

TÜRK ARKEOLOJİ VE ETNOGRAFYA DERGİSİ

TURKISH JOURNAL OF ARCHEOLOGY AND ETHNOGRAPHY

e-ISSN: 2791-8394

Sayı | Number: 91

Ocak | January 2026

Myrelia/Apameia Bronz Çocuk Heykelinin Arkeometrik İncelemesi

Archaeometric Investigation of the Bronze Child Statue from Myrelia/Apameia

Irmak Güneş YÜCEİL YILDIRIM

PhD(c)

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Arkeometri Bölümü, Ankara, Türkiye |

Middle East Technical University, Department of Archaeometry, Ankara, Türkiye

igyuceil@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-7699-0878>

Fatih ŞAHİN

Trabzon Restorasyon ve Konservasyon Bölge Laboratuvar Müdürlüğü | Trabzon Restoration and Conservation
Regional Laboratory Directorate

fetihshn@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0000-0720-0214>

Makale Türü | Article Type: Araştırma Makalesi | Research Article

Geliş Tarihi | Received: 22.10.2025

Kabul Tarihi | Accepted: 21.12.2025

Yayın Tarihi | Published: 31.01.2026

Atıf | Cite As

Yüceil-Yıldırım, I. G., Şahin, F. (2026). Myrelia/Apameia bronz çocuk heykelinin arkeometrik incelemesi. *Türk Arkeoloji ve Etnografya Dergisi*, 91, 41-60

Değerlendirme: Bu makalenin değerlendirilmesi çift taraflı kör hakemlik ile yapılmıştır.

Benzerlik taraması yapılarak (Turnitin) intihal içermediği teyit edildi.

Review: This article was evaluated by double-blind peer review. It was confirmed that it did not contain plagiarism by similarity scanning (Turnitin).

Etik Beyan: Bu makalenin yazarı tarafından çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur. Bu çalışma, etik kurul izni gerektirmeyen nitelikte olup kullanılan veriler literatür taraması/ yayımlanmış kaynaklar üzerinden elde edilmiştir.

Yapay Zeka Etik Beyanı: Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araç veya uygulama kullanılmamıştır. Çalışmanın tüm içeriği, yazarlar tarafından bilimsel araştırma yöntemleri ve akademik etik ilkelere uygun şekilde üretilmiştir.

Ethical Statement: The author of this article declares that scientific and ethical principles were followed during the preparation of the study and that all studies used were cited in the references. This study does not require ethics committee approval, and the data used was obtained from literature reviews/published sources.

Artificial Intelligence Ethical Statement: No artificial intelligence-based tools or applications were used in the preparation of this study. All content was produced by the authors in accordance with scientific research methods and academic ethical principles.

Öz

Bu çalışma, Bursa ili Mudanya ilçesi Myrelia/Apameia Antik Kenti'nde keşfedilen bronz çocuk heykelinin üretim teknolojisi, alaşım yapısı ve bozulma süreçlerini arkeometrik yöntemlerle incelemektedir. Heykelin korunmuşluk durumu, X-ışını radyografisi, taşınabilir XRF, Ramanspektroskopisi ve XRD gibi analitik tekniklerle değerlendirilmiştir. Bulgular, gövde bölümünün doğrudan yöntemle tek parça döküldüğünü, baş ve kollar gibi karmaşık formların ise ayrı kalıplarda dökülüp füzyon kaynağı ile birleştirildiğini göstermektedir. Kurşun (Pb) dağılımındaki heterojenlik, döküm potasında karıştırma yetersizliğine ve buna bağlı gaz kapanımı kaynaklı kusurlara işaret etmektedir. Malahit, küprit ve tenorit gibi korozyon ürünleri; eserin gömü öncesi ve sonrası farklı çevresel koşullara maruz kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca statik denge sorunlarını gidermek için kaideye entegre edilen demir donatı ve Antik Dönem onarım izleri belge altına alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, bronz heykelin teknik geçmişi ile kullanım ve gömü süreci arasındaki ilişkiyi ortaya koymakta ve Anadolu bronz heykelticiliği literatürüne yeni katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: arkeometri, bronz heykel, döküm tekniği, korozyon, XRF, XRD, radyografi

Abstract

This study presents a comprehensive archaeometric investigation into the production technology, alloy composition, and degradation processes of a bronze child statue unearthed in the ancient city of Myrelia/Apameia (Mudanya, Bursa, Türkiye). The conservation state of the artifact was assessed using a combination of X-ray radiography, portable XRF, Raman spectroscopy, and XRD analyses. Results reveal that the torso was cast in a single piece using the direct lost-wax technique, while the head and arms were produced separately and subsequently assembled via fusion welding. The uneven distribution of lead (Pb) within the alloy suggests inadequate mixing during casting, likely contributing to porosity and gas entrapment defects. Corrosion products such as malachite, cuprite, and tenorite indicate exposure to varying environmental conditions before and after burial. Additional findings include internal structural supports—such as an iron rod embedded in the base—and evidence of ancient repair interventions. These insights establish a strong correlation between the statue's fabrication methods and its post-manufacture alterations, offering valuable contributions to the study of technological practices in Anatolian bronze sculpture.

Keywords: archaeometry, bronze sculpture, casting technique, corrosion, XRF, XRD, radiography

Myrelia/Apameia Bronz Çocuk Heykelinin Arkeometrik İncelemesi

Antik bronz heykeller, estetik ve kültürel değerlerinin yanı sıra üretim teknikleri ve alaşım yapılarıyla geçmiş uygarlıkların teknolojik düzeyini yansıtır. Döküm yöntemi, yüzey işlemleri ve alaşım katkıları gibi unsurlar; sadece teknik becerileri değil üretim organizasyonu ve ekonomik yapıyı da ortaya koyar. Ancak bu eserler, üretimden gömüye kadar maruz kaldıkları çevresel etkiler nedeniyle karmaşık bozulmalara uğrar. Bu nedenle arkeometrik incelemeler, hem koruma sorunlarını anlamak hem de arkeolojik yorumlara zemin hazırlamak için temel bir araştırma aracına dönüşmüştür.

Bu çalışmanın temel amacı, Myrelia/Apameia/Apameia (Bursa, Mudanya) kazılarında bulunan bronz çocuk heykelini estetik, teknik ve teknolojik yönleriyle analiz ederek bilimsel olarak belgelemektir. Disiplinler arası yöntemlerle yürütülen bu inceleme, yalnızca heykelin koruma sorunlarını teşhis etmeyi değil aynı zamanda bu sorunları üretim tekniği ve kullanım süreciyle ilişkilendirmeyi hedeflemektedir. Heykel, daha önce de Arıcı (2021) tarafından arkeolojik, ikonografik ve tipolojik açıdan ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Şekil 1

Bronz Çocuk Heykeli Buluntu Görseli



Not. Fotoğraf Bursa Müze Müdürlüğü uzmanları tarafından çekilmiştir.

Arıcı (2021), figürü ikonografik ve stilistik özelliklerine göre MS 1. yüzyıla tarihlendirmektedir. Ancak, heykelin bulunduğu mimari katman; yangın izleri, amphora parçaları ve sikkeler gibi buluntulara dayanarak MS 4. yüzyıla tarihlenmiştir. Bu çelişki, heykelin orijinal yerinde bulunmadığı ve daha geç bir dönemde mevcut konumuna taşındığı ihtimalini gündeme getirmiştir. Arıcı'nın önerdiği tarihlendirme doğrusa bu heykel MS 257/258 Got saldırılarını, MS 4. yüzyıldaki yangını ve yaklaşık 1600 yıllık gömü sürecini atlatmış istisnai bir arkeolojik eser niteliği taşımaktadır (Arıcı, 2021, s. 238).

Bu denli uzun ve çalkantılı bir geçmiş, heykelde çok katmanlı, karmaşık ve estetik açıdan müdahalesi güç bozulmalara yol açmıştır. Bu nedenle konservasyon sürecinde yalnızca fiziksel bütünlüğün korunması değil aynı zamanda eserin estetik, teknik, sanatsal ve tarihsel değerlerinin de gözetilmesi öncelikli hâle gelmiştir. Bu kapsamda çalışmanın ilk adımını oluşturan teşhis aşamasında, heykelin üretim tekniği, tasarımı, üretim kusurları, Antik Dönem onarımları ve kullanım izlerini ortaya koymak amacıyla arkeometrik yöntemler kullanılmıştır.

Bu çalışmada X-ışını radyografisi, Raman spektroskopisi, X-ışını kırınımı (XRD), taşınabilir XRF analizleri ve görsel değerlendirmeler gibi arkeometrik yöntemler kullanılarak heykelin üretim sürecine dair teknik veriler elde edilmiştir. Aynı yöntemlerle yüzeydeki korozyon yapısı ve bozulmaların kökenleri de anlaşılmaya çalışılmıştır. Analizler ayrıca, antik bronz eserlerde sıkça rastlanan kaynak izleri, yama uygulamaları ve alaşım heterojenliği gibi yapısal özelliklerin belgelenmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma bronz çocuk heykelinin üretim tekniği, malzeme yapısı ve bozulma özelliklerini arkeometrik yöntemlerle inceleyerek teknik düzeyde belgelenmesini amaçlamaktadır. Elde edilen veriler, heykelin üretim süreci, kullanım ömrü ve korunmuşluk durumu hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır.

