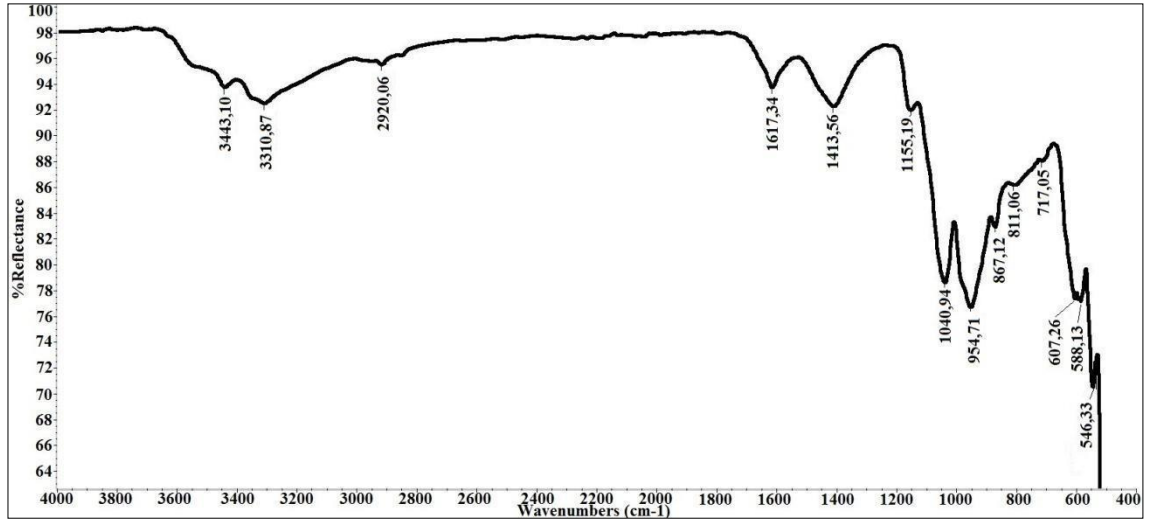
KDT1 FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-38 KDT1 kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

KDT1 kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Libethenit ($\text{Cu}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$) 526, 553 ve **945**; Brokhanit ($\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) 603 ve **3585**; Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 1038 ve 1485 karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-38).

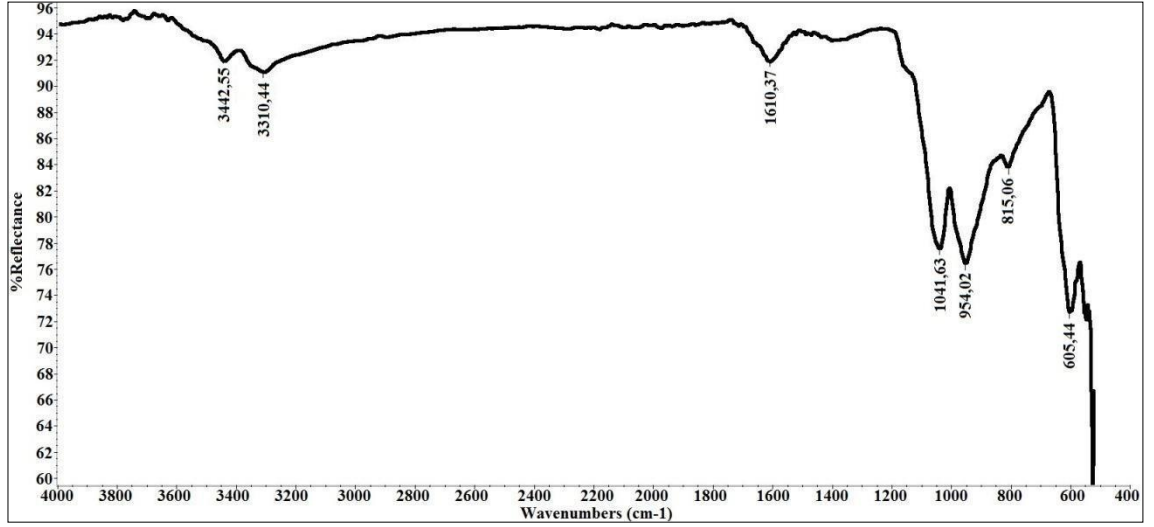
KDT2 FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-39 KDT2 kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

KDT2 kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Tenorit (CuO) 546 ve 588; Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 717, 811, 1040 ve **1413**; Antlerit ($\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$) **607** ve **1155**; Klinoatakamit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) 867, **3310** ve **3443** karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-39).

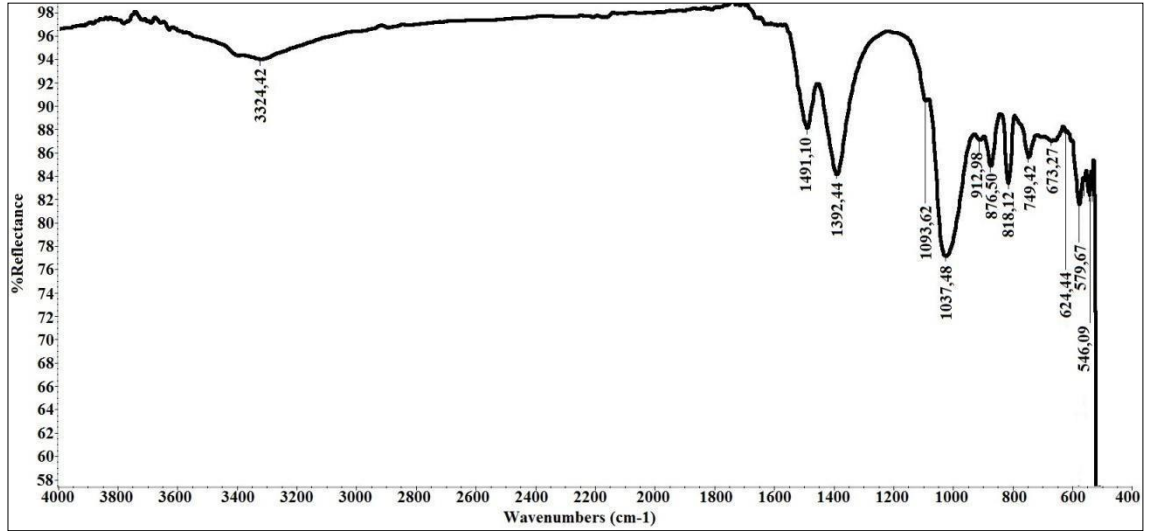
KDT3 FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-40 KDT3 kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

KDT3 kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 815 ve **1041**; Pseudomalahit ($\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$) 605 ve **954**; Klinoatakamit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) **3310** ve **3442** karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-40).

