

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ARKEOLOJİ ANABİLİM DALI
PROTOHİSTORYA VE ÖNASYA ARKEOLOJİSİ PROGRAMI

**BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLI ESERLERDE KOROZYON VE TAVŞANLI HÖYÜK
KAZISI ESERLERİ ÜZERİNDEN KOROZYON TANIMLAMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASEMİN DALGIÇ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MUSTAFA ERKAN FİDAN

BİLECİK, 2025

10702278

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ARKEOLOJİ ANABİLİM DALI
PROTOHİSTORYA VE ÖNASYA ARKEOLOJİSİ PROGRAMI

**BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLI ESERLERDE KOROZYON VE TAVŞANLI HÖYÜK
KAZISI ESERLERİ ÜZERİNDEN KOROZYON İNDİRGEME YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASEMİN DALGIÇ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MUSTAFA ERKAN FİDAN

BİLECİK, 2025

10702278

BEYAN

Bakır Ve Bakır Alaşım Eserlerde Korozyon Ve Tavşanlı Höyük Kazısı Eserleri Üzerinden Korozyon Tanımlama Yöntemleri adlı yüksek lisans yeterlik tezi projesinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Yasemin DALGIÇ

.../.../2025

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması bakır ve bakır alaşımlı buluntular üzerinde oluşan bozulma, korozyon, patina, mineral olarak isimlendirilen ürünlerin nedenleri ve sonuçları üzerine, eldeki somut örnekler üzerinden yorumlanan bilgiler ve uygulamalardan oluşmaktadır. Öncelikle yüksek lisans yapmam konusunda beni cesaretlendiren, bu tez konusunu bana öneren, tezin başından sonuna kadar beni yönlendiren ve çalışmaların her aşamasında destek veren değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Erkan FİDAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Buluntular üzerinde çalışamama imkan sağlayan ve beni içtenlikle ağırlayıp, yardımlarını hiç esirgemeyen Tavşanlı Höyük kazısı ekibine, özellikle laboratuvarında birlikte mesai yaptığım sevgili meslektaşlarım Kardelen ARIN ve Ayşenur YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım. Kazı evinde çalışmalarımı yaparken oğluma kazıyı anlatarak ona arkeoloji sevdiren ve güzel neşesiyle onunla ilgilenen ekibin en tatlı üyesi Öykü FİDAN'a teşekkürleri bir borç bilirim.

Çalışmalarımı yürütürken en büyük katkıyı ve imkanı sağlayan kurumum Bursa Restorasyon ve Konservasyon Bölge Laboratuvarı Müdürlüğü uzmanlarına, lisansüstü eğitim ve bilimsel yayınlar konusunda personeline destek veren Müdürümüz Dr. Hüseyin Gürsel BİLMİŞ'e, mesai arkadaşlarım Kimyagerler Seda ESEN ve Nagihan ARIKAN'a, beni her gün cesaretlendiren, çalışmamda yardımlarını esriyemeyen, tecrübelerini sunan çok sevgili arkadaşım Bursa Rölöve ve Anıtlar Müdürü Y. Mimar Nadide Aylin KIRLANGIÇ'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Yaptıkları çalışmalarıyla ve benimle paylaştıkları kaynaklarıyla yardımlarını sunan meslektaşlarım Irmak Güneş YÜCEİL ve Tarık GÜÇLÜTÜRK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, hayatımdaki desteğini tezime de sunarak katkıda bulunan sevgili eşim Caner DALGIÇ'a, varlığıyla her şeyi mümkün kılan, sonsuz ışığım, oğlum Atlas DALGIÇ'a, tez süreci boyunca oğlumun bakımı üstlenerek büyük emek veren babaannemiz Sebahat DALGIÇ'a ve lisans-lisansüstü öğrenimim boyunca beni destekleyen aileme sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım.

Yasemin DALGIÇ

2025

ÖZET

BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLI ESERLERDE KOROZYON VE TAVŞANLI HÖYÜK KAZISI ESERLERİ ÜZERİNDEN KOROZYON TANIMLAMA YÖNTEMLERİ

Bakır ve Bakır Alaşımlı Eserlerde Korozyon ve Tavşanlı Höyük Kazısı Eserleri Üzerinden Korozyon Tanımlama Yöntemleri konulu bu tez kapsamında bakır madeninin kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenerek korozyon mekanizması, tespiti ve bakır korozyonu indirgeme yöntemleri araştırılmıştır. Tavşanlı Höyük kazısından seçilen 16 adet bakır alaşımlı örnek üzerinden de korozyon ürünlerinin tanımlanması, oluşan tahribatın belgelenmesiyle, önleyici koruma çalışmalarını içermektedir.

Bakır ve bakır alaşımları antik çağlardan günümüze kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Ancak bu alaşımlar çevresel etmenler nedeniyle korozyona maruz kalmakta ve zamanla yapısal bütünlüklerini kaybetmektedir. Bu çalışmada korozyonun nedenleri, türleri, analitik tekniklerle tespiti ve indirgeme yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca korozyonu tanımlamak için kullanılan çeşitli yöntemler Tavşanlı Höyük kazı buluntuları üzerinden uygulamalı olarak anlatılmıştır.

Tavşanlı Höyük ve bakır bazlı eser buluntuları üzerinden, korozyonun türü, sebepleri, alaşımların korozyona etkisi, toprak altı koşulları araştırılarak 16 adet eserin her biri üzerinden tanımlamalar yapılmıştır. Mikroskop ve Xrf kullanılarak kristal yapı, korozyon rengi ve toprakaltı koşulları değerlendirildiğinde korozyonun oluşma nedenleri ve buluntunun depo koşullarında saklanmasına kadar olan süreçte öneriler sunulmuştur.

Metal eserlerin toprak altında geçirdikleri süre boyunca ortaya çıkan korozyon ürünlerine topraktaki nem, tuz, ph derecesi gibi birçok etmen sebep olmaktadır. Bu gibi bozulma etkenlerinin tanımlanması uygulanacak konservasyon yöntemlerini belirlemektedir. Eserin özgününe bağlı kalarak, bütünlüğünü bozmadan, malzeme ve estetik özelliklerini korumak, bozulmasını etkileyen nedenleri saptamak ve en uygun metot ve yöntemlerin seçilerek korunması Konservasyon biliminin de ana amacı olmuştur. Bu bağlamda çalışmamız, bakır alaşımlı eserlerin karakterizasyonu, bozulma etkenleri, oluşan korozyon ürünlerinin tanımlanması, oluşturduğu tahribatın saptanması ve doğru koruma uygulamaları için gerekli bilginin oluşturulmasını amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tavşanlı Höyük, bakır, bakır alaşımı, korozyon, konservasyon, koruma-onarım, analitik teknik

ABSTRACT

CORROSION ON COPPER AND COPPER ALLOY ARTIFACTS AND CORROSION IDENTIFICATION METHODS THROUGH THE ARTIFACTS FROM THE TAVŞANLI HÖYÜK EXCAVATION

This thesis, titled "Corrosion on Copper and Copper Alloy Artifacts and Corrosion Reduction Methods Through the Artifacts from the Tavşanlı Höyük Excavation," investigates the chemical and physical properties of copper, examines the mechanisms of corrosion, its detection, and reduction methods for copper corrosion. Through the analysis of 16 selected copper alloy samples from the Tavşanlı Höyük excavation, the study identifies corrosion products, documents the resulting damage, and explores preventive conservation measures.

Despite their enduring use throughout history, copper and copper alloys are susceptible to environmental corrosion, which degrades their structure over time. In this study, the causes, types, analytical detection techniques, and reduction methods of corrosion are discussed in detail. In addition, various methods used to identify corrosion are explained through practical applications on the finds from the Tavşanlı Höyük excavation.

Based on the Tavşanlı Höyük and its copper-based artifact finds, the type and causes of corrosion, the effect of the alloy on corrosion, and the underground conditions were investigated, and descriptions were made for each of the 16 artifacts. Using a microscope and XRF, the crystal structure, corrosion color, and underground conditions were evaluated, offering insights into the causes of corrosion formation and recommendations for the storage conditions of the finds in the repository.

Metal artifacts buried underground suffer damage from environmental factors like moisture and soil composition. Many factors, such as moisture, salt, and pH levels in the soil, contribute to the corrosion products that emerge as a result of this damage. Identifying these degradation factors determines the conservation methods to be applied. Conservation science aims to preserve artifacts by identifying the causes of their deterioration and applying appropriate preservation methods without compromising their original materials and aesthetics. In this context, our study aims to characterize copper alloy artifacts, identify degradation factors, define the resulting corrosion products, determine the damage they cause, and provide the necessary information for proper conservation practices.

Keywords: Tavşanlı Höyük, copper, copper alloy, corrosion, conservation, conservation-restoration, analytical techniques

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
HARİTALAR LİSTESİ.....	ix
RESİMLER LİSTESİ.....	x
KATALOG LİSTESİ.....	xi
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

BAKIR

1. BAKIR	3
1.1. Bakır Madeni	3
1.2. Bakır Alaşımları	4
1.3. Tarih Öncesi Dönemde Bakır	6

İKİNCİ BÖLÜM

BAKIR ve BAKIR ALAŞIMLARININ KOROZYONU

2. Bakır Korozyonu	12
2.1. Korozyon	12
2.1.1. Oluşum Nedenleri.....	13
2.2. Korozyon Ürünleri (Bakır Patinaları)	16
2.2.1. Oksitler ve Hidrooksitler	17
2.2.2. Karbonatlar	18
2.2.3. Bakır Klorürler	19

2.2.4. Bakır Sülfatlar.....	20
2.2.5. Bakır Sülfürler	21
2.2.6. Bakır Fosfatlar ve Nitratlar	23

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

KOROZYONUN TESPİTİ

3. Korozyonun Tespiti.....	25
3.1. Görsel Tespitler	26
3.2. Mikroskop İncelemeleri	26
3.2.1. Stereomikroskop.....	26
3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	27
3.2.3. Metalurji Mikroskobu.....	28
3.2.4. X-RAY.....	30
3.3. Analitik Teknikler	31
3.3.1. XRF	31
3.3.2. XRD (X-Işınları Difraksiyon Spektrometresi)	33
3.3.3. FT-IR ve Raman Spektrometre Yöntemleri	35
3.4. Mikroanaliz Yöntemleri (Pixe, Epma).....	37

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

KOROZYON İNDİRGEME YÖNTEMLERİ

4. Korozyon İndirgeme Yöntemleri	39
4.1. Kimyasal Yöntemler	41
4.1.1. Benzotriazol (BTA).....	41
4.1.2. AMT	43
4.1.3. Yeşil İnhibitörler.....	43

BEŞİNCİ BÖLÜM

TAVŞANLI HÖYÜK BULUNTULARI ÜZERİNDEN KOROZYON TANIMLAMA YÖNTEMLERİ

5. Tavşanlı Höyük Buluntuları Üzerinden Korozyon Tanımlama Yöntemleri.....	45
5.1. Tavşanlı Höyük	45

5.2. Tavşanlı Höyük Kazısı Bakır Buluntuları Üzerinden Korozyon Tanımlama ve Konservasyon Yöntemleri.....	48
5.2.1. AN-55 1/1 Bul. No.lu Metal Başlı İğne (Fiş No:1)	54
5.2.2. AV-37 48/8 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:2)	57
5.2.3. AV-37 48/10 Bul. No.lu Metal Keski (Fiş No:3)	60
5.2.4. AV-37 79/3 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No: 4)	63
5.2.5. AV-37 79/4 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No:5)	66
5.2.6. AV-37 87/3 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No:6)	70
5.2.7. AV-37 89/5 Bul. No.lu Metal Bilezik (Fiş No:7).....	73
5.2.8. AV-38 31/3 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:8)	76
5.2.9. AV-38 41/2 Bul. No.lu Metal (Fiş No:9)	79
5.2.10. AV-38 45/3 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:10)	82
5.2.11. AV-38 45/4 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:11)	85
5.2.12. AV-38 61/1 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:12)	88
5.2.13. AV-38 73/8 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:13)	91
5.2.14. AV-38 73/14 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:14)	94
5.2.15. AV-38 90/1 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No: 15)	97
5.2.16. AV-38 68/4 Bul. No.lu Metal Bız (Fiş No:16).....	100
SONUÇ	103
KAYNAKÇA	108

KISALTMALAR LİSTESİ

AMT: 2-amino-5-merkapt-1,3,4-tiadiazol

Bkz: Bakınız

BTA: Benzotriazole

Cm: Santimtre

EPMA: Elektron Probu Mikroanalizi

FT-IR: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

MÖ: Milattan Önce

PIXE: Parçacık veya Proton Kaynaklı X-ışını Emisyonu

RAMAN: Raman Spektroskopisi

S.: Sayfa

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

Vb: Ve benzeri

vd: Ve diğerleri

Vol.: Volume

Yy.: Yüzyıl

XRD: X-Işınları Difraksiyon Spektrometresi

XRF: X- ışını floresans spektrometresi

X-RAY: X ışını radyografisi

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1.1. Periyodik Tablo	3
Tablo 1.2. Bakır Mineralleri	4
Tablo 2.1. En Yaygın Bakır Korozyon Ürünleri	16
Tablo 5.1. Çalışılan Eser Envanterleri	49
Tablo 5.2. Buluntuların Element Kompozisyonları ve Bozulma Durumları.....	52



HARİTALAR LİSTESİ

Sayfa No

Harita 1.1. Anadolu'daki Bakır Yatakları ve Tarihöncesi Bakır İşletmeleri	7
Harita 5.1. Tavşanlı Ovası ve Tavşanlı Höyük Konumu	45



RESİMLER LİSTESİ

Sayfa No

Resim 1.1. Çayönü, Malahit Buluntular	8
Resim 3.1. Bronz bir eser üzerinde uygulanan görüntülemeler.....	29
Resim 3.2. Bronz bir eser üzerinde uygulanan görüntülemeler.....	29
Resim 3.3. Rafyografik Görüntüleme	31
Resim 3.4. Ana Bileşenleri Gösterilen Bir P-Xrf Diyagramı	32
Resim 3.5. Xrd Çalışma Diyagramı.....	34
Resim 3.6. F-TIR Spektrometre Çalışma Diyagramı	36
Resim 3.7. Raman Spektrometre Çalışma Diyagramı	36
Resim 4.1. İndirgeyicilerin Çalışma Mekanizması.....	40
Resim 5.1. Höyükten Hava Fotoğrafı,2021	46
Resim 5.2. 2022 Yılı Kazı Buluntuları	47

Fiş LİSTESİ

Sayfa No

Fiş 1. AN-55 1/1 Bul. No.lu Metal Başlı İğne (Fiş No:1)	54
Fiş 2. AV-37 48/8 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:2).....	57
Fiş 3. AV-37 48/10 Bul. No.lu Metal Keski (Fiş No:3).....	60
Fiş 4. AV-37 79/3 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No: 4).....	63
Fiş 5. AV-37 79/4 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No:5).....	66
Fiş 6. AV-37 87/3 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No:6)	70
Fiş 7. AV-37 89/5 Bul. No.lu Metal Bilezik (Fiş No:7)	73
Fiş 8. AV-38 31/3 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:8).....	76
Fiş 9. AV-38 41/2 Bul. No.lu Metal (Fiş No:9).....	79
Fiş 10. AV-38 45/3 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:10).....	82
Fiş 11. AV-38 45/4 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:11).....	85
Fiş 12. AV-38 61/1 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:12).....	88
Fiş 13. AV-38 73/8 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:13).....	91
Fiş 14. AV-38 73/14 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:14).....	94
Fiş 15. AV-38 90/1 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No: 15).....	97
Fiş 16. AV-38 68/4 Bul. No.lu Metal Bız (Fiş No:16)	100

GİRİŞ

Bakır ve bakır alaşımları, antik çağlardan günümüze kadar insanlık tarihinin en önemli metal malzemeleri arasında yer almış ve geniş bir kullanım alanı bulmuştur. İnsanlar, yaşamlarını kolaylaştırmak için tarih boyunca çeşitli malzemeler kullanmış, yerleşik hayata geçişle bu süreç hızlanmıştır. Başlangıçta ahşap, taş ve pişmiş topraktan yararlanılmış, daha sonra dövme ve döküm teknikleriyle şekillendirilebilen madenler kullanılmaya başlanmıştır. İlk keşfedilen madenlerden biri altın olsa da, aletten, takıya birçok alanda kullanılan bakır, ilk metalürjik faaliyetlerin ana malzemesi olmuştur.

Bakırın, tarih boyunca hem fonksiyonel hem de estetik açıdan önemli bir materyal olarak kullanılması, erken dönem metal işçiliğinde merkezi bir rol oynamıştır; bu nedenle, bakır ve bakır alaşımlarının korunması, arkeolojik ve tarihi değeri olan buluntular için büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bu tez, bakır madeni ve toprak altı koşullarında oluşan ürünleri araştırarak, elde edilen bilgilerle, farklı bozulma türlerine sahip 16 adet bakır ve bakır alaşımlı kazı buluntusu üzerinden korozyon ürünleri ve özelliklerinin çalışmasını kapsamaktadır.

Tez, toplam beş bölüme ayrılmış ve her bir bölümde ana konunun farklı boyutları derinlemesine incelenmiştir. Birinci bölümde, çalışmanın kuramsal altyapısı ve çalışmanın temelini oluşturan kavramsal çerçeve ele alınmıştır. Bu bölümde, bakır elementi ele alınarak konuyla ilgili literatür taraması yapılmış ve alandaki temel tanımlar tekrarlanmıştır. Bakır alaşımları ve tarihöncesi Anadolu’da bakırın kullanılmasıyla ortaya çıkan sonuçlar, bakır madenleri, bakırın ilk kullanıldığı dönemden Son Tunç Çağı’na kadar olan dönem anlatılmıştır.

İkinci bölümde, araştırma kapsamında kullanılan metodoloji detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölümde bakırın korunmasında ve arkeolojik eserlerin muhafazasında önemli bir rol oynayan korozyon oluşumlarının nedenleri ve ortaya çıkan korozyon ürünleri anlatılmıştır.

Korozyon süreçlerinin incelenmesi, özellikle arkeolojik ve tarihi eserlerin korunması açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, tezin üçüncü bölümünde korozyon tespit yöntemleri, arkeometri alanında kullanılan bilimsel ve analitik teknikler ile bu tekniklerde kullanılan cihazların çalışma prensipleri “Korozyonun Tespiti” bölümünde anlatılmıştır.

Dördüncü bölüm, korozyonun önlenmesi amacıyla kullanılan kimyasal indirgeme yöntemlerini ele almaktadır. Kimyasal yöntemler, metallerin oksitlenmesini engellemek veya yavaşlatmak

için çeşitli kimyasal maddelerin kullanımını içerir. Özellikle en çok kullanılan Benzotriazol (BTA) ve AMT, bakır ve bakır alaşımlarında korozyonun önlenmesinde etkili bir kimyasal inhibitör olarak öne çıkar ve bu başlık altında kullanım özellikleri detaylandırılmıştır. Ayrıca, çok yeni ve evre dostu olan yeşil inhibitörler konusu alternatif olarak araştırılmıştır. Bu bölümde, bu kimyasal maddelerin nasıl çalıştığı ve avantajları üzerine bilgi verilmektedir.

Beşinci ve son bölümde, tüm bu bilgiler ışığında Tavşanlı Höyük kazılarında seçilen 16 adet bakır alaşımlı buluntunun, korozyon tanımları, konservasyon süreçleri her bir eser için hazırlanan koruma ve onarım fişlerinde detaylı olarak sunulmuştur.

Sonuç olarak, bu tez, bakır ve bakır alaşımlarının tarihsel ve arkeolojik değerini koruma amacıyla, korozyon süreçlerinin incelenmesi, tespit yöntemleri, kimyasal indirgeme teknikleri ve koruma yöntemlerinin detaylı bir şekilde ele alınarak, kazı buluntuları üzerinden uygulamalı örneklerle bakır eserlerinin korunmasına dair önemli bulgular sunmaktadır.

Bakır, büyük miktarlarda doğada saf halde bulunabilen nadir metallere dendir. Doğada nabit ya da yaygın olarak sülfürlü, oksitli mineraller ve kompleks bileşikler halinde bulunmaktadır. Kuprit, kalkosit, kovellit, kalkopirit, bornit, tetrahedrite, tenorit, malahit, azurit ve tennantite üretim yapılan yaygın minerallerdir.

Tablo 1.2. Bakır Mineralleri

Mineral	Kimyasal Formül	Kütlece Bakır İçeriği (%)
Nabit Bakır	Cu	99,9
Kuprit	Cu ₂ O	88,8
Dijenit	Cu ₉ S ₅	85,6
Tenorit	CuO	79,9
Kalkosin	Cu ₂ S	79,9
Bornit	Cu ₅ FeS ₄	63,3
Malahit	Cu ₂ (CO ₃) (OH) ₂	57,5
Azurit	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55,3
Kalkopirit	CuFeS ₂	34,6

Kaynak: (Karapınar, 2022: 38)

Bakır üretimi sülfürlü ve oksitli bakır cevherlerinin madencilik teknikleriyle çıkarılması, zenginleştirilmesi, blister ve rafine bakır haline getirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Saf bakırın üretimi sırasında cevherleri ezilir ve toz hale gelene kadar öğütülerek flotasyon olarak bilinen teknik ile tozu metal olmayan bileşenlerinden ayrılır. Sonraki adım, minerallerin yaklaşık %15 bakır içeriğine sahip bir bulamaç haline getirilmesini ifade eden yoğun bir konsantrasyon aşamasıdır. Bakır daha sonra ergitilir ve %99 saf bakır olana kadar birkaç aşamadan geçirilerek anot içine dökülür. Oksijen yapıda bakır oksit, Cu₂O olarak kalmaktadır. Yapının büyük çoğunluğu saf bakırdır. Saf bakır ve bakır oksitin daha düşük bir ergime noktasında, dendritler arası bölgede ötektik olarak adlandırılan yapı oluşmaktadır.

Bakır alaşımları ise döküm yöntemi ile elde edilmekte, ısıtma işlem ve dövme teknikleri ile istenilen yapıya ulaşılmaktadır.

1.2. Bakır Alaşımları

Bakırın sertlik ve mukavemet gibi değerlerinin artırılması oluşacağı ürünlerdeki beklentileri karşılaması için alaşımlar yapılmıştır. Bakır alaşımları iki kategoride

sınıflandırılmıştır; Dövme bakır ve alaşımları ve döküm bakır ve alaşımları. Bu iki temel kategoride kendi içinde 6 temel gruba ayrılmaktadır. Saf bakır, yüksek bakır alaşımları, pirinç, bronz, bakır nikel alaşımları ve nikel gümüş alaşımlarıdır. Bunlar dışında kalanlar “Özel Alaşımlar” olarak adlandırılmaktadır.²

Dövme bakır ve alaşımları soğuk ve sıcak halde plastik şekil verme yöntemlerinden herhangi biriyle üretilen alaşımlardır. Dövme bakır alaşımları; yapısında en az %99,3 Cu, deoksida ediciler ve alaşım elementleri barındırır. Dövme bakır alaşımları korozyona karşı direnci çok yüksektir. Yüksek bakır alaşımları; bileşiminde maksimum %99,3, minimum %95 bakır bulunan alaşımlardır.

Pirinç; en bilinen bakır alaşımıdır. Bakır ve çinko birçok oranda alaşım yapabilmektedir, fakat %45’in üzerinde çinko içeren alaşımlar pirinç olarak adlandırılmaktadır.³ Kolay işlenebilirliği, sarı rengi, kolay eriyebilir olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmıştır.

Bronz; kalayın ana element olduğu alaşımdır. Silisyum bronzu, alüminyum bronzu kalay içermez, manganez bronzunda ise az miktarda kalay vardır. Fosfor bronzu %4,5,6 kurşun, kurşunlu fosfor bronzu ise %10 kalay içermektedir.⁴ Saf bakıra karşı sertliği, dayanıklılığı, hoş kırmızı rengi ve kolay döküm özellikleriyle önem kazanmıştır.

Bakır nikel alaşımları, bakır-çinko-nikel elementlerinden meydana gelmektedir. Alaşım dayanıklılığı korozyon direnci gibi özellikleri sebebiyle yeni gümüş olarak isimlendirilmiştir.⁵ Bakır nikel gümüş alaşımları, alpaka veya alman gümüşü de denmektedir. Yaklaşık %60 bakır, %20 nikel, %20 çinko ihtiva ederler. Görünüşü oldukça gümüşe benzemektedir.⁶

Döküm bakır alaşımları %99,3 ve daha fazla bakır içeren yüksek saflıktaki bakır alaşımlarıdır. Bu alaşımların bileşiminde bir miktar gümüş veya fosfor bulunabilmektedir. Alaşımdaki gümüş tavlama işlemine karşı direnç sağlarken, fosfor diğer malzemelerle kaynak yapabilme kabiliyetini artırmaktadır.⁷

² G. S. Altuğ (2014). *Çökelti Sertleştirilmiş Bakır Alaşımlarının Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, s.3.

³ B. S. Şentürk (2007). *Pirinç Alaşımlarının Ekstrüzyonunda Meydana Gelen Üretim Hatalarının Tespiti, Nedenleri ve Çözüm Yolları*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul s.2.

⁴ B. Oğuz (1989). *Malzeme Bilgisine Giriş*, Oerlikon Yayınları, İstanbul, s. 85.

⁵ A. Akar & A. Yazan, & L. Özmerih (1974). Bakır ve İlgili Ürünlerin Kullanım Alanları. *Madencilik*, 13(2), s.44.

⁶ Maden Teknik Arama (MTA) Elektronik Veri Dağıtım Sistemi (EVDS), (2024). *Bakır*. (Akım Veriler, %), [Erişim 04.11.2024, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/bakir>]

⁷ Gözde Seda Altuğ, *age*, s. 3.

Yüksek bakır alaşımları; Dövme bakır tekniği uygulamadan önceki döküm alaşımı bu grupta yer alır. Bakır oranı %99,3 ve %96 oranındadır. Döküm alaşımı olduğu halinde kullanıldığı durumda yüksek bakırlı döküm alaşımı olarak adlandırılır.

Pirinç, alaşımın ana elementi çinkodur. Bakır-çinko, bakır-çinko-kalay, bakır-çinko-manganez, bakır-çinko-manganez-kurşun, bakır-çinko-silisyum alaşımları alt pirinç alaşımlarıdır. Çinko alaşıma sertlik katar diğer eklenen tüm elementler malzemeye renk, mukavemet ve şekillendirme kolaylığı için eklenmektedir.

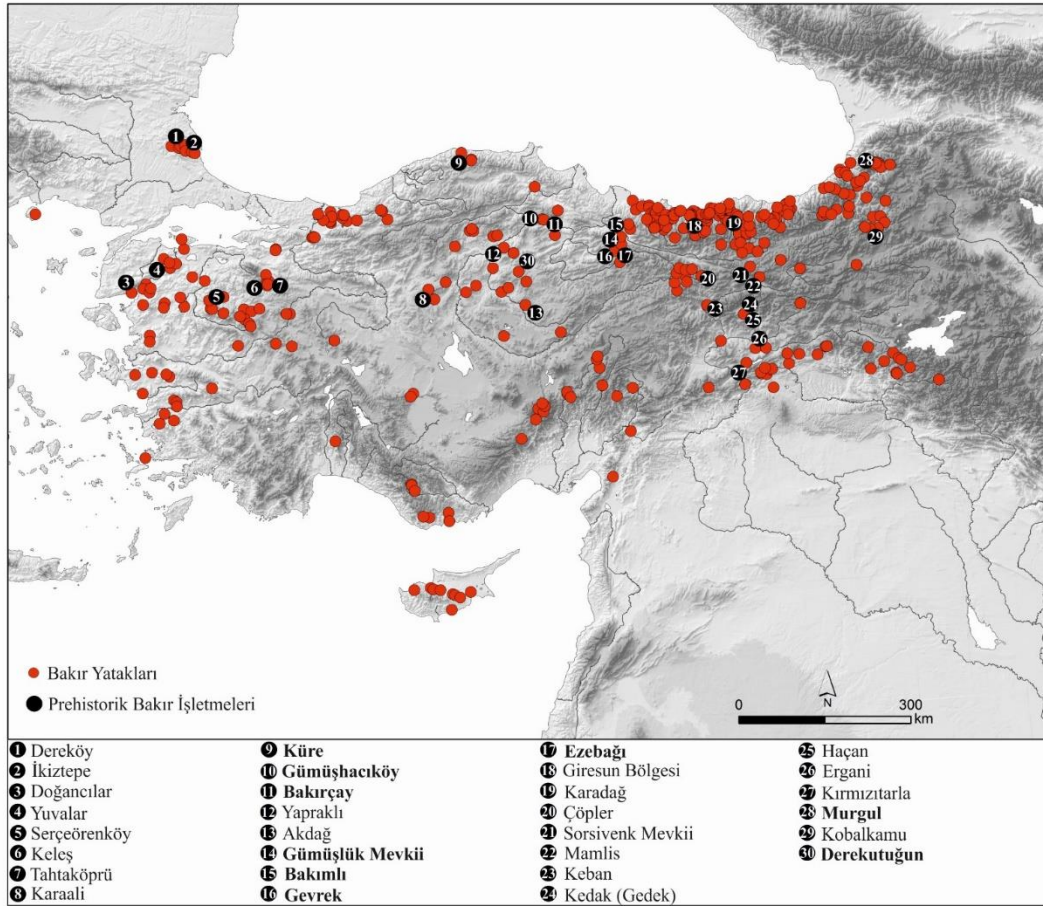
Bronz; bakır-kalay alaşımıdır. Bakır-kalay-kurşun, bakır-kalay-nikel, bakır-alüminyum olarak alt gruplandırma yapılmaktadır. Bakır nikel alaşımları; alaşım içindeki nikel %30lara çıkabilmektedir. Yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti ve korozyon dirençleri iyidir. Bakır-nikel-gümüş, alaşıma gümüş ilavesi ile malzemeye yumuşak ve deformasyon kabiliyetini artırıcı etki yaratmaktadır. Özel bakır alaşımları; elementel bileşim bakımından diğer gruplara dahil olmayan, bakır-berilyum, bakır-kobalt- bakır-krom gibi alaşımları ifade etmektedir.

1.3. Tarih Öncesi Dönemde Bakır

Anadolu toprakları jeolojik yapısı gereği bakır yataklarınca zengindir. Bu nedenle erken dönemde yüzeye yakın nabit bakırın işlenmesi aslında tesadüf değil sonuçtur. Madenlere kolay ulaşım sayesinde ilk madencilik faaliyetleri Anadolu topraklarında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar ve analizler ile en eski maden işletmesinin Çorum-Derekutuğun olduğu tespit edilmiştir. Geç Kalkolitik ve İlk Tunç Çağı'na tarihlenen kaplar ve madenci çıraları üzerinde yapılan C14 analizlerinde MÖ 4500'lere tarihlendiği kanıtlanmıştır.⁸ Anadoluda diğer önemli bakır kaynaklarının birçoğu Karadeniz Bölgesi'nde bulunmaktadır. Maden yataklarının pek çoğunun tarih öncesi dönemlerde de kullanıldığı bilirse de özellikle Derekutuğun, Küre, Gümüşhacıköy, Gevrek, Bakımlı, Gümüşlük Mevkii, Ezebağı, Bakırçay ve Murgul gibi maden yataklarının kesin olarak tarih öncesi dönemlerde kullanıldığı bilinmektedir.⁹

⁸ E. Fidan (2017). Madenin Beşiği Anadolu: Tarihöncesi Dönemlere Ait Bakır Yatakları, *Belleten*, 81(292), s. 669.

⁹ Erkan Fidan, *age*, s.673.