Materyal ve Method

Bronz çocuk heykeli, Bursa ili Mudanya ilçesi Ömerbey Mahallesi'nde gerçekleştirilen kurtarma kazısı sırasında, iç içe geçmiş yapı kalıntıları arasında bulunmuştur. Arkeolojik buluntular —amphora parçaları ve sikkeler— doğrultusunda, heykelin yer aldığı tabaka MS 4. yüzyıla tarihlendirilmiştir (Arıcı, 2021, s. 229). Amphora ve mimari parçalarda gözlenen yanık izleri, alanın geçmişte bir yangın sonucu terk edilmiş olabileceği ihtimalini akla getirmektedir (Şekil 1).

Heykelin koruma ve onarım çalışmaları İstanbul Restorasyon ve Konservasyon Merkez Laboratuvar Müdürlüğünde (İRKMLM) gerçekleştirilmiştir. Heykel, beş parça hâlinde bulunmuştur: sağ kol, sol kol, baş, köpek figürü ve dairesel kaideye monte edilmiş torso-bacak bölümü (Şekil 2). Toplam yüksekliği 83 cm, ağırlığı ise 165 kg'dır. Çocuk ve köpek figürlerinin yalnızca sol gözleri korunmuştur; sağ gözler eksiktir (Şekil 2c–f). Konservasyon sürecinde çocuğun sağ gözüne ait taş göz akı ve bronz iris parçası, gövde içinden çıkarılmıştır (Şekil 5c–e). Gövdenin içinden çıkan kemikten bir el aleti ve dairesel formda bir metal obje de belgelenmiştir (Şekil 7).

Heykelin iç kısmı kil dolgulu olup bu dolgunun bir bölümü sol bacak, sağ omuz (Şekil 2a) ve sağ kolda (Şekil 2e) korunmuştur. Sağ omuz ve kolda korunan kil dolgunun ortasında kare kesitli donatı delikleri belirlenmiştir. Ayrıca omuz, kollar ve baş–torso birleşimlerinde kaynak izleri tespit edilmiştir.

Kaide, yaklaşık 4 cm kalınlığında kurşun plaka üzerine kaplanmış 3–4 mm kalınlığında bakır alaşımlı levhadan oluşmaktadır (Şekil 2a–b). Kaideye heykelin öne doğru eğilerek devrilme/yıkılmasıyla uyumlu deformasyon gözlemlenmiştir (Şekil 2a). Kaideye sabitlenmiş 5 cm çapında bir demir donatı kalıntısına ek olarak tabanda dört adet, 2–4 cm kalınlığında dörtgen kesitli metal eleman yer almaktadır (Şekil 2b).

Şekil 2

Heykelin Koruma Öncesi Belgeleme Fotoğrafları



Not. Fotoğraf, İRKMLM uzmanları tarafından çekilmiştir.

Heykelin genel kondisyonu zayıftır; sol kalçada geniş bir çatlak mevcuttur. Çocuk figürü kendi ağırlığını taşıyamayacak durumdadır. Köpek figürünün durumu ise görece daha iyidir. Heykel genelinde yüzeyde, çok katmanlı ve heterojen yapıdaki korozyon tabakası katmanlar hâlinde yüzeyden ayrılmaktadır. Dökülen kabuk tabakasında dijital kumpas ile yapılan ölçümler kabuğun 1 mm kalınlığa ulaştığını göstermiştir (Şekil 4a).

Heykelin korunmuşluk durumunun tespiti ile ilişkili olarak üretim kalitesi, kullanım dönemi sorunları ve gömü ortamı koşullarını değerlendirmek amacıyla arkeometrik incelemeler kapsamında radyografik görüntüleme, korozyon karakterizasyonu ve element analizi uygulanmıştır.

Radyografik İnceleme

Tahribatsız analiz yöntemlerinden X-ışını görüntüleme (radyografi), arkeolojik eserlerin iç yapısı, dolgu malzemesi, üretim süreci ve antik onarımlar hakkında bilgi sağlar. Radyografide koyu alanlar, düşük yoğunluklu veya düşük atom numaralı bölgeleri; parlak alanlar ise X-ışını geçirmeyen, yüksek yoğunluklu yapıları gösterir (Azéma ve ark., 2013, s. 479). Heykelin dijital radyografi analizleri, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) laboratuvarında yapılmıştır. Görüntülemeye 270 kV'luk Golden Engineering XRS-3 X-ışını kaynağı kullanılmıştır (Şekil 3a). Kurşun kaplı odada, heykel parçaları görüntü paneli önüne yerleştirilerek 2–8 saniye ışınlanmıştır. Elde edilen dijital görüntüler, farklı yoğunlukların analizine olanak sağlamak amacıyla kontrast ayarı yapılarak işlenmiştir.

Şekil 3

Bronz Çocuk Heykeli Üzerinde Gerçekleştirilen Teknik Analizler ve Uygulamalar



Not. (a) Dijital radyografi, (b) örnek alımı, (c) element analizi ve (d) yüzey temizliği süreçlerini göstermektedir.

Patina ve Korozyon Karakterizasyonu

Renk ve doku farklılıkları gösteren örneklerin bileşimini belirlemek için Raman spektroskopisi ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri uygulanmıştır (Şekil 3b). Raman analizleri Bruker Senterra II cihazında, 532 nm ve 785 nm lazerlerle 0,2–50 mW güç ve 2–20 saniye ışınlama süresiyle gerçekleştirilmiş, spektrumlar Opus yazılımı kütüphanesi ve çevrimiçi mineral veri tabanlarıyla yorumlanmıştır. Aynı numuneler XRD analizi için taş havanda öğütülerek 0,5 mm çaplı platformlara yerleştirilmiş; analizler Cu tüplü Rigaku Miniflex II difraktometre ile 30 kV, 15 mA, 1°/dk (2 θ) hız ve 2°–60° aralığında yapılmıştır. Sonuçlar, cihaz yazılımındaki pigment ve korozyon kütüphaneleriyle karşılaştırılmıştır.

Element Analizi. Element analizi, tahribatsız el tipi X-ışını floresan (p-XRF) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle ölçüm alanındaki elementler niteliksel olarak saptanabilir, dağılımları ise yarı-nicel olarak değerlendirilebilir (Dardeniz & Öztan, 2020, s. 856; Yüceil, 2020, s. 87). Analiz öncesinde toprak ve gevşek korozyon tabakası temizlenmiş, ancak koruyucu patina tabakası korunarak ölçümler bu yüzey üzerinden yapılmıştır (Şekil 3d). Her ölçüm 1 cm²'lik alanı temsil etmektedir. Ölçüm sonrası bu alana kâğıt bant yapıştırılarak numaralandırılmış ve bu numaralar ölçüm konumlarının takibinde kullanılmıştır (Şekil 3c).

Analizlerde, Ag tüplü Olympus Innov-X Delta Standard 2000 p-XRF cihazı kullanılmış, 316 çeliği ile kalibre edilmiştir. Ölçümler “Alloy Plus Mode” modunda yürütülmüş, her biri 30 saniyelik 13 kV ve 40 kV'luk iki aşamalı ışınlamayla toplam 159 ölçüm yapılmıştır. Ön testler (Reading#2–15), 15–20 saniye içinde kararlı sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

Spektrumlar, Olympus Delta yazılımı ile değerlendirilip dışa aktarılmıştır (Şekil 10). Veri setinden deneme, kalibrasyon, antik onarım ve donatı noktaları ile minör elementler çıkarılmış; sadece Cu, Sn ve Pb majör elementleri değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçüm numaralarına ait bölgesel kategoriler de veri tablosuna eklenmiştir: torso (TOR), baş (HED), sağ kol (ARMR), sol kol (ARML), sol bacak (LEGL), sağ bacak (LEGR), ayaklar (FOOT), köpek (DOG) ve kaide üst kaplaması (PEDF).

Ölçümlerin terkipli veri (compositional data) yapısına uygun olarak, toplamdan minör element oranları çıkarılmış ve Cu, Sn, Pb yüzdeleri yeniden ölçeklendirilmiştir (van den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2013, s. 1–2). Bu veriler, farklı bir çalışmada istatistiksel analiz ve üretim hatalarıyla ilişkili hipotez testleri için kullanılacak; bu çalışmada detaylı olarak ele alınmayacaktır.