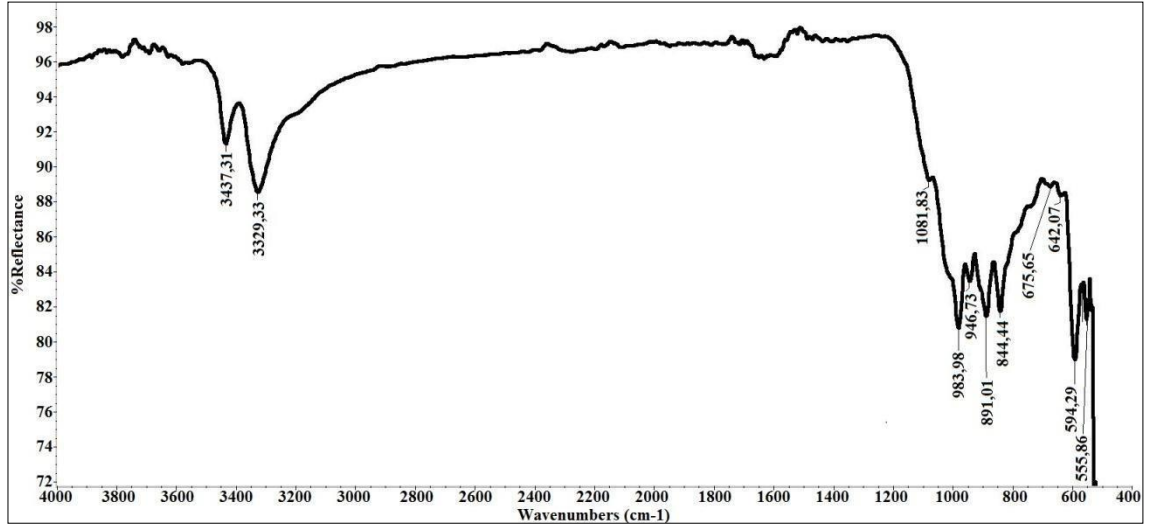
KDT4 FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-41 KDT4 kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

KDT4 kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 749, 818, 1093 **1392** ve **1491**; Zinkit (ZnO) **546**; Tenorit (CuO) **579**; Kuprit (Cu_2O) **624** ve 673; Kalsit (CaCO_3) **876**; Spertinit ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) **3324** karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-41).

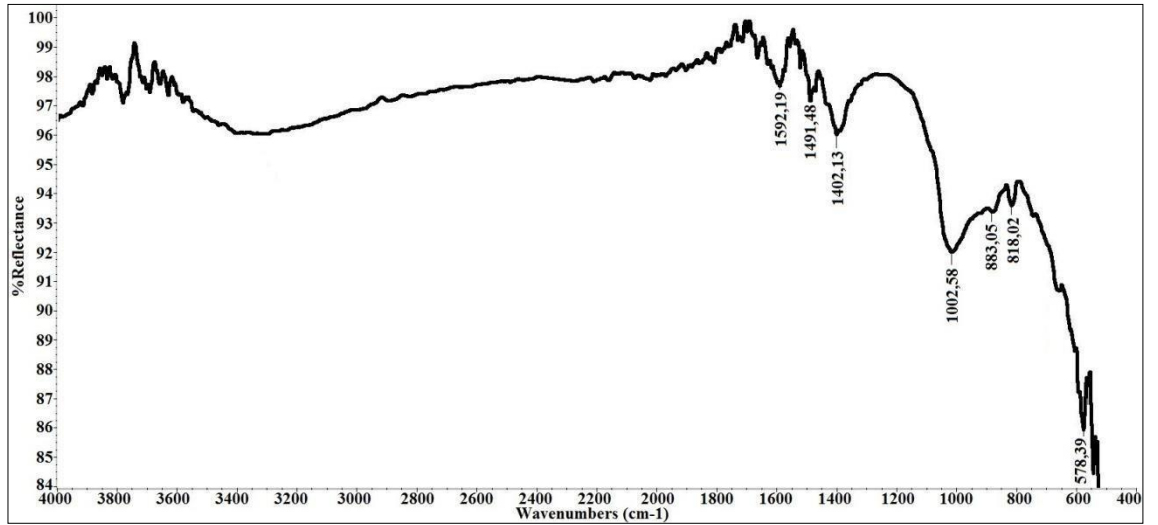
PNK FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-42 PNK kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

PNK kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Atakamit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) 844, 891, 946, 983, **3329** ve **3437**; Brokhanit ($\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) **604**, 642, 675 ve **1081** karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-42).

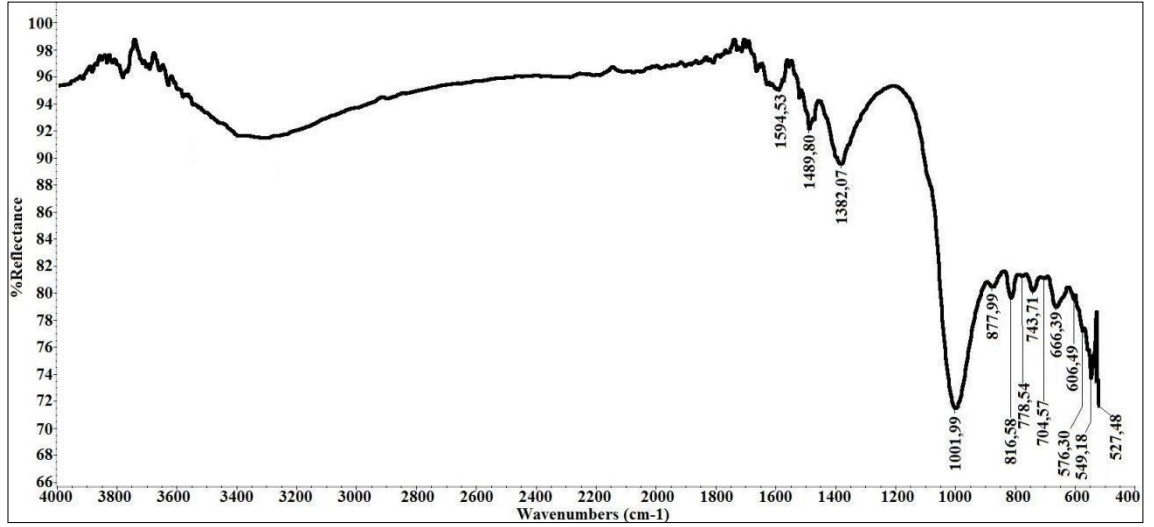
ON1 FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-43 ON1 kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

ON1 kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 578, 818, **1402** ve 1491; Diaptoz ($\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 883 ve **1002** karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-43).