Harita 1.1. Anadolu'daki Bakır Yatakları ve Tarihöncesi Bakır İşletmeleri

Kaynak: (Fidan, 2017: 676)

Bronz ve demir gibi metaller bir döneme isimlerini vermiş olsa da aslında metalin kullanımı adını verdiği dönemlerden çok daha öncelere dayanmaktadır. Bu metaller içinde bakır, insanoğlunun tarihte ilk kullandığı metal olmuştur. Metaller ile ilk tanışma, doğada mineraller içerisinde bulunan metalin mineral formunda kullanımıyla gerçekleşmiştir. Renkli mineraller, taş malzemeden ayrılmadan özel bir taş türü gibi işlenerek süs eşyaları ve boyar madde olarak kullanılmıştır.

Anadolu'da en eski metal kullanımını MÖ 10.000 yıllarında Paleolitik ve Mezolitik Dönemler'de Karain ve Beldibi mağaralarında duvarları hematit adı verilen kırmızı renkli demir minerali ile görmekteyiz. Hallen Çemi Yerleşiminde, Çanak Çömleksiz Neolitik Dönem'e tarihlenen tabaklarda bulunan ve bir bakır minerali olan malahitin parçaları, pigment olarak kullanılmıştır.

Gerçek anlamda bakırın kullanımı insanoğlunun yerleşik hayata geçip, tarım ve hayvancılık faaliyetlerini ilk defa uyguladığı Neolitik Dönemde (MÖ 9500-5500) Anadolu coğrafyasında gerçekleşmiştir.¹⁰

Bakırın doğadan toplanarak mineral formunda taş üretim teknikleriyle şekillendirilmesinden sonra, nabit bakırın dövülerek işlenmeye başlanmasına geçiş günümüzden yaklaşık 10.000 yıl öncesine dayanmaktadır. Başlarda soğuk dövülen bakırın kırılanlaştığı, ısıyla kolay işlenebilir hale geldiği gözlemlenmiştir. Böylece levhalar haline getirilen bakırdan boncuk, küçük iğneler ve olta iğnesi gibi aletler yapılmıştır.¹¹ Böylece çanak çömleğin pişirilmesinden önce ateş, metalin işlenmesinde kullanılmıştır. Çayönü Tepesi'nde MÖ 8200-7500'e tarihlenen 113 adet boncuk, Aşıklı Höyük'te MÖ 7800-7600'e tarihlenen 45 adet boncuk ve Can Hasan'da bulunan topuz bu yeni teknolojinin ilk örnekleridir.¹²



Resim 1.1. Çayönü, Malahit Buluntular

Kaynak: (Bayram,2018:82)

Soğuk işleme şekil verilen bakır daha sonra -muhtemelen tesadüf eseri- seramik fırınında ısıl işlem görmesiyle, Çayönü-Ergani bölgesinde ilk pirometalurjik faaliyetler görülmüştür. Doğal bakırın kullanımının yanı sıra, MÖ 7. Binin sonu 6. Binin ilk yarısında madenin ısı yoluyla cevherinden arındırılmış(izabe) bakırın da kullanıldığı Çatalhöyük ve Çayönü kazılarında bulunan bakır topaklarının analizi ile anlaşılmıştır.¹³ Artık ısıyı daha iyi kullanan insanlar cevheri akışkan hale getirerek kalıplara döküyor ve çeşitli yöntemlerle bakırı

¹⁰ Erkan Fidan, **agm**, s. 668.

¹¹ Ü. Yalçın (2013). "Anadolu Madenciliği" [Bildiri], *III. ODTÜ Arkeometri Çalıştayı*, 3-5 Ekim, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi D Salonu, Ankara. s.20.

¹² G. Dardeniz & P. De Jesus (2015). Antik Madencilik Hakkında Arkeolojik ve Jeolojik Görüşler. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, s.237.

¹³ O. Başak (2008). Taş Çağı'ndan Tunç Çağı'na Anadolu'da Maden Sanatının Gelişimi ve Kullanımı. *Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, S.21, s.20.

şekillendiriyordu. Bu yeni teknikle beraber ihtiyaç duyulduğu kadar bakırın üretilmesiyle, bakır eşyalar yaygınlaşmaya başlamıştır. MÖ 5000-4900 yıllarına tarihlenen Mersin Yumuktepe'nin XVI. Kültür tabakasında iğneler, yassı baltalar, keskiler hem bu yeni teknolojinin ilk ürünleri hem de bakırdan yapılan ilk formlardır. Bakırdan bu kadar çeşitli ürünün yapılmasına imkan yaratmak için bunun karşılığında başka değerli maddeler ile takas yapılması ticareti de beraberinde getirmiştir. Değirmentepe'de bulunan çok sayıdaki damga mühür buranın önemli bir ticaret merkezi olduğunu göstermektedir.¹⁴

Yapılan kazılarda ortaya çıkarılan metal ergitme işlikleri ve izabe fırınlarının varlığı MÖ 4. Binlerde Anadolu'da madencilğin ne denli gelişim gösterdiğinin kanıtıdır. Bakır işleme teknolojisindeki gelişime paralel olarak gelişen madencilik faaliyetleriyle başlarda yüzeyden toplanan cevherlerin derine inerek toplanmasıyla yeni bileşimli cevherler elde edilmiştir. Böylece elde edilen ürünlerdeki değişimlerin gözlemlenmesiyle bilinçli olarak alaşımlar yapılmaya başlanmıştır. Bu deneyimlerle ilk önce bakıra katılan arseniğin renk değişimi yarattığı ve döküm kalitesini arttırdığı farkına varılmıştır. Böylece arsenikli bakır ürünler yaklaşık MÖ 4000 yıllarında Yukarı Fırat ve Kilikya Bölgesinde görülmeye başlanmıştır.¹⁵ Bu dönemde artık bakırla beraber altın, gümüş ve kurşun da artık insanoğlunun hayatına giriş yapmıştır. Anadolu'daki tüm yerleşim birimlerindeki metal buluntuların çeşitliliğinden anlaşılacağı üzere madencilik faaliyetleri büyük bir ivme kazanmıştır. Çorum-Büyük Güllücek, Mersin-Yumuktepe, İkiztepe, Alishar, Alacahöyük, Boğazköy, Beycesultan, Limantepe, Ilıpınar ve Kuruçay da ele geçen aletler ve günlük yaşamda kullanılan gereçler yoğun madencilik faaliyetlerinin göstergesidir. Bakırın yanında diğer madenlerin keşfiyle beraber farklı metallerin bir arada kullanıldığı Arslanetpe VIa yapı katında bulunan kılıç ve mızrak uçları eşsiz örneklerdir. Çift ve tek kalıp tekniği kullanılarak dökülen kılıçların kabzalarına oyma yoluyla kaplama tekniğinde gümüş süslemeler bulunmaktadır. Aynı döneme tarihlenen Tülintepe'deki mızrak uçlarında kalay kaplama görülmüştür.¹⁶

Uzun zamandır üst üste eklenerek gelen metal işleme teknolojileri, bakıra kalay katılmasıyla elde edilen alaşımla devrim yaratmıştır. MÖ 3000 yılının başlarında görülmeye başlanan Tunç alaşımı, bakırdan daha sert olması, daha kolay erimesiyle başta döküm tekniği olmak üzere maden teknolojisinde çığır açmıştır. Döküm tekniği ile artık seri üretim yapılabilir duruma gelmiş, kaplama, kaynak, tavlama, lehimleme, balmumu kalıbı alma gibi kompleks

¹⁴ Oktay Başak, **agm**, s.22.

¹⁵ **agm**, s.22.

¹⁶ Ünsal Yalçın, **agm** s. 26.

teknikler kullanılmıştır. Bakıra %10 kalay eklenmesiyle elde edilen tunç Mezopotamya'dan Troya'ya ve İç Anadolu yerleşimlerinde görülmektedir. Ancak bu bölgeler dışında arsenikli bakır kullanımı İkiztepe gibi yerleşimlerde halen devam etmekteydi.¹⁷ Anadolu'da kalay yeteri kadar olmadığı için arsenikli bakır bazı bölgelerde kullanılmaya devam edilmiştir.¹⁸ Anadolu jeolojik yapısı gereği her ne kadar madencilik faaliyetleri için uygun olsa da üretilen eserlerdeki kalayın kaynağıyla ilgili araştırmalar net bir cevap bulamamıştır. Araştırmacılar iki görüş üzerinde durmuşlardır. İlk görüş kalayın Anadolu'da zamanında var olduğu ancak tükendiği, ikinci görüş ise kalayın ithal edildiği yönündedir.¹⁹ Kalay için Anadolu'daki en önemli yatak Niğde-Celallerdir. Maden de bulunan üretim galerilerinin yanında cevher kırma ve öğütme değirmenleri bulunmuştur.²⁰ Madendeki ilk üretimin MÖ 2880 tarihinden Bizans Dönemine kadar devam ettiği saptanmıştır.²¹ Çok sayıda maden potasının iç yüzeyinde saptanan kalay kalıntıları, diğer bir önemli maden yatağının Bolkarlar'daki Kestel olduğunu göstermiştir.²² İthal edilen kalayın kaynağı ile ilgili ise MÖ. 2. Binyıla tarihlenen Asur yazılı kaynakları Asurlu tüccarları işaret etmektedir. Kalayın, jeolojik olarak da kaynaklarının belirlendiği yer Afganistan olmuşsa da İlk Tunç Çağı kalayı ile ilgili araştırmalar devam etmektedir.²³

İlk Tunç Çağı I ve II dönemleri süresince tunç ürünler ayrıcalıklı olarak toplumun üst tabaklarındaki insanların kullanımı için üretilmekteydi. Özellikle Alacahöyük ve Ur'daki seçkin yönetici sınıfından kişilere ve krallara ait mezarlarda ortaya çıkarılan buluntular bunun somut bir göstergesidir. Bu dönemdeki buluntulara bakarak maden sanatına eklenen dövme, kakma, kaplama teknikleri kullanarak eşsiz sanat eserlerinin ortaya çıkarıldığını görülmektedir. Kullanılan tekniğin ve sanatın yanında maden çeşitliliği de artarak gümüş altın, elektron ve demirin birlikte işlenmeye başlanmış maden teknolojisinin ne kadar gelişmiş olduğunu gözler önüne sermektedir.

MÖ 3. Bin yılının sonlarında eskiden beri Mezopotamya ile sürdürülen ticarete maden ürünleri de eklenmiştir. Maden ürünlere karşı oluşan taleple beraber küçük işletmelerin yerini büyük üretim yapan atölyeler almıştır. Bu atölyeler ve taleple artan maden çeşitliliği,

¹⁷ Ünsal Yalçın, **agm**, s.10.

¹⁸ Oktay Başak, **agm**, s.24.

¹⁹ H. Özbal (2005). *MÖ 3. Binyılda Anadolu'da Bronz*, Reform Matbaacılık, s.11.

²⁰ H. Öztürk & N. Haniççi (2009). Metallogenic Evaluation Of Turkey: Implications For Tin Sources Of Bronze Age In Anatolia. *Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*. 12, s.106.

²¹ E. Kaptan (1992). "Anadolu'da Kalay ve Eski Yeraltı Kalay Madenciliği", *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, S:40, s.17.

²² Ü. Yalçın (2009). Stratejik 'Önemi Olan' Bir Metal: Kalay. *Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*. 12, s.100.

²³ Hadi Özbal, **age**,s.3.

maden işleme teknolojisinde önemli gelişmeler sağlamıştır. Hitit ve Troya gibi büyük uygarlıklardan kalan buluntular bize bu medeniyetlerin siyasi ve ekonomik gücünü madenden aldığını göstermektedir. Her bulunan teknoloji toplumun gelişip güçlenmesine paralel olarak gelişmiştir.

Son Tunç Çağı'nda ki döküm ve kalıp teknolojisinin geliştirilmesi, MÖ 2. bin yılda çoklu kalıp sistemine geçilmesiyle seri üretime yol açarak üretilen mala da nitelik kazandırmıştır.²⁴ Son Tunç Çağı'nda Hititler, parça parça döküm ve kaynakla birleştirme tekniğiyle heykel yapımında önemli bir ilerleme kaydederken, aynı dönemde Anadolu'da demir cevherinin arıtılması ve çelik alaşımının geliştirilmesiyle madencilikte çığır açmışlardır. İlk olarak Hititler tarafından kullanılan bu teknolojiler, dönemin toplumsal ve ekonomik yapısına yön vermiş, Demir Çağı'na geçişi hızlandırmıştır. Demirin işlenmesindeki kolaylık ve çeliğin dayanıklılığı, özellikle alet ve silah yapımında tuncun yerini almasını sağlamış; Hititlerin çöküşünden sonra bu bilgi, göç eden ustalar aracılığıyla Yakındoğu'ya yayılmıştır.

Maden teknolojisi, tarih boyunca uygarlıkların güçlenmesinde ve ilerlemesinde belirleyici olmuştur. Tunç ve Demir Çağı'ndaki bu teknolojik gelişmeler, sadece dönemin ihtiyaçlarını karşılamakla kalmamış, aynı zamanda ilerleyen çağlardaki teknolojik devrimlerin temelini atmıştır. Madenlerin dayanıklılığı ve geniş kullanım alanının, uygarlıkların gelişiminde oynadığı bu kritik rol arkeolojik verilerin de önemli bir parçasını oluşturmuştur.

²⁴Oktay Başak, **agm.** s.24.

İKİNCİ BÖLÜM

BAKIR ve BAKIR ALAŞIMLARININ KOROZYONU

2. Bakır Korozyonu

Korozyon Latince “corrodere” kökünden türetilmiştir. İlk yazılı korozyon tanımını Plato yapmıştır. Korozyonu pası metalden ayrılan toprağımsı bileşen olarak tarif etmiştir.²⁵

2.1. Korozyon

En genel tanımı ile korozyon, bir malzemenin ortamla tepkimeye girerek bozulma sürecine girmesidir. Bu tanım daha çok elektrokimyasal reaksiyonlara eğilimleri yüksek olduğu için metal ve alaşımlarında oluşan bozunma durumu için kullanılmaktadır.

Metaller doğada oksitler, karbonatlar, sülfürler veya silikatlar halinde bulunur, bu tür bileşik halinde metallerin enerjileri düşüktür. Bu nedenle metal durumunda enerjileri daha yüksek olan metaller doğası gereği kimyasal bileşik oluşturma eğilimindedir. Doğada oksit halinde bulunan bakır oksitler yüksek ısı ile bakıra dönüşürler yine de bakır her zaman daha düşük enerjideki kararlı haline daima dönme isteğinden oksitlenir. Her metalin farklı ortamlarda farklı korozyon eğilimleri vardır.²⁶

Bakır ve alaşımları atmosferdeki yoğunlaşmış neme maruz kaldığında elektrokimyasal süreçler korozyonu oluşturur ve yüzeyde ince tabaka halinde kahverengimsi yeşilimsi patina olarak adlandırılan bir tabaka oluşur. Yaklaşık birkaç nanometre kalınlığındaki bakıroksit veya Cu_2O bakırı daha fazla oksidasyondan korur.²⁷ Toprak altında bir denge oluşturmak için metalin yüzeyini koruyan mineraller maddeler yani patina oluşumu gerçekleşir. Toprak altında belirli düzeydeki oksijen ve nemin varlığı ve uzun süre aynı ortama adapte olmuş bakır yüzeyinde oluşan oksit tabaka patina koruyucu özellik gösterir. Topraktaki su varlığı metal yüzeyinde bazen patinadan farklı olarak kalın kabuk şeklinde kalsiyum karbonat halinde çökmesi ile sert bir tabaka oluşturur. Bu tabaka da metal yüzeyini korur ve korozyonu yavaşlatır. Ancak bir kez bakır eserler kaldırıldıktan sonra yeni bir dizi bozulma sürecine girerler ortamdaki ısı, nem ve atmosferik gazların etkisiyle korozyon tekrar patlak verebilir.²⁸

²⁵ O. İşdaş (2017). Elektrokimyasal Korozyon İlkeleri. *Metalurji Dergisi*. 155, s.45.

²⁶ William F. Smith (2006), *age*, s.668

²⁷ F. Clarelli & B. De Filippo & R. Natalini (2012). A Mathematical Model of Copper Corrosion. *Applied Mathematical Modelling*, S. 38, s.4805.

²⁸ A. B. Patel (2014). Conservation of Archaeological Metal Artifacts -Emphasizing on Copper/Bronze. *Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*. S.2, s.351.

Başlangıçta oksit tabakasına yol açan bu elektrokimyasal reaksiyon metalin bulunduğu çevreyle ilgili olarak karbonatlar ve klorürler halinde arkeolojik bakır ve alaşımlarında yaygın olarak görülmektedir.²⁹

Daha dökümhaneden yeni çıkmasına karşın bir bakır eser bozulmaya başlar ve korozyon oluşumu doğrudan metalin bulunduğu çevre ile ilişkilidir. Bu nedenle korozyon ve çevre ilişkisini anlamak konservasyon adımlarını oluşturmak için önemlidir.

2.1.1. Oluşum Nedenleri

Metallerin doğada bulundukları haline dönme eğilimi başlıca neden olmak üzere korozyonun büyük ölçüdeki nedeni bulundukları ortamla ilgilidir. Korozyon farklı ortamlar içinde değişik şekillerde ortaya çıkar. Arkeolojik metaller için korozyon nedenleri tezimizin konusu olduğu için korozyonu daha çok toprak altı metallerinde oluşan korozyonların nedenleri açısından değerlendirilmiştir. Buluntulardaki korozyon objenin kullanım süresinde, toprak altında geçirdiği süreçte veya toprak altından çıkarıldığı süreçten sonraki zamanlarda oluşabilmektedir. Toprak altı korozyonuna etki eden en önemli faktörler ise;

- Toprak yapısı ve nem
- Oksijen konsantrasyonu
- Ph değeri
- Mikroorganizmalar

Korozyon, metalin kendi yapısındaki değişimlerden, alaşım oluştururken çıkan kimyasal birleşim farklarından, hava, bulunduğu toprak, atmosferik koşullar, sıcaklık farklarından yani metal-ortam ilişkisinden oluşmaktadır. Bütün bu ortamlarda meydana gelen korozyon ürünü aynı nitelikte olmasına karşın, ortam farklılıkları metal yüzeyine oksijen difüzyon hızı birbirinden ayrı olduğu için korozyon hızları ve etkisi de birbirinden farklıdır.³⁰

Bakır kimyasal olarak çok aktif olmayan bir elementtir ve kuru bir atmosfer içinde çok yavaş oksitlenir. Bakır korozyonunu ortamdaki nemin varlığından doğrudan etkiler. Düşük nem değerlerinde metal yüzeyinde sıvı film oluşmaz, korozyon oluşumu içinse belli kalınlıkta sıvı filminin bulunması gerekmektedir.³¹ Nem hızlı ve şiddetli bir bozulma sürecini başlatır çünkü nem kimyasal reaksiyonları hızlandırır. Metal yüzeyinde bulunan kir, toz ve katı taneciklerin

²⁹ R Faltermeier (1995). *Surface Surface Characterization of Artificial Corrosion Layers on Copper Alloy Reference Materials*” Institute of Archaeology, Doctoral Thesis, University Collage London.s.15.

³⁰ T. Yalçın & H. Koç (1998). *Mühendisler İçin Korozyon*, Kimya Mühendisleri Odası, Ankara, s.33

³¹ age,s. 27.

varlığı ise katı taneciklerin higroskopik özelliği nedeniyle düşük nemde bile korozyona neden olabilir. Doğrudan toprak altı buluntularında ise yeraltı sularının durumu korozyon açısından önemlidir. Toprağın belirli derinliklerinde bulunan yeraltı suları ve bu suyun yoğunluğu mevsim şartlarına göre değişim göstermektedir. Bazı mevsimlerde suya doyan toprak yeryüzünde bile görülebilir hale gelir. Toprağın suya doymuşluğu ise korozyon açısından büyük önem taşımaktadır. Kum ve çakıllı yapıdaki toprakta su tutulumu az olacağı için killi zemindeki suyun tutulumuna göre daha az korozif ortam oluşturmaktadır. Toprak altındaki diğer korozyonu etkileyen faktör ise çözünebilir tuzların varlığıdır. Çözünebilir tuzların kaynağı yeraltı suları veya toprakta bulunan iyonlardır. Çözünmüş tuz konsantrasyonundaki artış elektriksel iletkenlikle doğru orantılıdır. Kimyasal etkiyle üretilen galvanik eylemlerde metalin zayıflamasına neden olur.³²

Toprak altı ortamındaki oksijenin varlığı havadan veya yeraltı suyu içindeki çözünmüş oksijenden gelmektedir. Su içindeki çözünmüş oksijenin olması korozyon için gerekli bir koşuldur. Toprağın oksijen taşıma hızı ve hava alabilme derecesi toprak cinsine ve yapısına bağlıdır.³³ Kumlu ve dolgu topraklarda oksijen difüzyon hızı fazlayken killi topraklarda daha yavaştır. Farklı havalanma durumu altındaki metallerde konsantrasyon hücresi oluşur ve oksijeni az alan bölgelerde yükseltgenme olur ve oksidasyon başlar. Bu nedenle kumlu bölgeden killi bölgeye geçişte killi bölge yakınında yoğun korozyon olayı gerçekleşir. Topraktaki oksijen alanındaki farklılıklar metalin daha az hava alan killi yapıdaki toprağın bulunduğu alanda bölgesel korozyon hücreleri oluşturabilir. Topraktaki yeraltı suyu ortamında metalin bir kısmı atmosferden bol oksijen alarak toprakta kalan kısmı az oksijen aldığı anda ise en yoğun korozyon bu kısımda görülmektedir.

Toprağın Ph derecesi ortaya çıkan korozyon ürünlerinin (patina) çözünebilirliği üzerinde etki yapmaktadır. Organik maddelerin ayrıştığı topraklarda ve asit yağmurlarına maruz kalan topraklarda ph değeri 5'in altına inerek asidik bir ortam oluşturmaktadır. Metallerde bahsettiğimiz patina adı verilen koruyucu tabaka bu tip ortamlarda görevini yerine getiremez veya patina hiç oluşmaz ve korozyon hızında artış görülür. Topraktaki normal kabul edilen 5-8 ph değerleri aralığında korozyon hızı üzerinde ph'ın herhangi bir etkisi yoktur.³⁴

Humustan zengin anaerobik topraklarda bazı bakteriler korozyona neden olmaktadır. Toprakta ve sularda bulunan bu bakteriler sülfat iyonunu sülfür haline redükleyerek bakırın

³² Ambika Bippi Patel, **agm**, s.348.

³³ Hayri Yalçın & Timur Koç, **age**, s. 23.

³⁴ A. F. Çakır (2016). Korozyon İnsalık İçin Stratejik Öneme Sahip Tabi Bir Olay. *Metallurji*. S.179, S.39.

oksitlenmesine neden olurlar.³⁵ Korozyon oluşumları içerisinde CuS barındırması biyolojik korozyon varlığını gösterir. Bakırın yüzeyinde kahverengi parlak bir tabaka kalkopirit ve ikinci korozyon ürünü yeşil renkli malahit oluşur. Biyolojik korozyonun meydana gelmesi için Ph değerinin 5-9 olması, toprakta organik bileşik varlığı, 40 dereceyi aşmayan sıcaklık gerekmektedir.

Bakteriyel korozyon üzerinde çoğu araştırma mikrobiyel korozyonun demir içeren metaller üzerindeki etkisini incelemiştir. Demir olmayan metaller için araştırmalar bronz ve kurşun alaşımları için çok sonra yapılmıştır. Altın sarısı ve siyah sülfidlerin oluşumu için iki ihtimal incelenmiştir.

1. Çökelti reaksiyonları bakır ve topraktaki iyonların presipitasyon reaksiyonları
2. Metal oksit yüzeylerindeki doğrudan hidrojen sülfid etkileri

Devam eden araştırmalara göre elektrokimyasal etkilerin olmadığı ortamlarda kalkopirit korozyon katmanları şu şekilde açıklanabilir;

1. Sülfat indirgeyici bakteri, organik açıdan zengin toprağın içinde metallere yakın yüzeylerde hidrojen sülfid oluşturur. Bu bakteriler bakır alaşımları üzerinde muhtemelen üremezler çünkü 2000ppm bakırın üzerindeki konsantrasyonlarda hayatta kalamazlar.
2. Bakır; bakır+kalay partikülleri üzerinde çözünür ve geride kalayca zengin bir faz bırakır.
3. Metaldeki bakır iyonları, çevredeki topraktaki demir iyonları ve sülfür iyonları birleşir ve kalkopirit olarak çöker.
4. Kalkopirit bakır alaşımları üzerinde nispeten homojen bir koruyucu katman oluşturur.
5. Kalkopirit katmanlarının büyümesi, difüzyon sürelerinin giderek daha uzun süre alması nedeniyle bir zaman sonra yavaşlamak zorundadır.³⁶

Bakır alaşımları üzerinde farklı görünüm ve kompozisyondaki patinaları açıklamak oldukça komplike bir süreçtir. Bakır alaşımlarının kimyasal bileşimi, üretim yöntemleri ve alaşım farklılıklarının birincil sebep olmadığı oldukça açıktır. Korozyonun olduğu çevre koşullarıyla ilgili olduğu görülmektedir.

³⁵ F. Scgweizer (1991). *Bronze Objects from Lake Sites: From Patina to "Biography"*. Ancient&Historic Metals: Conservation and Scientific Reserch. The Getty Conservation Institue. s.41.

³⁶ age, s.41.

2.2. Korozyon Ürünleri (Bakır Patinaları)

Arkeolojik bakır üzerinde çalışan uzmanlar için, malzemenin maruz kaldığı çevre koşulları sonucu yüzeyde oluşan tabakanın bilinmesi, malzeme teknolojileri, korozyonun yapısı ve patina durumunu bilmek önceliklidir. Çevresel koşullardan kaynaklanan korozyonu incelemek hem konuyla ilgili araştırmacıların hem de bu tezin ana konusu olmuştur. Malzemede yüzey değişikliklerinin izlenmesi ve tespitinin yapılması patina ve korozyon kavramlarını anlamak konservasyon müdahaleleri stratejilerini belirlemektedir. Toprak altı ve atmosferik koşullar altında bakır malzemede çok çeşitli korozyon ürünleri ve karmaşık yapıları patinalar görmek mümkündür. Bakır ve alaşımlarında görülen korozyon ürünleri ve patina bu başlık altında açıklanmıştır.

Tablo 2.1 En Yaygın Bakır Korozyon Ürünleri

Kimyasal Bileşik	Mineral	Kimyasal Formül	Renk
Oksitler ve Hidrooksitler	Kuprit	Cu_2O	Kırmızı/Turuncu
	Tenorit	CuO	Siyah/Gri
	Spertiniit	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	Mavi/Yeşil
Karbonatlar	Malahit	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	Yeşil
	Azurit	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	Mavi
Klorürler	Nantokit	CuCl	Beyaz/Yeşil
	Atakamit	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	Yeşil
	Paratakamit	$(\text{Cu}, \text{Zn}, \text{Ni}, \text{Co})_2(\text{OH})_3$	Soluk Yeşil
Sülfatlar	Brokantit	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	Yeşil
	Antlerit	$\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	Yeşil
	Posnjakite	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6\cdot\text{H}_2\text{O}$	Yeşil
Sülfürler	Kalkosit	Cu_2S	Siyah
	Kovellit	CuS	Mavi
Bakır Fosfatlar ve Nitratlar	Numuneit	$(\text{NaCaCu}_5(\text{PO}_4))$	Beyaz/Mavi
	Zapatalit	$(\text{Cu}_3\text{Al}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_9\cdot 4\text{H}_2\text{O})$	Soluk Mavi
	Gerhardt	$\text{Cu}(\text{NO}_3)(\text{OH})_3$	Yeşil

Kaynak: (Faltermeier,1995:16)

Bakır ve alaşımları atmosfer koşullarına maruz kaldığı zaman yüzeyde ince bir korozyon tabakası oluşur. Korozyon sonucunda ortaya çıkan patina, yeşilden kahverengiye, kahverengiden maviye değişen renklerde olabilir ve bu tabaka metal yüzeyini daha fazla oksidasyondan korur.³⁷

³⁷ Fabrizio Clarelli & Barbara De Filippo & Roberto Natalini, **agm**, s. 4806.

2.2.1. Oksitler ve Hidrooksitler

Bakır oksitler tipik olarak koyu kırmızıdan turuncuya kadar değişen bir renge sahiptir ve yapısı sert ve parlak olabilmektedir. Metaller gazlı ortamlarda reaksiyona girdiğinde oksitler ilk arayüzü oluşturur. Gaza maruz kalan yüzeyde ince bir film tabakası veya oksidayson oranına göre daha kalın bir tabaka oluşur. Bu oksit tabakaları genellikle ışığı geçirir ve geri yansıtır. Yüzey bakır oksit veya sülfür tabakalarıyla tamamen kaplandığında korozyon durur. Suda çözünmeyen, altındaki metalin kristal yapısına benzer bu film tabakası yani patina yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturur. Ancak bazı durumlarda oksit tabakası su tarafından oluştuğunda korozyon şartları devam ediyorsa, korozyon metalin içine doğru ilerler.

Metal kalıntılarının korozyonu esnasında çok çeşitli ortam şartlarında baskın olan bakır oksit kuprittir (Cu_2O), bakırın kırmızı bir oksididir. Bakır ve bakır alaşımlarında yaygın bir korozyon ürünüdür. Kuprit antik dönemlerde camları renklendirmek için pigment olarak kullanılsa da yaygın olarak doğal aşı boyası daha kolay elde edildiği için yaygın bir kullanımı görülmemiştir. Antik Roma ve Mısır'da haematinum veya heamation camı denen mat kırmızı renkte cam süs eşyaları ve mozaiklerde kullanılmıştır. İnce kristalli Kuprit parçacık boyutuna bağlı olarak turuncu, sarı, kırmızı, koyu kahverengi renkte görülebilir. 3,5-4 Mohs sertliğine sahiptir, suda çözünmez, kübik kristal yapıdadır³⁸. Korozyonları yüzeylerde küp şeklinde veya iç içe geçmiş sık kürler şeklinde görülür. Kuprit nemli havaya maruziyetten, kullanım sırasında veya toprak altı koşullarında oluşabilir. Kuprit katmanı çoğunlukla orijinal metalin yüzey tabakasının hemen üstünde oluşur. Bronz alaşımlarının korozyonunda en çok ortak olay yüzey tabakası içinde kuprit oluşumudur.³⁹ Polarize ışık mikroskobu altında güçlü polarizasyon renkleri gösterdiği için kolay ayırt edilebilir. Kuprit katmanlarının metal yüzeyinden alınması oldukça zor olabilmektedir. Kimyasal olarak kararlı olan kuprit çok yavaş çözünmektedir. Yüzeye bitişik ince kuprit tabakası çıkarılmamalıdır. Kuprit tabakası korozyon katmanının üstünde, bir yaldızın veya gümüş kaplama gibi süsleme yüzeylerinden uzaklaştırılması gerekiyorsa önce mekanik yöntemler uygulanabilmektedir. Kimyasal olarak uzaklaştırmak için su içinde %10 formik asit çözeltisi uygulanabilmektedir. Bu kimyasalla yapılan çözme işlemi

³⁸ M. B. Şahin & H. Ağrılı & E. Koşun & H. Mengi (2016). *Mineraller*,. Kuban Matbacılık Yayıncılık. Ankara s.34.