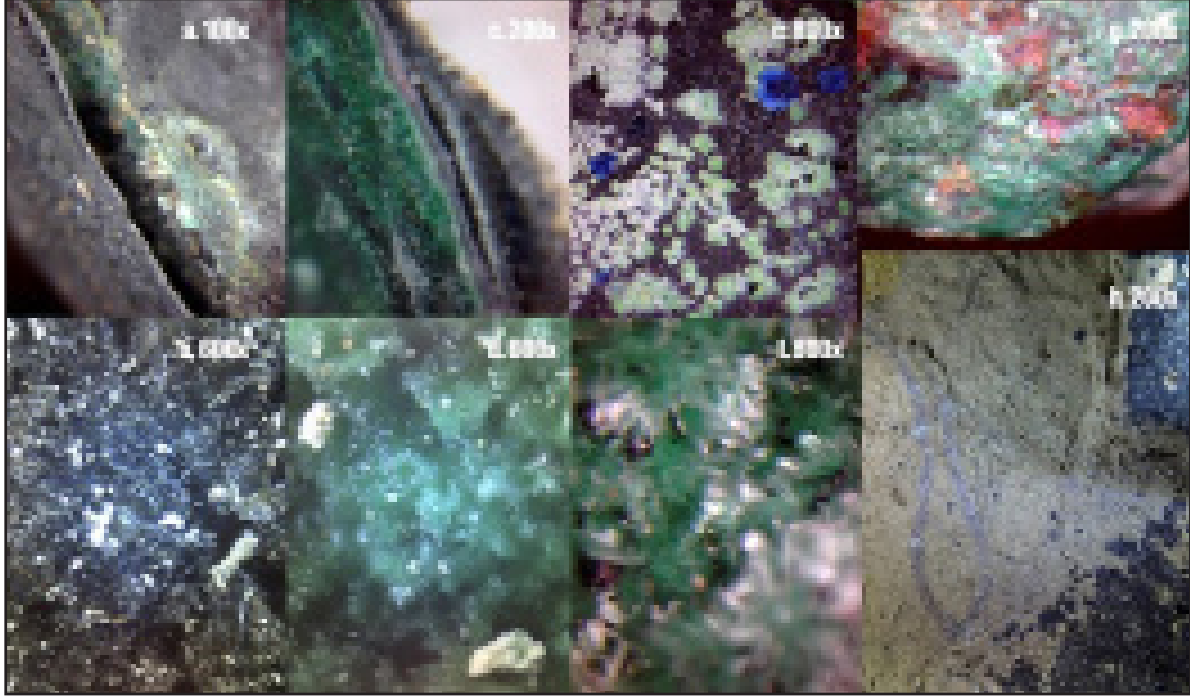
Bulgular

Yüzey Özellikleri ve Korozyon Formasyonu

Heykel yüzeyinde, kabuklanma eğilimi gösteren çok katmanlı korozyon tabakaları tespit edilmiştir (Şekil 4a). Bu tabakalar siyah-kahverengi, kırmızı-kahverengi (Şekil 4g), yeşil-mavi ve mat siyah tonlarda metal oksitlerden oluşmaktadır (Şekil 4b–e). Yüzeye en yakın siyah-kahverengi tabaka patina filmi olarak tanımlanırken (Şekil 5a), üzerindeki kırmızı-kahverengi tabaka heterojen kalınlıkta ve yer yer sınırlı alanlarda görülmektedir. Açık yeşil-mavi mineraller nodüler/karnabahar formunda (Şekil 4e), koyu yeşil tonlular ise konik kristal biçiminde oluşmuştur (Şekil 4f). Yüzeyin bazı bölgelerinde çukurcuk tipi korozyon gelişimi de belgelenmiştir (Şekil 5b).

Şekil 4

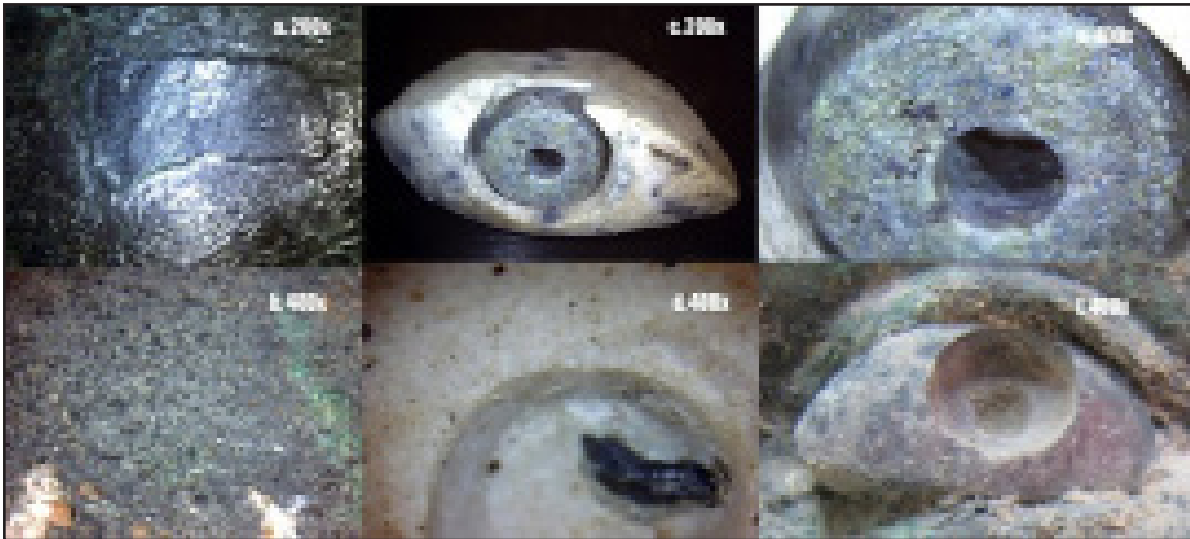
USB Mikroskop Görüntüleri ile Korozyon Oluşumlarının Belgelenmesi



Not. (a) Korozyon katmanının kabuk halde ayrılması, (b) en dış katmandaki siyah renkli korozyon, (c) çok katmanlı kabuk yapısı, (d) iç katmanda yer alan yeşil renkli korozyon formasyonu, (e) siyah katman üzerinde nodüler-karnabahar korozyon formasyonu, (f) konik kristal formu korozyon oluşumu, (g) kırmızı-kahve ve yeşil korozyon dönüşümü ve (h) çekirdek kil kalıntısında korunmuş organik katırlara ait izler görülmektedir.

Şekil 5

USB Mikroskop ile Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi



Not. (a) Patina seviyesinde gözlemlenebilen yama bölgesi (b), yanak bölgesinde meydana gelen çukurcuk korozyonu, (c) heykelin içinden çıkan sağ göz akı ve iris, (d) sağ göz akı detay, (e) iris detayı, (f) sol göz akı detayı.

Raman analizlerinde, koyu yeşil konik kristallerde malahit $[\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3]$ mineraline ait karakteristik pikler gözlemlenmiştir. XRD analizine göre, korozyon kabuğu numunesi (Şekil 3c) %81 tenorit (CuO), %7,5 kasiterit (SnO_2), %7 diğer kalay mineralleri, %1,7 kalkopirit (CuFeS_2) ve %2,7 minör mineraller içermektedir.

Heykelin göz aklarında farklı derecelerde lekelenme saptanmıştır. Sol göz akı belirgin şekilde renk değiştirmiş (Şekil 5f), gövdeden çıkarılan sağ göz akı ise iyi korunmuştur (Şekil 5c-d). Sol gözde yapılan element analizinde Cu ve Fe varlığı, lekelenmenin bakır oksitler ile gömü ortamındaki demir oksitlerden kaynaklandığını göstermektedir.

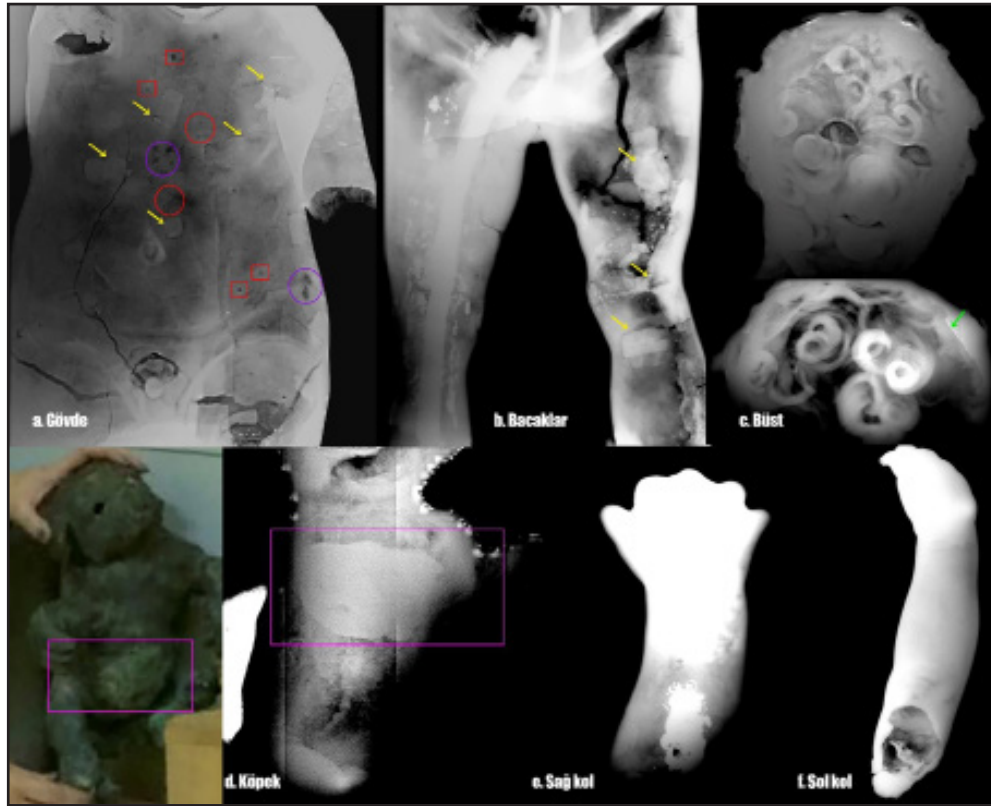
Heykelin İç Yapısına İlişkin Bulgular

Heykelin sol bacağının içinde kil dolgu olduğu ve bunun ortasında metal bir donatı bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 6b). Gövde bölümünde (torso ve bacaklar) ise farklı boyut ve biçimlerde çok sayıda dörtgen yama belirlenmiştir (Şekil 6).