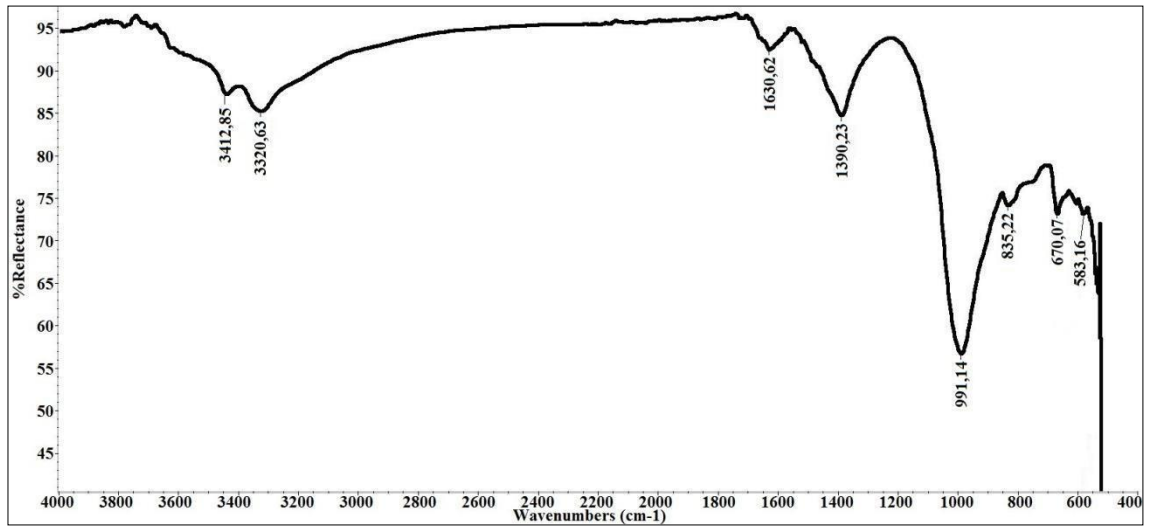
ON2 FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-44 ON2 kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

ON2 kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 527, 576, 704, 743, 816, **1382** ve **1489**; Diaptoze ($\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 778 ve **1001**; Kalsit (CaCO_3) 606 ve **877**; karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-44).

KL FTIR Analizi sonuçları ve değerlendirilmesi



Şekil-45 KL kodlu numunenin FTIR analiz grafiği

KL kodlu numunenin FTIR analiz sonuçları incelendiğinde: Kuprit (Cu_2O) **670** ve 835; Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) 583, **1390**, 3320 ve 3412; Diaptoze ($\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) **991** karakteristik bant aralığında (cm^{-1}) tespit edilmiştir (Şekil-45).

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma başlangıçta bronz eserlerin bozulma durumlarının incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Denizli Müze Müdürlüğü kurtarma kazılarında ele geçen etütlük bronz numunelerin malzeme karakterizasyonunun belirlenmesi için XRF analizleri yapılmıştır. XRF analizleri sonuçlarında ON1 kodlu numunenim bronz, KDT2, KDT3 ve PNK kodlu numunelerin bakır, KDT4 ve KDT1 kodlu numunelerin pirinç, KL ve ON2 kodlu numunelerin bakır alaşımı olduğu tespit edilmiştir. XRF analizleri sonuçlarında bronz olarak tanımlanan numunelerin sadece 1 tanesinin bronz, diğer numunelerin ise bakır, pirinç ve bakır alaşımı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda çalışma kapsamı genişletilerek bakır ve bakır alaşımli eserlerin bozulma durumlarının incelenmesi olarak değerlendirilmiştir.

Bakır ve bakır alaşımı numunelerin bozulma durumu, korozyonun morfolojik yapısı, korozyon tabakalarının yıkıcı etkisi, malzeme karakterizasyonu, korozyon tabakasında bulunan elementler ve bakır alaşımlarının homojen yapısı hakkında SEM-EDX analizleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek bilgi edinilmiştir.

SEM-EDX analizleri ile metal numunelerin bozulma durumları genel olarak değerlendirildiğinde numunelerin içeriğindeki elementlere ve bulunduğu çevre koşullarına göre farklı şekilde korozyon davranışları sergilediği tespit edilmiştir. KDT4 ve PNK kodlu numunelerin SEM analizleri incelendiğinde korozyon tabakalarının yıkıcı etkide gelişerek, metalik özün tamamen yok olmasına sebep olduğu görülmüştür. KDT1, KDT2 ve KDT3 kodlu numunelerin SEM analizleri incelendiğinde metalik özün bozulmadığı, ancak korozyon tabakalarının tahrip edici etkide geliştiği görülmüştür. ON1, ON2 ve KL kodlu numunelerin SEM analizleri incelendiğinde ise metalik özün bozulmadığı korozyon tabakalarının koruyucu etkide geliştiği görülmüştür. Korozyon tabakalarının yıkıcı ve koruyucu etkide gelişmesinde alaşımların homojen yapısı da etkili olmuştur. Bakır alaşımı numunelerin elementel haritalamaları incelendiğinde, homojen yapıda olmayan KDT1 ve KDT2 kodlu numunelerin korozyon oluşumlarının

yıkıcı etkide, homojen yapıda olan ON1, ON2 ve KL kodlu numunelerin korozyon oluşumlarının ise koruyucu etkide geliştiği gözlemlenmiştir (Bkz. Bölüm 3.3).

EDX analizleri sonucunda elde edilen veriler malzeme karakterizasyon açısından değerlendirildiğinde XRF analiz sonuçları ile birbirini destekler nitelikte olduğu görülmüştür. EDX analizi ile korozyon katmanlarında kükürt (S), klor (Cl), fosfor (P), karbon (C), kalsiyum (Ca), Silisyum (Si) , Magnezyum (Mg) ve Alüminyum (Al) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Metal eserlerin mezar alanında kemikler ile birlikte bulunmasından dolayı korozyon tabakasında fosfor (P), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) bulunması olağandır. Ancak kükürt (S)'ün gömü koşullarında elde edilen metalin korozyon tabakasında bulunması nadiren rastlanan bir durumdur. Çünkü kükürt genellikle atmosferik koşullara maruz kalmış eserlerin üzerinde hava kirliliğine bağlı olarak bulunmaktadır. Gömü koşullarında kükürtün bulunması topraktaki bakteri varlığından ya da yer altı sularından kaynaklanmaktadır.

Malzeme karakterizasyonuna ve korozyon katmanında bulunan elementlere bağlı olarak FTIR analiz sonuçları değerlendirilerek korozyon ürünlerinin tanımlanması yapılmıştır. FTIR analiz sonuçları bakır ve bakır alaşımı numuneler üzerinde oluşan korozyon tabakalarının karmaşık yapıya sahip korozyon ürünlerinden oluşan bozulma durumlarını göstermiştir. Korozyon ürünlerinin oluşturduğu bileşikler korozyon sürecinin yıkıcı/koruyucu etkide gelişmesine neden olmuştur.