³⁹ D. A. Scott (1997). Copper Compounds In Metals And Colorants: Oxides And Hydroxides. *Studies in Conservation*. 42,s.93.

yine çok yavaş olacağından asite batırılmış bir bezle tabakayı hafifçe ovarak uygulama yapmak gerekecektir.⁴⁰

Tenorit; (CuO) daha az yaygın olan bakır oksittir ve nadiren kararlı kaldığı için korozyon ara ürünü olarak görünür. Donuk siyah, metalik gri, kirli beyaz renklerde görülür. Suda çözünmez ve 3,5 Mohs sertliğe sahiptir⁴¹. Bakır kuprit yüzeyde oluşurken gelişen tabakanın altında başlangıçta siyah bir leke halinde gelişen tenorit, tabaka kalınlığı artıkça tüm yüzeye yayılır. Tenorit ısıyla beraber gelişir, 400-500 derece ısılardaki bakır bileşikler tenorite dönüşür. Hatta mısır krallığı döneminde malahiti yakarak siyah renkli göz boyası için tenoriti elde ettikleri bilinmektedir. Tenorit nadir olarak bakır bileşeni olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir bakır üzerinde patina bileşeni olarak tenorit görmek malzemenin gömülmeden önce veya gömüldükten sonra ısıya maruz kaldığını göstermektedir.⁴²

Spertiniit; Mavi/yeşil renklerdeki bakır hidroksit minerali spertiniit nadiren kararlı bir faz oluşturur. Öncelikli korozyon sırasında oluşan geçici bir ara üründür. Diğer bileşiklere göre kararlı yapıda olmadığı için kolaylıkla dönüştürülür/dönüşür.

2.2.2. Karbonatlar

Bakır karbonat minerallerinden iki önemli korozyon ürünü olarak azurit ve malahit bronz patinalarının temel bileşeni olarak bilinmektedir. Azurit ve malahit psödomorf minerallerdir. Yani kristal yapıları dışarıdan gelen kimyasal bir etkileşim sonucunda kısmen veya tamamen kaybolup onun yerine dışarıdan kristale gelen ilk maddenin biçimini alarak kendine ait olmayan kristal şeklinde bulunabilir. Azurit bünyesine su alarak karbondioksiti çıkarır ve malahite dönüşebilir. İki mineral de bakır cevherlerinin ayrışmasından oluşur ve en yaygın bakır mineralleridir.

Malahit ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) sadece önemli bir bakır minerali değil aynı zamanda pigment olarak camda ve sırlarda renklendirici olarak kullanılmıştır. Malahit hem yerel olarak çıkarılan hem de ticareti yapılan, süs eşyaları ve boncuklarda kullanılan yaygın bakır mineralidir⁴³. Kristalleri monoklinal sistemdir ama nadir olarak kristal yapıda bulunmaktadır. Kristaller çizgi şeklinde cam gibi parlak ve yeşil renklerde görünür. 3,5-4 Mohs sertliğe sahiptir.

⁴⁰ D. A. Scott (2002). *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation.*, Getty Publications. Los Angeles, s. 87.

⁴¹ G. Canpolat (2016). *Oksitli Bakır Cevherlerinden Bakırın Değerlendirilmesi*. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır. s.16.

⁴² David A. Scott, *age*, s. 95

⁴³ *age*, s.102

Korozyon ürünü olarak malahit çeşitli yapılarda görülebilir, iğne şekilli, kavisli lifli tabakalar bir arada demete benzer şekilde görünebilir.⁴⁴ Gevrek yapıda olduğu için midye kabuğu kırılması görünür, ısıtıldığında su kaybından dolayı matlaşır ve metal bakıra indirgenir.⁴⁵

Azurit [$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$], genellikle diğer bir bakır minerali malahit ile birlikte bulunur. Azurit, psödomorf bir mineral olduğu için bazı lokalitelerde kimyasal değişim geçirerek malahite dönüşür ancak kristal yapısını korur, bunun sonucunda azuritin bir kısmı orijinal kalırken diğer kısmı malahite dönüşür.⁴⁶ Nadiren azuritin klorürlerin ve nemin etkisiyle, yüksek Ph ve nemin etkisiyle paratakamite dönüştüğü de görülür⁴⁷Bu yapıda görünüm bir kısmı mavi bir kısmı yeşil olarak görünür. Kristal sistemi monoklinik, kristal biçimi genellikle levhamsı veya prizmatik kısa kristalli, masif, böbreğimsi olur. Sertliği 3,5-4 Mohs ve açık mavi, lacivert, çivit mavisi renklerde, parlak camsı yapıda görünür.⁴⁸

Kalkonatronit ($\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) nadir bulunan ikincil bir sodyum bakır karbonat mineralidir. Kristal sistemi monoklinik, soluk, mat maviden turkuaza giden renklerde görülür. Arkeolojik objelerde kalkonatronit oluşumu çevre koşullarıyla doğal yollarla oluşabildiği gibi, yüzey ve toprak altı suları ile gelen alkali karbonatların, ara korozyon ürünü olan malahit veya atakamit ile reaksiyonu sonucu yine kalkonatronit oluşabilir.⁴⁹

2.2.3. Bakır Klorürler

Bakır korozyonunda en önemli bakır klorür nantokit ve bakır hidroksiklorür izomerleri olan; paratakamit klinoatakamit, botallakittir. Başta ayrı bir mineral olarak düşünülen Anarakit minerali ise günümüzde bir tür çinkolu paratakamit olarak adlandırılmaktadır. Bu minerallerin hepsi farklı kristal yapılardadır, doğal olarak ya da korozyon ara ürünü olarak görülebilirler.

Klor iyonlarıyla etkileşime giren bakırlarda görülen kimyasal değişim araştırmacılar arasında bakır kanseri olarak adlandırılır.⁵⁰ Ancak her klorür içeren korozyon ürünü bronz kanseri anlamına gelmez. Bronz kanseri yüzeyde bakır klorür birikintilerinin aksine yüzey patinası altında yatan kararsız tabakada elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu gelişir. Bazik

⁴⁴ M. Bahadır Şahin & Haşim Ağrılı & Erdal Koşun & Hakan Mengi. (2016), **age**, s.53.

⁴⁵ F. Arık, & H. Kurt (2015). *Mineroloji*. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., Ankara, s.225.

⁴⁶ Gurbet Canpolat, **agt**, s.14.

⁴⁷ David A. Scott, **age**, s.110.

⁴⁸ M. Bahadır Şahin & Haşim Ağrılı & Erdal Koşun & Hakan Mengi (2016), **age**, s. 54

⁴⁹ David A. Scott, **age**, s.120.

⁵⁰ L. Özen (1999). *Bronz Kanseri (Hastalığı)*, I. Uluslararası Taşınabilir Kültür Varlıkları Restorasyonu ve Konservasyonu Kolokiyumu, 6-7 Mayıs, Ankara. s. 177.

klorür ve karbonatlarla kaplanmış kuprit yada karasız yapıda, yüzeye yakın yerde oluşan nantokit tabakasında gelişebilir ve alt tabaklara ulaşan serbest klor iyonlarıyla başlayan bu reaksiyon, koşullar değişmedikçe zincirleme şekilde ilerler. Nem ve oksijen varlığı gibi koşullar gerçekleştiğinde stabil olarak kalamayan bakır karbonat ve bakır klorür bileşikleri, hacim olarak genişlemeye başladığında malzemede fiziksel hasara neden olur.

Nantokit, soluk yeşil bir mineraldir, kübik kristal formdadır. 2,5 mohs sertlikte olup kolayca kazınabilir, yumuşak yapıdadır. Bakır alaşımlarında grimsi yeşil, yarı saydam mumsu bir katman olarak oluşur.

Atamakit zümrüt yeşilinden siyaha giden renkte, bakır trihidroksi klorürün en yaygın mineralidir. Ortorombik kristal yapı sistemindedir⁵¹. Bakırın hidroklorik asit ile muamelesi sonucu yüzeyde yapay bir atakamit tabakası oluşsa da doğal yollar ile oluşan bir atakamit tabakası ayırt edilebilir özelliktedir. Doğal bir atakamit tabakası yapayda olduğu gibi sürekli tabaka oluşturmaz.

Paratakamit pudramsı, tozlu açık yeşil renkte ikincil bir korozyon tabakası olarak patina yüzeyinde veya kabarcıklı nantokit kristallerinde görülür. Serbest klor iyonları varlığında bulunan nantokit, nemli ve aerobik ortamda parakamite dönüşür. Bakır trihidroksiklorürlerdeki en yüksek hidrojen bağı gücü paratakamitedir. Reaksiyon ortamındaki koşulları özellikle su varlığı ve oksijen seviyesine bağlı olarak başlayan reaksiyon stabil haldeki mineralleri parakatamite dönüştürüne kadar devam eder, ortam şartları değişmezse metal özü yok olma sürecine girer ve bu yok olma süreci bakır kanseri olarak adlandırılır.⁵²

2.2.4. Bakır Sülfatlar

Bakır sülfatlar dış atmosfer koşullarına maruz kalan bronzlarda yaygın korozyon ürünleri olarak görülür. Atmosferde gerçekleşen sis ve asit yağmurları yavaş yavaş zaman içinde kararlı durumdaki patinayı eriterek yüzeyde açık yeşil bir tabaka oluşturur. Dış ortam korozyon ürünlerinden en önemli bazik bakır sülfatlar, brokantit, anderit, posnjakitedir. Toprak altı koşullarındaki bronzda yaygın olarak görülen mineral malahittir, fakat aynı kimyasal oluşumlar altında laboratuvarında oluşan mineraller sülfar ve kloürler olmuştur. Araştırmacılar bunun nedenini kalsitin iki durumda da çözünme koşullarının farklılığından kaynaklandığı

⁵¹ M. C. Bandy (1938),. “*Mineralogy Of Three Sulphate Deposits Of Northern Chile*” The American Mineralogist Journal Of The Mineralogical Society Of America, S. 23,s.706.

⁵² David A. Scott, **age**, s.126.

üzerinde durmuştur. Yine de bakır alaşımları üzerinde yaygın olarak oluşan bazik bakır sülfatlar toprak altı koşullarından nadir görülmektedir.⁵³

Brokantit, sertliği 2,5-4 Mohs, monoklinik kristal formda, camsı yeşil renktedir. Atmosfer ortamında oluşan en kararlı ve en sık rastlanan bakır sülfattır. En kararlı mineral faz olarak bakır patinasında bulunur. Dünyaca ünlü Özgürlük Heykeli üzerini kaplayan yeşilimsi tabakanın 1905 yılında yapılan analizlerinde brokantit olduğu tespit edilmiştir ve açık havada kalan bronzlar üzerinde oluşan bu minerale en ünlü örnektir.

Antlerit sertliği 3,5 Mohs, ortorombik kristal formda yine camsı yeşil bir mineraldir⁵⁴. Şehirlerdeki kirli atmosfer koşullarında açıkta kalan bronz yüzeyindeki korozyonda antlerit varlığı olduğu varsayılır. Geçmişten günümüze artan yağmur sularındaki asit miktarı sonucu oluşan düşük Ph çevresel koşullarının göstergesi kabul edilir. Açıkta kalan bronzların üzerine yağın asit yağmurları zamanla patinayı çözerek yüzeyde oluşan çizgilere ve yüzey şeklinin bozulmasına yol açar. Yapılan laboratuvar çalışmalarında ph 2,5 da brokantit veya antlerit yerine kuprit ve bakır ikisi birden kalkantit veya bonatit oluşturmak için reaksiyona girebilir. Ph'ın 4 olduğu seviyelerde ise bakır bazik sülfatların çözünmesi kupritin çözünmesinden daha hızlıdır. Asitlenmiş bakır sülfat çözeltileri korozyon tabakalarının kabuklarında kolayca üretilir ve bu çözeltiler kuprit büyümesini etkileyebilir⁵⁵.

Posnjakite, monoklinik kristal forma sahip 2-3 Mohs arasında düşük sertliğe sahip koyu mavi, camsı yeşilimsi yaygın olmayan bir mineraldir. Brokantite yapısal benzerliği nedeniyle birlikte bulunabilir veya brokantite dönüşebilir.

2.2.5. Bakır Sülfürler

Bu mineral grubu ölçülebilmesi ve kristallliği şüpheli olan zor bir bileşik grubudur. Sülfütlü bileşikler müze tozlarından, su altı koşullarına, oksijensiz ortamlara kadar değişen koşullarda oluşabilmektedir. Bronz çağında uzunca bir süre objelerin üzerine süsleme yapmak için kakma/savat tekniğinde kullanılan yoğun siyah maddeyi yapmak için bakır sülfürler kullanılmıştır. Antik dönemlerde ise tıbbi alanda merhemlerin içinde kullanılmış, eklem ve diz ağrılarına iyi geldiği reçetelenmiştir.

⁵³ David A. Scott, **age**, s.145.

⁵⁴ F. C. Hawthorne & L. A. Groat & R. K. Ebby (1989). Antlerite, Gugso'(Oh)T A Heteropolyhedral Wallpaper Structure, *Canadian Mineralogist*, S. 27, s.205.

⁵⁵ David A. Scott, **age**, s.148.

Işık mikroskobu altında opak olan bakır sülfürler, maviden siyaha değişen renklerde görülebilir. Değişken kimyasal reaksiyonların hesabının zor olması, değişkenliği nedeniyle az sayıda sülfür bileşiği tanımlanabilmiştir. Tanımlanan bileşiklerden kalkosit(Cu_2S); düşük monoklinik yapıda, 103°C 'ye kadar sıcaklıkta kararlıdır. Aynı formüle sahip yüksek hekzagonal yapıdaki kalkosit ise 103°C üzerindeki sıcaklıklarda kararlı yapıdadır. Yüz merkezli kübik mineral digenit($\text{Cu}_{1.8}\text{S}$) ; yüksek ve düşük yapıda görülebilir, düşük digenitin demir varlığında stabilize olduğu ve sentetik olduğu bilinmekte, kükürt ve demir içeriğine göre kararlılıkları değişmektedir. Bu bileşikler değişik sıcaklık fazlarında değişime uğrama eğilimde oldukları için tanımlamaları zorlaşmaktadır.

Altıgen mineral yapıdaki kovellit (CuS); 507°C 'ye kadar kararlı yapıdadır. Mavi renkli kovellit içeriğinde %2 ile %8 arasında bakır içermektedir. Oda sıcaklığında başka bir bakır sülfür bileşiği olan digenit ve kalkositin oksidasyonu ile oluşabilmektedir. Bakır sülfür kurşun içeren diğer bir mineral Kalkopiritir⁵⁶. Antik çağlardan beri bakır veya diğer metalik elementlerin eritme işleminde önem taşımaktadır. Pirinç sarısı renklerde ve opaktır. Birincil olarak magmatik kayalarda ve hidrotermal damarlarda çeşitli cevher mineraller ile birlikte bulunan, porfiri bakır yataklarında oluşan önemli bir mineraldir.⁵⁷

Bakır sülfürler, deniz suyu çökeltilerindeki oksijen indirgeyici ortamlarda yaygın bir korozyon ürünü olarak görülür. Deniz suyu çökeltilerinde oksijenli ortamlarda en fazla görülen bakır sülfür ürünü kovellittir. Sülfat indirgeyen bakterilerin bulunduğu koşullarda ise sülfat iyonları kalkosit de üretebilir. Sülfat indirgeyen bakterilerin bulunduğu ortamlarda sülfat iyonları gelişen reaksiyonlar sonucu ortaya çıkar. Bakteriler oksijeni kullanarak hidrojen sülfür üretirler. Serbest kalan hidrojen sülfür bakır alaşımlarının yüzeyinde oluşan patinanın yerini alarak korozyonu hızlandırır. Kararsız yapıdaki patinada ilave bakteri üremesi meydana gelir buda daha fazla korozyon anlamına gelmektedir. Bakır yüzeyindeki hidrojen sülfür devamlı ise çukurlaşma da meydana gelebilir.

Bakır sülfidler nadir olarak atmosfere bağlı olarak bakır patinalarının bileşiminde görülür, çünkü genellikle bakır sülfid oluştuktan sonra hızla bazik bakır sülfatlara oksitlenirler. Bununla birlikte bazen atmosferik koşullar altındaki eserlerde sülfürlere rastlanmaktadır.

Müze depolarında ve teşhir salonların sergilenen bronz ve pirinç yüzeylerini incelediğimizde siyah damarlı bir görüntü karşımıza çıkmaktadır. Bu görüntü teşhir depolarda

⁵⁶ age, s.226.

⁵⁷ M. Bahadır Şahin & Haşim Ağrılı & Erdal Koşun & Hakan Mengi (2016), age, s. 17.

uygunsuz malzemeden yayılan karbonil sülfür, hidrojen sülfür gibi kirleticilerin varlığından kaynaklanmaktadır. Bakır malzeme bu kirleticileri içeren havaya maruz kaldığında siyah damarlı çizgi görünimleri oluşmaktadır. Eğer bakır önce bir miktar saf havaya maruz kalırsa önce kuprit tabakası oluşur daha sonra hidrojen sülfürlü havaya maruz kalsa bile kararma olmaz⁵⁸.

2.2.6. Bakır Fosfatlar ve Nitratlar

Bakır fosfatlar kurak iklimler ve mezar gömüleri gibi karakteristik ortamlar dışında genellikle korozyon ürünü olarak bulunmazlar. En yaygın bakır fosfatlar maviden yeşile giden renklerde turkuazlar süslemelerde ve pigment olarak kullanılmışlardır. Psödomalakit, camısı yeşil bir bakır fosfat mineralidir lakin bugüne kadar bakır korozyon ürünü olarak raporlanmamıştır. Görünüşleri psödomalakitle aynı olduğu bilinen diğer mineraller tagilit, ludjibait içinde korozyon ürünü olduğuna dair bilgi raporlanmamıştır.

Korozyon ürünü olarak tanımlanan iki bakır fosfat vardır; Numuneit ve zapatalit. Numuneit ($\text{NaCaCu}_5 (\text{P}_4\text{O}_{10})_2$), sodyum-kalsiyum-bakır-fosfat klorür açık maviden inci beyazına giden renklerde tanımlanmıştır. Zapatalit ($\text{Cu}_3\text{Al}_4 (\text{P}_4\text{O}_{10})_3 (\text{OH})_9 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), alüminyum-bakır fosfat, yarı saydam ve soluk mavidir. Bu bileşikteki alüminyum varlığı antik bakır alaşımlarında görülmediği alüminyum görülmediği için yüzey kirliliğinden geldiğini düşündürmektedir.

Bakır alaşımlarının mezarlarda kemik, boynuz gibi başka fosfor kaynaklarıyla beraber gömülmesi alaşım yüzeyinde korozyon veya organik malzeme üzerinde mavi yeşil leke, bakır fosfat (II) üreterek karşımıza çıkar. Yapılan çalışmalarda kremasyon kaplarındaki bakır fosfat varlığı bakır alaşımlarının korozyona karşı direncini düşürdüğünü göstermiştir. Atmosfer koşullarında sergilenen heykelerde de bakır fosfata muhtemelen kuş pisliklerinin korozyon katmanındaki diğer bileşiklerle reaksiyonu sonucu rastlanmıştır. Toprak altı koşullarında kurak iklimlerde de rastlanan ve Mısır'daki çalışmalarda raporlanan bakır fosfatlar, yer altı suyunun yüksek konsantrasyonlarda çözünür tuzlara sahip olduğu koşullarda oluşmaktadır. Yer altı sularındaki sodyum varlığı klorür ve fosfat üretebilmektedir. Periyodik olarak ıslanan yüzey ardından kuraklıktan dolayı aşırı kurumaya geçtiğinde çözünebilir tuzlu yüksek konsantrasyonlu yeraltı çözeltilerinde bozulmalar görülür. Yüzeyde çok kalın ve sert olmayan tabaka halinde görülür.

⁵⁸ David A. Scott, **age**, s.232.

Bakır fosfatların korozyon ürünü olarak tanımlanması da bakır fosfatlar kadar nadir olmuştur, çünkü nitrat tuzlarının hepsi suda çözünebilir. Kısmen tanımlananlar ise pigment ve korozyon ürünü olarak rastlanan bazik nitratlardır. En yaygın bakır nitrat minerali, masif kuprit yataklarında malakit ve atakamit ile beraber bulunan bazik bir tuz Gerharditdir. Korozyon ürünü olarak raporlanmasa da diğer bakır nitrat ürünleri likasit ve buttgenbachitdir.⁵⁹

⁵⁹ David A. Scott, **age**, s.241.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

KOROZYONUN TESPİTİ

3. Korozyonun Tespiti

Günümüzde bilimsel araştırmalarda disiplinler arası çalışmalar hızla artmaktadır. Arkeolojik buluntuları araştırıp belgeleyerek yorumlayan arkeoloji, sorularına somut verilere dayalı cevaplar arar. Bu da analizlerin ve disiplinler arası çalışmanın önemini ortaya koyar. Arkeoloji ile fen ve doğa bilimlerinin ortak çalışması, arkeolojik malzemelere matematiksel ölçüm ve analiz tekniklerini uygulayan arkeometri bilim dalını doğurmuştur.⁶⁰

Arkeoloji ve konservasyon bilimini laboratuvar ortamında ölçüm yapma ve somut verilere dayandırma çabaları, arkeometri çalışmalarının hızla artması koruma uygulamalarını da önemli ölçüde geliştirmiş, malzemelerin özellikleri ve bozulma süreçlerinin araştırılmasıyla ilgili derin bir anlayış sağlamıştır. Uzunca bir zaman teknik cihaz olarak optik mikroskoptan fayda sağlamaya çalışan konservasyon bilim dalı da aynı gelişmelerden paralel olarak faydalanmaya, geniş cihaz ve disiplinler ile bilimsel çalışmalar yapmaya başlamıştır.

Arkeolojik malzemelerin kimyasal ve fiziksel analizlerinden elde edilen veriler; buluntuların kökeni, yapım tekniği, üretildiği tarih ve bozulma süreçlerinin anlaşılmasını sağlamış, böylece somut verilere dayalı, net bir envanter oluşturulmasını mümkün kılmıştır.

Konservasyon uygulamalarının başlangıcındaki en önemli basamak teşhistir. Buluntulara müdahale etmeden önce mümkün olduğunca üzerinde taşıdığı verileri kaydetmek önemlidir. Hiçbir müdahalede bulunmadan önce tüm verilerin belgelenmesi analiz edilmesi ve kayıt altına alınması önemlidir.

Bakır ve alaşımlarının da yüzeyini kaplayan korozyon ürünlerinin tespitinin yapılması araştırılması için birçok yöntem ve teknik kullanılmaktadır. Çünkü eser yüzeyindeki her bir tabaka toprak altı koşulları ve geçmiş kullanımına dair önemli bilgiler taşımaktadır. Korozyon ürünlerinin tespitini doğru yapmak ve en uygun analiz yöntemini seçmek konservasyon yöntemini belirlemede büyük önem taşımaktadır. Matematiksel ölçüm ve analiz yöntemlerini tercih etmek konservasyon çalışmalarının bilimselliğini artırmaktadır. Görsel inceleme ile başlayan bu süreç çeşitli analiz enstrümanları ile desteklenmektedir. Ayrıca yapılacak analizin seçimi, koruma çalışmasının ölçeği (büyük ölçekli onarım, basit onarım), zaman, eserin durumu, analiz cihazlarının ulaşılabilirliği, uzmanlarca alınacak ortak kararlar ile belirlenir.

⁶⁰ U. Esin (1985). Arkeolojide Kullanılan Arkeometrik Araştırmalar Genel Bakış, [Bildiri], *I. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 20-24 Mayıs Ankara, s.1.

3.1. Görsel Tespitler

Binlerce yıl toprak altında kalmış metal objelerin şeklini ve yüzey detaylarını ortaya çıkarmak arkeoloji açısından önemlidir. Bu süreç, korozyonun tespiti ve sınırlarının belirlenmesiyle başlar ve uzmanların görsel incelemeleri bu aşamada en önemli basamağı oluşturur. Koruma uygulamalarının yöntemini ve kullanılacak malzemeleri belirlemek için buluntuların durum tespiti ve teşhisi gereklidir. Buluntu üzerindeki tortulaşmış veya yapışmış tabakanın, yani malzemenin, tanımlanması öncelikle görsel incelemeyle yapılır. Çıplak gözle veya basit büyüteçle gerçekleştirilen bu incelemelerde, buluntunun kondisyonu, ait olduğu döneme dair izler ve yüzeydeki tabakanın durumu gibi ilk bulgular not edilir. Bu gözlemler, ileride yapılacak fiziksel ve kimyasal analizlerin planlanması için de önem taşır.

3.2. Mikroskop İncelemeleri

Mikroskopik analizler bir objenin büyütülmüş yüzey görüntüsü elde edilerek yapılır. Görüntüleme için çeşitli ışınlar farklı dalga boyları kullanılarak yapılır. Tüm mikroskopların çalışma şekli temelde birbirine benzemektedir. Bir ışık kaynağı, ışık kaynağından çıkan ışınları numuneye toplayan bir mercekle, numune bölgesi, ilk görüntüyü büyüten bir projektör merceği ve gözlem bölgesi bölümlerinden oluşur.⁶¹ Standart ışık mikroskoplarında 1000x büyütme sağlanırken iyi bir elektron mikroskopunda 200.000x'i geçmektedir. Mikroskop incelemelerinde; metalurjik, polarizasyon, elektron (geçirgen veya taramalı), mikroradyografi kullanarak malzemenin yüzey özelliği ve yüzeyde korozyonun mineral içeriği incelenmektedir. Mikroskop incelemelerinde yüzeyde üretime ait izler, aşınma, tahribat, korozyonun mineral yapısına dair kristal yapı çıkarımları yapmak mümkündür. Korozyonda kristal yapı belirlemek korozyon bileşimini saptamada önemli bir veridir.

3.2.1. Stereomikroskop

En yaygın kullanılan ve en basit yapıdaki mikroskop çeşididir. Toprak, maden, bitki, böcek gibi farklı incelemelerde kullanılır. Işık mikroskobu sınıfında olan stereomikroskoplar

⁶¹ Ş. Demirci (1985). Arkeolojik Örneklerin Mikro Analizi, [Bildiri], *I. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 20-24 Mayıs Ankara, s.56.

gözle görülebilen cisimlerin ayrıntılı görüntülerinin incelenmesi amacıyla kullanılır. Sadece yüzey özelliklerini incelemeye kullanılır.⁶²

Bakır malzemenin yüzeyindeki ilk katman, metalin karakteri ve çevreyle etkileşimine dair fiziksel tanımı bize verir ve yapılan ilk mikroskop gözlemleri önemlidir. Bakır üzerinde oluşan katmanların derinliği, dokusu, rengi, farklı katmanların varlığının tespiti, fiziksel olarak bozulmuş bölgelerin tespiti bir ön hazırlık olarak mikroskop incelemelerinde yapılır. Yüzeyden elde edilen bu veriler daha sonra yapılacak ileri teknik analiz yöntemini belirlemede araştırmacılara yol gösterici olmaktadır.

3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Elektron mikroskobu görüntüyü alabilmek için ışıktan daha fazla elektronları kullanan bir mikroskoptur. Işık mikroskopları atom gibi çok küçük maddeleri görmemiz gereken büyüklükte veremezler, elektron mikroskopları bu anlamda daha fazla avantajlar sunar. Bu mikroskop numune üzerinde bir noktadan sırayla hareket ettirilen ince bir elektron demeti oluşturur.⁶³ Bu elektron demetinin yüzeyi taraması sırasında uyarılan numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlarla beraber geri saçılan elektronlardan elde edilen sinyallerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntüler elde edilir.⁶⁴ Yüksek büyütme ve odak gücü sayesinde, elde edilen görüntülerin kalitesi, detay zenginliği üç boyutlu görünümü oluşturur. Bu görünümeler üzerinden ortaya çıkan malzemenin kimyasal yapısını incelemeye olanak sağlar ve tıp, biyoloji, mühendislik, malzeme bilimleri, arkeoloji gibi birçok alanda SEM'den faydalanılır.

Taramalı elektron mikroskobu ile enerji dağılımlı X ışınları spektroskopisi (Edx) detektörünün birlikte kullanıldığı kombinasyonlarda ise malzeme hakkında daha çok bilgi edinilir. Malzemenin kimyasal kompozisyonu ve elementel yapısı hakkında bilgi vererek metalurjik değerlendirme imkânı sağlamaktadır. SEM kullanılarak yapılan analizlerde metal, cam, seramik, tekstil ve taş gibi birçok eser grubu tanımlanmaktadır.⁶⁵

⁶² Z. Karakoç & M. Aydın Ketani & Ş. Ketani (2016). Mikroskopların Çalışma Mekanizması ve Çeşitleri. *Dicle Üniversitesi Veterinerlik Bölümü Dergisi*, S. 1(1), s.3.

⁶³ Agm, s.5

⁶⁴ K. A. Terim Kapakin (2006). Scanning-Elektron Mikroskobu, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi, S. 17(1-2), s.55.

⁶⁵ E. Torgan & R. Karadağ (2015). "Tahribatsız ve Mikroanaliz Yöntemleri İle Arkeolojik Eserlerin Karakterizasyonu" [Bildiri], 31. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, 11-15 Mayıs Erzurum, s.122.

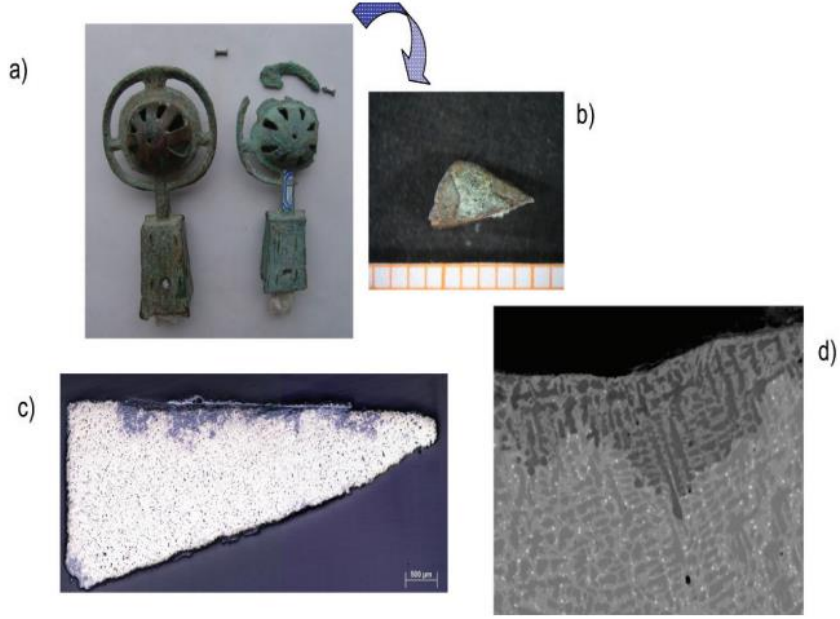
Metal eserlerde yüzeyde oluşan korozyon katmanı yani patinanın alınarak metalin orijinal yüzeyindeki ayrıntıların görünür hale getirilmesi arkeolojik açıdan önemlidir. Bu gereklilikle beraber koruma uzmanları orijinal yüzeye ulaşmadan önce eserin üzerinde oluşan tabakanın tanımını yaparak uygulayacağı yöntemi belirlemektedir. Eser üzerinde oluşan katmanın tanımlanmasında SEM ile görüntüleme de kullanılan yöntemler arasındadır. Metal eserlerdeki korozyonun mekanizmalarının tanımı ve ölçülmesi bugüne kadar binoküler mikroskop altında tam olarak yapılmamıştır. Alınan veriler niteliksel sonuçlar veremediği için yeterince iyi tanımlanamamıştır. SEM'den alınan mikroskobik ölçekteki topografik görüntüler ise eserin yüzeyini ve korozyon ürünlerini detaylı incelemeyi mümkün kılar. Korozyon ürünlerinin gözlemlenen mikro yapısındaki belirteçlerin metalin özüne yakınlığı veya metalden dışa doğru gelişen bir korozyonun parçası olup olmadığını belirlemek amacıyla sistematik araştırmalar yapılmıştır. Toprak altı koşullarından kaynaklanan çok fazla korozoyona uğramış bakır bazlı eserlerde korozyon orijinal metal yüzeyi altında gözlemlenebilmektedir.⁶⁶ Sem ile alınan ayrıntılı görüntülerde korozyon katmanı ve orijinal yüzey arasındaki sınırları bilmek orijinal yüzeyin izlenmesi ve genel bir sınıflandırma yapmaya imkan tanıyarak, sistematik bir koruma prosedürü oluşturulmasını sağlamaktadır.