Radyografik görüntülerde cidar içindeki gaz kabarcıkları kırmızı daire, yüzeye yakın küçük kare yamalar kırmızı kare ile işaretlenmiştir (Şekil 6a-b). Geniş dörtgen yamalar sarı okla, yoğunluğu düşük ve metal kaybının ileri düzeyde olduğu alanlar mor daireyle gösterilmiştir. Bu bölgeler, delinme riski taşıyan yapısal zayıflıklar olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 6

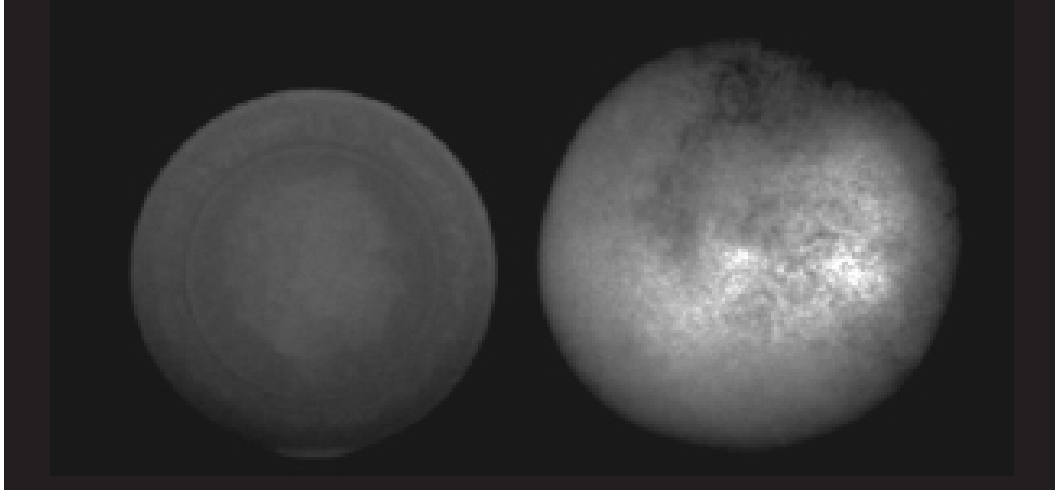
Heykel Parçalarının Radyografi Görüntüleri ve Tespit Edilen Üretim Kusurları



Not. (a) Torso, (b) bacaklar, (c) büst parçalarının dijital radyografi görüntülerinde gaz kabarcıkları (kırmızı daire), tamir gören kabarcıklar (kırmızı kare), derin korozyon oluşumları (mor daire), antik yama (sarı ok) ve sonradan eklendiği sanılan dekoratif parça (yeşil ok), köpeğin (d) karın bölgesinde beliren yoğun alan (pembe dörtgen) ve kollar (e-f).

Şekil 7

Heykelin İçinden Çıkan Daire Formlu Objenin Radyografi Görüntüsü



Not. Sağda obje, solda güncel 1 TL gösterilmektedir

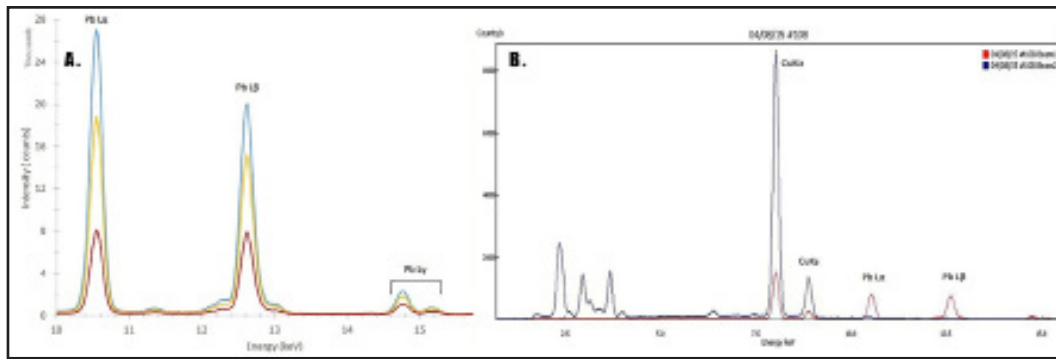
Köpeğin karın bölgesinde, çevreye kıyasla daha yoğun bir malzeme tabakası saptanmış ve pembe dörtgenle belirtilmiştir (Şekil 6d). Saç kıvrımlarında sonradan yapılmış eklemelere işaret eden yapısal anomaliler gözlenmiştir (Şekil 6c). Sağ kolun içi dolu bölümünde ise parlaklık gösteren tekil bir yama uygulaması tespit edilmiştir (Şekil 6e).

Element Dağılımına İlişkin Bulgular

Yüzeysel element analizinde nitel olarak atom ağırlığı sırasına göre (hafiften ağıra artan) Si, P, S, Fe, Ni, Cu, Zn, Sn, Sb ve Pb elementleri tespit edilmiştir. Cu, Sn ve Pb alaşım bileşenleri olarak değerlendirilmiş; heykelin kurşun katkılı bronzdan üretildiği anlaşılmıştır. Korozyon karakterizasyonuna dayanarak, Cu ve Sn elementlerinin yüzeyde zenginleştiği, dolayısıyla XRF ile bu elementlerin gerçek alaşım oranlarından yüksek ölçüldüğü öngörülmüştür. Öte yandan, yüzeyde Pb oksitlerine dair bulgu saptanmamıştır; bu nedenle Pb'nin patina formasyonu ile değil metalik yapı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. XRF spektrumları da Pb'nin patina altında bulunduğunu desteklemektedir (Şekil 10b).

Şekil 10

Pb La/L β Piklerinin Standart Nominal Yüksekliği



Not. (a, mavi çizgi), zayıflama olayı nedeniyle La/L β piklerinin azalan (a, sarı çizgi) ve eşitlenen yüksekliğini (a, kırmızı çizgi) belirten spektrum gösterimi (Bezur ve ark., 2020, s. 75), Çocuk heykeli element analizinden elde edilen spektrum örneğinde eşitlenen Pb La/L β pik yükseklikleri (b).

Spektrum grafiklerinde, Pb'ye ait $L\alpha$ ve $L\beta$ pikleri incelenmiştir. Normalde bu oran 100:66 (yaklaşık 3:2) iken (Şekil 10a), çocuk heykelinde tüm spektrumlarda pik yükseklikleri eşit (1:1) bulunmuştur (Şekil 10b). Bu durum, $L\alpha/L\beta$ evrilmesi olarak bilinen (Bezur ve ark., 2020, s. 75–76) ve Pb'nin yüzeyde bulunmadığını gösteren spektral bir zayıflama olayıdır. Bu olgunun nedeni, hem gelen X-ışını fotonlarının hem de geri dönen Pb floresans sinyalinin, Cu içeren patina filmi tarafından soğurulmasıdır. Enerji farkı nedeniyle Cu, Pb $L\alpha$ fotonlarını (10.55 keV) $L\beta$ 'ye (12.61 keV) kıyasla daha fazla absorbe etmektedir. Sonuç olarak, Pb $L\alpha$ pik yüksekliği düşerek $L\beta$ ile eşitlenmiştir (Şekil 10b). Bu bulgular, analiz sonuçlarına yansıyan Pb'nin heykel yüzeyindeki göreceli dağılımının metalik alaşım ile ilişkilendirilebileceğini, dolayısıyla alaşım heterojenliği ve bunun heykelin mekanik dayanımı ve korunmuşluk durumu ile ilişkilendirilebileceğini düşündürmektedir. Alaşımın homojen/heterojen yapısına dair istatistik analizler yürütülmüş olup bu sonuçlar başka bir yayında sunulacaktır.

Değerlendirme ve Tartışma

Üretim Süreci

Tespit edilen kil çekirdek, heykelin kayıp mum (*cire perdue*) tekniğiyle üretildiğini göstermektedir. Bu yöntemin başlıca avantajları, daha az metal kullanımıyla ağırlığın ve ham madde maliyetinin azalması, taşınabilirliğin kolaylaşması ve yüzey kusurlarının en aza indirilmesidir. Masif dökümde sık rastlanan gaz sıkışması ve büzülme kaynaklı kusurlar, kil çekirdekli dökümde sıvı alaşımın katılaşma sürecinde açığa çıkan gazların kil tarafından emilmesiyle azaltılmaktadır. Ayrıca kil çekirdeğin eşit cidar kalınlığı oluşumuna katkı sağladığı bilinmektedir (Basset, 2008, s. 11).