Bakır ve bakır alaşımı eserler üzerinde oluşan ilk korozyon tabakası baskınlık özelliğinden dolayı kuprittir. Ancak kuprit metal eserlerin malzeme özelliğine ve bulunduğu çevresel koşullara bağlı olarak farklı korozyon ürünlerine dönüşmektedir. Kuprit genellikle uniform şekilde metalin yüzeyini kaplayan koruyucu özelliğe sahip bir korozyon tabakasıdır. Metal numunelerin korozyon ürünleri FTIR analizi ile incelendiğinde kuprit varlığı sadece KDT4 ve KL kodlu numunelerde tespit edilmiştir. Ancak KDT4 kodlu numunenin üzerinde tenorit, zinkit, sipertinit ve malahit korozyon ürünlerinin varlığı, kristal yapılarının farklı olmasından ve korozyon davranışlarının farklı gelişmesinden dolayı, korozyon sürecinin yıkıcı etkide gelişmesine neden olmuştur (Bkz. Bölüm 3.4).

Metal eserlerin için en riskli korozyon ürünleri klorlü bileşiklerin oluşturduğu korozyon tabakalarıdır. Çünkü klor elektronegatiflik özelliğinden dolayı stabil olmayan korozyon oluşumuna sebep olmaktadır. KDT2, KDT3 ve PNK kodlu numunelerin

korozyon tabakalarında bulunan klorlü bileşikler, klinoatakamit ve atakamit korozyon sürecinin yıkıcı etkide gelişmesine neden olmuştur.

Bakır ve bakır alaşımı numunelerin FTIR analizleri incelendiğinde metal numunelerin üzerinde fosfatlı (libethenit, pseduomalahit), sülfatlı (antlerit ve brokhanit), karbonatlı (malahit), ve silikatlı (diaptose) korozyon ürünlerinin oluştuğu görülmüştür. Bu korozyon ürünleri stabil ortam sağlandığı zaman metaller için koruyucu niteliktedir. ON1, ON2 ve KL kodlu numuneler üzerinde oluşan korozyon ürünleri malahit, diaptose ve kuprit koruyucu etkide gelişim göstermiştir. Ancak KDT1 kodlu numunenin malzeme karakterizasyonuna bağlı olarak pirinç'in içeriğindeki çinkonun anodik tavır sergilemesinden dolayı, metalin üzerinde oluşan korozyon ürünleri libethenit, malahit ve brokhanit koruyucu etkide gelişim gösterememiştir.

ON2 ve KDT4 kodlu numunelerin FTIR analizleri sonucunda korozyon tabakasında kalsit varlığı tespit edilmiştir. Jeolojik olarak toprağın birçok mineralden oluştuğu gözönüne alındığında, kalsit mineralinin gömü koşullarında eserin yüzeyine nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak kalsit'in korozyon tabakasında korozyon ürünü değilde kirletici olarak bulunduğu tespit edilmiştir.

Bakır ve bakır alaşımlarının karakterizasyonlarının belirlenerek bozulma durumlarının incelenmesi, koruma ve onarım müdahale yöntemlerinin belirlenmesine yol göstermektedir. Yapılan çalışmada elde edilen veriler ışığında, bakır ve bakır alaşımı eserlerde meydana gelen bozulmaların önlenmesi için çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

KISALTMALAR DĞZĞNG

KDT1	: Kocadere Tümülsü Kurtarmas Kazısı, Kemer tokası parçası
KDT2	: Kocadere Tümülsü Kurtarmas Kazısı, Sikke 1
KDT3	: Kocadere Tümülsü Kurtarmas Kazısı, Sikke 2
KDT4	: Kocadere Tümülsü Kurtarmas Kazısı, Sikke3
PNK	: Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı, Formsuz metal parçaları
ON1	: Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı, Yüzük parçası
ON2	: Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı, Çivi
KL	: Kaklık Lahiti Kurtarma Kazısı, Kandil parçası
XRF	: X-ışını Floresans Spektrometresi
SEM-EDX	: Taramalı Elektron Mikroskobu – Enerji Dağılımlı X-ışını
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
M.Ö.	: Milattan önce
Bkz.	: Bakınız
NACE	: National Association of Corrosion Engineers
pH	: Power of Hydrogen
RH	: Bağlı Nem

KAYNAKÇA

- Akkaş 2011 C. Akkaş, *Oksitli Bakır Cevherlerinden Bakır Kazanımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011 (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi).
- Ashkenazi et al. 2015 D. Ashkenazi – I. Taxel – O. Tal, “Archeometallurgical Characterization of Late Roman- and Byzantine-Period Samaritan Magical Objects and Jewelry Made of Copper Alloys”, *Materials Characterization*, Volume 102, 195–208, 2015.
- Altıntaş – Günaydın 2012 E. Altıntaş – B. Ç. Günaydın, *Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı Raporu*, Denizli Müze Müdürlüğü Arşivinden, Denizli, 2012.
- Amelinckx et al. 1997 S. Amelinckx – D. van Dyck – J. van Landuyt – G. van Tendeloo, *Electron Microscopy Principles and Fundamentals*, A Wiley Company, 1997.
- Arslan 1987 N. Arslan, *Seramik Tasarımında Süsleme Kavramı*, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1987.
- Artioli 2010 İ. Artioli, *Scientific Methods and Cultural Heritage*, Oxford University Press, 2010.
- Bakthiari – Darezereshki 2011 F. Bakthiari – E. Darezereshki, “One-step Synthesis of Tenorite (CuO) Nano-particles from Cu₄(SO₄)(OH)₆ by Direct Thermal-decomposition Method”, *Materials Letters* 65, 171–174, 2011.
- Başak 2008 O. Başak, “Taş Çağm’dan Tunç Çağı’na Anadolu’da Maden Sanatının Gelişimi ve Kullanımını”, *Atatürk Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, Sayı 21.
- Bayazit 2013 M. Bayazit, *Kuriki Höyük (Batman) Arkeolojik Kazılardan Elde Edilen Seramiklerin Karakterizasyonu*, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013 (Yayımlanmış Doktora Tezi).
- Baykan 2016 D. Baykan, “Anadolu metalurji uygulamaları”, *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, Yıl 5, Sayı 9, 61-68, 2016.
- Belli Oktay 2004 O. Belli, *Anadolu’da Kalay ve Bronzun Tarihçesi*, Antalya, 2004.
- Berger 2012 D. Berger, *Bronzezeitliche Färbetechniken An Metallobjekten Nördlich Der Alpen*, Landes Museums For Vorgeschichte Halle Band 2 | 2012.
- Bilgi 2004 Ö. Bilgi, *Anatolia, Cradle of Castings/ Anadolu, Dökümün Beşiği*, İstanbul, 2004.