3.2.3. Metalurji Mikroskobu

Metalurji mikroskobu, metaller gibi opak malzemelerin incelenmesi için kullanılmaktadır. Mikroskobun çalışma mantığı basittir, ışık kaynağından gelen ışık, mikroskobun objektifinden geçerek, objektif altındaki malzemeye düşen ışığı geri yansıtır ve mercekten görüntü gelecek şekilde tasarlanmıştır. Mikroskopta görüntüleme yapabilmek için malzemedan küçük bir numune alınır, numune reçineye gömülerek inceleme yapılır. Malzemedan alınan numunedan ince bir kesit alınarak inceleme yapıldığı için, çoğu zaman arkeolojik eserler için tahribatlı bir görüntüleme yöntemidir. Reçiyeye gömülen numune ince zımparadan geçirilerek pürüzsüz bir yüzey elde edilir ve ardından çarkta cilalanır. Bu işlem sonucu metal kristallerinin numune içindeki yerleşimi kolayca görülebilmeyi sağlar. Metal malzemelerin üretim tekniği araştırmalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.⁶⁷

⁶⁶ M. Aucouturier & E. Darque-Ceretti (2007). "The Surface Of Cultural Heritage Artefacts: Physicochemical Investigations For Their Knowledge And Their Conservation", *Chemical Society Reviews*, S.36, s.1608.

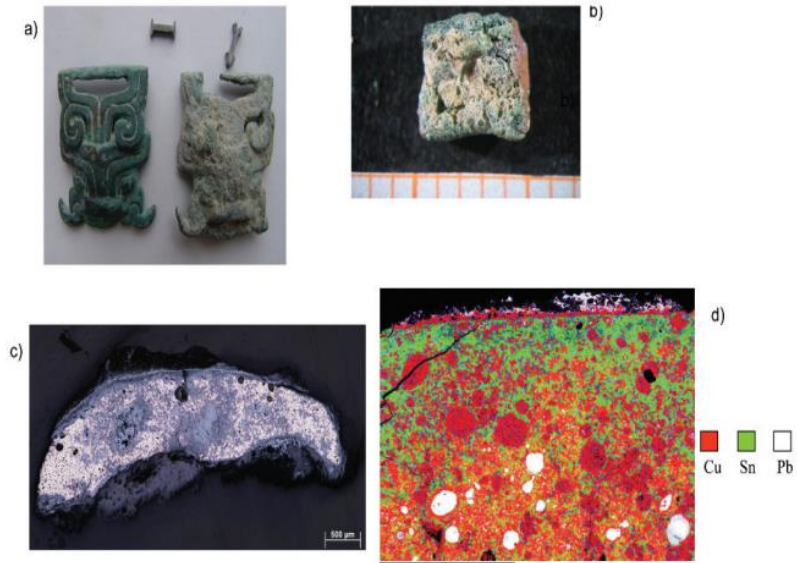
⁶⁷ O. P. Agrawal (1979). *Science In Service Of Art, Archaeology And Conservation*, ICCROM, Rome ,XXI 116, S.15.



Resim 3.1. Bronz bir eser üzerinde uygulanan görüntülemeler

a) Eser fotoğrafı b) Stereo mikroskop c) Metalurji mikroskobu d) Sem görüntüsü

Kaynak: (Rocco Mazzeo, Silvia Prati, Marta Quaranta, Giorgia Sciutto, 2012, s.263)



Resim 3.2. Bronz bir eser üzerinde uygulanan görüntülemeler

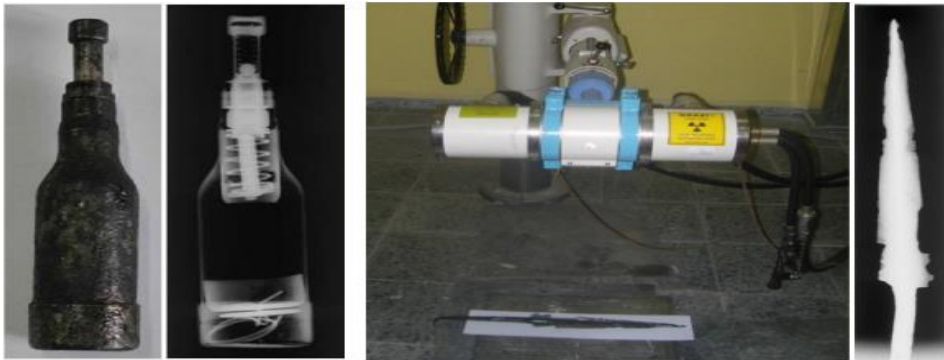
a) Eser fotoğrafı b) Stereo mikroskop c) Metalurji mikroskobu d) Sem görüntüsü

Kaynak: (Rocco Mazzeo, Silvia Prati, Marta Quaranta, Giorgia Sciutto, 2012, s.263)

3.2.4. X-RAY

X ışını radyografisi arkeolojik malzemelerin görüntülenmesinde kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Cihazda bulunan X ışını kaynağından çıkan ışınlar, mekanik parametrelerden geçerek görüntülenmek istenen bölgeye ulaşır ve gelen görüntü filme ya da ekrana yansır. X ışınları görüntüye farklı yoğunluklarda düşer, ışınlar numuneden geçerken malzemelerin özelliklerine göre enerjisini kaybetmesi prensibine göre çalışır ve malzemenin görüntüsü film üzerinde değişik gri tonlardan görüntülenmesini sağlar.⁶⁸

Malzeme çalışmasının temelini oluşturulan görüntüleme yöntemlerinden bir diğer teknikte X ışını radyografisidir. Bronzların dış yüzeyinin incelenmesi kadar önemli bir diğer detayda döküm sürecinin bilinmesidir. Bu görüntüleme tekniği özellikle döküm bronzlarda ve heykellerde kullanılır. Özellikle heykellerde döküm sürecine dair spesifik tekniklerin kanıtları ve eski onarımlara dair eklentiler, eserin içine erişilemediği kapalı formların bileşimi, korozyon durumu ve mevcut özellikler hakkında yüksek çözünürlüklü görüntüler kaydedilir. Bir malzemenin X ışını soğurma yeteneği onun yoğunluğuna bağlıdır. Bir malzeme ne kadar yoğun ve kalın olursa, o kadar x ışını emer ve o kadar az ışın geçirir. Örneğin bir heykeldeki lehim bileşim yerleri, katı döküm bölgeleri gibi alanlar gri ve beyaz çıkarken, daha az yoğun gözenekli boşluklar içi boş döküm bölgeleri daha koyu çıkar. Bu sayede cidar kalınlığı, kusurlar, bağlantılar, onarımlar, sonradan eklenen değişiklikler ayrıntılı incelenebilmektedir. Malzemenin yüzeyiyle ilgili de onarımlar, kaplamanın altındaki tabakalar, bronzun kendi yapısındaki boşluklar ve kusurlar gibi önemli veriler sağlamaktadır.⁶⁹



Resim 3.3. Radyografik Görüntüleme

Kaynak: (Uğur Genç, Şinasi Ekinci, Mehmet Aksu, Asiye Başsarı 2013, s.87)

⁶⁸ S. Nur & A. Toy (2023). Quality Control In The Portable X-Ray Appliances Used By Radiodiagnostic: The Importance Of Periodic Measurement Of The Light-Beam Field Test, *Uluslararası Medeniyet Çalışmaları Dergisi*, S.3, s.413.

⁶⁹ J. Bassett (2008). The Craftman Revealed, Adriaen de Vries, Sculptor in Bronze. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, s.17.

3.3. Analitik Teknikler

3.3.1. XRF

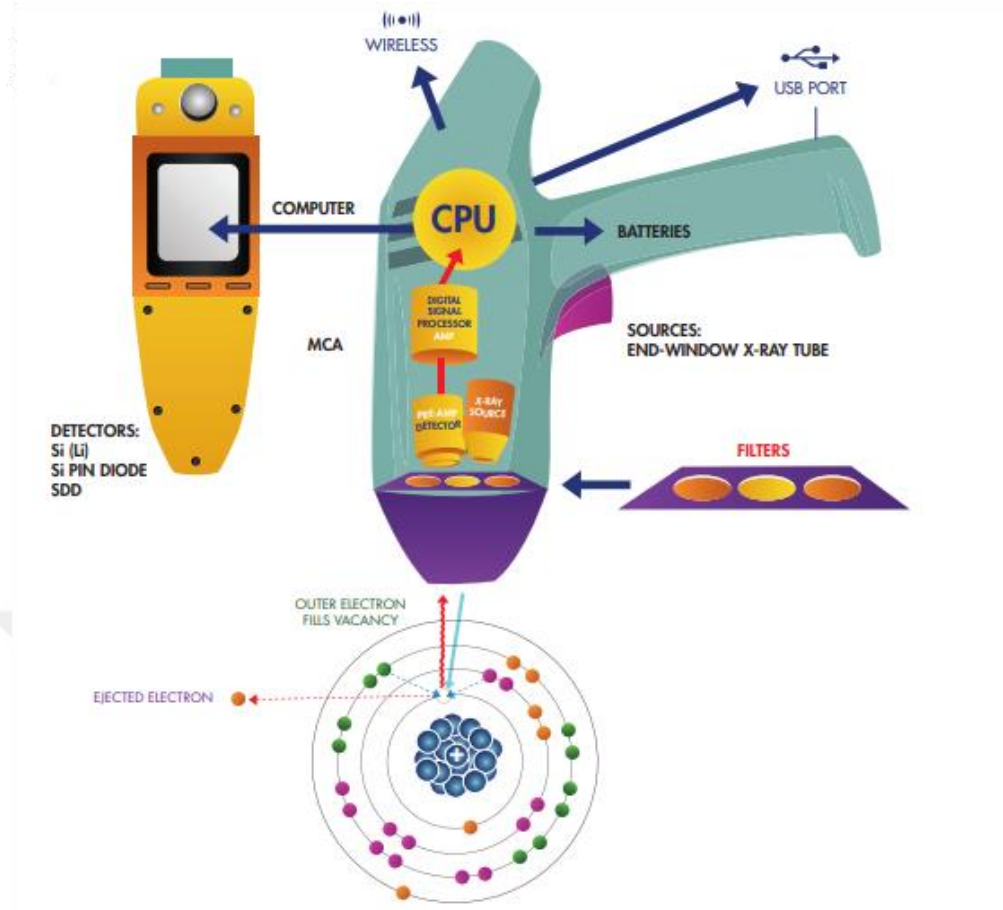
Arkeoloji ve konservasyon biliminde malzemelerin tarihlendirilmesi ve karakterizasyon çalışmaları için nükleer ışınlı analitik araçlar gün geçtikçe önemli hale gelmektedir. Eserler ile ilgili mümkün olan en fazla bilgiyi tahribatsız ve tek seferde hızlı bir şekilde elde etmek için Xrf gibi cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşınabilir veya masaüstü Xrf cihazları kimyasal elementlerin hızlı ve tahribatsız tespitlerini yapmaktadır. Xrf cihazlarının şebeke elektriği ve pillerle çalışan modelleri mevcuttur. Pille çalışan portatif Xrf cihazları hafif, kompakt, tahribatsız ve son derece hassas ölçümler verdiği için arkeoloji ve restorasyon biliminde sıklıkla tercih edilmektedir.

X- ışını floresans spektrometresi, ışık (foton) ve madde etkileşiminden oluşan karakteristik X-ışınları atomları yüksek enerjili radyasyonla uyarması ve bu yüksek enerji girişiyle yörüngelerdeki elektronların daha yüksek enerji düzeyine çıkmasıyla uyarılan elektronların ilk enerji düzeylerine döndüklerinde kazanmış oldukları fazla enerjiyi dalga boyu şeklinde geri vermesiyle ortaya çıkan ikincil X ışınları yayılımı her element için farklı ve benzersizdir/ayırıcıdır. Bu ayırıcı iz elementin cinsini, konsantrasyonu belirlemektedir.⁷⁰ Bu floresans X ışınlarının tespiti ve incelenmesi, XRF spektroskopisinin temelini oluşturur ve prosesin elementel bileşimi belirlemek için analitik bir teknik olarak kullanılmasına olanak tanır.

Portatif veya masaüstü XRF spektrometreleri aynı ana bileşenlere sahiptir. Bir X ışını kaynağı, fitreler, ışın değiştiriciler, detektör, sinyal işlemcileri ve verileri kaydeden bir bilgisayar. Tüpte üretilen X ışınları, birincil ışın filtrelerinden ve berilyum pencereden geçer, malzemedeki oluşan X ışını yayılımı dijital sinyal işlemcisinde veya çok kanallı analiz cihazında işlenerek toplanan veriler bilgisayarın merkezi işlem biriminde XRF spektrumu olarak saklanır.⁷¹

⁷⁰ A. Bezur & L. Lee & M. Loubser & K. Trentelman (2020). *Handheld XRF in Cultural Heritage: A Practical Workbook for Conservators*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, s. 17.

⁷¹ *age*, s. 23.



Resim 3.4. Ana Bileşenleri Gösterilen Bir P-Xrf Diyagramı

Kaynak: (Anikó Bezur, Lynn Lee, Maggi Loubser, Karen Trentelman., 2020, s.23).

Özellikle arkeoloji ve restorasyon biliminde sıklıkla P-XRF cihazları yaygın kullanılmaktadır. P-Xrf cihazları hızlı sonuç verme, laboratuvar dışı kullanım imkanı, geniş uygulama alanı, mineral analizi, toprak analizi, alaşım tayini yapabilmesiyle birçok farklı malzemede kullanılabilmektedir. Katı, sıvı ve toz haldeki örnekler ve önceden hazırlık gerektirmeyen numune özellikleri sayesinde araştırmacılara büyük kolaylık sağlamaktadır.

Arkeoloji de Xrf analizi yaparken beklentiler, kullanılan hammadde, üretim süreçleri, tarihlendirme, kullanım şekli ve amacı, malzemenin yayılımı, nerede bulundukları

Restorasyon da Xrf kullanımı eserlerin tanımlanmasında, orijinal olup olmadığı, restorasyon süreçlerinde (korumada yöntem ve malzeme belirlemek için), aktif ve önleyici koruma yaparken, eserler üzerinde mekanik, kimyasal yada biyolojik değişimlere neden olan çevresel etmenler, eserlerin korunmuşluk durumları (kondisyonları) ile bozulma nedenleri ve mekanizmaları hakkında bilgi toplamak için kullanılan hızlı ve tahribatsız bir yöntemdir.

Xrf ölçümlerinde dezavantajlar ise, yüzeysel ölçüm alması, tek seferde ölçülebilecek element sayısının sınırlı olması, heterojen örneklerde yanıltıcı sonuç vermesi, düşük kütleli elementleri ölçememesi, örneğin belli bir boyutta olması ve tek başına arkeometrik çalışmalarda yetersiz kalmasıdır.

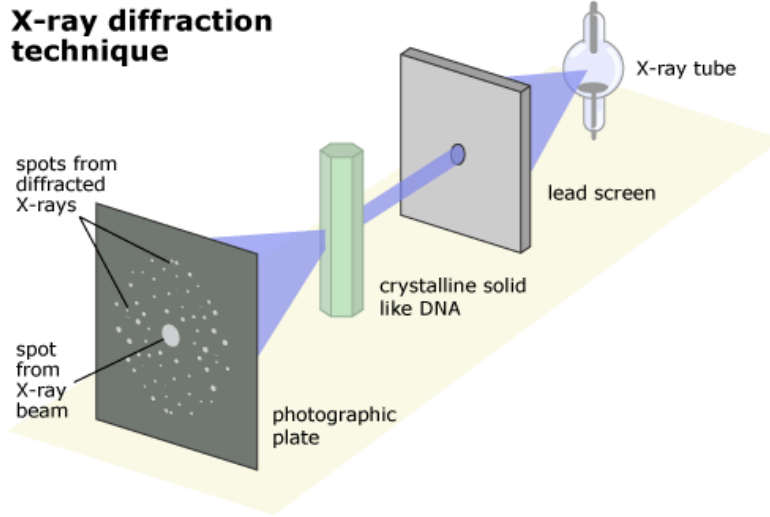
3.3.2. XRD (X-Işınları Difraksiyon Spektrometresi)

Malzemeyi tanımlamada ve karakterize etmede kullanılan bir diğer yöntem Kristal yapıda malzemeler için X ışını kırınmış XRD'dir. Kristal yapıyı incelemekte başka yöntemler kullanılsa da korozyon yapısını incelerken en çok tercih edilen tekniktir. Malzemeleri yerinde analiz etmek için taşınabilir sistemler geliştirilse de en çok kullanılan laboratuvar tipi XRD cihazlarında malzemeyi incelemek için mikro ölçekte numune gerektirmektedir.⁷² Numune toz haline getirildikten sonra cihazın örnek kısmına yerleştirilir, gelen ışın örneklerin mineral tanımları ve bileşenlerinin miktarını verir, ortaya çıkan sonuç fen filmleri ışığında yorumlandıktan sonra, analizden beklenen sorunun cevabı araştırmacının yorumuyla tekrar değerlendirilmektedir. Bu yöntemle kemik, duvar resmi, çanak-çömlek, pigment, metal gibi farklı türdeki eser grubunda analiz yapılmaktadır.

Xrd, kristal yapı sistemlerin belirlenmesi ve ölçümü sayesinde yüzey kristalize bileşiklerin yapısal olarak tanımlanmasını sağlar. Bu analiz yöntemi örneğe herhangi bir tahribatta bulunmadan fiziksel ve kimyasal bileşenlerin saptanmasını sağlar. XRD, X-Işını kırınımı tekniğinde, X-ışını kaynağından (Cu) alfa (α), beta (β) parçacıkları üretilir, ışın mineral üzerinde parçacığın minerale ait kristal yapısına bağlı olarak yansıma açılarının tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır.⁷³

⁷² P. C. Sarrazin & G. Chiari & M. GailHanou (2008). A Portable Non-Invasive Xrd-Xrf Instrument For The Study Of Art Objects, *Powder Diffraction*, S. 23, s.175.

⁷³ T. Y. Yünsel & A. Ersoy & A. Ehsani (2019). X-ışını difraksiyonu yöntemi ile kantitatif mineral içeriği tayini ve çalışma şartlarının etkisi, *Artıbilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, S. 2(2), s. 18.



Resim 3.5. Xrd Çalışma Diyagramı

Kaynak: Berkeley Understanding Science [Erişim: 14.11.2024, <https://undsci.berkeley.edu/the-structure-of-dna-cooperation-and-competition/atoms-and-x-rays-seeing-inside-a-crystal/>]

Korozyon ürünlerinin mikroskopik özelliklerine bakarak, kristal yapı üzerinden niteliksel analizler ile mineral tayini yapmak, metal nesnelerin uzun vadeli korozyon mekanizmalarını tanımlamamıza olanak sağlamaktadır. Ama hiçbir zaman uzun vadeli korozyon mekanizmaları tam olarak ölçülememiştir. Xrd, yüzeyde kristalize olmuş bileşiklerin, kristal sistemlerinin belirlenmesi ve kristal ağ parametrelerinin ölçülmesini sağlamaktadır.⁷⁴

Restorasyon prosedürlerini belirlemede en önemli basamak olan analiz kısmı Laboratuvar imkanları ve malzemenin durumuna göre çeşitlenmektedir. Konservatörler için en ulaşılabilir olan, Xrf ile yapılan element analizi sonucunda yapılan çıkarımdan sonra metalin yüzeyini kaplayan korozyon ürünlerinin bileşik olarak analiz edilmesi için Xrd ve Raman gibi yöntemler ikinci bir basamak olarak tercih edilen analizlerdir. Fiziksel ve elektrokimyasal korozyon indirgeme yöntemlerinin tercihinde bileşik analizi önemli bir basamaktır. Toprak altı koşullarında oluşan yüzey ürünleri, muhafaza altında tutulan ortamdan kaynaklanan tabakalar, atmosfer koşullarının getirdiği yüzey katmanlarını belirlemede bileşik analizi gerekmektedir. Bunun yanında korozyon mekanizmalarının oluşumunda birçok unsur (ısı, nem, atmosfer koşulları gibi) devreye girdiği için analiz imkanları dahilinde birçok analitik teknik

⁷⁴ Aucouturier, Darque-Ceretti, **agm**, s.1608.

yapılabilmektedir. Metal yüzeyindeki katmanların malzeme restorasyon proseslerini belirleme yanında gömü ortamında hakkında bilgilerde vermektedir. Bakır sülfidlerin varlığı deniz ortamında bir gömü durumunu işaret ederken, bakır fosfat ve nitratlar toprak altı koşullarını işaret etmektedir. Analizler sonucu çıkarılan bu ileri bilgiler, farklı ortam koşullarına maruz kalmış kültür varlıklarının tanımlanmasında, eserlerin onarımı ve muhafazalarına yönelik önlemleri hızlı ve kolay şekilde almamızı sağlamaktadır.

3.3.3. FT-IR ve Raman Spektrometre Yöntemleri

FT-IR (fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi) ve Raman spektrometre yöntemleri, birlikte kullanılarak birbirlerinin tamamlayıcısı olan tekniklerdir. Bu tekniklerde moleküler bağların karakterizasyonu ile organik ve inorganik maddelerin nitel ve nicel analizleri yapılmaktadır. Moleküler karakterizasyon için tek başına FT-IR analizi yeterli olmamaktadır. Raman spektrometre analizinde ise doğrudan organik ve inorganik maddelerin moleküler karakterizasyonu yapılabilmektedir.⁷⁵ Kültür varlıklarının içerdikleri protein, yağ gibi organik katkıları, organik koruyucular, inorganikler (sülfatlar, karbonatlar, nitratlar, fosfatlar, silikatlar) ve pigmentlerin analizi için hem laboratuvar hem de taşınabilir sistemleri kullanılmaktadır. ATR (geçirgenlik) ve Reflection (yansıma) gibi farklı ölçüm modları bulunmaktadır.⁷⁶ Raman spektrumları, bir numunenin görünür veya IR'ye (kızılötesi) yakın spektral bölgede neredeyse monokromatik bir lazer kaynağıyla saçılan ışının belirli bir açıdan ölçülmesi prensibine dayanır.⁷⁷ Raman spektrometrelerinde lazer kaynağı, numune aydınlatma sistemi ve spektrometre olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisinin çalışması da Raman gibi kimyasal bağların titreşiminin ölçülmesi prensibi de dayanmaktadır.⁷⁸ IR (kızılötesi) yöntemde görünmeyen zayıf titreşimler Raman da görüldüğü için bu iki yöntem birbirinin tamamlayıcısı olmuştur.⁷⁹

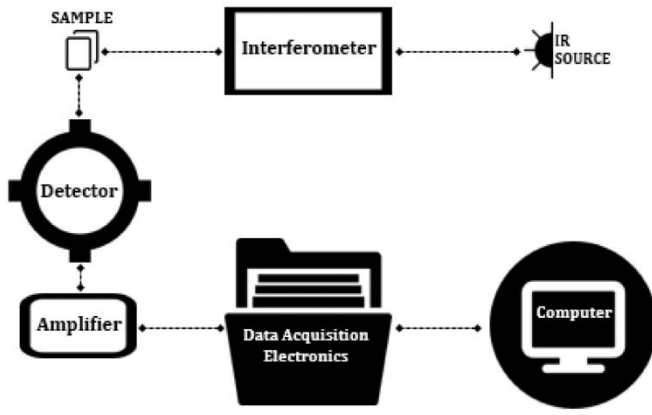
⁷⁵ M. Bakiler (2013). "Kültür Mirasının Tanısında İleri Analiz Yöntemlerinin Önemi " [Bildiri], 29. *Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 27-31 Mayıs, Muğla, s.153.

⁷⁶ A. Öten (2020). XRF, Kırmızıaltı ve Raman spektroskopi tekniklerinin Türk - İslâm sanatlarına arkeometrik katkısı. *Journal of Spectroscopy and Molecular Sciences* 2(2), s.66.

⁷⁷ D. A. Skoog & E. J. Holler & S. R. Crouch (2016). *Principles of Instrumental Analysis Seventh Edition*, Cengage Learning, Boston.s.442.

⁷⁸ G. Başyigit Kılıç, A. N. Karahan (2010). Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ve Laktik Asit Bakterilerinin Tanısında Kullanılması. *Gıda*, 35(6),s.445.

⁷⁹ M. A. Akçe, & Y. K. Kadioğlu (2020). Raman Spektroskopisinin İlkeleri ve Mineral Tanımlamalarında Kullanılması. *Nevşehir Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), s.100.



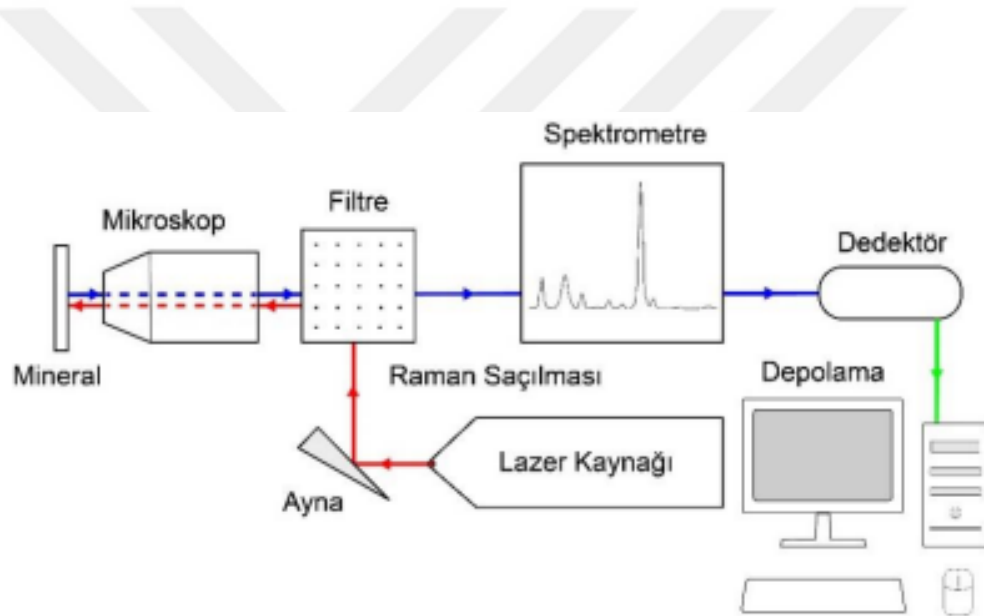
(a)



(b)

Resim 3.6. F-TIR Spektrometre Çalışma Diyagramı

Kaynak: (Abi Munajad, Cahyo Subroto, 2018: s.3)



Resim 3.7. Raman Spektrometre Çalışma Diyagramı

Kaynak: (Mustafa Avi Akçe, & Yusuf Kağan Kadioğlu 2020, s.103)

Raman ve FT-IR incelemelerinde ön hazırlık gerektirmeden küçük boyuttaki numuneler üzerinden hızlı ve tahribatsız şekilde analizler yapılabilmektedir. Bu avantajları nedeniyle özellikle mineral tayini yapmak için kültür varlıkları üzerinde sıklıkla tercih edilen yöntemler olmuşlardır. Cihazların içinde yüklü olan kütüphanelerde tanımlı bileşik formülleri sayesinde güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Minerallerin Raman spektrumları; XRD, kimyasal analizler ve polarizan mikroskop incelemeleri ile karşılaştırıldığında birbirleriyle uyumlu ve

doğru sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.⁸⁰

Metallerdeki korozyon ürünlerinin belirlenmesinde hızlı, güvenilir ve tahribatsız olduğu için çoğunlukla Raman ve FT-IR tercih edilen yöntemlerdir. Tüm analitik analiz tekniklerinde olduğu gibi korozyon ürünlerinin sınıflandırılması, uygulanacak restorasyon basamaklarının belirlenmesinde önemli katkılar sağlamaktadır.

3.4. Mikroanaliz Yöntemleri (paxe, epma)

Son yıllarda artan analitik tekniklerle malzemelerin nitel ve nicel araştırmalarında birçok ekipman arkeoloji ve koruma alanının hizmetine sunulmuştur. Diğer bölümlerde bahsedilen tüm teknikler son yıllarda performanslarını etkileyici şekilde geliştirmişlerdir. XRF, Raman, FT-IR gibi ekipmanların taşınabilir olması malzemelerin yerinde ve hızlı analiz edilebilmesi bu tekniklerin erişimlerini artırmıştır. Diğer önemli gelişme ise büyük laboratuvar ekipmanları olan parçacık hızlandırıcılar gibi ağır kaynaklara erişiminde artması olmuştur. Analitik tekniklerde gelişmeler laboratuvarlara ve cihazlara erişim artıkça genişlemiştir. Malzeme yüzeyi dışında daha derinlemesine inceleme gerektiren bazı özel durumlarda tamamlayıcı diğer analizlerle çalışma desteklenmektedir. Koruma uzmanlarının tercihi her zaman tahribatsız analizlerden yana olmalıdır ancak mineral tayini yaparken bir ile birkaç yüz mikronküçük hacimdeki yerlerin mikro ışınlar aracılığıyla mikro analizleri de yapılmaktadır. Çok küçük boyuttaki mikroskobik bölgelerin karakterize edilmesiyle yapısal özelliklerinin belirlenmesinde karşımıza sıklıkla iki yöntem çıkmaktadır, PIXE ve EPMA.

PIXE (Parçacık veya Proton Kaynaklı X-ışını Emisyonu), yönteminde parlatılmış ince kesitler üzerine nükleer bir mikro-probdan (NMP) üretilen proton ışın demetinin örnek üzerine nüfus etmesi ve örnekteki atomların iç yörüngelerindeki elektron sıçramasından saçılan ışınların bir dedektörde sayılmasıyla analiz gerçekleştirilmektedir.⁸¹ Pixe pahalı bir cihazdır ve az sayıda laboratuvarında bulunur. Genellikle iz element analizleri, metal cevherlerin karakterizasyonunda kullanılan hassas araştırma gerektiren malzemelerde tercih edilen mikro analiz tekniğidir. Mikro analiz kabiliyeti ve yüksek geçirgenliği sayesinde korozyon tabakları arasında hassas mikro boyutta ölçümler yapabildiği ve nicel sonuçlar verdiği için bazı çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır.

EPMA (Elektron Probu Mikroanalizi), malzeme üzerindeki elementlerin

⁸⁰ Mustafa Avi Akçe, & Yusuf Kağan Kadioğlu, *agm* s.101.

⁸¹ O. Celep & A. D. Baş & E. Y. Yazıcı & H. Deveci (2018). Altın Cevherlerinin Karakterizasyonunda Kullanılan Mikro Analitik Yöntemler, *Madencilik*, 57(4), s.291.

tanımlamasında mikro ölçekte miktar ve dağılım hesaplarının yapılmasını sağlayan kantitatif mineral tanımlama yöntemlerindendir. EPMA, SEM (taramalı elektron mikroskobu) gibi malzeme üzerinden yüksek çözünürlüklü görüntüler verir, Sem'den farkı dalga boyu dağılımlı (WDS) spektroskopi kullanarak kantitatif sonuçlar vermesidir. Düz ve parlak kesitler üzerinde noktasal görüntülerle kimyasal yapı analizi yapılmaktadır.⁸²

⁸² B. Paktunç (1996). Yer Bilimlerinde Mikroanalitik Yöntemler, *Jeoloji Mühendisliği*, sayı:48-49, Cilt:20, s.42.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

KOROZYON İNDİRGEME YÖNTEMLERİ

4. Korozyon İndirgeme Yöntemleri

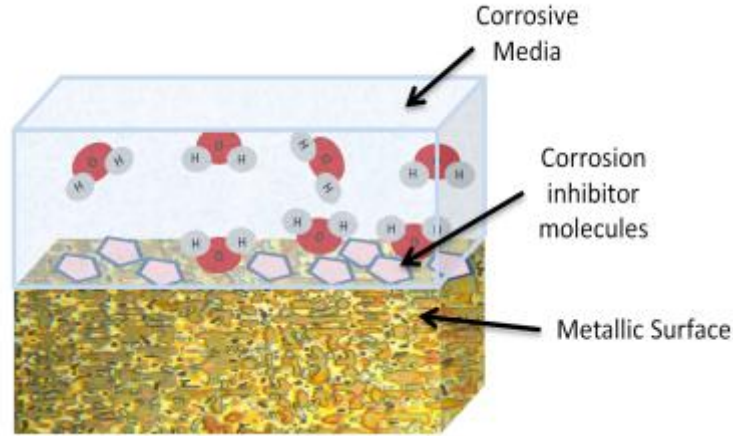
Metallerin doğası gereği bozulma süreci sonsuza kadar durdurulamaz. Konservatörler ve malzeme bilimciler korozyonu önlemek, malzemeyi mümkün olduğunca orijinal halinde tutmakla ilgilenen birbirine yakın bilimlerdir. Korozyon bilimindeki gelişmeler koruma alanında faydalı olsa da en önemli fark müdahale edilen malzemelerin farklılığıdır. Koruma tarafında müdahale edilen nesne eşsiz bir kültür varlığıdır. Koruma uygulamalarında orijinal malzemeyle uyum, minimum müdahale, geri alınabilir malzemeleri kullanmak daima esastır. Bu noktada, malzeme bilminde uygulanan korozyon önleme prosedürleri daha aktif uygulanabilirken koruma alanında müdahaleler sınırlıdır.