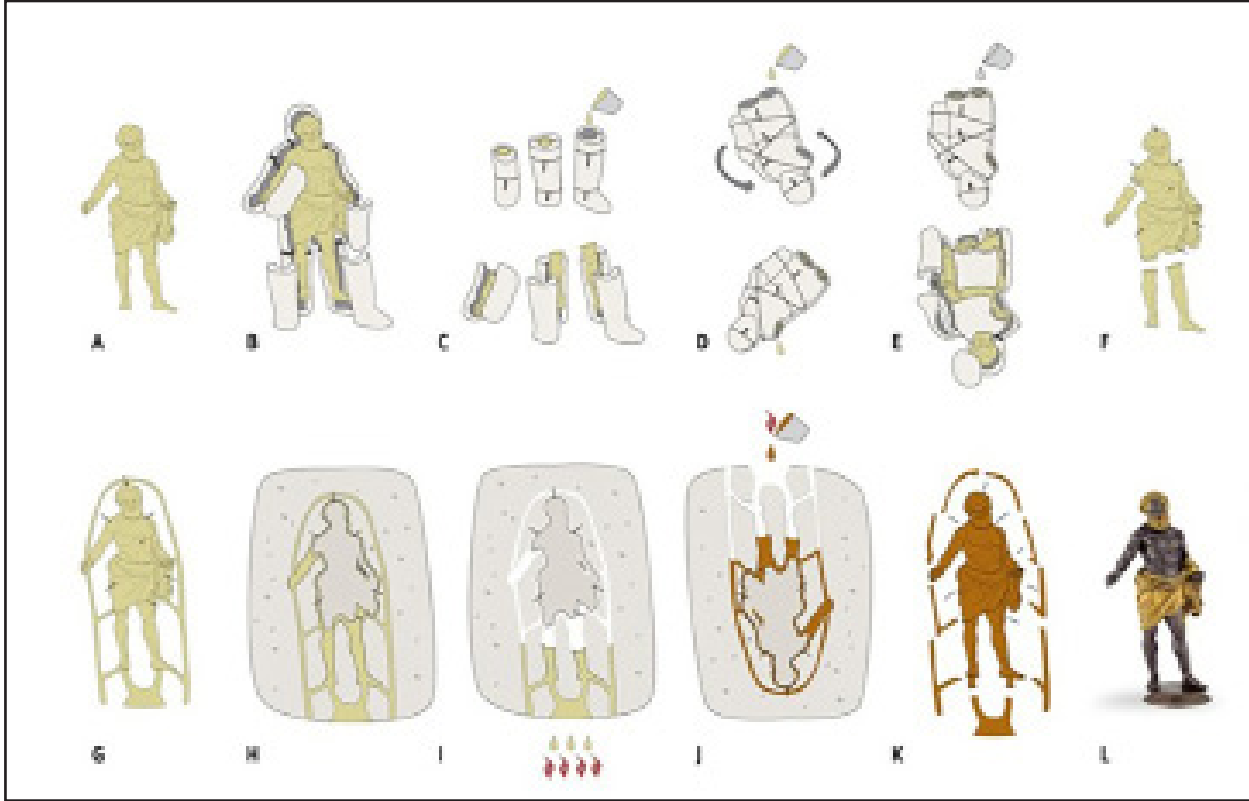
Kayıp mum yöntemi, direkt ve indirekt olmak üzere iki farklı teknikte uygulanır. Direkt yöntemde, metal bir iç destek üzerine kilden ana model oluşturulur (Şekil 9a-b), bu model balmumu ile kaplanır; sıva kalınlığı hedeflenen cidar kalınlığını belirler (Şekil 9c). Üzerine detaylar işlenerek döküme hazır hâle getirilir (Mattusch, 1975; Basset, 2008; Giumlia-Mair, 2012; Yüceil, 2016, s. 36).

İndirekt yöntemde ise mevcut bir modelden kalıp alınır (Şekil 8a-b); bu kalıbın içi balmumu ile sıvanır ve iç kısım sıvı kil ile doldurulur (Mattusch, 1975; Basset, 2008; Giumlia-Mair, 2012; Şekil 8c-d-e). Direkt yöntemde kil, ana modeli oluştururken indirekt yöntemde kalıp içi dolgu işlevi görür. Ayrıca, direkt yöntemle heykel tek parça olarak dökülebilirken (Şekil 9), indirekt yöntemde parçalar ayrı dökülüp birleştirilir (Azéma ve ark., 2011, s. 71, şekil 8).

Her iki yöntemde de mum model sonrası üretim adımları benzerdir. Gaz sıkışmasını önlemek için hava tahliye kanalları açılır (Şekil 8g); modelin dışına sert kil ceket, içteki çekirdek modele bağlantı sağlayacak donatılar yerleştirilir (Şekil 8h). Isıl işlem ile kalıp dayanımı artırılır, nem uzaklaştırılır ve mum eriyerek döküm boşluğu oluşturur (Şekil 8i). Bu boşluğa sıvı metal dökülür ve katılaşması beklenir (Şekil 8j). Sonrasında ceket kırılır, döküm yollukları kesilerek izleri törpülenir ve yüzey işlemleriyle heykel tamamlanır (Basset, 2008; Giumlia-Mair, 2012, şekil 8l).

Şekil 8

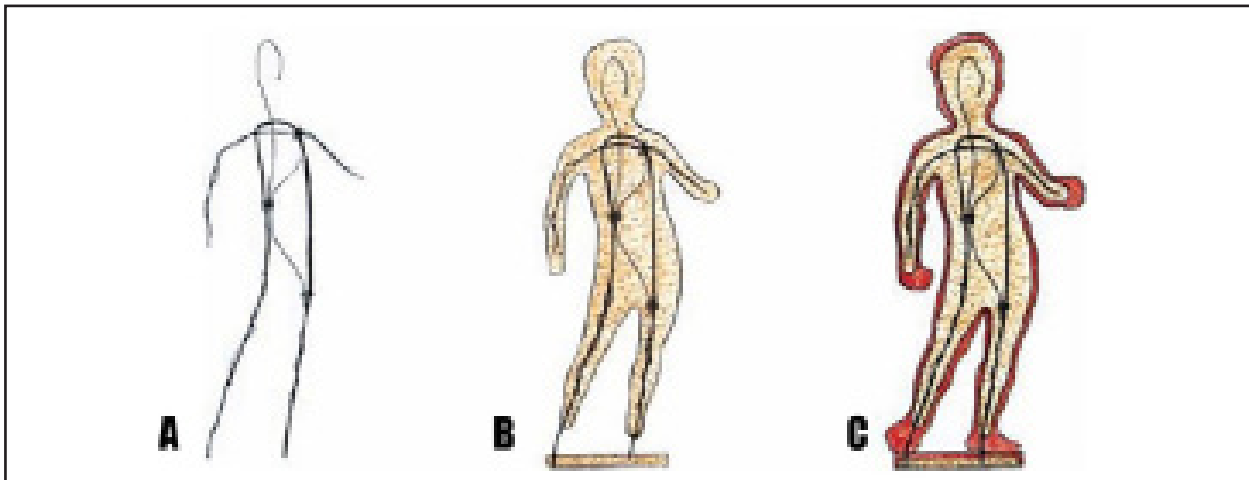
Antik Yunan Indirekt Döküm Yöntemiyle Heykel Üretim Aşamaları



Not. Çizim, Maria, 2018'den alınmıştır.

Şekil 9

Direkt Döküm Yöntemle Heykel Üretim Aşamaları



Not. Çizim Basset, 2008, s. 13'den alınmıştır.

Sol bacadaki çekirdek kil içinde tespit edilen metal destek çubuğu (Şekil 6b), bu bölümde kilin ana model olarak kullanıldığına ve dolayısıyla gövdenin direkt yöntemle tek parça döküldüğüne işaret edebilir. Basset'in aktardığı direkt yöntemde (2008, s. 13, şekil 9a), iç donatılar, kil modeli bütünüyle destekler. Ancak çocuk heykelinde süreklilik gösteren bir iç donatıya rastlanmamıştır. Bu nedenle indirekt yöntemle kalıbı alınan sol bacağın içine heykelin ağırlık merkezini desteklemek amacıyla sonradan donatı yerleştirilebileceği de düşünülmektedir. Kollar ve başta görülen kaynak izleri, bu parçaların ayrı kalıplarda üretilip sonradan monte edildiğine işaret etmektedir. Dolayısıyla heykelin indirekt yöntemle üretimi daha olası görülmektedir.

Torso ve bacaklardan oluşan ana gövdenin, yüzeyde az girinti-çıkıntıya sahip olması ve yapısal bütünlüğü açısından tek parça dökülmesi özellikle tercih edilmiş olmalıdır. Öne eğimli duruş nedeniyle bel ve bacaklara binen yük, kaynak gibi zayıf birleşim noktalarıyla taşınamayacak düzeydedir. Buna karşılık, kollar, baş ve köpek parçalarının çok parçalı üretilmesi, heykelin karmaşık formuyla ilişkilidir. Eğimli duruş, kollar ile gövde arasında oluşan boşluklar ve köpeğin dinamik pozisyonu göz önüne alındığında bu tür formların hava kanalları oluşturularak tek parça dökülmesi teknik olarak mümkün görünmemektedir. Bu nedenle bu karmaşık parçalar ayrı kalıplarda hazırlanarak ayrı ayrı dökülmüş olmalıdır.

Güncel arkeometalürjik çalışmalar, Roma ve Yunan heykelleriyle birlikte Yemen Bölgesi'nde MÖ 7. yy – MS 3. yy arasına tarihlenen eserlerde, “eriyik kaynağı” yönteminin kullanıldığını ortaya koymuştur (Azéma ve ark., 2011; Jett ve ark., 2012). Bu yöntemde, birleştirilecek iki parça arasına heykelin alaşımına benzer bir ara eritken dökülür. Uygulama, birleşim kenarlarının hazırlanışına göre ikiye ayrılır: İlki, cidar kalınlığının yarısına kadar kesilerek eritkenin geçeceği bir kanal oluşturulması; ikincisi ise parçalar arasında boşluk bırakılarak eritkenin doğrudan bu boşluğa dökülmesidir. Bu ikinci yöntemde, iç bölgelere alaşım sızıntısı görülebilir (Azéma ve ark., 2011, s. 73).

Çocuk heykelinde gözlemlenen kaynak izleri, içe doğru sızmış eriyik alaşım izleriyle uyumludur. Cidar kesimi ya da inceltme izine rastlanmadığından, ikinci yöntemin kullanıldığı düşünülmektedir. Modern metalürjide eritme kaynağı (fusion welding) iki parçanın birleşmesi için malzemenin yerel olarak eritilip ortak bir sıvı havuzu (weld pool) oluşturulmasına dayanır. Bu havuzun oluşabilmesi için sıcaklığın, bakırın sıvılaştırma sıcaklığını aşması ($T > 1085^{\circ}\text{C}$) gerekmektedir (DeBroy, 1995). Azéma ve ark., antik eriyik kaynaklarında da benzer termal ve kimyasal süreçlerin gerçekleştiğini göstermektedir. Deneysel veriler, ara eritkenin hem dolgu maddesi hem de birleşim yüzeyinde kısmi füzyon sağlayan ısı kaynağı olarak işlev gördüğünü ortaya koymuştur (2011, s. 74).

Ayrıca, birleşim yüzeylerinin oval kesitli olması dikkat çekicidir: baş parçası ense kısmında aşağı yönlü çıkıntı yaparken, kolların kesiti dairesel değil, açılı oval formdadır. Bu form, birleşme yüzeyini genişleterek daha sağlam tutunma sağlamış olabilir.

Üretim Sonrası Tadilat Süreci

Dökümle üretilen eserlerin dayanımı; uygulama yöntemi, alaşımın homojenliği ve işçilik kalitesi gibi faktörlere bağlıdır (Yüceil, 2016, s. 37). Döküm sürecinde, yetersiz alaşım hazırlığı, ince cidar kalınlığı veya kusurlu yüzeyler gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkabilir. En yaygın kusur ise kalıpta sıkışan gazların oluşturduğu kabarcıklar ve yüzey düzensizlikleridir (More ve ark., 2011, s. 292–294).

Radyografi görüntüleri ile cidar içi gaz kabarcıkları, ince çatlaklar ve çeşitli boyutlardaki yama uygulamaları belgelenmiştir (Şekil 6a-b). Özellikle küçük kare kesitli yamalar (Şekil 6a), yüzeydeki oyukların giderilmesine yönelik müdahalelerle ilişkilendirilmiştir. Bu kusurlar şu nedenlerle ilişkilendirilmiştir: (i) kil model veya ceketin nemli olması; (ii) kalıptaki havanın uygun şekilde dışarı atılamaması (aspirasyon yetersizliği); (iii) bronz içinde çözünmüş gazların soğuma sırasında açığa çıkması; (iv) alaşımın yüksek viskoziteye sahip olması (düşük akışkanlık).

Cidardan yüzeye doğru çıkan kabarcıklar nedeniyle oluşan oyuklara yönelik tadilatlar, bu alanlara dörtgen formlar verilerek yama işlemine tabi tutulmuştur. Dörtgen, köşeli geometri sayesinde kusurlu bölgeyle temas yüzeyi artırılarak tutunma mukavemeti güçlendirilmiştir. Benzer formda üretilen yamalar, düzgünleştirilmiş oyuklara çakılarak yerleştirilmiş olmalıdır (Dooijes, 2012). Gövde bölümündeki daha büyük dörtgen yamalar ise (Şekil 6a-b), daha geniş yüzey kusurlarını gizlemek amacıyla uygulanmıştır. Bu kusurlar, belli alanlarda yoğunlaşan oyuk oluşumları ya da sıcak yırtılma kaynaklı yapısal bozulmalarla ilişkili olabilir.

Antik üretimlerde kurşun (Pb), bronz alaşımın erime noktasını düşürmek, akışkanlığını artırmak ve katı halde esneklik kazandırmak amacıyla eklenmiştir (Scott, 1991, s. 24; Yüceil, 2016, s. 28). Ancak Pb, bronz içinde çözünmeyip sıvı eriyik içinde askıda kalır ve pota tabanına doğru çökme eğilimindedir (Scott, 1991, s. 23).

Çocuk heykeli gibi büyük parçaların üretiminde, geniş hacimli potalarda hazırlanan alaşımın iyi karıştırılmaması durumunda Pb konsantrasyonu pota seviyelerine göre değişkenlik gösterebilir. Üst seviyelerde Pb oranının düşmesi, viskozitenin artmasına ve bu da döküm sırasında gaz kabarcığı oluşum riskinin yükselmesine neden olabilir. Nitekim başka bir çalışmada detaylı şekilde anlatılacak olan istatistik ve hipotez testleriyle belirlenen heterojen Pb dağılımı, cidarda görülen kabarcıkların oluşumuna katkı sağlamıştır.

Radyografik görüntülerde tespit edilen kabarcıkların, Pb oranı daha düşük olan torso bölgesinde yoğunlaşması dikkat çekicidir. Döküm işleminin baş aşağı pozisyonda gerçekleştirildiği varsayılırsa (Şekil 8j), potanın üst seviyesindeki daha az Pb içeren eriyik alaşımın torsoya denk gelmiş olması muhtemeldir. Bu durum, döküm öncesinde alaşımın yeterince homojen karıştırılmadığını düşündürmektedir.

Heterojen Pb dağılımının etkileyebileceği bir diğer unsur, heykelin ağırlık merkeziyle ilgili olası dengesizliktir. Element analizleri, ağırlığın yoğunlaştığı ön bölümdeki kollar ve köpekteki Pb oranının, torso ve bacaklara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yüksek özgül ağırlığa sahip kurşun (7.4–7.6 g/cm³), tasarım aşamasında öngörülen ağırlık dağılımının, döküm sonrası değişmesine neden olmuş olabilir. Bu durum, ağırlık merkezinin kaymasına ve heykelin kaide kısmına monte edilen demir çubuğun kullanıma gerekliliğine işaret etmektedir.

Jett ve ark. (2012), çekirdek kilin genellikle döküm sonrası bilinçli şekilde boşaltıldığını belirtmektedir. Bu uygulamanın temel gerekçeleri, ağırlığın azaltılması ve kilin hidrofilik yapısına bağlı genleşme riskinin, çatlak oluşumuna yol açmasını engellemektir (Jett ve ark., 2012, s. 232). Literatürde, 1:1 ya da daha büyük ölçekli heykelerde yer yer korunmuş kil çekirdeklere rastlanmakla birlikte, bu çekirdeklerin ne ölçüde ve hangi aşamada boşaltıldığına dair bilgiler sınırlıdır (Leoshko & Reedy, 1994; Lombardi, 2002; 2009). Lombardi ve ark. (1998), MS 430–470'e tarihlenen iki bronz heykelde, iç korozyon riskini azaltmak amacıyla geniş ölçüde korunmuş kil çekirdeğin konservatörlerce boşaltıldığını aktarmaktadır.

Çocuk heykelinde, kil çekirdeğin bulunduğu köpek, sağ kol ve sol bacak bölgelerinin diğer bölümlere göre daha iyi korunduğu gözlemlenmiştir. Ağırlık merkezine etkisine rağmen, köpeğin çekirdek kilinin boşaltılmamış olması dikkat çekicidir. Jett ve ark. (2012) tarafından öne sürülen, kilin hidrofil yapısına bağlı genleşme riskine yönelik sav, özellikle sağ bacak ve baldırda gelişen dikey çatlağın ilerlemesinin önlenmesi bağlamında anlamlıdır.

Bu durum, sağ baldırda yoğunlaşan dörtgen kesitli yama uygulamalarıyla birlikte değerlendirildiğinde (Şekil 8b), çekirdek kilin boşaltılmasının Antik Dönem onarımlarıyla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Öte yandan, yama izine rastlanmayan sağ omuz ve sol bacakta çekirdek kilin yerinde bırakılması, boşaltma işleminin yalnızca müdahale gerektiren hasarlı bölgelere uygulandığını desteklemektedir.

Torso bölgesindeki yamalar, döküm sonrası yapılan tadilatlarla ilişkilendirilebilir. Ancak bacaklardaki yamaların ne zaman uygulandığı kesin olarak belirlenememektedir. Hasar, üretim aşamasında meydana gelmiş ve atölyeden çıkmadan önce onarılmış olabilir ya da heykel, kullanım sürecinde bir veya birden fazla kez hasar görüp sonradan onarılmış olabilir. Ayrıca, saç kıvrımlarında tespit edilen ekleme, ya üretim sırasında oluşan bir kusurun giderilmesi amacıyla ya da ilk tasarımdan farklı bir estetik etki yaratmak için yapılmış da olabilir.

Antik Dönem Tadilatları

Kaideye monte edilen demir donatının, ağırlık merkezi sorununa bağlı olarak heykelin öne devrilmesini önlemek amacıyla yerleştirildiği düşünülmektedir. Ancak bu uygulamanın hangi dönemde yapıldığına dair kesin bulgular bulunmamaktadır. Donatı, üretim sürecinde yaşanan dengesizliklerin fark edilmesiyle atölyeden çıkmadan önce eklenmiş olabilir ya da heykelin kullanım sürecinde, sonradan yapılan bir müdahale sırasında monte edilmiş olması da olasıdır.

Kaide altındaki dörtgen formlu donatılar, heykelin kullanım döneminde daha geniş bir kaideye sabitlenmiş olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Donatıların ucunda meydana gelen deformasyon bir çakma uygulaması ile ilişkilendirilmiştir. Bu işlem, kurşun kaidenin alt kısmına plaka formunda taş vb. başka bir destek malzemesinin bu donatılar aracılığıyla sabitlenmesi için gerçekleştirilmiş olabilir. Donatıların kurşun plakaya olan yakınlığı göz önüne alındığında, taş plakanın ince olduğu değerlendirilmiştir. Kullanım döneminde, bu taş vb. plakanın da daha geniş ve yüksek bir kaideye sabitlenmiş olması muhtemeldir.

Kurşun plaka altındaki donatılardan biri, öne eğilme hareketiyle uyumlu deformasyonunun yarım daire merkezine denk gelmektedir (Şekil 2b). Bu ilişki, deformasyonun heykelin kendiliğinden düşme ya da sabitlenmiş olduğu zeminden sökülmesi sırasında meydana gelmiş olabileceği şeklinde yorumlanabilir.

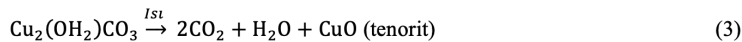
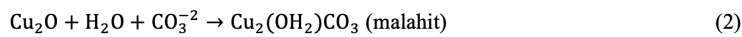
Çocuk ve köpeğin sağ gözlerinin aynı anda yerinde olmaması, rastlantısal bir deformasyon olabileceği gibi, bilinçli bir tahribat (vandalizm) yönelimine de işaret edebilir. Gövde içinde keşfedilen el aletinin, antik dönem işlemleri sırasında kazara düşmüş olabileceği değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, sikke benzeri objenin de onarımlar sırasında iç kısma istemeden girmiş olabileceği düşünülmektedir. Ancak bazı uzman görüşleri, bu nesnenin üretim dönemini belgelemek amacıyla heykelin içine bilinçli olarak yerleştirilmiş olabileceğini öne sürmektedir. Objeye “sikke benzeri” denmesinin nedeni budur. Ne var ki, yüzeyinin korozyon nedeniyle okunamaz durumda olması (Şekil 7), hem tanımlamayı hem de varlık nedenini kesin olarak belirlemeyi engellemektedir.

Gömü Süreci

Doğadan cevher olarak elde edilen metal, saflaştırılıp yükseltgendikten sonra, doğal halinde bulunduğu daha kararlı mineral formuna geri dönme eğilimi gösterir (Yüceil, 2016, s. 42). Bu süreç, yani korozyon, metalin nem, oksijen ve atmosferik gazlarla ilk temasıyla birlikte kullanım döneminde başlar. Ancak oluşan korozyon ürünleri sabit değildir; oksitleyici etkenlerin türü ve konsantrasyonundaki değişiklikler, hem sürecin hızını hem de ürünlerin yapısını dönüştürebilir.

Korozyon ürünleri oluşum biçimlerine göre üç grupta incelenir: epitaksiyel, topotaktik ve rekonstrüktif dönüşümler. Epitaksiyel dönüşümde, metal yüzeyinin kristal yapısı ile oluşan oksitlerin kristal yapısı doğrudan ilişkilidir. Örneğin, ilk patina olarak küprit (Cu_2O) oluştuğunda, bu yapı metal yüzeyinin mikro yapısına uygun biçimde gelişerek yüzey özelliklerini korur (1).

Topotaktik dönüşümde, kristal kafes yapısında meydana gelen değişimler nedeniyle, başlangıç ürünü ile dönüşüm sonrası oluşan yapı arasında doğrudan bir yapısal ilişki olmayabilir (2). Rekonstrüktif dönüşümde ise kimyasal reaksiyon sonucu, önceki üründen tamamen farklı kristal yapıya ve bileşime sahip yeni bir korozyon ürünü oluşur (Yüceil, 2016, s. 49–52). Malahitin yüksek ısıya maruz kalmasıyla tenorite dönüşmesi bu sürece örnek olarak verilebilir (3).



Raman spektrumlarında tespit edilen malahit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$), bakır oksit mineralleri içeren tabakanın üzerinde oluşmuştur. Korozyon kabuğunun çok katmanlı yapısı (Şekil 4b), farklı korozyon ürünleri arasında gerçekleşen dönüşüm sürecine işaret etmekte ve bu yapı, topotaktik sürecin doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Öte yandan, XRD analizlerinde tespit edilen tenoritin (CuO) kendiliğinden oluşumu yaygın bir durum değildir. Atmosferik ortamda yavaşça ısıtılan bakırda, önce küpşit filmi oluşur; bu film kalınlaştıkça rengi koyulaşır ve üzerinde siyah tenorit lekeleri belirir. Film kalınlığı girişim (interference) renk aralığını aştığında, siyah tenorit tabakası tüm yüzeye yayılabilir. Bu nedenle, patina bileşeni olarak tenoritin varlığı genellikle eserin gömü öncesi ya da gömü sırasında ısıya maruz kaldığını göstermektedir (Scott, 1997, s. 97).

Heykelin bulunduğu tabakada yangın izlerine rastlanması, rekonstrüktif korozyon sürecinin bu yanma olayıyla tetiklenmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ancak kurşun kaideye herhangi bir yangın kaynaklı deformasyon gözlenmemesi, ortam sıcaklığının kurşunun erime noktası olan $327,5\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmadığını göstermektedir. Isının etkisiyle heykel yüzeyinde oluşan metal oksit katmanlarının, ısı genleşme farkları nedeniyle yüzeyden kabuk şeklinde ayrıldığı tahmin edilmektedir. Bu kabuklanma (Şekil 3a), gömü ortamındaki kirleticilerin metal yüzeye daha kolay ulaşmasına ve korozyonun döngüsel biçimde ilerlemesine zemin hazırlamış olabilir.

Metallerin korozyon sürecinde taş gibi gözenekli malzemelerle temas etmesi, bu malzemelerde renk değişimi (lekelenme) oluşturabilir. Lekelenmenin oluşumu ve şiddeti, taşın gözenekliliğine, bakır bileşiklerinin çözünme özelliklerine ve gömü ortamının çözücülük kapasitesine bağlıdır. Demir oksitlerin aksine, bakır korozyon ürünleri taş matrisinde parçalanma veya tozlaşma gibi yapısal bozulmalar oluşturmaz (Macchia ve ark., 2011, s. 1300).

Göz akı parçalarında gözlenen farklı derecelerdeki lekelenme (Şekil 5c-d-f), sol göz akının korozyonla temas süresinin sağ göze kıyasla daha uzun olduğunu göstermektedir. Sağ göz akı, gömü sürecinde kirleticilerden izole kalmış görünmektedir.

Ayrıca, bronz iris parçasında gözlenen yüzeysel korozyon yapısı, heykel genelindeki korozyondan farklıdır (Şekil 5c-e). Bu parçanın oksitleyici kontaminantlarla yoğun bir temas yaşamadığı anlaşılmaktadır. Yüzeyinde yangına bağlı deformasyonun bulunmaması ise bu parçanın heykelin maruz kaldığı yangından etkilenmediğine işaret etmektedir. Bu bulgular, hem sağ göz akı hem de iris parçasının yangın ve gömü süreçlerinden önce heykelin içine düşmüş olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç

Bu çalışma, Bursa ili Mudanya ilçesinde yer alan Myrelia/Apameia antik yerleşiminde ele geçen bronz çocuk heykelinin üretim teknikleri, yapısal bileşimi ve bozulma süreçlerini disiplinler arası arkeometrik yöntemlerle inceleyerek çok boyutlu bir teknik değerlendirme sunmuştur. Çalışmada, X-ışını radyografisi, taşınabilir XRF, XRD, Raman spektroskopisi ve mikroskobik analizler kullanılarak hem üretim fazına hem de kullanım ve gömü sonrası bozulmalara ilişkin veriler elde edilmiştir.

Heykelin sol bacağında tespit edilen kil çekirdek ve metal donatı, gövde bölümünün doğrudan modelleme ile tek parça döküldüğünü göstermektedir. Baş, kollar ve köpek gibi karmaşık formlar ise indirekt yöntemle ayrı kalıplarda dökülmüş ve sonrasında eriyik kaynakla birleştirilmiştir. Radyografik analizlerde birleşim yerlerinde cidar inceltmesi bulunmaması, bu bölgelerde dolgu tipi kaynak kullanıldığını işaret etmektedir. Oval kesitli birleşim noktaları, birleştirilen parçalar arasında mekanik kilitlenme yüzeyi sağlayarak kaynak mukavemetini artırmıştır.

Taşınabilir XRF analizleri, alaşımda yoğunluklu olarak Cu-Sn-Pb bileşimine işaret etmiş; özellikle Pb'nin asimetric dağılımı, üretimde kullanılan geniş hacimli döküm potasında homojen karıştırma eksikliğini göstermiştir.

Pb konsantrasyonundaki düzensizlik, sıvı metalin viskozitesini bölgesel olarak etkileyerek, gaz kapanımı (gas entrapment) ve cidarda tespit edilen boşluk/kabarcık oluşumlarıyla ilişkilendirilmiştir. Döküm kusurlarının yoğunlaştığı bölgelerde, dörtgen kesitli yama uygulamaları ile lokal tamiratlar gerçekleştirilmiştir. Bu yamaların şekli, mekanik tutunma yüzeyini maksimize edecek biçimde tasarlanmış ve dövme işlemiyle cidar yüzeyine adapte edilmiştir.

Raman ve XRD analizleri, heykelin yüzeyinde çok katmanlı ve mineralojik olarak evrimleşmiş bir korozyon yapısı olduğunu göstermiştir. Tespit edilen malahit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$), küpşit (Cu_2O) ve tenorit (CuO) eş zamanlı varlığı, gömü öncesi ve sırasında farklı termokimyasal ortamların etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle tenorit oluşumu, patinanın yüksek ısı etkisine ($\geq 300^\circ\text{C}$) maruz kaldığını düşündürmekte, bu da kazı alanında belgelenmiş olan yangın olayıyla doğrudan ilişkilendirilmektedir. Öte yandan heykelin kaidesindeki kurşun dolgunun erimeden korunmuş olması, yangın sıcaklığının kurşunun erime noktasını geçmediğine işaret etmiştir. Bu bilgilerden hareketle, yangın tabakasında sıcaklığın $300\text{--}327^\circ\text{C}$ aralığında olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Yangın nedeniyle ısı genleşme farkları, oksit tabakasında delaminasyon oluşumunu tetiklemiş ve metal yüzeyinin daha ileri seviyede korozyona açık hâle gelmesine neden olmuştur.

Kaide altında yer alan çakma tipi dörtgen donatılar ve kaideye entegre edilen 5 cm çapındaki demir çubuk, heykelin ağırlık merkezi sorununa karşı antik dönemde alınmış bir mühendislik önlemi olarak değerlendirilmiştir. Yüksek özgül ağırlığa sahip Pb'nin gövdeye oranla kollarda ve köpekte daha fazla bulunması, heykelin kütle dağılımını öne doğru kaydırmış ve statik dengeyi bozmuştur.

Heykelin sağ baldırında görülen çatlaklar ve bu bölgede boşaltılmış kil çekirdek alanları, üretim sonrası veya kullanım sırasında yapılmış antik müdahalelerdir. Sağ kol ve baş gibi bazı bölümlerdeki kil çekirdeğin korunmuş olması, onarım faaliyetlerinin yalnızca hasarlı bölgelerde gerçekleştirildiğini ve selektif müdahale pratiğinin varlığını düşündürmektedir. İç yapıdan çıkarılan taş ve bronz göz parçalarının, heykelin üretim sonrası geçirdiği evrelere dair dolaylı kanıtlar sunduğu düşünülmektedir.

Bu araştırma, bronz çocuk heykeli özelinde, antik heykel teknolojilerinin uygulanışı, kaynak yöntemlerinin detayları, malzeme kompozisyonunun yapısal ve mekanik etkileri, korozyon ürünlerinin evrimi ve gömü koşullarının fizikokimyasal etkilerini entegre biçimde ele almıştır. Bulgular, bronz heykelciliğinin üretim organizasyonu ve konservasyon stratejileri üzerine daha geniş çaplı değerlendirmelere zemin hazırlamaktadır.

Kaynakça

- Arıcı, S. (2021). Myrleia/Apameia'dan (Bursa/Mudanya) bir bronz çocuk heykeli. *OLBA*, 29, 227–244.
- Azéma, A., Angelini, F., Mille, B., Framezelle, G., & Chauveau, D. (2013). Ultrasonic phased array contribution to the knowledge of the flow fusion welding process used to make the Roman large bronze statues. *Welding in the World*, 57(4), 477–486. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0039-1>
- Azéma, A., Mille, B., Echegut, P., & De Sousa Meneses, D. (2011). An experimental study of the welding techniques used on large Greek and Roman bronze statues. *The Journal of the Historical Metallurgy Society*, 45(2), 71–80.
- Basset, J. (2008). *The craftsman revealed: Adriaen de Vries, sculptor in bronze* (P. Fogelman, D. A. Scott, & R. C. Schmidtling II, Eds.). Getty Conservation Institute. http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/de_vries_bronze

- Bezur, A., Lee, L., Loubser, M., & Trentelman, K. (2020). *Handheld XRF in cultural heritage*. Getty Conservation Institute.
- Dardeniz, G., & Öztan, A. (2020). Acemhöyük fayans ve frit eserleri üzerine arkeolojik ve arkeometrik değerlendirmeler. *Belleten*, 84(301), 837–886.
- DebRoy, T., & David, S. A. (1995). Physical processes in fusion welding. *Reviews of Modern Physics*, 67(1), 85–112.
- Dooijes, R. (2012). Ancient repairs on bronze objects. *EXARC Journal*, 3. <https://exarc.net/issue-2012-3/ea/ancient-repairs-bronze-objects>
- Giumlia-Mair, A. R. (2012). The technology of bronze statuary. In G. C. Cianferoni, M. Iozzo, & E. Setari (Eds.), *Myth, allegory, emblem: The many lives of the Chimaera of Arezzo* (s. 9–27). Aracne.
- Jett, P., McCarthy, B. E., & Douglas, J. G. (2012). The casting techniques of antique South Arabian large bronze statues. In P. Jett & J. G. Douglas (Eds.), *Scientific research on ancient Asian metallurgy: Proceedings of the fifth Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art* (pp. 225–247). Archetype Publications. <https://doi.org/10.5479/sil.986959.39088016753477>
- Leoshko, J., & Reedy, C. L. (1994). Interdisciplinary research on the provenance of Eastern Indian bronzes: Preliminary findings. *South Asian Studies*, 10(1), 25–35. <https://doi.org/10.1080/02666030.1994.9628474>
- Lombardi, G. (2002). A petrographic study of the casting core of the Lupa Capitolina bronze sculpture (Rome, Italy) and identification of its provenance. *Archaeometry*, 44(4), 601–612. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.t01-1-00088>
- Lombardi, G. (2009). The casting core composition and provenance of the Goljamata Kosmatka (Bulgaria) bronze head. *Journal of Archaeological Science*, 36(2), 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.10.002>
- Lombardi, G., & Vidale, M. (1998). From the shell to its content: The casting cores of the two bronze statues from Riace (Calabria, Italy). *Journal of Archaeological Science*, 25(11), 1055–1066. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0321>
- Macchia, A., Sammartino, M. P., & Laurenzi Tabasso, M. (2011). A new method to remove copper corrosion stains from stone surfaces. *Journal of Archaeological Science*, 38(6), 1300–1307. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.01.005>

Maria, S. G. (2018, May 18). *Bronze in Ancient Greece*. <https://www.perseus.tufts.edu/>

Mattusch, C. C. (1975). *Casting techniques of Greek bronze sculpture: Foundries and foundry remains from the Athenian Agora with reference to other ancient sources* [Yayımlanmamış doktora tezi]. University of North Carolina.

More, A. P., Baxi, R. N., & Jaju, S. B. (2011). Review of casting defect analysis to initiate the improvement process. *International Journal of Engineering TechScience*, 2(4), 292–295.

Scott, D. A. (1991). *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*. Getty Conservation Institute; Archetype Books.

Scott, D. A. (1997). Copper compounds in metals and colorants: Oxides and hydroxides. *Studies in Conservation*, 42(2), 99–100. <https://www.jstor.org/stable/1506620>

Van den Boogaart, K. G., & Tolosana-Delgado, R. (2013). *Analyzing compositional data with R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36809-7>

Yüceil, I. G. (2016). Rezan Has Müzesi Urartu takı koleksiyonuna ait bir grup tunç eserin bozulmalarının araştırılması ve koruma-onarım uygulamaları [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. İstanbul Üniversitesi

Yüceil, I. G. (2020). Topkapı Sarayı Harem Dairesi yaşmaklı altın yaldızlı ocağın teknolojik incelemesi. *RAD - Rölöve Anıtlar Dergisi*, 2, 86–97.