- Brown 1976 D. Brown, "Bronze and Pewter" Roman Crafts, 24-41, London, 1976.
- Chase 1991 W.T Chase, "Chinese Bronzes: Casting, Finishing, Patination, and Corrosion", *Ancient Historic Metals*, The Getty Conservation Institute, 85-117, 1991.
- Chiavari et al. 2007 C. Chiavari – K. Rahmouni – H. Takenouti – S. Joiret – P. Vermaut – L. Robbiola, "Composition and Electrochemical Properties of Natural Patinas of Outdoor Bronze Monuments", *Electrochimica Acta* 52, 7760–7769, 2007.
- Chilvers 2004 İ. Chilvers, *The Oxford Dictionary of Art*, Oxford University Press, USA, 2004.
- Collins 1934 W.F Collins, "The Mirror-Black and "Quicksilver" Patinas of Certain Chinese Bronzes", *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, Vol. 64, 69-79, 1934.
- Çatal 2009 Ç. Gökhan, *Antik Anadolu Madenciliği*, Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, 2009 (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi).
- Davy 1826 J. Davy, "Observations on the Changes Which have Taken Place in Some Antient Alloys of Copper", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 116, No. 1/3, 55-59, 1826.
- Derrick et al. 1999 M.R. Derrick – D. Stulik – J.M. Landry, *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1999.
- Di Carlo et al. 2017 G. Di Carlo – C. Giuliani – C. Riccucci – M. Pascucci – E. Messina – G. Fierro – M. Lavorgna – G.M. Ingo, "Artificial patina formation onto copper-based alloys: Chloride and sulphate induced corrosion processes", *Applied Surface Science* 421, 120–127, 2017.
- Doruk 2014 M. Doruk, *Metalik Malzemeler ve Korozyon*, Ankara, 2014.
- Duda – Rejil 1990 R. Duda – L.Rejil, *Minerals of the World*, New York, 1990.
- Ehsani – Yazıcı 2016 A. Ehsani – E. Y. Yazıcı, "Anadolu'da Bakır Madenciliği ve Kullanımının Kısa Tarihçesi", *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, Yıl 5, Sayı 9, 43-48, 2016.
- Engelbrekt et al. 2014 C. Engelbrekt – P. Malcho – J. Andersen – J. Zhang – K. Stahl – B. Li – J. Hu – J. Zhang, "Selective Synthesis of Clinoatacamite $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ and Tenorite CuO Nanoparticles by pH Control", *Journal of Nanoparticle Research*, Issue 8, 2014.
- Erginsoy 2008 Ü. Erginsoy, "Maden" Eczacıbaşı Sanat Ansiklopedisi, cilt 2, Yem Yayın, İstanbul, 974-975, 2008.

- Fidan 2016 E. Fidan, “Tarih Öncesi Dönemlerde Anadolu’da Kullanılmış Olan Maden Yatakları”, *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, Yıl 5, Sayı 9, 49-59, 2016.
- Figueiredo et al. 2013 E. Figueiredo – M. F. Araújo – R.J.C. Silva – R. Vilaça, “Characterisation of a Proto-historic bronze collection by micro-EDXRF”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 296, 26–31, 2013.
- Fink – Polushkin 1936 C. G. Fink – E. P. Polushkin, “Microscopic Study of Ancient Bronze and Copper”, *Trans. Am.Inst. Mining Met. Engrs.*, 122: 90-117, 1936.
- Friese 2012 D. Friese, *Onarım Uzmanı Kimdir? Onarım Nedir? Ne değildir*, Side, 2012.
- Ghoniem 2011 M. Ghoneim, “The Characterization of a Corroded Egyptian Bronze Statue and a Study of The Degradation Phenomena”, *International Journal of Conservation Science*, Volume 2, Issue 2, 95-108, 2011.
- Gorghinian et al. 2013 A. Gorghinian – A. Esposito – M. Ferretti – F. Catalli, “XRF analysis of Roman Imperial coins”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 309, 268–271, 2013.
- Greenwood – Earnshaw 1997 N.N. Greenwood – A. Earnshaw, *Chemistry of The Elements 2nd Edition*, Butterworth-Heinemann, 1997.
- Güldür 2013 G. Güldür, *İç Anadolu Bölgesi Bronz Çağı “ Hitit Dönemi” Eserleri Motif Ve Kompozisyonlarının Takı Tasarımında Uygulanması*, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013 (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi).
- Gürü – Yalçın 2012 M. Gürü – H. Yalçın, *Malzeme Bilgisi*, Ankara, 2012.
- Harman 2010 H. Hasan, *Hidrometalurjik Yöntemlerle Bakır Kimyasalları Üreten Tesislerden Çıkan Bakır İçerikli Atık Suların Değişimi Metodu İle Temizlenmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010 (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi).
- Hasol 2012 D. Hasol, *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*, İstanbul, 2012.
- İngo et al. 2001 G.M İngo – E. Angelini – G. Bultrini – I. Calliari – M. Dabala – T. De Caro, “Study of Long-Term Corrosion Layers Grown on High-Tin Leaded Bronzes by Means of The Combined Use of GDOES and SEM + EDS”, *Surface and Interface Analysis*, 2002; 34: 337-342, 2001.
- İngo et al. 2004 G.M İngo – E. Angelini – T. De Caro – G. Bultrini – I. Calliari, “Combined Use of GDOES, SEM+EDS, XRD and OM for The Microchemical Study of The Corrosion Products on Archaeological Bronzes” *Applied Physics A* 79, 199-203, 2004.
- Joseph 2009 E. Joseph, *Application of FTIR Microscopy To Cultural Heritage Materials*, Alma Mater Studiorum-Universita di Bologna, Dottorato Di Ricerca, 2009.

- Kaptan 1992 E. Kaptan, "Anadolu'da Kalay Ve Eski Yeraltı Kalay Madenciliği" *Jeoloji Mühendisliği*, Sayı 40, 15-19, Ankara, 1992.
- Karabay – Günaydın 2011 N. Karabay – B. Ç. Günaydın, Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı Raporu, Denizli Müze Müdürlüğü Arşivinden, Denizli, 2011.
- Karabay – Günaydın 2012 N. Karabay – B. Ç. Günaydın, "Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarma Kazısı", *21. Müze Çalışmaları ve Kurtarma Kazıları Sempozyumu*, 73-93, Marmaris, 2012.
- Knotkova – Kreislova 2007 D. Knotkova – K. Kreislova, "Atmospheric corrosion and conservation of copper and bronze" *Environmental Deterioration of Materials*, 107-138, Slovakia, 2007.
- Koval'chuk et al. 2016 M.V. Koval'chuk – E.B. Yatsishina – A.E. Blagov – E. Yu. Tereshchenko – P.A. Prosekov – Yu.A. Dyakova, "X-Ray and Synchrotron Methods in Studies of Cultural Heritage Sites", *Crystallography Reports*, Vol. 61, No. 5, 703–717. 2016.
- Köktaş 2009 S. Köktaş, *Bazı Organik Bileşiklerin Kristalografik ve Biçimlenimsel İncelenmesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2009 (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi).
- Kumbasar – Aykol 1993 I. Kumbasar – A. Aykol, *Mineraloji*, İstanbul, 1993.
- Li et al. 2017 Z. Li – F. Rao – S. Song, "Comparison of Adsorption of Phenol O-O and N-O Chelating Collectors at the Malachite/Water Interface in Flotation" *Minerals*, 7, 20; 2017, www.mdpi.com/journal/minerals
- Lins – Power 1991 A. Lins – T. Power, "The Corrosion of Bronze Monuments in Polluted Urban Sites: A Report on the Stability of Copper Mineral Species at Different pH Levels" *Ancient & Historic Metals, Conservation and Scientific Research*, 119-152, 1991.
- Majzlan et al. 2015 J. Majzlan – A.H. Zittlau – K.D. Grevel – J. Schliesser – F. Woodfield – E. Dachs – M. Števkó – M. Chovan – J. Plášil – S. Milovská, "Thermodynamic Properties And Phase Equilibria of The Secondary Copper Minerals Libethenite, Olivenite, Pseudomalachite, Kröhnkite, Cyanochroite, And Devilline", *The Canadian Mineralogist*, Vol. 53, pp. 937-960, 2015.
- Marabelli 1991 M. Marabelli, "The Monument of Marcus Aurelius: Research and Conservation", *Ancient and Historic Metals; Conservation and Scientific Research*, 1-20, The Getty Conservation Institute, 1991.
- Mazzeo – Joseph 2005 R. Mazzeo – E. Joseph, "The Use of FTIR Micro-ATR Spectroscopy and FTIR-Mapping For The Surface Characterisation of Bronze Corrosion Products", *art'05 - 8th International Conference on "Non Destructive Investigations and Micronalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage"*, Lecce (Italy), May 15th - 19th, 2005.
- Mazzeo et al. 2012 R. Mazzeo – S. Prati – M. Quaranta – G. Sciutto, "An Overview of Analytical Techniques and Methods for The Study and Preservation of

Artistic and Archaeological Bronzes” *Mediterranean Arhaeology and Archaeometry*, Vol. 12, No 2, 261-271, 2012.

M.E.B 2006

M.E.B, *Metalurji Alanları Döküm Hataları*, Ankara 2006.

Mohamed – Darweesh 2012

W. Mohamed – S. Darweesh, “Ancient Egyptian Black-Patinated Copper Alloys”, *Archaeometry* 54, 1, 175–192, 2012.

Morcillo et al. 2017

M. Morcillo – T. Chang – B. Chico – D. de la Fuente – I. Odnevall Wallinder – J.A. Jiménez – C. Leygraf, “Characterisation of a Centuries-Old Patinated Copper Roof Tile From Queen Anne's Summer Palace in Prague”, *Materials Characterization* 133, 146–155, 2017.

Namduri – Nasrazadani 2008

H. Namduri – S. Nasrazadani, “Quantitative analysis of iron oxides using Fourier Transform Infrared Spectrophotometry”, *Corrosion Science*, Volume 50, Issue 9, 2493-2497, 2008.

Nilsen 1977

N. A. Nilsen, “Corrosion Product Characterizasyon”, *Corrosion And Metal Artifacts- A Dialogue Between Conservators And Archaeologists And Corrosion Scientists*, 17-38, Washington, 1977.

Ohring 1992

M. Ohring, *The Materials Science Of Thin Films*, New Jersey, Academic Press 1992.

İşdaş

O. İşdaş, “Elektrokimyasal Korozyon İlkeleri” https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi155/d155_4548.pdf (10.07.2017).

Onaran 1995

K. Onaran, *Malzeme Bilimi*, İstanbul, 1995.

Orlić Bachler et al. 2016

M. Orlić Barchler – M. Bišćan – Z. Kregar – I. Jelovica Badovinac – J. Dobrinić – S. Milošević “Analysis of Antique Bronze Coins by Laser Induced Breakdown Spectroscopy and Multivariate Analysis”, *Spectrochimica Acta Part B* 123, 163–170, 2016.

Ospitali et al. 2012

F. Ospitali – C. Chiavari – C. Martini – E. Bernardi –F. Passarini – L. Robbiola, “The Characterization of Sn-Based Corrosion Products in Ancient Bronzes: a Raman Approach” *Journal of Raman Spectroscopy*, 1596-1603, 2012.

Özbal 2003

H. Özbal, *MÖ 3. Binyılda Anadolu’da Bronz*, Ankara, 2003.

Özbal 2013

H. Özbal, “Başlangıcından Demir Çağı Sonuna Kadar Anadolu Madencilerinin ve Metalurji ustalarının Teknolojik Başarılarının Kısa Bir Değerlendirmesi”, 3. *Türkiye Arkeolojisinde Metal: Arkeolojik ve Arkeometrik Çalışmalar*, 29-38, Ankara, 2013.

Özen 1999

L. Özen, “Bronz Kanseri Hastalığı”, *1. Ulusal Taşınabilir Kültür Varlıkları Konservasyonu ve Restorasyonu Kolokyumu*, 177-184, Ankara, 1999.

Paola 1991

F. Paola, “Restoration of The Marcus Aurelius: Facts and Comments”, *Ancients and Historic Metals; Conservation and Scientific Research*, 21-31, The Getty Conservation Institute, 1991.

- Quaranta et al. 2014 M. Quaranta – E. Catelli – S. Prati – G. Sciutto – R. Mazzeo, “Chinese Archaeological Artefacts: Microstructure and Corrosion Behaviour of High-Leaded Bronzes” *Journal of Cultural Heritage* 15, 283–291, 2014.
- Rahmouni et al. 2009 K. Rahmouni – H. Takenouti – N. Hajjaji – A. Srhiri – L. Robbiola, “Protection of Ancient and Historic Bronzes by Triazole Derivatives” *Electrochimica Acta* 54, 5206-5215, 2009.
- Reale et al. 2010 R. Reale – G. Guida – M.P. Sammartino – G. Visco, “Ancient Coins: Cluster Analysis Applied to Find a Correlation Between Corrosion Process and Burial Soil Characteristics” *Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment Taormina*, 26-29, Italy, 2010.
- Rosales et al. 2010 B.M Rosales – R.M. Vera – J.P. Hidalgo, “Characterisation and Properties of Synthetic Patina on Copper Base Sculptural Alloys”, *Corrosion Science* 52, 3212–3224, 2010.
- Rotaru et al. 2010 I. Rotaru – M. Mada – M. Fazecaş, “Corrosion and Anti-Corrosion Protection of Archeological Bronze Artifacts”, *Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume IX (XIX), 3.237-3.241, 2010.
- Rull-Pérez 2007 F. Rull-Pérez, “Raman Microscopy of Corroded Metals in Archaeology and Art History”, *Selected Topics in Raman Spectroscopic Applications Gelology. Bio-Materials. Art*, 2007.
- Savaş 2006 S.Ö. Savaş, *Çivi Yazılı Belgeler Işığında Anadoluda'da Madencilik Ve Maden Kullanımı*, Ankara, 2006.
- Schroder 2006 D.K Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, 2006.
- Schwizer 1991 F. Schwizer, “Bronze Objects from Lake Sites: From Patina to “Biography”, *Ancient and Historic Metals; Conservation and Scientific Research*, 33-50, The Getty Conservation Institute, 1991.
- Scott 1985 D.A Scott, “Periodic Corrosion Phenomena in bronze antiquities”, *Studies in Conservation*, Vol. 30, No. 2, 49-57, 1985.
- Scott 1994 D.A Scott, “An Examination of the Patina and Corrosion Morphology of Some Roman Bronzes”, *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 33, No. 1, 1-23, 1994.
- Scott 2002 D.A Scott, *Copper and Bronze in Art Corrosion, Colorants, Conservation*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2002.
- Sevinç – Kök 2007 C. Sevinç – Ş. Kök, Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı Raporu, Denizli Müze Müdürlüğü Arşivinden, Denizli, 2007.
- Tansuğ 2016 G. Tansuğ, “Bronz Yapıtların Atmosferik Korozyonunda Hava Kirlenmelerinin Etkisi ve İnhibitörlerle Korunması”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), ss. 401-414, Adana, 2016.

- Tarhan 2009 Ç. M. Tarhan, *Urartu Maden Teknolojisi*, Ege Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2009 (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi).
- Tarhan vd. 2014 M. Tarhan – A. Ceylan – D. Bor, Kaklık Lahit Mezar Kurtarma Kazısı Raporu, Denizli Müze Müdürlüğü Arşivinden, Denizli, 2014.
- Tekin 2015 H. Tekin, *Eski Anadolu Madenciligi*, Ankara, 2015.
- Uluengin 2006 M.B Uluengin, *Mimari Metaller Özellikleri Bozulma Nedenleri Koruma ve Restorasyon Teknikleri*, İstanbul, 2006.
- Uyar v.d 2013 N. Uyar – B.Ç. Günaydın – E. Altıntaş, “Denizli Müze Müdürlüğü, Honaz İlçesi, Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısı”, *22. Müze Çalışmaları ve Kurtarma Kazıları Sempozyumu*, 395-406, Adana, 2013.
- Üneri 1988 S. Üneri, *Elektrokimya Cilt 1*, Ankara, 1988.
- Vasilache et al. 2011 V. Vasilache – D. Aparaschivei – Sandu Ion, “A Scientific Investigation of The Ancient Jewels Found In The Ibida Site, Romania”, *International Journal of Conservation Science*, Volume 2, Issue 2, April-June: 117-126, 2011.
- Watkinson 2010 D. Watkinson, “Preservation of Metallic Cultural Heritage”, 2010. https://booksite.elsevier.com/brochures/shreir/PDF/Preservation_of_Metallic_Cultural_Heritage.pdf (10.10.2017).
- Weil 2007 P. D. Weil, “Technical Art History and Archaeometry I Patina: Historical Scientific and Practical Considerations” *Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação*, Sayı: 1/2, 60-66. USA, 2007.
- Wharton – Kökten Ersoy 2002 G. Wharton - H. Kökten Ersoy, “Arkeolojik Kazılarda Metal Bulunların Konservasyonu”, *Arkeolojik Konservasyon ve Antik Yerleşimlerin Korunması İçin Pratik Rehber*, Sayı 11, Kırşehir, 2002.
- Yalçın 2016 Ü. Yalçın, “Anadolu Madencilik Tarihine Toplu bir bakış”, *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, Yıl 5, Sayı 9, Sayfa 3-14, 2016.
- Yokota et al. 2003 M. Yokota – F. Sugaya – H. Mifune – Y. Kobori – K. Shimizu – K. Nakai – S-İ Miyahara – Y. Shimizu, “Possibility of Bacteria-Induced Corrosion of Ancient Bronze Mirrors Found in Ground”, *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 2, 268-276, 2003.
- Yüceil 2016 I.G. Yüceil, *Rezan Has Müzesi Urartu Takı Koleksiyonuna Ait Bir Grup Tunç Eserin Bozulmalarının Araştırılması Ve Koruma Onarım Uygulamaları*, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2016 (Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi).
- Zhang et al. 2014 X. Zhang – Y. Zhang – D. Wang – F. Qu, “Investigation of Adsorption Behavior of Cu₂O Submicro-Octahedra towards Congo Red”, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials*, Article ID 619239, 6 pages, 2014.
- Zittlau et al. 2013 A.H. Zittlau – Q. Shi – J. Boerio-Goates – B.F. Woodfield – J. Majzlan, “Thermodynamics of The Basic Copper Sulfate Antlerite, Posnjakite And Brochantite”, *Chemie der Erde*, 73, 39– 50, 2013.

İNTERNET KAYNAKLARI

merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-floresans-spektometresi, (10.03.2018)

<http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/Arsenik> (19.05.2017)

<http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kalay/>, (19.05.2017)

[file:///C:/Users/PETA/Downloads/BronzeDiseaseAnElectrochemicalExplanationICCM Bulletin1981.pdf](file:///C:/Users/PETA/Downloads/BronzeDiseaseAnElectrochemicalExplanationICCMBulletin1981.pdf), (20.05.2018)

<http://rruff.info/> (20.06.2018)

<http://www.englishheritage.org.uk/content/learn/conservation/2543455/2543024/guidelines-for-the-storage-and-display-of-archaeological-metalwork.pdf> (10.09.2017).

http://cameo.mfa.org/wiki/Main_Page (02.07.2018)

<http://www.gem-passion.com/dioptase-from-mozambique> (10.07.2018)

<http://cool.conservation-us.org/jaic/articles/jaic42-02-008.html> (10.07.2017)