Korozyon inhibitörleri/indirgeyiciler, metalin yüzeyine eklenen ve elektrokimyasal süreci geciktirerek oksidasyonu yavaşlatmak için yaygın olarak kullanılan maddelerdir. İndirgeyiciler korozyon süreçlerinden bir veya birkaçını engelleyerek yüzey durumunun özelliklerini değiştiren maddelerdir. İndirgeyiciler, korozyon oranını düşüren veya korozyon tabakasındaki agresif ürünleri etkisizleştirerek pasif bir korozyon ürünü tabakasının oluşumunu teşvik ederler. Bazı indirgeyiciler anodik reaksiyonu bastırırken bazıları katodik reaksiyonu, bazıları da her iki elektrokimyasal reaksiyonu birden bastırabilmektedir. İndirgeyici malzemeler, elektrotla hızlı bir reaksiyona girerek elektrostatik veya Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla kimyasal olarak metal yüzeyinde absorbe edilmesi gerekir.⁸³

İndirgeyiciler, metal malzemelerin korozyon süreçlerine karşı koymak için kullanılmaktadır ve asıl amaç oksijen ve klorür iyonlarının aktivitesini kısıtlamaktır. Su ve neme maruz kalan metallerdeki aktif korozyon sürecindeki oksijen indirgeme reaksiyonu hedeflenerek buluntuların korozyon direnci önemli ölçüde iyileştirilmektedir. Öncelikli olarak bu reaksiyonu hedefleyerek malzemenin korozyon direncini önemli ölçüde iyileştirir buda korozyon oranında bir azalmayla sonuçlanır. Ek fayda olarak korozyon önleyici koruma sağlayarak malzemelerin ömrünü uzatır.⁸⁴

⁸³ Robert Faltermeier, **agt**, s.28.

⁸⁴ J. R. González-Parra & F. Di Turo (2024). The Use of Plant Extracts as Sustainable Corrosion Inhibitors for Cultural Heritage Alloys: A Mini-Review, *Sustainability*, S.16, s.3.



Resim 4.1: İndirgeyicilerin Çalışma Mekanizması

Kaynak: (Jesús Rafael González-Parra, Francesca Di Turo 2024, s.3)

Bakır alaşımlarında meydana gelen korozyon sürecini durdurmak oldukça zor bir durumdur. Çeşitli koruma stratejileri geliştirirken iki temel yaklaşım: pasif ve aktif yöntemler tercih edilmektedir. Koruma etiği açısından esere doğrudan müdahale etmeden çevresel koşulların iyileştirilmesiyle gerçekleştirilen önleyici koruma çalışmaları ilk tercih olmaktadır. Ancak bu yaklaşım kapalı ortamda tutulan eserler için uygulanabilir olsa da dış ortamda sergilenen eserler ve uygun depo koşullarında depolanamayan eserler için bazen ekonomik ve pratik olmamaktadır. Bu nedenle koruma bilimi doğrudan eser yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyon hızlarını azaltan ve yüzeyin çevreyle etkileşimini kesen aktif koruma prosedürlerini geliştirmişlerdir.

Bakır korozyonu için tedavi basamakları genel olarak; ön sağlamlaştırma, mekanik, kimyasal, elektrokimyasal temizlik, çözünür tuzların konsolidasyonu, korozyon indirgeme, stabilizasyon, yüzey koruyucu uygulaması adımlarından oluşmaktadır. Korozyonun durdurulmasında doğrudan klorürlerin ekstrasyonu üzerinde çalışmalar geliştirilmiştir. Bakır klorürlerin eser üzerinde oldukça yıkıcı etkiler vardır. Bronz kanseri olarak bilinen ve durdurulması oldukça zor ve ilerleyen bir bozulma türüdür. Bu sebeple indirgeyici malzemeler doğrudan bu tahrip edici elektrokimyasal oluşumu durdurmak için geliştirilmiştir. Kimyasal birçok ürün metal malzemenin çevreyle etkileşimini keserek yüzeyde moleküler boyutta kaplama oluştururlar. Korozyon indirgeyici kimyasallar da metal yüzeyinde birikinti veya filmler şeklinde oluşturularak, metali pasifleştirerek daha fazla korozyonu önleyebilir. Yüzey kaplama maddelerinin çoğu şeffaftır, ancak indirgeyici malzemeler gözle görünür değişikliklere sebep olmaktadır. Düşük kalınlıkları nedeniyle fiziksel olarak yüzeyden

alınmaya uygun değildir, ayrıca birçoğu oldukça toksik olduğu için sağlığa ve çevreye oldukça zararlıdır.⁸⁵ Bu sebeplerle pek çok konservasyon uzmanı bu tür malzemelere alternatif daha az toksik ve çevreye duyarlı malzemeler geliştirmeye her gün daha da yaklaşmaktadır. Bu bölümde koruma alanında çok sık kullanılan indirgeyici malzemelerden bahsedilecektir.

4.1. Kimyasal Yöntemler

4.1.1. Benzotriazol (BTA)

Koruma alanında Benzotriazol (BTA), korozyon indirgeyicilerden en uzun kullanım geçmişine sahiptir. Kimyasal formülü $C_6H_5N_3$, kristalimsi, beyazdan bej rengine kadar ve neredeyse kokusuz bir maddedir. Molekül ağırlığı 119,13/mol, erime noktası 94-97°C, kaynama noktası 203- -205°C'dir.⁸⁶ Alkol, aseton gibi organik çözücülerle çözünür. BTA oldukça toksik bir maddedir, solunduğunda veya deri yoluyla emildiğinde üst solunum yollarını ve cildi tahriş ettiği bilinmektedir.⁸⁷ Uygulama yapılırken çeker ocak içinde, havalandırması iyi olan bir mekanda, koruyucu kıyafetler, maske ve eldiven takmak gereklidir.

BTA'nın bakır ve bakır alaşımlarındaki korozyon direncini artırdığı bilinmektedir. Bakırın çözünmesini geciktirici etkisi ve ikincil olarak metalin yüzeyinde oluşturduğu kaplamayla oksijeni indirgeyerek reaksiyona girer. BTA, düşük konsantrasyonda katodik korozyon görevi görerek, yüksek konsantrasyonda anodik korozyon indirgeyici olarak çalışır. Katodik bölgelerde hidrojen oluşumlarının durdurulmasını veya anodik bölgelerde de oksijen emiliminin durdurulmasını sağlamaktadır.

Bronz hastalığından etkilenen eserlerin benzotriazol etkileşiminin genel süreci oldukça karmaşıktır BTA'nın bakır üzerinde çeşitli kompleks tabaklar oluşturarak korumayı sağlaması araştırmacıların üzerinde çok detaylı çalıştığı bir konu olmuştur. Konuyla ilgili kaynaklarda BTA'nın, farklı yapıdaki korozyon tabakları üzerinde oluşturduğu reaksiyonlar farklı şekillerde açıklanmıştır. Çünkü eserler gibi üzerinde oluşan tabakalarda oldukça çeşitli ve özeldir. Bakırın BTA'dan önce ön işleme tabi tutulması da BTA filminin doğasını etkilemektedir. Ayrıca patina yapısı, çukurlardaki aktif klorür varlığı, patina bileşeni, korozyon derecesi önceden detaylıca incelenerek uygulama yapılmalıdır. BTA'nın indirgeyici olarak etkisinin kesin olarak

⁸⁵ M. P. Casaletto & C. Cirrincione & A. Privitera & V. Basillissi (2016). A Sustainable Approach to the Conservation of Bronze Artworks by Smart Nanostructured Coatings, [Bildiri], Metal 2016, Proceedings Of The Interim Meeting Of The Icom-Cc Metals Working Group, Eylül 2016, New Delhi, s.283.

⁸⁶ Robert Faltermeyer, *agt*, s.42.

⁸⁷ T. De Alarcon (2013). A Comparative Study of Corrosion Inhibitors for the Treatment of Archaeological Copper and Copper Alloys, *Anatolian Archaeological Studies*, S.18, s.111.

tanımlanması oldukça tartışılan bir konudur. Bakırların tümünde ince bir bakır oksit tabakası mevcuttur, BTA ana sabitleme bölgelerini bu katman üzerinde oluşan koruyucu bir film katmanı oluşturmaktadır.⁸⁸ Bakır+bakır oksit Cu(I) tabakası son derece çözünmezdir. Yoğun klorür varlığında ise BTA; yüksek klorür yani bronz hastalığının varlığı düşük Ph oluşturacağından, BTA'nın kısmi çökmesinden dolayı kalın bir film tabakası oluşturabilir. Çünkü Ph düştükçe malzeme çözünmesi azaltacaktır⁸⁹. Ph yükseldiğinde oksitler daha yavaş ilerleyeceğinden ortaya çıkan film ince ve oksijen geçirgensiz olacağı için en iyi korumayı sağlamaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmalarda BTA'nın oksitler üzerinde iyi çalışsa da klorürler üzerinde uzun vadede çokta uygun bir koruma sağlamadığı düşünülmektedir.

BTA'nın standart olarak uygulanması oda sıcaklığında indirgeyici malzemenin nem alımını en aza indirmek için ve penetrasyonu kolaylaştırmak için vakum altında yapılmaktadır. %3 olarak etanolla hazırlanan çözelti içinde eser 24 saat boyunca bekletir. Çözeltiden çıkarılan eser üzerindeki fazla malzeme uzaklaştırıldıktan sonra etanolla durulama yapılır ve kurumaya bırakılır. Eser daha sonra yüksek nemli bir mikro klima ortamında gözlemlenir, eğer eser üzerinde aktif korozyon süreci devam ediyorsa durum stabil olana kadar aynı işlemler tekrar tekrar uygulanır. BTA uygulama sonrası yüzeyde kararma yaparak görünümü bir miktar değiştirmektedir. Son olarak uygulama sonrası yüzeyle oksijenin temasını kesmek için Paraloid B72 veya Incralac uygulaması yapılmaktadır.

BTA öncesinde mekanik veya kimyasal bir temizlik yapmak tamamen eserin durumuyla ilgilidir. BTA uygulama yapılmadan veya öncesinde bir temizlik yapılarak da kullanılmaktadır. Örneğin eser üzerinde yüzeyde nantokit gibi kolay çözünmeyen bir tabaka varsa öncesinde sodyum seski karbonat uygulaması yapmak gerekebilir. Parakatamit varlığında ise öncesinde mekanik olarak tozumanın tabaklarda açığa çıkarılarak BTA'nın kimyasal olarak tepkimeye girmesini sağlamak için temizlemek gerekebilir. Deniz etkili korozyonlarda ve klorür, kalkerlerin varlığında ise BTA öncesinde tavsiyede edilen mekanik veya eserin durumuna göre sitrik asit ile temizlik tavsiye edilmektedir.⁹⁰

BTA uygulamasından sonra eserler sergi veya depolarda mutlaka periyodik olarak kontrol edilmelidir. Uygun olmayan nem ve sıcaklık koşullarında yüzeydeki film malzemesinden geçen nem, asitliğin artmasına neden olarak yeniden aktif korozyon sürecini

⁸⁸ David A. Scoot, **age**, s.377.

⁸⁹ Robert Faltermeier, **agt**, s.46.

⁹⁰ J. M. Cronyn (1990). The Elements of Archaeological Conservation, Taylor & Francis Group, New York, s.229.

hızla başlatabilmektedir.

4.1.2. AMT

Kimyasal formülü $C_2H_3N_3S_2$ olan AMT, yaygın olarak 2-amino-5-merkaptio-1,3,4-tiadiazol adıyla bilinir, molekül yapısında amino ve metil grupları içerir. Sarımsı beyaz renkli kristal yapıda bir tozdur.⁹¹ BTA'da olduğu gibi yüksek toksikolojik içeriği sebebiyle kullanırken koruyucu ekipman kullanılmalıdır. BTA'dan sonra AMT korozyon önlemede öneril ikinci önemli bileşiktir. Raporlamalarda AMT malzemenin morfolojisine ve görünümüne etki etmeden tepki vermektedir. Yüzeyde bulunan bakır klorürü çözerek suda çözünmeyen bakır klorürleri çözelti haline getirerek başka bir kompleks oluşturmaktadır. Klorür minerallerini pasifleştirmeden korozyona uğrayan alanın yüzeyini kaplayan BTA'ya karşın AMT daha etkili bir indirgeyici olarak görev yapmaktadır. BTA filminin yüzeyden ayrılması ve açılması durumunda korozyon döngüsü devam edeceği için klorürler tekrar aktive olabilmektedir. AMT bakırla tamamen çözünmeyen ve polimerik bir kompleks oluşturduğu için çözelti içine daldırılan malzemelerde ağırlık artışı meydana gelmekte, bakır yüzeyinde ince sarı renkli bir tabaka oluşturduğu raporlanmıştır. Yüzeyde oluşan bu tabakanın çamurumsu yapıda olduğu nesnelerin gözeneklerine ve kırıklardan içinden çıkarılmasının güç olduğu da raporlanmıştır. Suda çözünmeyen AMT çeşitli organik ve inorganik çözücüler içinde çözülebilmektedir. Bazı konservasyon çalışmalarında AMT çözeltisi hazırlanırken içine eklenen %5lik sitrik asidin yüzeyde oluşan çökeltileri azalttığı belirtilmiştir. AMT hazırlanırken karışıma reaksiyonu hızlandırmak için eklenen birkaç damla nitrik asit özellikle Ph dengesini (asiditeyi artırması) bozduğu ve patina hasarlarına neden olabileceği için kullanımına dikkat edilmelidir.⁹²

Bakır klorürler üzerinde başarıları kaydedilen AMT, bakır patinası üzerinde de etkili olduğu ve patinayı temizlediği için yine de dikkatli kullanılması ve uygulama öncesinde dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Korozyon yapısının karmaşık doğası gereği AMT farklı yapıdaki arkeolojik eserler üzerindeki davranışı net olarak bilinmemektedir.

4.1.3. Yeşil İnhibitörler

Korozyon indirmek için yapılan bilimsel çalışmalar kapsamlı ve çok geniştir. Ancak bu yöntemlerin birçoğu kültürel miras uygulamaları için uygun değildir. Son zamanlarda insan sağlığına zarar vermeyen doğayla uyumlu ürünlerde görülen gelişim, koruma uzmanlarını da

⁹¹ Robert Faltermeyer, **agt**, s. 50.

⁹² David A. Scoot, **age**, s.382.

agresif kimyasallara alternatif malzemeler geliştirmek için yeni bir çalışma alanı açmıştır. Arkeolojik bakır alaşımlarını korumak için BTA ve AMT'ye alternatif olarak, organik bileşiklerden sentezlenen, tohum, bitki özü ve uçucu yağ karışımlarıyla elde edilen yeni bir koruyucu malzeme geliştirilmektedir. Bu malzeme, düşük toksisite, çevre dostu olma, uzun vadeli kararlılık, orijinal malzeme uyumu ve uygulama kolaylığı gibi özelliklere sahip olup korozyon performansı araştırılmaktadır.

Bitki özünden elde edilen indirgeyiciler düşük maliyet, yenilebilirliği, biyolojik olarak parçalanması, düşük toksisite ve doğa dostu olmasıyla avantajlarındandır. Dezavantajları ise geri alınaabilirliği zahmetli ve pahalı olması, aktif bileşikle ilgili belirsiz bağlar ve birden fazla molekülün potansiyel sinerjik etkileri yer almaktadır.⁹³

Devam eden araştırmalar organik yeşil inhibitörlerin bitkiler gibi doğal kaynaklardan elde edilen tannik asit, aloe vera, akasya meyvesi, zeytin yaprağı özü gibi kombinasyonlarının korozyon üzerinde oldukça yüksek etkisi olduğu izlenmiştir.⁹⁴ Genel olarak çoğu metal türü için korozyona karşı etkileri güçlü görölse de bu alan araştırmalara geliştirilmeye hala açıktır.

⁹³ Jesús Rafael González-Parra & Francesca Di Turo, **agm**, s.6.

⁹⁴ D. Kesavan & M. Gopiraman & N. Sulochana (2012). Green Inhibitors for Corrosion of Metals: A Review, *Chemical Science Review and Letters*, 1(1), s. 2.

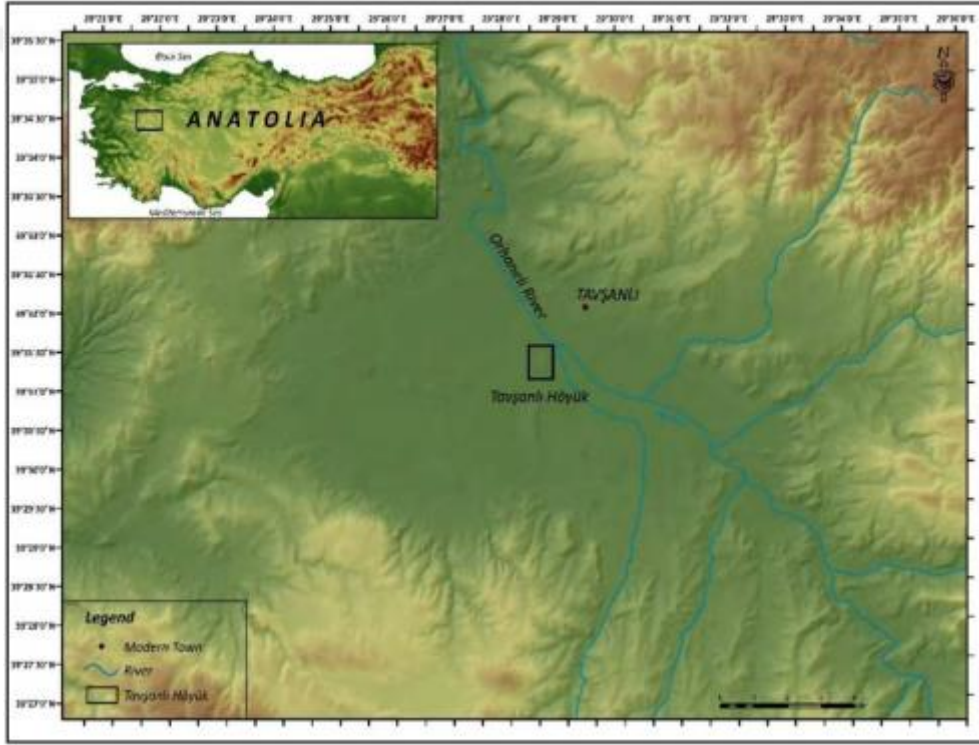
BEŞİNCİ BÖLÜM

TAVŞANLI HÖYÜK BULUNTULARI ÜZERİNDEN KOROZYON TANIMLAMA YÖNTEMLERİ

5. Tavşanlı Höyük Buluntuları Üzerinden Korozyon Tanımlama Yöntemleri

5.1. Tavşanlı Höyük

2021 yılında kazısına başlanan, Tavşanlı Höyük, Kütahya İli, Tavşanlı İlçesi'nin 1.5 km güneyinde yer alan Tavşanlı Ovasında yer almaktadır. Höyüğün hemen kenarından Orhaneli Çayı geçmektedir. 300x250 m boyutlarındaki alan, Tunç Çağına ait malzemelerin dağılımıyla 650x700 m ölçülerine ulaşmaktadır. Bu haliyle 45 hektarlık bir alana yayılan höyüğün 21 metrelik dolgusu olduğu tespit edilmiştir.⁹⁵



Harita 5.1. Tavşanlı Ovası ve Tavşanlı Höyük Konumu

Kaynak: (Erkan Fidan, Atalay Karatak, Sezer Seçer Fidan, Mehmet Ali Kocabaş 2022, s.250)

Alanda başlatılan ilk kazı çalışmaları höyüğün kuzeydoğusundaki beş farklı plankarede gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 40 gün süren arazi çalışmalarında Ege Dünyası ve Orta Anadolu ile benzer, 77 adet envanterlik, 60 adet etütlük buluntu, tekstil üretimiyle ilgili olan ağırşak, tezgah ağırlığı, kemik iğnelerdir. Üst tabakalarda büyük oranda tahrip olmuş Son Tunç Çağı

⁹⁵ E. Fidan & A. Karatak & S. Seçer Fidan & M. A. Kocabaş (2022). Tavşanlı Höyük Kazisi 2021 Yılı Çalışmaları (İlk Sezon), 42. Kazı Sonuçları Toplantısı, Denizli, Cilt 2, 245.

mimari evre, alınan radyokarbon örnekleriyle doğrulanmıştır. Yapılan bu radyokarbon analizi yanında sondajlar ve jeoarkeolojik araştırmalara göre MÖ 3. Binyıl yerleşmesinin 45 hektarlık tüm alana yayılım gösterdiğini, höyük konilerinin ise yüksek oranda MÖ 2. Binyıl tabakaları ile yükseldiği fikri ilk gözlemlere dayanmaktadır.⁹⁶



Resim 5.1. Höyükten Hava Fotoğrafı,2021

Kaynak: (Tavşanlı Höyük Kazı Arşivi)

2022 yılında 6 ay süren arazi çalışmalarında geçen yıla ek 7 farklı açmada daha kazılar gerçekleştirilmiştir. Höyüğün en üst tabakasında yer alan Son Tunç Çağı çukurları kazılarak bu seviyenin altındaki Orta Tunç Çağı yangın tabakalarının varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca höyüğün doğusundaki kazılarda Orta Tunç Tabakasının altında İlk Tunç Çağı tabaklarına inilmiştir. Sezon boyunca 122 adet envanterlik, 142 adet etütlük buluntu ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkarılan buluntulardan yola çıkarak, arkeozooloji, arkeobotanik, yontmataş, çanak çömlek ve tekstil teknolojileri ayrıca ayrıntılı olarak çalışılmıştır.⁹⁷ 2023 ve 2024 yıllarında da çalışmalar devam etmiş, hem Orta Tunç hem de Son Tunç Çağı'na ait tabakalarda kazı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarla çok sayıda büyük çoğunluğu bakır bazlı metal eserler ele geçirilmiştir.

⁹⁶ age, s.248,249.

⁹⁷ E. Fidan, H. L. Keskin, N. Naiboğlu, S. Seçer Fidan, N. Kolankaya Bostancı, G. Ekmen, H. Ekmen, & M. A. Kocabaş (2023). Tavşanlı Höyük Kazısı 2022, 43. Kazı Sonuçları Toplantısı, Ankara, Cilt 1, s.413.



Resim 5.2. 2022 Yılı Kazı Buluntuları

Kaynak: (Fidan, vd., 2022, s.410)

Batı Anadolu'daki tarih öncesi döneme ait önemli konulardan olan bölgedeki şehir devletlerinin ortaya çıkmaya başladığı zamanı aydınlatmak açısından Tavşanlı Höyük kazıları büyük önem taşımaktadır.⁹⁸ Özellikle MÖ 3. Binyılın ortalarında büyük şehirlerin varlığı önceki yapılan araştırmalar ile örtüşmektedir. Özellikle 2017-2023 yılları arasında Prof. Dr. Erkan FİDAN başkanlığında yapılan Eskişehir ve Kütahya İlleri Tarihöncesi Dönem Yüzey Araştırması (EKAR), projesinin amaçlarından biri de Kütahya'nın olası arkeometalurjik varlığını ortaya çıkarmak olmuştur.⁹⁹ Bu çalışmalar kapsamında arkeolojik, tarihi ve kırsal alanda sanayi öncesi metalurjik aktivitelere ait kalıntılar, 2021 yılından itibaren Cumhurbaşkanlığı Kararlı Kazı statüsünde bilimsel ve sistematik kazı çalışmalarına başlanan Tavşanlı Höyük'te de yüzey araştırmaları sonucu ulaşılan verilerle her yıl ulaşılan bu araştırma sonuçları uyumlu görünmektedir. Höyüğün konumunun ticaret ağının çevresinde, çevresindeki doğal kaynakların tedariki ve transferi için oluşturulmuş bir şehir olarak var olmuş olması muhtemel görünmektedir.¹⁰⁰ Ayrıca Tavşanlı Höyük'te Tunç Çağı'nın neredeyse bütün

⁹⁸ E. Fidan & L. Uncu & E. B. Karakoca (2021). Bronze Age Survey On Tavşanlı Höyük (Kütahya, Turkey): Preliminary Results, *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, Sayı:14, 28.

⁹⁹ A. Karatak & E. Fidan & H. L. Keskin. (2024). Arkeolojik ve Tarihsel Bağlamda Kütahya'da Madencilik ve Metal İşçiliğine Dair Yeni Bulgular, *Yer Altı Kanakları Dergisi*, Sayı:25, s.58.

¹⁰⁰ E. Fidan, & L. Uncu, E. B. Karakoca, *agm*, s.35.

evrelerinin görülüyor olması, bölgede söz konusu dönem kronolojisinin daha sağlam temellere oturtulmasına yardımcı olacaktır.

5.2. Tavşanlı Höyük Kazısı Bakır Buluntuları Üzerinden Korozyon Tanımlama ve Konservasyon Yöntemleri

Arkeolojik eserlerin korunması, toprağın altından çıkarıldıkları anda başlayan hassas bir süreçtir. Toprak altında uzun yıllar stabil koşullarda kalan eserler, ani atmosferik değişimlere maruz kaldıklarında hızla bozulma riski taşır. Kazı laboratuvarlarında, eserin durumu ve laboratuvar imkanları göz önünde bulundurularak aktif ya da pasif müdahale stratejileri belirlenmelidir. Bu süreçte temel amaç, bozulma süreçlerini durdurmak ve eserin fiziksel ve kimyasal stabilitesini koruyarak uzun vadeli muhafazasını sağlamak olmalıdır.

Laboratuvarlarda yapılan önleyici müdahaleler, arkeolojik eserlerin uzun vadeli korunması için kritik bir basamaktır. Toprağın altındaki stabil koşullardan çıkarılan eserler, atmosferik oksijen, nem değişimi ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere maruz kaldığında hızlı bozulmalara uğrayabilir. Bu bozulmaların etkisini en aza indirmek için konservasyon uygulamaları bir zorunluluktur. Özellikle metal objelerde klorür, oksijen ve nem etkisiyle devam eden korozyon süreçleri malzemeyi tamamen yok edebilir. Konservasyonun temel amacı, bu aktif bozulma süreçlerini durdurarak eseri pasif bir duruma getirmektir. Koruma çalışmaları, eserin fiziksel bütünlüğünü stabilize ederek, çevresel faktörlerden etkilenmesini en aza indirir. Pasivasyon işlemleri, kimyasal reaksiyonları yavaşlatarak malzemenin uzun vadeli dayanıklılığını artırır. Arkeolojik eserler, tarihsel, kültürel ve bilimsel bilgi taşır. Konservasyon, bu bilgilerin korunmasını sağlayarak eserin gelecek nesillere aktarılmasını mümkün kılar. Eserler, çıkarıldıkları andan itibaren çevresel koşullara karşı hassastır. Nem kontrolü, uygun sıcaklık ve ışık seviyeleri gibi konservasyon önlemleri, eserlerin zamanla daha fazla zarar görmesini engeller. Arkeolojik eserlerin sadece fiziksel yapısını değil, aynı zamanda tarihi ve bilimsel değerlerini korumak için hayati bir süreçtir. Doğru uygulamalar hem aktif bozulmayı durdurur hem de eserlere uzun vadeli bir stabilite kazandırır. Bu nedenle, konservasyon, arkeolojik çalışmaların ayrılmaz bir parçası olarak görülmelidir.

Bu amaçlarla çalışmanın materyalini oluşturan Tavşanlı Höyük kazısına ait bakır buluntular üzerinden teze konu araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Kazı sezonu boyunca çıkan tüm metallerin Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra içlerinden bakır bazlı olan eserler seçilmiş, bakır

içeren buluntuların arasından farklı bozulmaları temsil eden 16 adet örnek araştırmanın materyali olmuştur (Tablo5.1.).

Çalışmalar Tavşanlı Höyük kazı evi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kazı evimizde bulunan imkanlar dahilinde bakır alaşımlı eserlerin önleyici koruma çalışmaları gerçekleştirilmiş, acil onarım kararları verilmiştir. Daha sonra gelişmiş laboratuvar çalışmalarına veri oluşturmak amacıyla belgelenmeleri yapılarak kapsamlı onarım sürecine katkı sağlayacak veriler, oluşturulan koruma onarım fişlerine işlenmiştir.

Tablo 5.1. Çalışılan Eser Envanterleri

Buluntu Numarası	Buluntu Tanımı	Fiş Numarası
AN-55 1/1	Metal Başlı İğne	1
AV-37 48/8	Metal Nesne	2
AV-37 48/10	Metal Keski	3
AV-37 79/3	Metal İğne	4
AV-37 79/4	Metal İğne	5
AV-37 87/3	Metal İğne	6
AV-37 89/5	Metal Bilezik	7
AV-38 31/3	Metal Nesne	8
AV-38 41/2	Bronz Nesne	9
AV-38 45/3	Metal Nesne	10
AV-38 45/4	Metal Nesne	11
AV-38 61/1	Metal Nesne	12
AV-38 73/8	Metal Nesne (İğne?)	13
AV-38 73/14	Metal Nesne	14
AW-38 90/1	Metal İğne	15
AW-38 68/4	Metal Bız	16

Tavşanlı Höyük kazısından seçilen bakır eserlerin belgelenmelerine öncelikle ölçek ile fotoğraflanarak başlanmıştır. Yüzeyde korozyon ürünlerinin daha iyi anlaşılması için stereo mikroskop altında incelemeler yapılarak, fiziksel durumları ve korozyon ürünleri incelenerek fotoğraflarla belgelenmiştir. Bakır alaşımlarının element kompozisyonlarının belgelenmesi taşınabilir p-XRF kullanarak yapılmıştır. P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle en az 2 farklı noktadan referans alınarak yapılmıştır. Korozyona uğrayan eserlerin yüzeyinde biriken ürün katmanlarının analiz sonuçlarını daha çok korozyon ya da yüzey kirliliklerinin gelmesini, az miktarda da hammadde sonuçlarını içermesi olasıdır. Bu sebeple

ölçümler temizlik öncesi ve sonrasında yapılarak, alınan verilerin ortalamaları koruma onarım fişlerine ve tabloya (Tablo5.2) işlenmiştir.