<https://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/alasimlarin-yapisi/> (15.07.2018)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil-1	Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri	16
Şekil-2	Arseniğin fiziksel ve kimyasal özellikleri	18
Şekil-3	Kalayın fiziksel ve kimyasal özellikleri	19
Şekil-4	Çinkonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	21
Şekil-5	Kurşunun fiziksel ve kimyasal özellikleri	22
Şekil-6	Çukurcuk oluşumu ve tepecik korozyonu	25
Şekil-7	Türkiye haritası üzerinde Denizli ilinin konumu	42
Şekil-8	Denizli Müze Müdürlüğü kurtarma kazı çalışmalarının konumu	43
Şekil-9	KDT1 kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	55
Şekil-10	KDT1 kodlu numunenin korozyon kalınlığı ölçümü görüntüsü	55
Şekil-11	KDT1 kodlu numunenin EDX grafiği	56
Şekil-12	KDT1 kodlu numunenin elementel haritalaması	56
Şekil-13	KDT2 kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	57
Şekil-14	KDT2 kodlu numunenin korozyon kalınlığı ölçümü görüntüsü	58
Şekil-15	KDT2 kodlu numunenin EDX grafiği	58
Şekil-16	KDT2 kodlu numunenin elementel haritalaması	59
Şekil-17	KDT3 kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	59
Şekil-18	KDT3 kodlu numunenin korozyon kalınlığı ölçümü görüntüsü	60
Şekil-19	KDT3 kodlu numunenin EDX grafiği	60
Şekil-20	KDT3 kodlu numunenin elementel haritalaması	61
Şekil-21	KDT4 kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	61

Şekil-22	KDT4 kodlu numunenin EDX grafiği	62
Şekil-23	KDT4 kodlu numunenin elementel haritalaması	63
Şekil-24	PNK kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	63
Şekil-25	PNK kodlu numunenin EDX grafiği	64
Şekil-26	PNK kodlu numunenin elementel haritalaması	65
Şekil-27	ON1 kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	65
Şekil-28	ON1 kodlu numunenin korozyon kalınlığı ölçümü görüntüsü	66
Şekil-29	ON1 kodlu numunenin EDX grafiği	66
Şekil-30	ON1 kodlu numunenin elementel haritalaması	67
Şekil-31	ON2 kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	67
Şekil-32	ON2 kodlu numunenin EDX grafiği	68
Şekil-33	ON2 kodlu numunenin elementel haritalaması	68
Şekil-34	KL kodlu numunenin SEM analizi, ASB görüntüsü	69
Şekil-35	KL kodlu numunenin korozyon kalınlığı ölçümü görüntüsü	70
Şekil-36	KL kodlu numunenin EDX grafiği	70
Şekil-37	KL kodlu numunenin elementel haritalaması	71
Şekil-38	KDT1 kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	73
Şekil-39	KDT2 kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	73
Şekil-40	KDT3 kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	74
Şekil-41	KDT4 kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	74
Şekil-42	PNK kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	75
Şekil-43	ON1 kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	75
Şekil-44	ON2 kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	76
Şekil-45	KL kodlu numunenin FTIR spektroskopi analiz grafiği	76

TABLO DĞZĞNG

		Sayfa
Tablo-1	Başlıca bakır cevherleri	17
Tablo-2	Metallerin standart elektrot potansiyelleri	26
Tablo-3	Metal eserlerin bulunduğu farklı gömü koşullarından örnekler	29
Tablo-4	Bakır ve bakır alaşımlarının korozyon ürünleri	32
Tablo-5	Bakır asetatların karakteristik özellikleri	40
Tablo-6	Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarmas Kazısı, analizi yapılan etütlük eserler	45
Tablo-7	Pınarkent Nekropol Alanı Kurtarmas Kazısı, analizi yapılan etütlük eserler	47
Tablo-8	Ovacık Köyü Tonozlu Mezar Kurtarmas Kazısı, analizi yapılan etütlük eserler	48-49
Tablo-9	Kaklık Lahiti Kurtarmas Kazısı, analizi yapılan etütlük eserler	50
Tablo-10	Kurtarma kazılarındaki numunelere ait XRF analizi sonuçları	52
Tablo-11	XRF analizi sonuç tablosunun renklendirilmesine dair bilgi	52
Tablo-12	FTIR spektroskopi analizi korozyon ürünlerinin bant değerleri (cm ⁻¹)	72

RESİM DİZİNİ

		Sayfa
Resim-1	Denizli Müze Müdürlüğünde numune alma çalışmaları	42
Resim-2	Tonozlu mezarın girişi üzerindeki kapak taşı	44
Resim-3	Tonozlu mezarın iç görünüşü	44
Resim-4	Kaya oygu mezar genel görünüm	46
Resim-5	Tekne tipi mezar iç görünüm	46
Resim-6	Kazı çalışması yapılan belli bir mezar alanın genel görünümü	47
Resim-7	Tekne tipi mezar iç görünüm	48
Resim-8	Lahit genel görünüm	59
Resim-9	Lahit iç görünüm	50

ÖZGEÇMİŞİ

Adı Soyadı: Ahmet SANSAR

Doğum Yeri ve Tarihi: Tokat-Merkez /15.04.1987



Email: ahmetsansar60@gmail.com

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim Bilgileri

& Pamukkale Üniversitesi, Arkeoloji Enstitüsü

Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Anabilim Dalı Yüksek Lisans (2015-2018)

& Batman Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi

Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Lisans (2009-2014)

& Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Hayvan Sağlığı Meslek Yüksekokulu

Hayvan Yetiştiriciliği ve Sağlığı (2005-2007)

Mesleki Tecrübeler

& İlbada Mezarlığı Çevre Düzenleme ve Koruma Onarım Çalışmaları, Konservatör (2017)

& İlısu Barajı Siirt Başur Höyük Kurtarma Kazısı, Konservatör (2015)

& Şanlıurfa Çarmelik Hanı Restorasyonu, Konservatör (2015)

& Şanlıurfa Siverek Hacı Ömer Cami Restorasyonu, Konservatör (2014)

& Tokat Kalesi Restorasyon Çalışmaları, Konservatör (2014)

& Nif Dağı Olympos Arkeolojik Araştırma Kazısı, Konservatör (2013)

& Acemhöyük Arkeolojik Araştırma Kazısı, Konservatör (2013)

& Komana Arkeolojik Araştırma Kazısı, Konservatör (2012)

Projeler

PAU-BAP “Denizli Müze Müdürlüğü 2016 Yılı Kazı Çalışmalarında Ele Geçen Etütlük Bozulmaların İncelenmesi Ve Koruma Önerileri” Proje Üyesi (2017-2018)

Yayımlar

A.Sansar, E. Caner, C. Gök, B.A. Güney, *Kocadere Tonozlu Mezar Kurtarma Kazısından Ele Geçen Etütlük Metal Eserlerin Karakterizasyonu ve Bozulma Durumlarının İncelenmesi*, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 40. Uluslararası Kazı, Araştırma ve Arkeometri Sempozyumu, 2018, bildiri sunumu.