Seçilen malzemeler üzerinde yapılan konservasyon çalışmalarından önce buluntuların element kompozisyonları ve mikroskop görüntüleri üzerinden bozulma nedenleri, korozyon ürünleri ve toprak altı koşullarına ilişkin elimizdeki verilerle yorumlar getirilmiştir. Alaşımdaki içeriklere göre genel bir değerlendirme yapmak gerekirse; Tez kapsamında incelenen buluntuların ana bileşeni bakıdır. Saf bakıra yakın yüksek bakır içeriğine sahip örnekler genellikle daha çok korozyona uğramıştır. Saf bakır korozyona karşı oldukça savunmasızdır. Klorür ve nem gibi çevresel faktörler saf bakırın hızlı bir şekilde oksitlenmesine ve tamamen mineralize olmasına neden olmuştur (ör. AV-37 48/8, AV-38 73/14). Daha düşük bakır içeriğine sahip alaşımlarda bakır içeriği %57-80 arasında değiştiğinde (ör. AV-37 79/4, AV-38 73/8), genel olarak "Kötü" ya da "Orta/İyi" bozulma durumu raporlanmıştır. Örneğin AN-55 1/1 ve AV-37 87/3 gibi buluntular da ise, bakır içeriği yüksek olmasına rağmen (sırasıyla %68,27 ve %72,62), korozyon durumları Orta/İyi olarak raporlanmıştır. Bu durum, çevresel şartların veya alaşımın diğer elementlerinin koruyucu rol oynadığını düşündürmektedir. Alaşımdaki diğer elementler (ör. silisyum, demir, alüminyum) korozyona karşı direnci artırmış olabilir. Silisyum, genellikle bronz alaşımlarında mukavemeti artırmak veya döküm özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Silisyum oranının %10'un üzerinde olduğu bazı örneklerde (örneğin AV-37 79/4 ve AV-37 89/5), bozulma durumu daha kötü olarak raporlanmıştır. Bu durum silisyum fazlalığının alaşımı çevresel etkilerden koruyamayabileceğini göstermiştir. Örneklerde (%1-2 civarı) düşük oranda bulunan Al (Alüminyum) ve Fe (Demir) varlığı ise bu elementlerin alaşıma bilinçli olarak mı eklendiği yoksa bir safsızlık mı olduğu konusu dikkat çekicidir. Demir genellikle korozyon problemlerini artırabilir. Demir oranı düşük olan örneklerde (örneğin AV-37 79/3), metalin daha sağlam kaldığı gözlemlenmiştir. AV-37 79/4 gibi örneklerde Si ve Fe oranlarının yüksek olması (%28,73 ve %4.05), korozyon etkilerini artırsa da ana metalde sağlamlığı sağlamıştır. Bu elementlerin oranları, mekanik dayanıklılığı artırsa da çevresel bozulmayı önlemede yetersiz kalmıştır. Diğer bir görülen element As (Arsenik), bronz alaşımlarında sertliği artırmak için kullanılmaktadır. Ancak bazı buluntularda (%1-2 civarında) düşük oranlarda yer almıştır. AV-37 89/5 buluntusunda tespit edilen %1,78 Pb (Kurşun) genellikle döküm özelliklerini iyileştirmek ve işlenebilirliği artırmak için kullanıldığını düşündürmektedir. Kalay (Sn) içeren örneklerde, (ör. AV-38 45/3, AV-38 45/4), korozyon durumu genellikle "Çok Kötü" olarak

raporlanmıştır. Bu durum, kalayın bakır alaşımlarında korozif etkileri tam olarak engelleyemediğini yorumunu getirmektedir.

Metal bileşimlerindeki farklı elementlerin oranları, malzemenin mekanik özelliklerini ve çevresel koşullara dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle demir, silisyum, arsenik, kurşun ve kalay gibi elementlerin kombinasyonları, alaşımın sağlamlık, işlenebilirlik ve korozyon direnci üzerinde farklı sonuçlar doğurmuştur. Bununla birlikte, bu kimyasal bileşimlerin çevresel faktörlere maruz kaldığında korozyon süreçlerini nasıl etkilediği, incelemeye değer bir diğer kritik konudur.

Elimizdeki somut örnekler üzerinden bu kritik konu incelenerek, oluşan korozyon ürünleri, bu alaşımların zamanla nasıl değişime uğradığını ve çevresel faktörlere karşı ne ölçüde dayanıklılık gösterebildiğini anlamak için her bir eser üzerinde yapılan incelemeler eser fişlerine işlenmiştir. Buluntular üzerinde oluşan korozyon ürünlerinden; Azurit ve Malahit, bakır karbonatlar olarak bilinen bu mineraller, genelde koruyucu bir tabaka oluştursa da bu durumda saf bakırın yapısal zayıflığı ve klorür varlığı nedeniyle koruyucu etkilerini gösterememiştir. Nantokite (CuCl), bakırın klorürlerle etkileşimi sonucu oluşmuş ve nem, yağmur ve pH gibi çevresel faktörlerin etkisiyle malzemeleri daha da zayıflatmıştır. Korozyonun hızlanmasında nem, su, klorür tuzları ve Cl_2 gazı gibi çevresel faktörler belirgin bir şekilde etkili olmuştur. Bu, metalin oksitlenme ve klorürlenme süreçlerinin birleşiminden kaynaklanmaktadır. Toprak altı koşulları, topraktaki nem, tuz ve pH gibi çevresel faktörlerle birleşerek, korozyonun hızını ve şiddetini artırmıştır.

Tablo 5.2. Buluntuların Element Kompozisyonları ve Bozulma Durumları

Buluntu Numarası	Alaşım Elementleri					Bozulma Durumu
AN-55 1/1	Cu% 68,27	Si % 24,92	Al% 1,18			Orta /İyi(metalde sağlam)
AV-37 48/8	Cu% 86,86	Si% 9,86	As% 1,58			Çok Kötü(metalden geriye curüf kalmış)
AV-37 48/10	Cu% 75,80	Si % 16,48	As% 1,35			Kötü(ama ana metal sağlam)
AV-37 79/3	Cu% 84,41	Si % 10,76	Sn% 1,85			Kötü(ama ana metal sağlam)
AV-37 79/4	Cu % 57,60	Si % 28,73	Fe % 4,05	Al % 4,04		Kötü(ama ana metal sağlam)
AV-37 87/3	Cu % 72,62	Si % 22,31	Al % 1,14	Fe % 2,57		
AV-37 89/5	Cu % 63,19	Si % 28,78	Fe% 1,54	Al% 5,72	Pb% 1,78	Orta /İyi(metalde sağlam-formda iyi)
AV-38 31/3	Cu % 71,60	Si % 10,30	Ni % 6,90	Fe% 1,60		
AV-38 41/2	Cu % 76,50	Si % 14,64	S % 2,01	P % 1,02		
AV-38 45/3	Cu % 80,12	Si % 6,71	Sn % 10,02	As % 1,09		
AV-38 45/4	Cu % 72,00	Si % 10,14	Sn % 13,27			Çok Kötü(metalden geriye curüf kalmış)
AV-38 61/1	Cu % 72,97	Si % 12,07	S % 2,11			Orta /İyi(metalde sağlam-formda iyi)
AV-38 73/8	Cu % 73,08	Si % 20,94	Al % 2,00	Fe % 1,13	Sn % 1,00	
AV-38 73/14	Cu % 88,23	Si % 8,33				Çok Kötü(metalden geriye curüf kalmış)
AW-38 90/1	Cu % 77,30	Si % 19,25	Fe % 1,17	Pd % 1,13		Orta /İyi(metalde sağlam-form bozukluğu var)
AW-38 68/4	Cu % 79,18	Si % 15,98	Al % 1,84			Kötü(ama ana metal çok sağlam,patina çok iyi)

Mikroskop ve XRF cihazlarıyla yapılan detaylı incelemelerde, korozyon ürünlerinin mineral yapıları belirlenmiş ve bu ürünlerin eser üzerindeki tahribatına dair veriler elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, bakır alaşımlarında gözlemlenen farklı korozyon türlerinin, eserin bulunduğu çevresel koşullarla doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Korozyon tanımlaması ve konservasyon sürecinde, eserin estetik ve tarihi değerini korumak temel amaç

olmuştur. Bu kapsamda hem geleneksel hem de modern konservasyon yöntemleri uygulanmış; mekanik ve kimyasal temizleme tekniklerinden başlayarak pasivasyon ve koruyucu kaplama gibi işlemler değerlendirilmiştir. Bu yöntemler, eserlerin gelecekteki bozulmalarını en aza indirmek için önerilen depo koşulları ile birleştirilmiştir. Bakır ve bakır alaşımlı eserlerin saklama koşulları, korozyon riskini en aza indirmek ve eserin ömrünü uzatmak için dikkatle belirlenmelidir. Nem, bakır korozyonunda en kritik faktörlerden biridir. Özellikle klor iyonlarının varlığında, yüksek nem seviyesi korozyon süreçlerini hızlandırır. %35-45 bağıl nem aralığı, bakır eserlerin güvenli şekilde korunması için idealdir. Nem seviyesi, özellikle klorür içeren bileşiklerin bulunduğu eserlerde %35'in altında tutulmalıdır. Bu, "bakır kanseri" olarak bilinen korozyonun ilerlemesini yavaşlatır. Nem seviyesi yüksek olduğunda, atakamit veya nantokit gibi klorür bazlı minerallerin oluşumu hızlanır. Bu durum, eserin yüzeyinde bozulmaya yol açabilir. Sıcaklık değişimleri de nemin yoğunlaşmasına neden olabilir ve korozyon riskini artırabilir. Depolarda önerilen sıcaklık 18-22°C arasında sabit bir sıcaklık uygundur. Ani sıcaklık değişimlerinden kaçınılmalıdır, çünkü bu, yoğunlaşmaya yol açarak eser yüzeyinde korozyonu tetikleyebilmektedir. Havadaki kirleticiler, özellikle sülfür bileşikleri, klorürler ve organik asitler, bakır eserlerin korozyonunu hızlandırabilir. Saklama alanında hava filtreleme sistemleri kullanılmalıdır. Bakır eserler, kükürt, klor ve diğer reaktif gazlardan uzak tutulmalıdır. Eserlerin düzenli aralıklarla incelenmesi, başlangıç korozyon belirtilerini tespit etmek ve hızlı müdahale sağlamak için önemlidir. Saklama ortamında ani sıcaklık ve nem değişimlerini önlemek için iklimlendirme sistemleri kullanılmalıdır. Bu koşullar sağlanarak bakır ve alaşımlarının doğal bozulma süreçleri yavaşlatılabilir ve eserlerin tarihi ve estetik değerleri uzun süre korunabilir.

Tavşanlı Höyük kazısından elde edilen buluntular üzerinden yapılan bu çalışma, korozyonun kompleks yapısını ve çevresel faktörlerin etkisini anlamada önemli bir katkı sunmuş, konservasyon yöntemlerinin doğru seçilmesinin tarihi eserlerin korunmasındaki kritik önemini vurgulamıştır.

5.2.1. AN-55 1/1 Bul. No.lu Metal Başlı İğne (Fiş No:1)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 1	Açma Adı -Buluntu Numarası: AN-55 1/1	Grid: 2.5/9.5	
Tarih: 26.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Başlı İğne	Dönemi: Son Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
4	3	4	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	-	-	-
Buluntunun Durumu			
Başlı küre şeklinde ucuna doğru sivrilen iğnenin üzeri yumuşak bir toprak tabakasıyla kaplıdır. Korozyon tabakası sert, patina iyi durumdadır. Xrf ölçümlerinde bakır, silisyum, alüminyum, demir, elementlerini içeren bakır alaşımıdır. Fosfor topraktan veya kemiklerle bulunma durumundan gelmektedir. İçerdiği elementler alaşımı oldukça dengeli ve dayanıklı hale getirmiştir, buluntunun mukavemeti yüksektir. Alüminyum ve silisyum korozyon direncini, demir sağlamlığı, temizlik sonrası çıkan arsenik korozyon direncinin yanında sertliği artırmıştır.			
Konservasyon Öncesi			
			

1/1 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

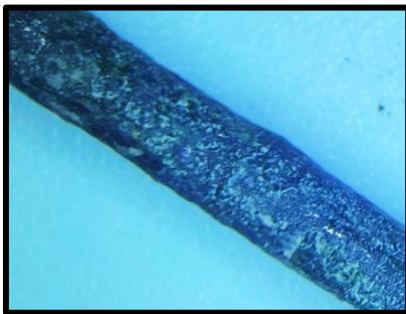
XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	P %
Önce:	50.22	34.17	7.39	7.39	1.19
Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	P %
Sonra:	68.27	24.92	1.18	0.72	3.02

Korozyon Tanımları



İğnenin üzeri yumuşak bir toprak tabakasıyla kaplıdır. Toprak tabakasının altında yine sert yapıda yeşil renkli mineral yapı mikroskop altında değerlendirildiğinde; malahit olduğunu değerlendirilmiştir. Bakır karbonatlar ürünleri suda çözünmediği için buluntu üzerinde koruyucu bir

patina oluşmuş ve ana malzeme sağlam kalabilmiştir. Patina oldukça sağlamdır.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası etanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle etanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

Konservasyon Sonrası



5.2.2. AV-37 48/8 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:2)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 2	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-3748/8		Grid: S 7/ 6.42
Tarih: 01.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne		Dönemi: Orta Tunç Çağı
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
1	1	1	1
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	Atakamit-Paratakamit-Nantokit	-	-
Buluntunun Durumu			
Metal nesnenin yüzeyini kaplayan korozyon tabakasının objenin içinde de devam ettiği görülmüştür. Mukavemeti oldukça düşük ve kırılmandır, metal özünden geriye sadece cüruf ve mineral yapı kalmıştır. Metalin yüzeyindeki tabakada bakır klorürlerin yıkıcı etkisi sebebiyle korozyon içe doğru ilerleyerek mikroskopta bakıldığından iğne olduğu düşünülen objeyi tamamen yok etmiştir. Elementel analizinde saf bakır olduğu ölçülen obje, yoğun nem, su varlığı ve Ph gibi ortam koşullarında çözünerek korozyon süreci aktifleşmiştir. Aktif korozyon süreci devam eden objenin yoğun klorür etkileri (yağış, nem, klor tuzları, atmosferdeki Cl₂ gazı) sebebiyle oluşan etkileşimden bozulduğu düşünülmektedir.			
Konservasyon Öncesi			
			

48/8 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

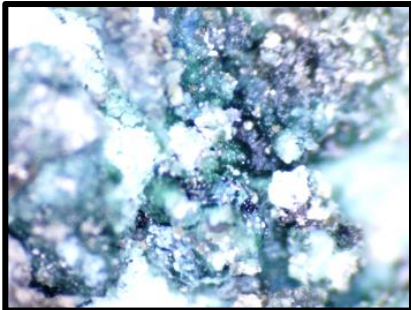
XRF Ölçümleri



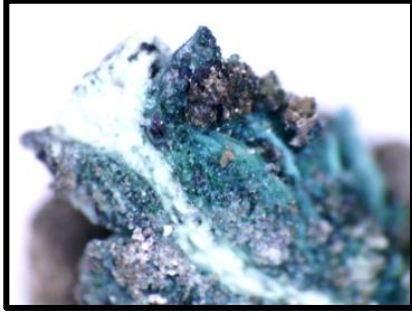
P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan ölçüm alınarak, tabloda ortalamaları sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	As %	Ti %	Fe%
	86.86	9.86	1.58	1.39	0.18

Korozyon Tanımları



Mavi renkli bir mineral olan azurit, mavi rengi ve şişkin bombeli kristal görünümüyle korozyon tabaklarında belirli noktalarında tespit edilmiştir. Yeşil renkteki korozyon tabaklarının ise azuritin yanında malahit olduğunu düşündürmektedir. Bakır karbonatların varlığı normalde bakır üzerinde koruyucu bir tabaka sağlayıp korozyonu yavaşlatıcı etki göstermelerine karşın bu eserin saf bakır olması



ve yoğun klorürlerin etkisiyle tamamen yok olmuştur.

Objenin kırık kısmından mikroskopla bakıldığında açık yeşil/ beyazımsı renkli iğne şeklindeki kısmın nantokite olabileceği düşünülmektedir. Ortam koşulları -ph, nem, yağmur, Cl₂ etkisiyle- saf bakırla etkileşime girerek nantokite oluşturmuştur.

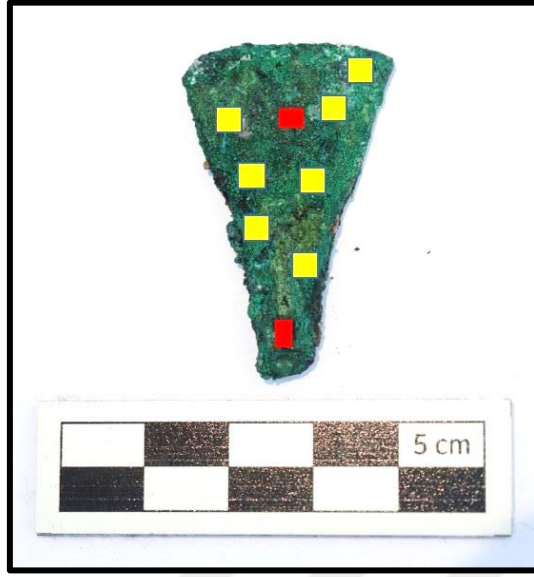
Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası etanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Oldukça kırılgan yapıda olduğu için koruma bu ölçekte sınırlandırılmış, sadece koruyucu uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7'lik Paraloid B 72 uygulamasıyla yüzeyin oksijenle teması kesilmesi amaçlanarak korozyonun ilerlememesi amaçlanmıştır. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi ve düşük nem seviyelerinde (%35'in altında) muhafazası önerilmektedir.

5.2.3. AV-37 48/10 Bul. No.lu Metal Keski (Fiş No:3)

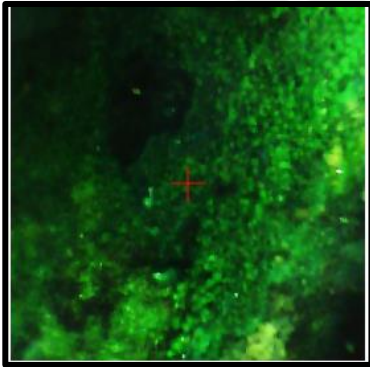
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 3	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-3748/10	Grid: S 7/ 6.35	
Tarih: 01.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Keski	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	1	2	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Tutma yerinden gövdeye doğru genişleyen keskinin ucu ince ve düzgündür. Tüm halde ve mukavemeti oldukça yüksektir. Xrf analizlerinde %2,32'lik Arsenik oranıyla Arsenikli bronz olarak nitelendirilebilir. Sert yapıdaki korozyon tabakası tüm yüzeyi kaplamıştır. Mikroskopla yapılan incelemelerde siyah renkte homojen olmayan patina görülmüştür. Yeşil renkteki malahit ve mavi renkte azurit olduğu düşünülen bakır karbonat oluşumları görülmüştür. Xrf analizlerinde çıkan arseniğin bir miktarı bu minerallerin içinde barındırdığı arsenikten de gelmiş olabilir. Patina tabakasının hemen üstünde koyu kırmızı/kahve tonlarında bakır oksitlere rastlanmış, kuprit olduğunu düşündürmüştür. Bakır oksitler genel olarak bir patina bileşeni olarak ilk metal yüzeyinde görülen minerallerdir. Aslında bu oluşan oksit tabakası ana metalin hemen üstünde hava ve su geçirmeyen bir tabaka oluşturduğu için bakır keski sağlam kalabilmiştir.			
Konservasyon Öncesi			
			

48/10 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

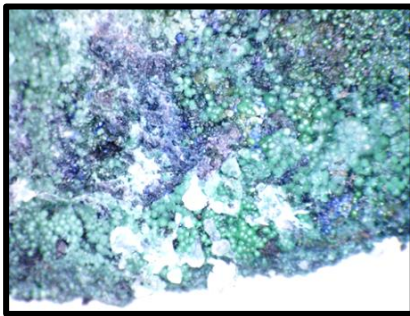
XRF Ölçümleri



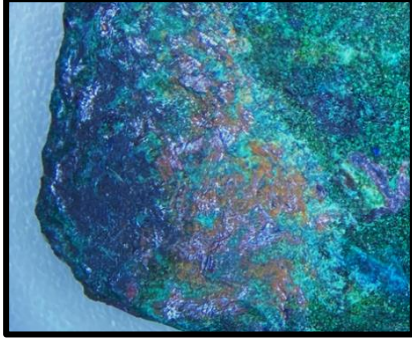
P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	As %	P %	Fe%
Önce:	83.00	12.25	2.32	0.85	0.64
Element:	Cu %	Si %	As %	P %	Fe%
Sonra:	75.80	16.48	1,35	0.30	0.64

Korozyon Tanımları



Mavi renkli bir mineral olan azurit mavi rengi ve şişkin bombeli kristal görünümüyle korozyon tabaklarında belirli noktalarında tespit edilmiştir. Yeşil renkteki korozyon tabaklarının ise azuritin yanında malahit olduğunu düşündürmektedir. Bakır karbonatlar ürünleri suda çözünmediği için buluntu



üzerinde koruyucu bir patina oluşmuş ve ana malzeme sağlam kalabilmiştir

Buluntu üzerindeki bakır karbonatların oluşturduğu ilk tabaka kazındığında altından ikinci bir tabaka olarak kırmızı/kahve renğinde bakır oksit tabakasına rastlanmıştır. Renginden ve hemen ana metal üzerinde patinayla beraber görüldüğü için kuprit olduğu düşünülmüştür. Hemen ana metal yüzeyinde rastlanan bu ürün oluşacak korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun bu zamana kadar korunmasını sağlamıştır.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelenmesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 uygulamasıyla yüzeyin oksijenle teması kesilmesi amaçlanarak korozyonun ilerlememesi amaçlanmıştır. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

5.2.4. AV-37 79/3 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No: 4)

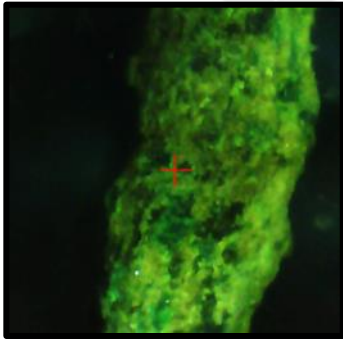
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 4	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-3779/3		Grid: 2.6-9.5/1.45-7.50
Tarih: 19.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal İğne		Dönemi: Orta Tunç Çağı
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	3	3	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	-	-	-
Buluntunun Durumu			
Metal nesne olarak bilgilerine işlenen bakır objenin sivri ucu ve formu sebebiyle iğne olabileceği düşünülmektedir. Başından uca doğru incelen yapıdaki buluntunun yapılan ölçümlerde bakır-kalay alaşımlı bronz olduğu anlaşılmıştır. Mukavemeti oldukça iyi ve tamdır. Yüzeydeki yoğun toprak tabakasının altından kısmen iyi durumda patina tabakası, bakır oksit ve bakır karbanot tabakaları gelmektedir. Xrf analizlerinde yoğunlukta olan Si, P elementlerinin gömü ortamındaki kemik buluntulardan geldiği düşünülmektedir.			
Konservasyon Öncesi			
			

79/3 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

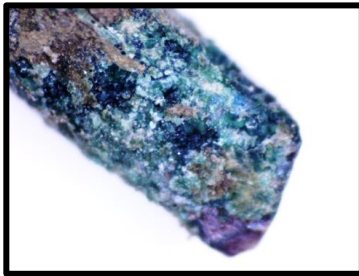
XRF Ölçümleri



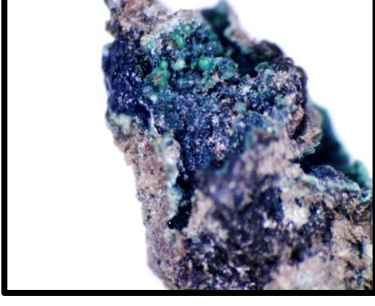
P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan ölçüm alınarak, tabloda ortalamaları sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	P %	Sn %	Fe%	Al %
Önce:	52.46	22.71	6.27	5.81	4.23	2.30
Element:	Cu %	Si %	P %	Sn %	Fe%	Al %
Sonra:	84.41	10.74	0.02	1.85	0.95	0.01

Korozyon Tanımları



Belirgin siyah patina üzerinde yumuşak yeşil bir tabaka olarak şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonat varlığı görülmüştür. Yeşil renkteki korozyon tabaklarının altında çok daha az yoğunlukta yer yer mavi renkli azurit olduğu düşünülen korozyon ürünleri görülmektedir.



Siyah/kahve renkteki bakır karbonatlarla birleşik ve hemen altında gelişen bu tabakanın toprak oluşumu dışında tenorit olabileceği değerlendirilmiştir. Bakır kuprit yüzeyde oluşurken gelişebilen tenorit, başlangıçta siyah bir leke halinde gelişip tabaka kalınlığı arttıkça tüm yüzeye yayılabilmektedir. 400-500 derece ısıyla beraber bakır bileşiklerinin tenorite dönüştüğü değerlendirildiğinde siyah-beyaz yer yer gri bu tabakanın tenorit olması muhtemeldir.

Buluntu üzerindeki ilk tabaka kaldırıldığında altından altından ikinci bir tabaka olarak kırmızı/kahve renginde bakır oksit tabakasına rastlanmıştır. Renginden ve hemen ana metal üzerinde patinayla beraber görüldüğü için kuprit olduğu düşünülmüştür. Hemen ana metal yüzeyinde rastlanan bu ürün oluşacak korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun bu zamana kadar korunmasını sağlamıştır.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile buluntunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

5.2.5. AV-37 79/4 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No:5)

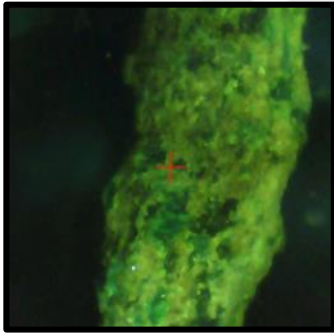
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 5	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-37 79/4		Grid: 2.6-9.5/1.45-7.50
Tarih: 19.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal İğne		Dönemi: Orta Tunç Çağı
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	3	3	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Silindiriğe yakın düzeltilmiş baş kısmından, uca doğru sivrilen iğnenin göz olarak bilinen küçük bir deliği mevcuttur. Xrf ölçümlerinde bakır oranı düşük, silisyum oranı bakır alaşımlarına göre yüksektir. Mevcut durumunda mukavemeti de gayet yüksek olan iğnedeki silisyumun yüksek oranda olması malzemeye sertlik ve dayanıklılık vermiştir. Alüminyum, Kurşun ve Arsenik varlığı da kolay işlenebilirliği artırıcı etkinin yanında yine korozyon direncini artırıcı katkıda bulunmuştur.			
Konservasyon Öncesi			
			

79/3 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

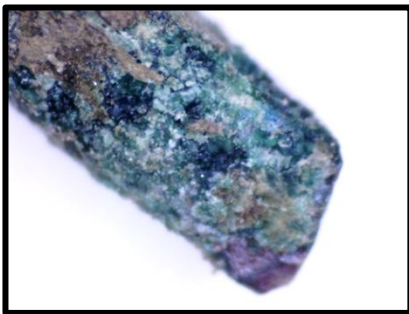
XRF Ölçümleri



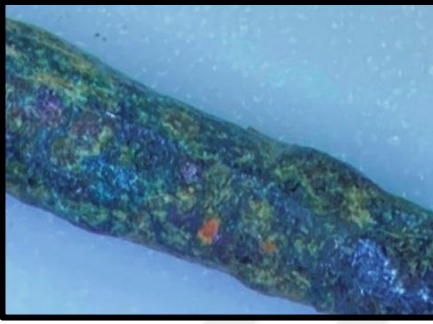
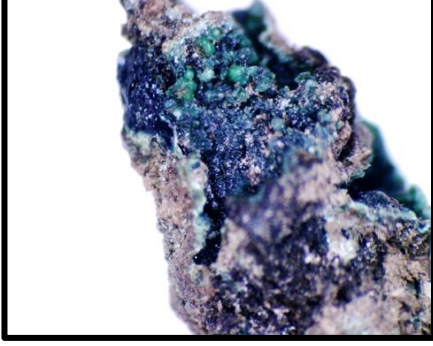
P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Fe %	Al %	Pb%	As %
Önce:	51.67	33.31	6.27	5.81	4.23	2.30
Element:	Cu %	Si %	Fe %	Al %	Pb%	As %
Sonra:	57.60	28.73	4.05	4,04	1.85	2.84

Korozyon Tanımları



Belirgin siyah patina üzerinde yumuşak yeşil bir tabaka olarak şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonat varlığı görülmüştür. Yeşil renkteki korozyon tabaklarının altında çok daha az yoğunlukta yer yer mavi renkli azurit olduğu düşünülen korozyon ürünleri görülmektedir.



Siyah/kahve renkteki bakır karbonatlarla birleşik ve hemen altında gelişen bu tabakanın toprak oluşumu dışında tenorit olabileceği değerlendirilmiştir. Bakır kuprit yüzeyde oluşurken gelişebilen tenorit, başlangıçta siyah bir leke halinde gelişip tabaka kalınlığı artıkça tüm yüzeye yayılabilmektedir. 400-500 derece ısıyla beraber bakır bileşiklerinin tenorite dönüştüğü değerlendirildiğinde siyah-beyaz yer yer gri bu tabakanın tenorit olması muhtemeldir.

Buluntu üzerindeki ilk tabaka kaldırıldığında altından altından ikinci bir tabaka olarak kırmızı/kahve renğinde bakır oksit tabakasına rastlanmıştır. Renginden ve hemen ana metal üzerinde patinayla beraber görüldüğü için kuprit olduğu düşünülmüştür. Hemen ana metal yüzeyinde rastlanan bu ürün oluşacak korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun bu zamana kadar korunmasını sağlamıştır.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelenmesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile buluntunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir.

Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

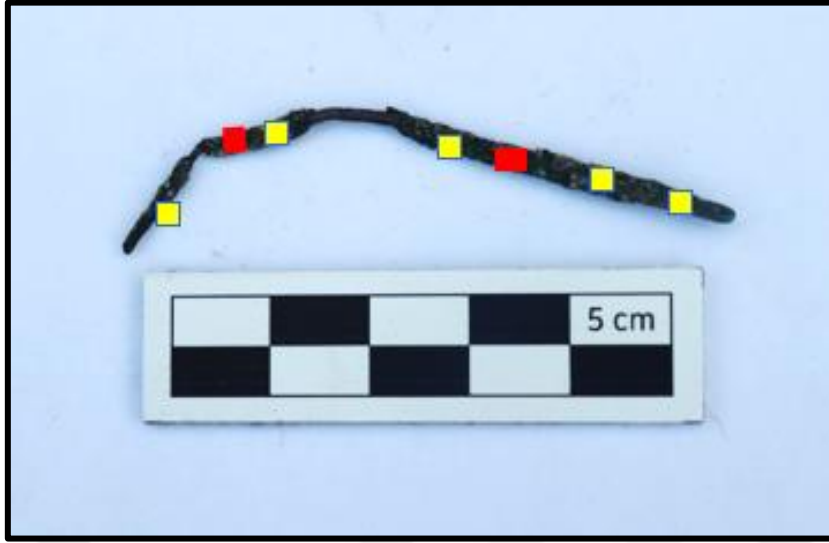
Konservasyon Sonrası



5.2.6. AV-37 87/3 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No:6)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 6	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-37 87/3	Grid: 1.65-9.5/1.94-7.50	
Tarih: 22.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal İğne	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
2	2	3	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
İnce, uzun ve sivri uçlu bir forma sahip iğne orta kısmından eğilerek iç bükey görünmektedir. Yüzeyinde korozyon ve toprak tabakası eğrilen kısımda kabuk olarak atmıştır. Kabuğun altındaki metalin yapısı sağlam mukavemeti yüksektir. Xrf analizinde iğnenin bakır alaşımı olduğu, içerdiği silisyum, alüminyum içerilikleri nedeniyle malzemenin sert ve dayanıklıdır.			
Konservasyon Öncesi			
			

87/3 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	P %
Önce:	52.61	26,28	2.0	1,72	0,48
Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	P %
Sonra:	72.62	22.31	1.14	2.57	0,38

Korozyon Tanımları



Buluntunun korozyon kabuğu olmadığı uç kısmından bakıldığında yer yer siyah patina üzerinde, büyük çoğunluğunu kaplayan ilk tabaka kırmızı/kahve rengine bakır oksit tabakasıdır. İkinci kabuk şeklinde korozyon katmanı yumuşak yeşil bir tabaka olarak şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonatın malahit olabileceği düşünülmüştür. Metal iğnenin yüzeyinde ilk görülen oksit tabakası oluşacak korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun korozyona karşı korunmasını sağlamıştır.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

Konservasyon Sonrası



5.2.7. AV-37 89/5 Bul. No.lu Metal Bilezik (Fiş No:7)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 7	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-37 89/5	Grid: 2.5-9.5/1.9-7.50	
Tarih: 23.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Bilezik	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	3	4	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Bilezik, basit yarım daire formundadır. Boyutuna bakıldığında çocuk bileziği olduğu söylenebilir. Sağlam ve tumdür. Uçları yuvarlatılarak düzeltilmiştir. Yüzeydeki korozyon tabakası sert ve ince yapıdadır. Siyah renkteki patina homojen dağılımlı ve yüzeyi toprak tabakasıyla kaplıdır. Xrf analizine bakıldığında bakır alaşımı olduğu, içerdiği silisyum, alüminyum içerilikleri nedeniyle malzemenin sert ve dayanıklı olduğu görülmüştür.			
Konservasyon Öncesi			
			

89/5 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

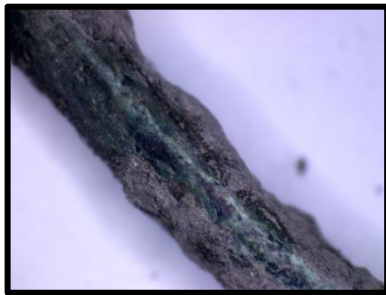
XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Fe %	Al %	Pd %	Pb%
Önce:	43.44	30.17	4.70	3.01	1.80	1.40
Element:	Cu %	Si %	Fe%	Al %	Pd %	Pb%
Sonra:	63.19	28.78	1.54	5.72	-	1.78

Korozyon Tanımları



Buluntunun korozyon kabuğu olmadığı kısmından mikroskopla bakıldığında siyah patina üzerindeki ilk tabaka, ince yapıdaki yeşil bakır karbonat tabakasıdır. Yeşil tabaka altında yer yer çukurlaşmış şekilde kırmızı/kahve renginde bakır oksit tabakası görülmüştür. En üst katman kabuk şeklinde sert ama kolay temizlenen toprak

	tabakasıdır. Korozyona karşı dirençli sağlam olan metal özü ve patina iyi durumdadır. Muhtemelen yüzeyde oluşan ilk oksit tabakası korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun korozyona karşı korunmasını sağlamıştır.
--	---

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

Konservasyon Sonrası



5.2.8. AV-38 31/3 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:8)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 8	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 31/3	Grid: 0.5-9.5/ 5.0-9.5	
Tarih: 08.07.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	3	3	3
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Şekli bir halka, cımbız veya çengele benzeyen metal nesnenin Xrf ölçümlerinde bakır alaşımı olduğu bulunmuştur. Bakır, silisyum, nikel, demir ve eser miktarda kobalt barındıran alaşım içerdiği elementler bakımından mekanik mukavemeti yüksektir. Bu sebeple metalin özü sağlamdır, yüzeyde ince bir tabaka halinde korozyon sahip, yüzeydeki patina kısmen korunmuştur.			
Konservasyon Öncesi			
			

31/3 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

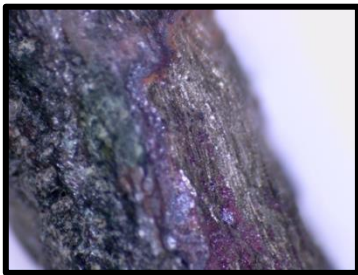
XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları verileri tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Ni %	Fe%	Co%
Önce:	71.60	10.30	6.9	1.60	0.98
Element:	Cu %	Si %	Fe%	Al %	Pd %
Sonra:	63.19	28.78	1.54	5.72	-

Korozyon Tanımları



Buluntudaki renkler yoğunluk ve toprakaltındaki durumuna bağlı olarak; kırmızımsı-kahverengi tabaka bakır oksit tabakası muhtemelen kuprittir. Gözle de görülen siyah patina üzerindeki ilk tabaka, ince yapıdaki yeşil bakır karbonat tabakası malahit olmalıdır. Yeşil tabaka altında yer yer çukurlaşmış şekilde kırmızı/kahve renginde bakır oksit tabakaları görülmüştür. Korozyona karşı dirençli sağlam olan metal özü ve patina iyi durumdadır.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

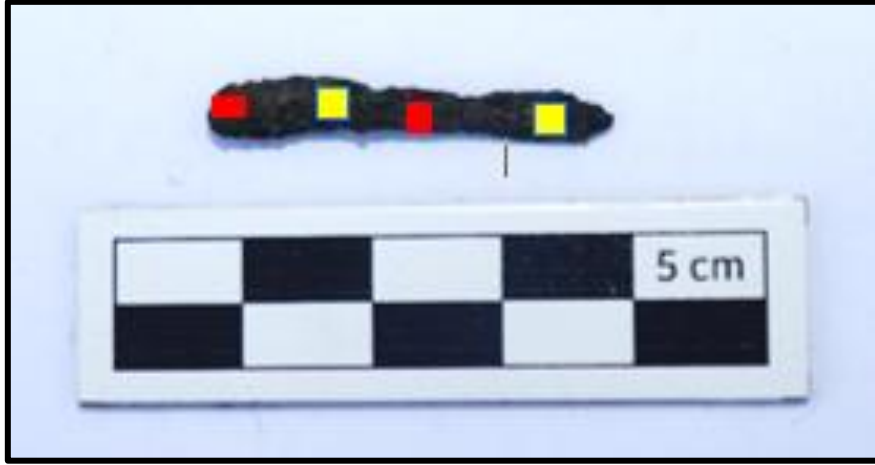
Konservasyon Sonrası



5.2.9. AV-38 41/2 Bul. No.lu Metal (Fiş No:9)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 9	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 41/2	Grid: 05.-9.5/5.0-9.5	
Tarih: 12.07.2024	Buluntu Tanımı: Bronz Nesne	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	2	2	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Formuna bakıldığında küçük bir iğne veya bız olabileceği düşünülen metal nesnenin üzeri yoğun bir korozyon tabakasıyla kaplıdır. Xrf ölçümlerinde; bakır, silisyum, kükürt, fosfor ve demir elementlerini içeren bakır alaşımıdır. Bakır alaşımlarında nadir görülen kükürt ve fosforun gömü şartlarından kaynaklanan elementler olduğu düşünülmektedir. Kükürt genellikle atmosferik koşullara maruz kalmış eserlerin üzerinde hava kirliliğine bağlı olarak bulunmaktadır, gömü koşullarında ise topraktaki bakteri varlığından ya da yer altı sularından kaynaklanmaktadır. Fosfor varlığı ise topraktan veya kemik varlığı olan gömü ortamından kaynaklanabilmektedir.			
Konservasyon Öncesi			
			

41/2 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

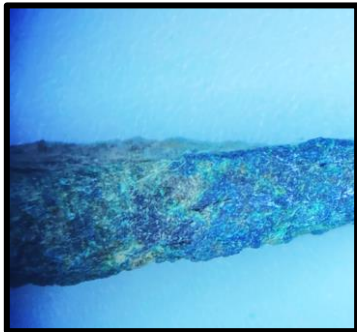
XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan ölçüm alınarak, tabloda ortalamaları sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	S %	P %	Fe%
	76.50	14.64	2.01	1.02	0.60

Korozyon Tanımları



Buluntu üzerinde renkli mineral yapı ve toprak altındaki durumuna bağlı olarak korozyon ürünleri değerlendirildiğinde; kırmızımsı-kahverengi tabaka bakır oksit tabakası muhtemelen kuprittir. Gözle de görülen siyah patina üzerindeki ilk tabaka, ince yapıdaki yeşil bakır karbonat tabakası malahit olmalıdır. Yeşil tabaka altında yer yer çukurlaşmış şekilde kırmızı/kahve rengine bakır oksit tabakaları görülmüştür. Yüzeyde homojen bir patina yoktur,

	parlak metal özü hemen korozyon tabakalarının altında görülmektedir.
Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar	
Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası etanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Yüzeydeki korozyon tabakası kısmen mekanik yöntemlerle alınarak sadece koruyucu uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 uygulamasıyla yüzeyin oksijenle teması kesilmesi amaçlanarak korozyonun ilerlememesi amaçlanmıştır. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.	

5.2.10. AV-38 45/3 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:10)

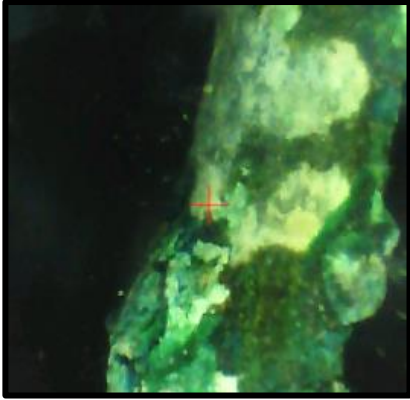
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 10	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 45/3		Grid: 1.20-9.50/0.5-5.0
Tarih: 16.07.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne		Dönemi: Orta Tunç Çağı
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
2	1	2	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	Atakamit-Paratakamit-Nantokit	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Küçük çubuk şeklindeki metal nesnenin; Xrf ölçümlerinde bakır, silisyum, kalay, arsenik ve fosfor elementlerini içeren bakır alaşımı olduğu görülmüştür. Malzemenin yüzeyindeki tabakada bakır klorürlerin yıkıcı etkisi sebebiyle açık yeşil pudramsı aktif korozyon tabakasıyla kaplıdır. Toprak altı koşulları veya dönem kullanımında, yoğun nem, su varlığı ve Ph gibi ortam koşulları korozyon süreci aktifleştirmiştir. Aktif korozyon süreci devam eden objenin yoğun klörür etkileri (yağış, nem, klor tuzları, atmosferdeki Cl₂ gazı) sebebiyle oluşan malzeme-ortam etkileşiminden kaynaklanan bozulma süreci geçirmektedir.			
Konservasyon Öncesi			
			

48/8 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

XRF Ölçümleri



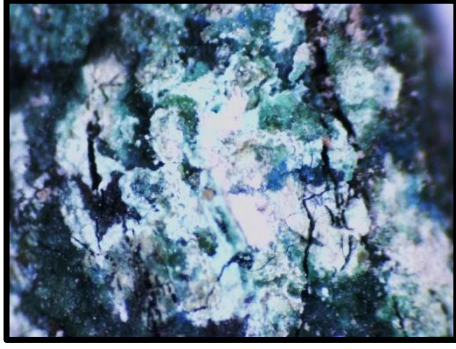
P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Sn %	As %	P %
Önce:	75.38	13.14	8.84	0.95	1.11
Element:	Cu %	Si %	Sn %	As %	P %
Sonra:	80.12	6.71	10.02	1.09	0.01

Korozyon Tanımları



Mavi renkli bir mineral olan azurit mavi rengi ve şişkin bombeli kristal görünümüyle korozyon tabaklarında belirli noktalarında tespit edilmiştir. Yeşil renkteki korozyon tabaklarının ise azuritin yanında malahit olduğunu düşündürmektedir.



Malzeme yüzeyinde tozuma şeklinde görülen bakır klorür, muhtemelen Atakamit/Paratakamittir. Pudramsı, tozlu açık yeşil renkte kabarcıklı nantokit kristalleriyle beraber görülmüştür. Serbest klor iyonları varlığında bulunan nantokit, nemli ve aerobik ortamda atakamit/parakamite dönüşür. Reaksiyon ortamındaki koşulları özellikle su varlığı ve oksijen seviyesine bağlı olarak başlayan reaksiyon stabil haldeki mineralleri atakamit/parakatamite dönüştürüne kadar devam etmiş ve sonucunda bakır kanseri denen yıkıcı etki gözlemlenmiştir. Yanlızca yüzeyde bulunan metal özüne işlemeyen klörür yapısı, Atakamit/Paratakamit oluşumlarının malzeme topraktan çıkarıldıktan sonraki oksijen ve nem varlığından kaynaklandığını düşündürmüştür.



Diğer bir korozyon ürünü kırmızımsı-kahverengi tabaka bakır oksit, muhtemelen kuprittir. Gözle de görülen metal özü üzerindeki yeşil malahit tabaka altında yer yer çukurlaşmış şekilde kırmızı/kahve renginde bakır oksit tabakaları görülmüştür. Korozyona karşı dirençli sağlam olan metal özü ve az bir alanda görülen patina iyi durumdadır

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Yüzeydeki korozyon tabakası kısmen mekanik yöntemlerle alınarak sadece koruyucu uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 uygulamasıyla yüzeyin oksijenle teması kesilmesi amaçlanarak korozyonun ilerlememesi amaçlanmıştır. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

5.2.11. AV-38 45/4 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:11)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 11	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 45/4		Grid: 4.20/4.90
Tarih: 16.07.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne		Dönemi: Orta Tunç Çağı
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
2	1	2	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	Atakamit-Paratakamit- Nantokit	-	-
Buluntunun Durumu			
Metal nesnenin yüzeyinde sertleşmiş toprak tabakasının altında korozyon tabakası görülmüştür. Toprak tabaka ve korozyon kaldırılınca mukavemeti sağlam metal çubuk ortaya çıkartılmıştır. Metalin yüzeyindeki tabakada bakır klorürlerin yıkıcı etkisi yüzeydeki korozyon tabakasında sınırlı kalarak metal özüne işlememiştir. Elementel analizinde; Bakır, silisyum, kalay, demir ve alüminyum elementlerini içeren bakır alaşımı olduğu anlaşılmıştır. Alüminyum ve yüksek kalay içeriği korozyon dayanımı ve yüksek mukavemet sağlamıştır.			
Konservasyon Öncesi			
			

48/8 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Sn %	Fe %	Al%
Önce:	67.72	15.81	11.03	1.58	1.13
Element:	Cu %	Si %	Sn %	Fe %	Pd %
Sonra:	72.00	10.14	13.27	0.75	2.12

Korozyon Tanımları



Mikroskop altındaki görüntülemelerde; Yeşil renkteki şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonat varlığı muhtemel malahit oluşumları görülmüştür. Yüzeyde kırık şeklinde hatta ilerleyen çukurlaşmadaki malahit kristalleri patina yüzeyinde sert bir tabaka olarak da görülmüştür.



Yüzeyde tozuma şeklinde görülen yumuşak açık yeşil/ beyazımsı renkli tabakada bakır klörürlerin varlığı düşündürmektedir. Malzeme yüzeyinde tozuma şeklinde görülen bakır klorür, muhtemelen Atakamit/Paratakamittir. Pudramsı, tozlu açık yeşil renkte kabarcıklı nantokit kristalleriyle beraber görülmüştür. Serbest klor iyonları varlığında bulunan nantokit, nemli ve aerobik ortamda atakamit/parakamite dönüşür. Reaksiyon ortamındaki koşulları özellikle su varlığı ve oksijen seviyesine bağlı olarak başlayan reaksiyon stabil haldeki mineralleri atakamit/parakamite dönüştürüne kadar devam etmiş ve sonucunda bakır kanseri denen yıkıcı etki gözlemlenmiştir. Yalnızca yüzeyde bulunan metal özüne işlemeyen klörür yapısı, Atakamit/Paratakamit oluşumlarının malzeme topraktan çıkarıldıktan sonraki oksijen ve nem varlığından kaynaklandığını düşündürmüştür.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi ve düşük nem seviyelerinde (%35'in altında) muhafazası önerilmektedir.

5.2.12. AV-38 61/1 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:12)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 12	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 61/1	Grid: 5.9/ 2.20	
Tarih: 22.07.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	2	2	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	-	Kuprit-Tenorit	-
Buluntunun Durumu			
Metal nesne olarak bilgilerine işlenen bakır objenin sivri ucu ve formu sebebiyle iğne olabileceği düşünülmektedir. Başından uca doğru incelen muhtemel iğnenin baş kısmında deliği vardır. Mukavemeti oldukça iyi ve tamdır. Yüzeydeki yoğun toprak tabakasının altından kısmen iyi durumda patina görülmektedir. Xrf analizlerinde; bakır, silisyum, titanyum, demir, alüminyum, paladyum elementlerini içeren bakır alaşımıdır. Yüzey tabakasının temizliği sonrası yapılan Xrf ölçümlerinde titanyum, demir, alüminyum yüzdelerindeki düşüş bu elementlerin iğnenin etrafını kaplayan yoğun toprak tabakasından geldiğini düşündürmektedir.			
Konservasyon Öncesi			
			

61/1 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

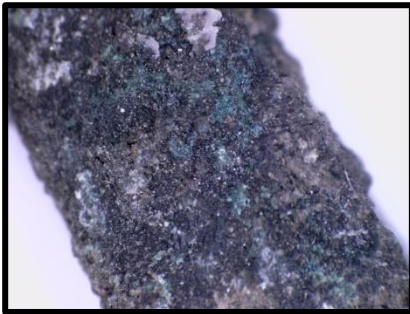
XRF Ölçümleri



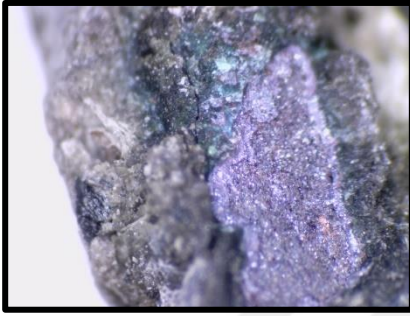
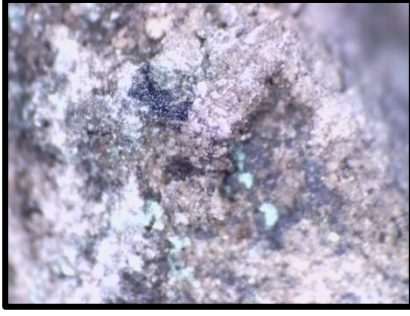
P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur

Element:	Cu %	Si %	Fe %	Al %	Pd%	
Önce:	46.86	33.17	4.64	4.29	1.51	
Element:	Cu %	Si %	S %	Fe %	Al%	Pd%
Sonra:	72.97	12.07	2.11	0.73	0.73	1.19

Korozyon Tanımları



Mikroskop altındaki tabaka görüntülemelerinde; şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonat varlığı görülmüştür. Yeşil rengi ve krsital yapı yakınlığı sebebiyle muhtemel malahit varlığı tespit edilmiştir.



Siyah/kahve renkteki bakır karbonatlarla birleşik ve hemen altında gelişen bu tabakanın toprak oluşumu dışında tenorit olabileceği değerlendirilmiştir. Bakır kuprit yüzeyde oluşurken gelişebilen tenorit, başlangıçta siyah bir leke halinde gelişip tabaka kalınlığı artıkça tüm yüzeye yayılabilmektedir. 400-500 derece ısıyla beraber bakır bileşiklerinin tenorite dönüştüğü değerlendirildiğinde siyah-beyaz yer yer gri bu tabakanın tenorit olması muhtemeldir.

Buluntu üzerindeki ilk tabaka kaldırıldığında altından altından ikinci bir tabaka olarak kırmızı/kahve renğinde bakır oksit tabakasına rastlanmıştır. Renginden ve hemen ana metal üzerinde patinayla beraber görüldüğü için kuprit olduğu düşünülmüştür. Hemen ana metal yüzeyindeki kırık kabuk altında görülmüştür.

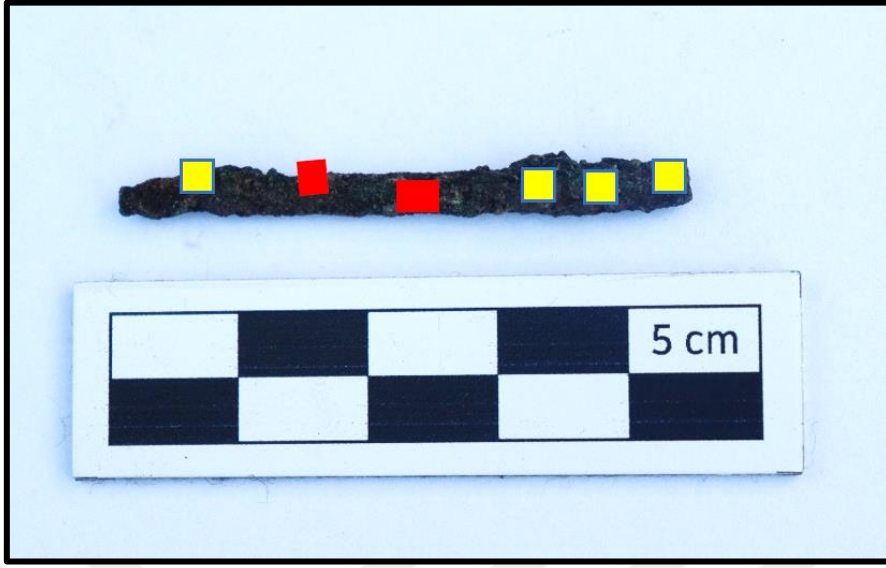
Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası etanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle etanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

5.2.13. AV-38 73/8 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:13)

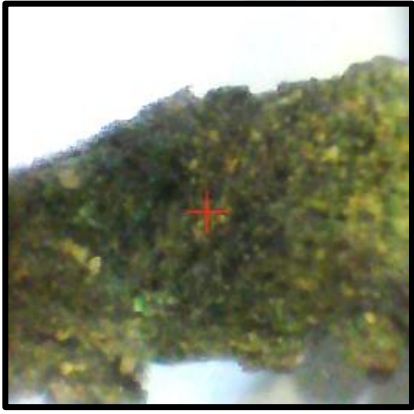
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 13	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 73/8	Grid: 2.45-7.1/ 1.45-7.50	
Tarih: 19.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne (İğne?)	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	3	3	2
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Uzun çubuk şeklindeki nesne iğneye benzemektedir, başı ve ucu kırık görünmektedir. Buluntunun üzeri sert, yoğun toprak ve korozyon tabakasıyla kaplıdır. Xrf analizinde buluntunun bakır alaşımı olduğu, içerdiği silisyum, alüminyum, kalay elementleri alaşımın dayanıklılığını artırdığı bu yüzden mukavemetinin iyi olduğu görülmüştür. Fosfor elementinin gömü ortamındaki kemik buluntulardan geldiği düşünülmektedir.			
Konservasyon Öncesi			
			

61/1 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

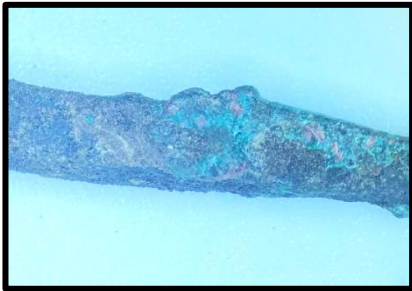
XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	Sn %	P %
Önce:	46.07	37.94	8.33	3.16	2.33	0.86
Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	Sn %	P %
Sonra:	73.08	20.94	2.00	1.13	1.00	0.19

Korozyon Tanımları



Belirgin siyah patina üzerinde sert yeşil bir tabaka olarak bakır karbonat varlığı görülmüştür. Yeşil renkteki muhtemel malahit varlığının altında daha az yoğunlukta yer yer kırmızı/kahve renğinde bakır oksit tabakasına rastlanmıştır. Renginden ve hemen ana metal üzerinde patinayla beraber

	görüldüğü için kuprit olduğu düşünülmüştür. Hemen ana metal yüzeyinde rastlanan bu ürün oluşacak korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun korozyona karşı korunmasını sağlamıştır.
--	---

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası etanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle etanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7'lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

Konservasyon Sonrası



5.2.14. AV-38 73/14 Bul. No.lu Metal Nesne (Fiş No:14)

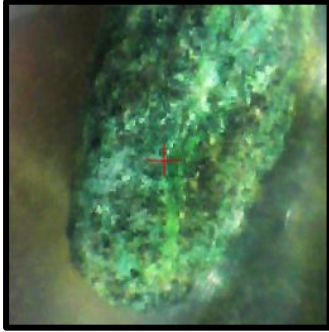
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 14	Açma Adı -Buluntu Numarası: AV-38 73/14	Grid: 2.0-6.0/ 7.9-9.5	
Tarih: 12.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Nesne	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
3	1	2	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	Parakatamit/Atakamit	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
Metal nesnenin yüzeyinde sertleşmiş toprak tabakasının altında açık yeşil renkli yumuşak korozyon tabakası görülmüştür. Toprak tabaka ve korozyon kaldırılınca mukavemeti sağlam metal çubuk ortaya çıkartılmıştır. Metalin yüzeyindeki tabakada bakır klorürlerin yıkıcı etkisi yüzeydeki korozyon tabakasında sınırlı kalarak metal özüne işlememiştir. Elementel analizinde; Bakır, silisyum, kalay, alüminyum, kurşun ve demir elementlerini içeren bakır alaşımı olduğu anlaşılmıştır. Alüminyum ve kalay içeriği korozyon dayanımı ve yüksek mukavemet sağlamıştır.			
Konservasyon Öncesi			
			

73/14 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Sn %	Al %	Pb %	Fe %
Önce:	70.26	22.39	2.59	1.76	0.71	0.65
Element:	Cu %	Si %	Sn %	Al %	Pb %	Fe %
Sonra:	88.23	8.33	0.64	0.01	0.87	1.01

Korozyon Tanımları



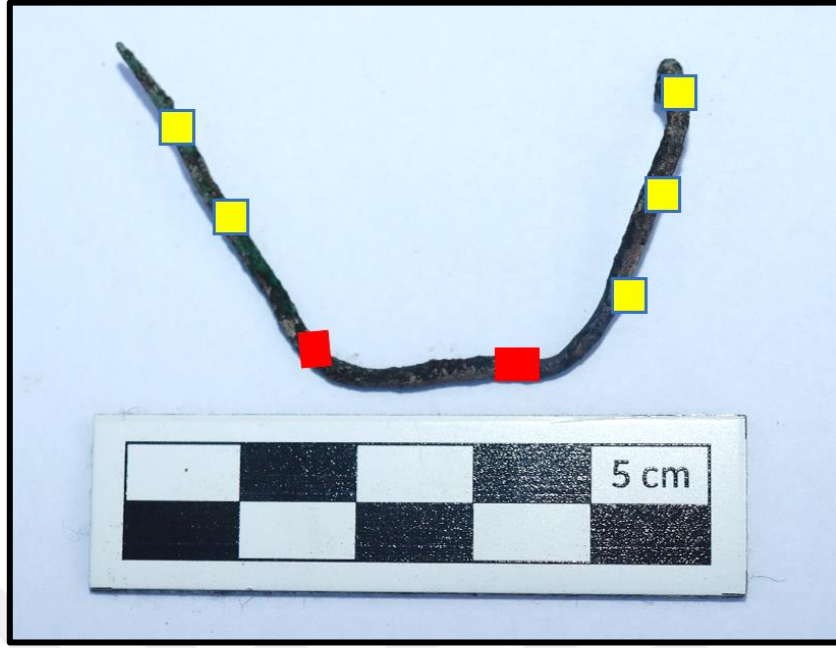
Mikroskop altındaki görüntülemelerde; Yeşil renkteki şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonat varlığı muhtemel malahit oluşumları görülmüştür. Toprakla beraber tozuma şeklinde görülen yumuşak açık yeşil/ beyazımsı renkli tabakada bakır klorürlerin varlığı düşündürmektedir. Malzeme yüzeyinde tozuma şeklinde görülen bakır

	klorür, muhtemelen Atakamit/Paratakamittir. Pudramsı, tozlu açık yeşil renkte kabarcıklı nantokit kristalleriyle beraber görülmüştür. Serbest klor iyonları varlığında bulunan nantokit, nemli ve aerobik ortamda atakamit/parakamite dönüşür. Reaksiyon ortamındaki koşulları özellikle su varlığı ve oksijen seviyesine bağlı olarak başlayan reaksiyon stabil haldeki mineralleri atakamit/parakatamite dönüştürüne kadar devam etmiş ve sonucunda bakır kanseri denen yıkıcı etki gözlemlenmiştir. Yalnızca yüzeyde bulunan metal özüne işlemeyen klorür yapısı, Atakamit/Paratakamit oluşumlarının malzeme topraktan çıkarıldıktan sonraki oksijen ve nem varlığından kaynaklandığını düşündürmüştür.
Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar	
Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Yüzeydeki korozyon tabakası kısmen mekanik yöntemlerle alınarak sadece koruyucu uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7 lik Paraloid B 72 uygulamasıyla yüzeyin oksijenle teması kesilmesi amaçlanarak korozyonun ilerlememesi amaçlanmıştır. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.	

5.2.15. AV-38 90/1 Bul. No.lu Metal İğne (Fiş No: 15)

TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 15	Açma Adı -Buluntu Numarası: Aw-38 90/1	Grid: 0.5-5.0 / 0.5-6.0	
Tarih: 30.07.2024	Buluntu Tanımı: Metal İğne	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
2	2	3	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit	-	Kuprit	-
Buluntunun Durumu			
İnce, uzun ve sivri uçlu bir forma sahip iğne orta kısmından eğilerek iç bükey görünmektedir. Yüzeyinde korozyon ve toprak tabakası sert ve patina iyi durumdadır. Kabuğun altındaki metalin yapısı sağlam mukavemeti yüksektir. Xrf analizinde iğnenin bakır alaşımı olduğu, içerdiği silisyum, alüminyum içerilikleri nedeniyle malzemenin sert ve dayanıklıdır. Paladyum elementinin topraktan doğal olarak bulunan minerallerden veya bakırın saflaştırılması tam anlamıyla yapılamamış olduğu için doğal yollarla bakır cevherinden gelmiş olabilir.			
Konservasyon Öncesi			
			

90/1 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz	■ Korozyon	■ Parça Kaybı	■ Kopma-Ayrılma	■ Tuzlanma	■ Diğer
---	--	--	---	--	---

XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	Pd %
Önce:	62.81	23.35	4.33	2.68	1.78
Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	Pd %
Sonra:	77.30	19.25	-	1.17	1.13

Korozyon Tanımları



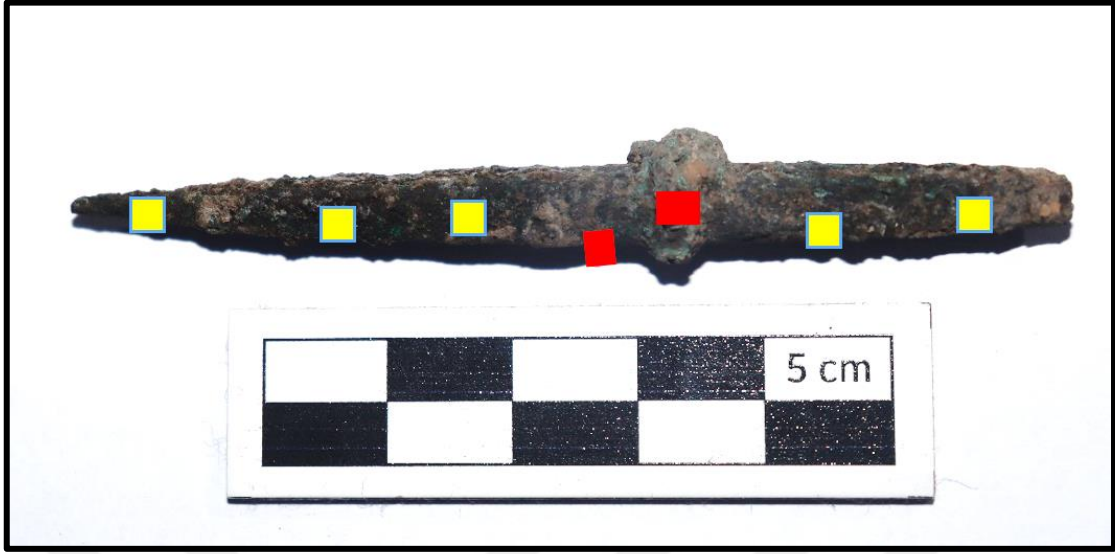
Buluntunun üstündeki toprak tabakası alındığında altta çıkan korozyon kabuğuna mikroskopla bakıldığında siyah patina üzerinde, büyük çoğunluğunu kaplayan ilk tabaka kırmızı/kahve renginde bakır oksit tabakasıdır. İkinci kabuk şeklinde korozyon katmanı yumuşak yeşil bir tabaka olarak şişkin ve bombeli kristal yapıda bakır karbonatın malahit olabileceği

	düşünülmüştür. Metal iğnenin yüzeyinde ilk görülen oksit tabakası oluşacak korozyonun pasifleşmesini sağlayarak buluntunun korozyona karşı korunmasını sağlamıştır.
Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar	
Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7'lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile buluntunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.	

5.2.16. AV-38 68/4 Bul. No.lu Metal Bız (Fiş No:16)

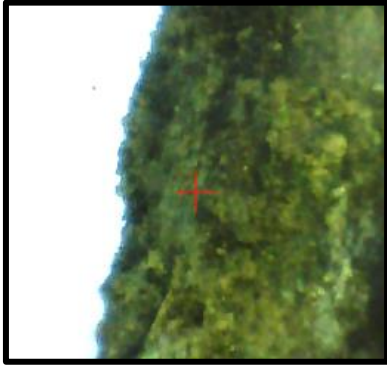
TAVŞANLI HÖYÜK - METAL BULUNTU KORUMA ONARIM FİŞİ			
Fiş Numarası: 16	Açma Adı -Buluntu Numarası: AW-3968/4	Grid: 0.5-9.5/05-9.5	
Tarih: 21.08.2024	Buluntu Tanımı: Metal Bız	Dönemi: Orta Tunç Çağı	
Malzemesi: Bakır			
Mevcut Durum: (1-4, 1 Kötü - 4 Çok iyi)			
Genel Durum:	Korozyon Durumu:	Patina Durumu:	Parça Kaybı:
4	2	4	4
Korozyon			
Bakır Karbonat:	Bakır Klorür:	Bakır Oksit:	Diğer:
Malahit-Azurit	-	-	-
Buluntunun Durumu			
Fişe bız olarak kaydedilen buluntu, ince uçlu sivri el aletidir. Genellikle deri, ahşap, kumaş işlemek, delmek için kullanılır Bızın tam ortasındaki şişkinlik kazındığında yumuşak bir toprak birikintisi olduğu görülmüştür. Xrf ölçümlerinde bakır, silisyum, alüminyum, demir, arsenik elementlerini içeren bakır alaşımıdır. İçerdiği elementler alaşımı oldukça dengeli ve dayanıklı hale getirmiştir, buluntunun mukavemeti yüksektir. Alüminyum ve silisyum korozyon direncini, demir sağlamlığı, arsenik korozyon direncinin yanında sertliği artırmıştır.			
Konservasyon Öncesi			
			

68/4 Numaralı Buluntu Bozulmaları



■ Toprak/Toz
 ■ Korozyon
 ■ Parça Kaybı
 ■ Kopma-Ayrılma
 ■ Tuzlanma
 ■ Diğer

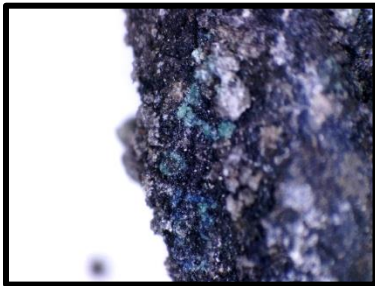
XRF Ölçümleri



P-XRF ölçümleri yapılırken; X-MET 8000 Expert Geo XRF Analiz Cihazı kullanılmış olup ölçümler cihazın Alaşım (Alloy) modunda, 30 s ölçüm süresiyle 2 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamaları, yüzey temizliği öncesi ve sonrası veriler tabloda sunulmuştur.

Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	As %
Önce:	55.14	30.19	4.50	3.12	1.08
Element:	Cu %	Si %	Al %	Fe %	As%
Sonra:	79.18	15.98	1.84	0.87	0.69

Korozyon Tanımları



Bızın üzeri kalın ve yumuşak bir toprak tabakasıyla kaplıdır. Toprak tabakasının altında yine sert yapıda olmayan mavi ve yeşil renkli mineral yapı mikroskop altında değerlendirildiğinde; Mavi renkli bir mineral olan azurit mavi rengi ve şişkin bombeli kristal görünümüyle korozyon tabaklarında belirli noktalarında tespit edilmiştir. Yeşil renkteki korozyon tabakalarının ise azurit in yanında malahit olduğunu

düşündürmektedir. Bakır karbonatlar ürünleri suda çözünmediği için buluntu üzerinde koruyucu bir patina oluşmuş ve ana malzeme sağlam kalabilmiştir.

Buluntu Üzerinde Yapılan Uygulamalar

Buluntu üzerinde çalışmalara başlamadan önce fotoğrafları çekilip belgelemesi yapılmıştır. Detaylı fotoğraflaması, mikroskop görüntülemeleri, Xrf ölçümleri yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmiştir. Yüzeydeki toprak tabakası ethanol ve pamukla silinerek uzaklaştırılmıştır. Eserin öncelikle ethanol ve saf sudan oluşan karışım (%50) kullanılarak bambu çubuk ve pamuk yardımı ile hassas bir şekilde temizliği yapılmıştır. Bu uygulama ile temizlenemeyen daha sert kir tabakalarında, bistüri yardımı ile mekanik temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra dişçi frezesine takılan çelik uçlu fırça yardımı ile en düşük seviyede kontrollü olarak, eser üzerinde kalan oksit tabakası alınmıştır. Yapılan işlemler sonunda tüm yüzeye ilk katman koruyucu amaçlı olarak homojen bir şekilde %3'lük oranda seyreltilmiş Paraloid B72 fırça yardımıyla uygulanmıştır. Depo şartlarında saklanacağı için korumada; %3,5,7'lik Paraloid B72 sırayla uygulanmıştır. Yüzeyde oluşturulan film tabakası ile bulutunun oksijenle teması kesilmesi amaçlanmış, korozyonun ilerlememesi hedeflenmiştir. Depoda periyodik olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

Konservasyon Sonrası



SONUÇ

İlk kullanılan metal eserler bakırdan üretilmiştir. Bakır ve bakır alaşımları, tarih öncesi dönemlerden günümüze kadar insanlık tarihinin en önemli malzemeleri arasında yer almış, geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak bu tür metaller, çevresel koşulların etkisiyle kaçınılmaz olarak korozyona uğrayarak yapısal bütünlüklerini kaybetme riskiyle karşı karşıya kalmaktadır. Korozyon süreçlerinin incelenmesi, özellikle hem tarihi hem de arkeolojik eserlerin korunması açısından oldukça karmaşık ve çok boyutlu bir çaba gerektirmektedir. Bu çalışmada bakır madeninin toprakaltı koşullarında ortaya çıkan korozyon ürünleri detaylıca incelenmiş, elde edilen bilgiler, Tavşanlı Höyük Kazılarında bulunan 16 adet bakır ve bakır alaşımlı eser üzerinden detaylıca değerlendirilerek, bozulmaların türü ve özellikleri ortaya konmuştur.

Metallerin çevresel faktörlere maruz kalarak korozyona uğraması, yapısal bütünlüklerini kaybetme riskiyle karşı karşıya kalmalarına yol açmaktadır. Metal korozyonu, genellikle elektrokimyasal reaksiyonlarla meydana gelir ve metaller doğada oksitler, karbonatlar, sülfürler veya silikatlar halinde bulunur. Bakır da bu tür reaksiyonlarla oksitlenir ve atmosferdeki nemle birleşerek yüzeyinde kahverengimsi yeşilimsi bir patina tabakası oluşturur. Bu patinanın bakırı daha fazla oksidasyondan koruduğu bilinse de çalışılan örnekler üzerinden de görülmüştür ki çevresel koşullar, nem, oksijen ve pH gibi faktörler bu süreci etkilemektedir. İncelenen buluntulara yapılan XRF sonucunda, bakır (Cu) ana bileşen olarak öne çıkmakta buluntuların bronz veya bakır alaşımlarına ait olduğunu görülmektedir. Yüksek bakır içeriğine sahip örneklerde (örneğin AV-37 48/8), ciddi bozulma belirtileri görülmüş, bu da saf bakırın çevresel etkenlere karşı daha duyarlı olduğunu düşündürmüştür. Örnek büyük ölçüde tahrip olmuş ve geriye yalnızca “curuf” kalmıştır. Ancak AN-55 1/1 ve AV-37 87/3 gibi buluntular ise, bakır içeriği yüksek olmasına rağmen (sırasıyla %68,27 ve %72,62), çevresel şartların veya alaşımın diğer elementlerinin koruyucu etkisiyle daha iyi bir durumda korunmuş olduğu görülmüştür. Silisyum (Si), genellikle bronz alaşımlarında mukavemeti artırmak veya döküm özelliklerini iyileştirmek için kullanılmakla birlikte, %10’un üzerinde olduğu örneklerde bozulma durumunun kötü olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum (Al) düşük oranlarda (%1-2) bulunurken, bu elementin alaşıma bilinçli mi eklendiği yoksa bir safsızlık mı olduğu belirsizdir. Demir (Fe) genellikle korozyon sorunlarını artırsa da, düşük Fe oranına sahip örneklerde (örneğin AV-37 79/3) metalin daha sağlam olduğu gözlemlenmiştir. “Kötü” durumda değerlendirilen AV-37 79/4 gibi örneklerde ise, silisyum (%28,73) ve demir (%4,05) oranlarının yüksekliği dikkat çekmektedir. Bu, demir içeriğinin galvanik korozyona neden

olabileceğini ve bozulmayı hızlandığını düşündürmektedir. Arsenik (As), bronz alaşımlarında sertliği artırıcı bir element olarak yer alırken, bazı buluntularda düşük oranlarda (%1-2) tespit edilmiştir. Kurşun (Pb) ise döküm özelliklerini iyileştirmek ve işlenebilirliği artırmak amacıyla kullanılmış, örneğin AV-37 89/5 buluntusunda %1,78 oranında tespit edilmiştir. Koruma etiği açısından, patina durumunun değerlendirilmesi de önemlidir. Örneğin, AW-38 68/4 numaralı buluntunun "patinasının çok iyi" durumda olması, yüzeyde doğal olarak oluşan koruyucu bir tabakanın varlığını göstermektedir. Bu tür buluntularda patinanın korunması, koruma stratejilerinde öncelikli olmuştur. Yapılan konservasyon müdahalesi de buna göre seçilerek patina korunmuştur. Çok kötü durumda olan buluntularda (örneğin, AV-37 48/8) yalnızca stabilize edici işlemler tercih edilerek yalnızca Paraloid uygulaması yapılmıştır.

Patinalar çeşitli kimyasal bileşiklerden oluşur ve yüzey ürünlerinde renkleri değişkendir. Örneğin, bakır oksitleri kırmızıdan siyaha, karbonatlar yeşilden maviye kadar farklı renkler sergileyebilir. Bu korozyon ürünlerinin türü, çevresel koşullara ve ortamın kimyasal yapısına göre değişir. Bakırın korozyonunun başlıca nedenleri, doğada bulundukları haline geri dönüş eğiliminden kaynaklanır. Korozyon, toprak yapısı, nem, oksijen konsantrasyonu, pH değeri ve mikroorganizmalar gibi faktörlerle şekillenir. Örneğin, yüksek nem oranı korozyon hızını artırırken, düşük nemde sıvı film oluşmaz ve korozyon daha yavaş ilerler. Yeraltı sularının varlığı, toprakta bulunan çözünebilir tuzlar ve mikroorganizmalar da korozyonu etkileyen diğer önemli faktörlerdir. Özellikle anaerobik topraklarda bulunan bakteriler, sülfat iyonlarını sülfür haline indirger ve bakırın oksitlenmesine yol açar. Bunlar gibi korozyon süreçleri, metalin korunmasında önemli bir rol oynar ve özellikle arkeolojik bakır eserlerin korunması açısından dikkate alınması gereken bir faktördür. Bu çalışma, 16 adet bakır buluntunun kimyasal bileşimlerini, mevcut bozulma durumlarını ve koruma stratejilerine olan ihtiyaçlarını değerlendirmektedir. Metal nesnelerin bozulma süreçleri, kullanılan alaşım elementleri, çevresel koşullar ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Tez kapsamında incelenen buluntular, bakır ve alaşımlarının korozyona karşı gösterdiği farklı davranışları ortaya koymuştur. Saf bakır, çevresel faktörler nedeniyle daha hızlı oksitlenip mineralize olurken, bakır içeriği düşük alaşımlar, genellikle daha az korozyona uğramıştır. Örneğin, yüksek bakır içeriğine sahip bazı buluntular, çevresel etmenlerin etkisiyle orta seviyede korozyona uğramıştır. Bu durum, alaşımdaki diğer elementlerin, örneğin silisyum, demir ve alüminyumun, korozyona karşı direnç sağladığını göstermektedir. Silisyum oranı yüksek olan bazı örneklerde, bozulma durumu daha kötü olmasına rağmen, metalin sağlamlığı korunabilmiştir. Demir, korozyon riskini artıran bir element olarak dikkat çekerken, silisyum

ve demir oranlarının yüksek olduğu örneklerde korozyon etkileri artsa da metalin mekanik dayanıklılığı devam etmiştir. Ayrıca, arsenik ve kurşun gibi elementler de alaşımların işlenebilirliğini ve sağlamlığını etkileyerek, çevresel bozulmayı etkileyen faktörler arasında yer almıştır. Örneğin, kalay içeren alaşımlarda korozyon durumu genellikle çok kötü olarak raporlanmıştır. Bu buluntular, metal bileşimindeki elementlerin çevresel faktörlere karşı nasıl bir etki yarattığını ve korozyon süreçlerini nasıl şekillendirdiğini anlamamıza yardımcı olmuştur. Korozyon ürünleri olarak tespit edilen azurit, malahit ve nantokite gibi mineraller, genellikle koruyucu bir tabaka oluştursa da saf bakırın yapısal zayıflığı nedeniyle etkili olamamıştır. Klorür ve nem gibi çevresel faktörler, metalin oksitlenme ve klorürlenme süreçlerini hızlandırarak, toprak altı koşullarında korozyonun hızını ve şiddetini artırmıştır. Bu çalışmalar, bakır ve alaşımlarının korunması için çevresel faktörlerin ne denli önemli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Korozyon süreçlerinin incelenmesi ve bu süreçlerin etkilerinin giderilmesi, özellikle arkeolojik ve tarihi eserlerin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde, bilimsel araştırmalarda disiplinler arası çalışmalar hızla artmaktadır. Arkeoloji, somut verilere dayalı analizlerle sorularına cevap ararken, arkeoloji ile fen ve doğa bilimlerinin birleşimi arkeometri bilim dalını ortaya çıkarmıştır. Arkeometri, arkeolojik malzemelere matematiksel ölçüm ve analiz teknikleri uygulayarak, malzemelerin özelliklerini ve bozulma süreçlerini derinlemesine anlamamıza olanak sağlamıştır. Konservasyon bilimindeki benzer gelişmeler de geniş analitik cihazlar ve disiplinlerle yapılan bilimsel çalışmaların önemini artırmıştır. Bu tezde de, bu tür bilimsel yöntemler kullanılarak korozyonun etkilerinin incelenmesi ve giderilmesi amaçlanmıştır.

İncelenen buluntular elde ettiğimiz verilerle, kimyasal ve fiziksel analizler, bozulma süreçlerini anlamamızda yardımcı olmaktadır. Bu analizler, somut verilere dayalı bir envanter oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Konservasyon sürecinin ilk aşaması teşhistir; bu aşamada, buluntulara müdahale etmeden önce tüm verilerin belgelenmesi ve kaydedilmesi gereklidir. Eser yüzeyindeki korozyon ürünlerinin tespit edilmesi, konservasyon yönteminin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Tez kapsamında da bu süreç, görsel inceleme ile başlamış ve daha sonra çeşitli analiz teknikleriyle desteklenmiştir. Görsel tespitler, binlerce yıl toprak altında kalmış metal objelerin şekli ve yüzey detaylarının ortaya çıkarılmasında önemlidir. İlk görsel incelemelerde, buluntunun durumunu ve yüzeyindeki tabakanın özelliklerini belirlemeyerek hazırlanan fişlere işlenmiştir. Bu bilgiler, daha ileri düzeyde

yapılacak analizlerin planlanmasında ve korunacak malzemenin doğru bir şekilde tanımlanmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Restorasyon ve konservasyon çalışmalarının temel hedefi, tarihi eserlerin malzeme bütünlüğünü ve estetik özelliklerini bozmadan korumaktır. Metallerin bozulma süreci tamamen durdurulamaz, ancak konservatörler ve malzeme bilimciler bu süreci yavaşlatmak için farklı yaklaşımlar benimser. Koruma alanında, müdahale edilen nesne eşsiz bir kültür varlığı olduğu için minimum müdahale, geri alınabilir malzemeler ve orijinal malzemeyle uyum esastır. Bu doğrultuda, Tavşanlı Höyük buluntularında yapılan çalışmalarda genellikle pasif (çevresel koşulların iyileştirilmesi) yöntemler tercih edilmiştir. Buluntular bize korozyonun neden olduğu bozulmaların sadece malzemenin kimyasal yapısından değil, aynı zamanda çevresel koşulların karmaşık etkileşimlerinden kaynaklandığını göstermiştir. Korozyonun nedenleri ve türleri üzerine yapılan analizler, bu eserlerin hem koruma öncesi hem de koruma sırasında nasıl bir yaklaşıma ihtiyaç duyduğunu da net bir şekilde ortaya koymuştur.

Bu çalışma, bakır alaşımlı eserlerin korozyona uğramasına neden olan mekanizmaları ve bu mekanizmaları durdurmak veya yavaşlatmak için kullanılabilecek yöntemleri anlamak açısından önemli bir katkı sağlamıştır. Elde edilen bulgular, korozyon indirgeme ve konservasyon süreçlerinin, sadece malzeme özelliklerini değil, aynı zamanda çevresel faktörleri ve depolama koşullarını da dikkate alması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, tarihi ve arkeolojik eserlerin doğru bir şekilde korunması, uzun vadede zarar görmelerinin önlenmesi ve gelecek nesillere aktarılabilmesi için bilimsel ve sürdürülebilir bir temel sunmaktadır.

Tavşanlı Höyük kazısından seçilen bakır alaşımlı eserler üzerinden yürütülen analizler, korozyonun oluşum mekanizmasının, ürünlerinin ve etkilerinin belirlenmesindeki zorlukları gözler önüne sermiştir. Buluntuların element içeriği, çevresel faktörlerin etkisi ve toprak altı koşullarının rolü gibi çok sayıda değişken, korozyon süreçlerinin detaylı bir şekilde ele alınmasını gerektirmiştir. Özellikle, topraktaki nem, tuz, pH ve diğer kimyasal etkenlerin bir arada değerlendirilmesi, korozyon ürünlerinin oluşumu ve bu ürünlerin eserin bütünlüğü üzerindeki etkisini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Numuneler üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen detaylı veriler, eserlerin korunmasına yönelik uygulanacak yöntemlerin seçiminde yol gösterici olmuştur. Mikroskop ve XRF analizleriyle kristal yapının ve korozyon renklerinin değerlendirilmesi, sadece korozyonun nedenlerini belirlemekle kalmamış, aynı zamanda eserin saklanacağı depo koşullarına kadar birçok sürecin optimize edilmesi için de önemli bilgiler sunmuştur.

Restorasyon ve konservasyon çalışmalarının temelini oluşturan önemli bir bulgu olarak, bakır alaşımlı eserlerde korozyonun neden olduğu bozulmalar, yalnızca malzemenin kimyasal yapısı ve çevresel koşulların değil, aynı zamanda bu etmenlerin bir arada oluşturduğu karmaşık etkileşimlerin bir sonucudur. Bu çalışma, korozyonun karmaşık doğasının anlaşılmasına katkıda bulunarak, tarihi eserlerin doğru bir şekilde korunması ve gelecek nesillere aktarılması için bilimsel bir temel oluşturmuştur. Korozyon indirgeme ve konservasyon yöntemlerinin dikkatle seçilmesi hem eserin estetik özelliklerinin hem de malzeme bütünlüğünün korunması açısından büyük bir öneme sahiptir.



KAYNAKÇA

- Akar A., Yazan H. A., & Özmerih L.** (1974). Bakır ve İlgili Ürünlerin Kullanım Alanları. *Madencilik*, 13(2), 43-47.
- Alarcon, T. D.** (2013), A Comparative Study of Corrosion Inhibitors for the Treatment of Archaeological Copper and Copper Alloys, *Anatolian Archaeological Studies*, 18, 109-119.
- Akçe, M. A., & Kadioğlu, Y. K.** (2020). Raman Spektroskopisinin İlkeleri ve Mineral Tanımlamalarında Kullanılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 99-115. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.778678>.
- Altuğ, G. S.** (2014). *Çökelti Sertleştirilmiş Bakır Alaşımlarının Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Aucouturiera M., Darque-Ceretti E.** (2007). “The Surface Of Cultural Heritage Artefacts: Physicochemical Investigations For Their Knowledge And Their Conservation”, *Chemical Society Reviews*, 36, 1605-1621.
- Bakiler, M.** (2013). “Kültür Mirasının Tanısında İleri Analiz Yöntemlerinin Önemi ” [Bildiri], *29. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 27-31 Mayıs, Muğla, 151-156.
- Bandy, M. C.** (1938), “Mineralogy Of Three Sulphate Deposits Of Northern Chile ” *The American Mineralogist Journal Of The Mineralogical Society Of America*, 23(11), 669-760.
- Bassett J.** (2008). *The Craftman Revealed, Adriaen de Vries, Sculptor in Bronze*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- Başak, O.** (2008). Taş Çağı' ndan Tunç Çağı' na Anadolu' da Maden Sanatın Gelişimi ve Kullanımı. *Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, S.21, 15-33.
- Bayram, G.** (2018), Güneydoğu Anadolu'nun Neolitik Çağ Totemleri ve Ritüel Nesneleri, *Amisos*, 3, 67-89.
- Bezur A., Lee L., Loubser M., & Trentelman K.** (2020). Handheld XRF in Cultural Heritage: A Practical Workbook for Conservators, The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- Canpolat, G.** (2016). *Oksitli Bakır Cevherlerinden Bakırın Değerlendirilmesi*. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Casaletto M. P., Cirrincione, C., Privitera, A., Basillissi V. (2016), A Sustainable Approach to the Conservation of Bronze Artworks by Smart Nanostructured Coatings, [Bildiri], Metal 2016, Proceedings Of The Interim Meeting Of The Icom-Cc Metals Working Group, Eylül, New Delhi.

Celep, O., Baş A. D., Yazıcı, E. Y., & Deveci, H. (2018). Altın Cevherlerinin Karakterizasyonunda Kullanılan Mikro Analitik Yöntemler, *Madencilik*, 57(4), 281-298.

Clarelli F., Filippo B. D., & Natalini R. (2012). A Mathematical Model of Copper Corrosion. *Applied Mathematical Modelling*, S. 38, 1-18.

Cronyn, J. M. (1990), *The Elements of Archaeological Conservation*, Taylor & Francis Group, New York.

Çakır, A.F. (2016). Korozyon İnsanlık İçin Stratejik Öneme Sahip Tabi Bir Olay. *Metalurji*. S.179, 35-40.

Dardeniz, G., & Jesus, P. (2015). Antik Madencilik Hakkında Arkeolojik ve Jeolojik Görüşler. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, s: 151, 235-250.

Demirci, Ş. (1985), “Arkeolojik Örneklerin Mikro Analizi” [Bildiri], *I. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 20-24 Mayıs Ankara.

Ehsani A., & Yazıcı E. Y. (2016), Anadolu’da Bakır Madenciliği ve Kullanımının Kısa Tarihçesi, *MT Bilimsel Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 9, 43-48.

Esin, U. (1985). Arkeolojide Kullanılan Arkeometrik Araştırmalar Genel Bakış, [Bildiri], *I. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 20-24 Mayıs Ankara.

Faltermeier, R.B. (1995). Surface Surface Characterization of Artificial Corrosion Layers on Copper Alloy Reference Materials” Institute of Archaeology, Doctoral Thesis, University Collage London.

Fidan, E. (2017), Madenin Beşiği Anadolu: Tarihöncesi Dönemlere Ait Bakır Yatakları, *Belleten*, 81(292), 667-665.

Fidan, E., Uncu, L., & Karakoca E. (2021), Bronze Age Survey On Tavşanlı Höyük (Kütahya, Turkey): Preliminary Results, *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 14, 28-35.

Fidan, E., Karatak, A., Seçer Fidan, S., & Kocabaş M. A. (2022), Tavşanlı Höyük Kazisi 2021 Yılı Çalışmaları (İlk Sezon), 42. *Kazı Sonuçları Toplantısı*, Denizli, Cilt 2, 245-254.

Fidan E., Keskin H., Naiboğlu N., Seçer Fidan S., Bostancı Kolankaya N., Ekmen G., Ekmen H., M. Kocabaş A. (2023). Tavşanlı Höyük Kazısı 2022, 43. Kazı Sonuçları Toplantısı, Ankara, Cilt 1, 401-414.

Frank C. Hawthorne, L. A., Groat, E., & Raymon K. E. (1989), Antlerite, $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$, A Heteropolyhedral Wallpaper Structure, *Canadian Mineralogist*, 27, 205-209.

Genç, U., Ekinci, Ş., Aksu, M., & Başsarı, A. (2013), Kültür Varlıklarının İncelenmesinde Radyografinin Kullanımı, *Uluslararası İstanbul Tarihi Yarımada Sempozyumu*, İstanbul, 2013.

İşdaş, O. (2017). Elektrokimyasal Korozyon İlkeleri. *Metallurji Dergisi*. 155, 45-48.

Mazzeo, R., Prati, S., Quaranta, M., & Sciutto, G. (2012), An Overview Of Analytical Techniques And Methods For The Study And Preservation Of Artistic And Archaeological Bronzes, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 12, 261-271.

Munajad, A., Subroto, C. (2018), Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Analysis of Transformer Paper in Mineral Oil-Paper Composite Insulation under Accelerated Thermal Aging, *Energies*, 11 (2), 1-17.

Kaptan, E., (1992), “Anadolu’da Kalay ve Eski Yeraltı Kalay Madenciliği“, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, S:40, ss.15-19.

Karakoç, Z., Ketani, M.A., Ketani, Ş. (2016). Mikroskopların Çalışma Mekanizması ve Çeşitleri. *Dicle Üniversitesi Veterinerlik Bölümü Dergisi*. 1(1), 1-6.

Karatak, A., Fidan, E., & Keskin, H. L. (2024), Arkeolojik ve Tarihsel Bağlamda Kütahya’da Madencilik ve Metal İşçiliğine Dair Yeni Bulgular, *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 25, 57-78.

Kesavan, D., Gopiraman, M. & Sulochana, N. (2012). Green Inhibitors for Corrosion of Metals: A Review, *Chemical Science Review and Letters*, 1(1), 1-8

Kılıç, G. B., & Karahan, A. G. (2010). Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ve Laktik Asit Bakterilerinin Tanısında Kullanılması. *Gıda*, 35(6), 445-452.

Kurt, H., & Arık, F. (2015). *Mineroloji*. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., Ankara.

Nur S., & Toy, A. (2023). Quality Control In The Portable X-Ray Appliances Used By Radiodiagnostic: The Importance Of Periodic Measurement Of The Light-Beam Field Test, *Uluslararası Medeniyet Çalışmaları Dergisi*, 3, 411-417.

Oğuz, B. (1989). Malzeme Bilgisine Giriş, Oerlikon Yayınları.

Öten, A. (2020). XRF, Kırmızıaltı Ve Raman Spektroskopi Tekniklerinin Türk - İslâm Sanatlarına Arkeometrik Katkısı. *Journal of Spectroscopy and Molecular Sciences*, 2(2), 65–80.

Özbal, H. (2005). MÖ 3. Binyılda Anadolu’da Bronz, Reform Matbaacılık.

Özen, L. (1999), Bronz Kanseri (Hastalığı), I. Uluslararası Taşınabilir Kültür Varlıkları Restorasyonu ve Konservasyonu Kolokyumu, s. 177-184, 6-7 Mayıs, Ankara.

Öztürk, H., & Hanilçi, N. (2009). Metallogenic Evaluation Of Turkey: Implications For Tin Sources Of Bronze Age In Anatolia. *Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*. 12, 105-116.

Paktunç, B. (1996). Yer Bilimlerinde Mikroanalitik Yöntemler, *Jeoloji Mühendisliği*, 48-49, Cilt:20, 41-48.

Palache, C., Harry B. & Clifford F. (1951), The System of Mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana Yale University 1837-1892, Volume II: Halides, Nitrates, Borates, Carbonates, Sulfates, Phosphates, Arsenates, Tungstates, Molybdates, Etc. John Wiley and Sons, Inc., New York, 7th edition, revised and enlarged.

Patel, A.P. (2014). Conservation of Archaeological Metal Artifacts -Emphasizing on Copper/Bronze. *Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*. S.2, 347-358.

Rafael, J., González, P., & Turo, F. D. (2024), The Use of Plant Extracts as Sustainable Corrosion Inhibitors for Cultural Heritage Alloys: A Mini-Review, *Sustainability*, 16, 1-19.

Sarrazin, P., Chiari, G., & Gailhanou, M. (2008). A Portable Non-Invasive Xrd-Xrf Instrument For The Study Of Art Objects, *Powder Diffraction*, 23, 175-186.

Schweizer, F. (1991). Bronze Objects from Lake Sites: From Patina to “Biography”. Ancient&Historic Metals: Conservation and Scientific Reserch. *The Getty Conservation Institue*. 33-50.

Scott, D.A. (2002). *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation.*, Getty Publications. Los Angeles.

Scott, D.A. (1997). Copper Compounds In Metals And Colorants: Oxides And Hydroxides. *Studies in Conservation*. 42, 93-100.

Skoog, D.A., Holler, E.J., Crouch, S.R. (2016). Principles of Instrumental Analysis Seventh Edition, Cengage Learning, Boston.

Smith, W. F. (2006). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Literatür Yayınları.

Şahin, M. B., Ağrılı, H., Şahin E., & Mengi H. (2016). *Mineraller*,. Kuban Maatbacılık Yayıncılık. Ankara.

Şentürk, B.S. (2007). *Pirinç Alaşımlarının Ekstrüzyonunda Meydana Gelen Üretim Hatalarının Tespiti, Nedenleri ve Çözüm Yolları*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Terim Kapakin, K. A. (2006), Scanning-Elektron Mikroskobu, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi, 17(1-2), 55-58.

Torgan E., Karadağ, R. (2015), “Tahribatsız ve Mikroanaliz Yöntemleri İle Arkeolojik Eserlerin Karakterizasyonu” [Bildiri], *31. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 11-15 Mayıs Erzurum.

Yalçın, Ü. (2016). Anadolu Madencilik Tarihine Toplu Bir Bakış. *Yeraltı Kaynakları Dergisi*, S:9, 3-13.

Yalçın, Ü. (2013). “Anadolu Madenciliği” [Bildiri], *III. ODTÜ Arkeometri Çalıştayı*, 3-5 Ekim, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi D Salonu, Ankara.

Yalçın, Ü. (2009). Stratejik ‘Önemi Olan’ Bir Metal: Kalay. *Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*. 12, 99-101.

Yalçın, H., & Koç, T. (1998). *Mühendisler İçin Korozyon*, Kimya Mühendisleri Odası.

Yünsel, T. Y., Ersoy A., & Ehsani, A. (2019). X-ışını difraksiyonu yöntemi ile kantitatif mineral içeriği tayini ve çalışma şartlarının etkisi, Artıbilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi