Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367 DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1673079
CITE: Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering 26(2) (2026) 449-462

Kuyumculukta Metal Hamurun Rolü: Isıl İşlem, Mikroyapı ve 3B Kalıplama Uygulamasının İncelenmesi

*Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 11.05.2025
Kabul/Accepted: 27.12.2025
Yayımlandı/Published: 08.04.2026

The Role of Metal Paste in Jewelry: An Investigation of Heat Treatment, Microstructure, and 3D Molding Application

Hakan YAYKAŞLI[1,5*], Alaaddin GÜNDEŞ[2,4], Ahmet BALTACI[2,4], Mustafa KAVGACI[3,5]

[1] *Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan MYO, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye*
[2] *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Kuyumculuk ve Takı Tasarım Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye*
[3] *Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Sağlık Hizmetleri MYO, Optisyenlik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye*
[4] *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bil. ve Müh. Böl., Kahramanmaraş, Türkiye*
[5] *Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme Bil. ve Müh. Böl., Kahramanmaraş, Türkiye*

©2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, kuyumculuk sektöründe kullanılmak üzere değerli metal tozları ve organik bağlayıcılar kullanılarak özel tasarım takı ve süs eşyalarının üretimine olanak tanıyan metal kil hamurları geliştirilmiştir. Metal kil hamurları, saf gümüş tozları hidrometalurji yöntemiyle elde edilmiş, ardından metil selüloz organik bağlayıcısıyla altı farklı metal tozu (saf Ag, 950 Ag, 925 Ag, 900 Ag, Saf Cu ve Bronz) karıştırılarak sinterlenmiş hamurlar üretilmiştir. Bu metal kil hamurlarının mikroyapı özellikleri ve kimyasal bileşimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), Arşimet yoğunluk testi ve X-ışını flüoresans spektroskopisi analizleri kullanılmıştır. Hidrometalurji yöntemiyle üretilen saf gümüş tozlarının parçacık boyutunun 50 mikrondan küçük olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen metal kil hamurlarının XRF sonuçları, kullanılan metal tozlarının stokiyometrik oranlarla uyumlu olduğunu göstermiştir. Bakır katkısının artışıyla metal kil hamurlarının yoğunluk değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Saf metal tozları (gümüş, bakır) ile yapılan bağlayıcılık işlemlerinde metil selülozun daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bakır oranının artmasıyla bağlayıcılık özelliklerinin azaldığı saptanmıştır. 3 boyutlu kalıplar kullanılarak metal kil hamurları tasarımı karmaşık parçaların üretimi başarı ile üretilmiştir. Sonuç olarak, sinterleme sonrası zımpara ve cilası yapılan metal kil hamurları, takı ve hediyelik eşya üretimi için uygun metal form özelliklerini kazanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gümüş metal tozları, Metal Kil Hamuru, SEM, XRF, Kuyumculuk.

Abstract

This study focused on developing metal clay pastes for creating customized jewelry and ornaments in the jewelry business. These pastes are composed of precious metal powders combined with organic binders. The production involved obtaining pure silver powders via hydrometallurgy, which were subsequently mixed with a methyl cellulose binder to produce sinterable pastes. Six different metal powders were utilized: pure silver, 950 silver, 925 silver, 900 silver, pure copper, and bronze. A comprehensive analysis of these metal clay pastes' microstructure and chemical content was conducted using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), Archimedes density testing, and X-ray fluorescence spectroscopy. Hydrometallurgy yielded pure silver powders with particle sizes below 50 microns. XRF results of the obtained metal clay pastes showed that the metal powders used were compatible with the stoichiometric ratios. An inverse correlation was observed between copper concentration and the density values of the metal clay pastes. Methyl cellulose exhibited greater efficiency in binding pure metal powders, specifically silver and copper, with binding characteristics decreasing as copper levels increased. The successful fabrication of intricate components using metal clay pastes and 3D molds was achieved. Consequently, sintered, sanded, and polished metal clay pastes displayed the necessary metallic properties for the creation of jewelry and giftware.

Keywords: Silver metal powders, Metal Clay Paste, SEM, XRF, Jewelry.

1. Giriş

Metal killer, geleneksel metal işleme yöntemleriyle güçlükle elde edilen formların, el aletleri veya kalıplar vasıtasıyla yenilikçi tekniklerle kolayca şekillendirilmesine imkân tanımasıyla sanatçılar ve kuyumcular için cazip bir malzeme haline gelmiştir. Bu malzemeler, mikroskobik değerli metal tozlarının toksik olmayan organik bağlayıcılarla homojen bir şekilde birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Kuyumculukta takı üretim teknikleri alet ve ekipmanların ekonomik olarak maliyeti yüksektir. Metal kil hamurunda kullanılan ekipmanların ekonomik olmasından dolayı tercih edilmektedir (McCreight vd. 2006). Değerli metal kil hamurları üretiminde geleneksel seramik üretim yöntemi kullanılmaktadır. Aynı şekilde değerli metal kil hamuruna istenen şeklin verilmesi sonrasında formun bozulmadan metal haline dönüştürülebilmesi için karışımda bulunan suyun uzaklaştırılması kurutma ve sinterleme gibi ısıl işlemler ile gerçekleştirilmektedir. Kurutma aşamasında fırında 90 °C

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hakan YAYKAŞLI e-posta/e-mail: hakan.yaykasli@istiklal.edu.tr

bekletilerek nemin uzaklaştırılması ve sinterleme aşamasında değerli metal kil hamuru içerisinde bulunan bağlayıcıların, katkıların uzaklaştırılarak metal form elde edilmektedir (McCreight vd. 2006, İnt. Kyn. 1). Kuyumculuk sektöründe tasarımcılar ve imalatçılar, metal kil hamuru ile oluşturacakları ürünlerde üretim kolaylığı ve ekonomik avantajları sayesinde estetik değeri yüksek sanatsal eserin elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Yeşilmen 2018).

Morikava ve arkadaşları 1990 yıllarda Japonya'da kurulan Mitsubishi Materials Corporation firmasında metal tozları ve organik bağlayıcılar kullanarak metal kil hamurunu geliştirmişlerdir. Morikava ve arkadaşları, geliştirdikleri metal kil hamurlarına el ile ve kesici aletlerle şekillendirilebilme özelliği kazandırmışlardır. Ayrıca, metal kil hamurlarının değerli takıların ve dekoratif hediyelik eşyaların süslenmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Kuyumculuk ve takı tasarımı çalışmalarında kullanılmak üzere altın ve gümüş metal tozlarından metal kil hamurları geliştirmişlerdir (McCreight vd. 2006). Son yıllarda metal killeri, sanatsal çalışmalarda detaylandırma ve yenilikçi konseptlerin uygulanması amacıyla giderek yaygınlaşmaktadır. Dünya genelinde Goldie Metal, Hadar's Clay ve Aussie Metal Clays gibi çeşitli firmalar tarafından toz bileşimi halinde sunulan bu hamur killer, ofisler, distribütörler ve çevrimiçi platformlar aracılığıyla kolayca erişilebilir durumdadır (İnt. Kyn. 2-4).

Metal kil hamurları, mikroskobik metal tozu, organik bağlayıcılar, yüzey aktif ajanları, saf su karıştırılarak elde edilmektedir. Metal killerinin üretiminde bulunan nem ve organik bağlayıcılar ısıl işlemle uzaklaştırılır. Ancak, bu ısıl işlem sürecinde kırılma, çatlama veya sinterlenme sırasında modelde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu durum, metal killerinin ısıl işlem protokollerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Mevcut literatürde bu alanda önemli bir boşluk bulunmaktadır. Metal kil hamurlarının ısıl işlem sonrasında formlarında küçülme meydana gelmektedir. Sinterleme sürecinde meydana gelen boyutsal daralma oranının, kullanılan metal tozunun niteliği, içerdiği katkı maddelerinin yüzdesi ve uygulanan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak tipik olarak %5 ila %30 arasında bir küçülme gösterdiği bildirilmektedir (İnt. Kyn. 3-9). Metal kil hamurlarının üretiminde metil selüloz, arap zamkı, guar gam, ksantan gam, jelatin ve agar-agar dahil olmak üzere çeşitli organik bağlayıcılar kullanılmaktadır. Bu bağlayıcılar arasında metil selüloz, ekonomikliği, sağlık açısından güvenilirliği ve üstün bağlayıcı nitelikleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Saf formunda beyazımtırak renkte olan metil selüloz, organik bir madde olup toksikolojik ve alerjenik etkileri bulunmamaktadır; tatsız, granüler veya toz halinde lifli bir yapıya sahiptir. Başlıca gıda sanayisinde (özellikle şarküteri ürünlerinde) ve kozmetik sektöründe uygulama alanı bulan metil selüloz, genellikle viskozite düzenleyici, kristalleşme kontrol ajanı, bağlayıcı, sedimantasyon engelleyici ve yapısal regülatör olarak işlev görmektedir (İnt. Kyn. 10). Metal kil hamuru üretiminde kullanılan metal tozların belirlenmesi ve ekonomik olarak temin edilmesi önemlidir. Metal toz olarak temelde kuyumculuk alanında altın, gümüş ve bakır gibi değerli maden elementleri kullanılmaktadır. Bu değerli metallerin farklı teknikler ile üretimi bulunmaktadır. Kuyumculuk sektöründe saf gümüş elde edilmesinde en çok kullandığı yöntemler arasında hidrometalurjik yöntem tercih edilmektedir. Hidrometalurjik yöntem çevreci, çalışma sisteminin kurulum maliyetlerinin düşük olması, düşük metal içeriğine sahip kaynakların değerlendirilmesine olanak sağlaması bu yöntemin tercih edilmesini sağlamaktadır (Boyl 2022).

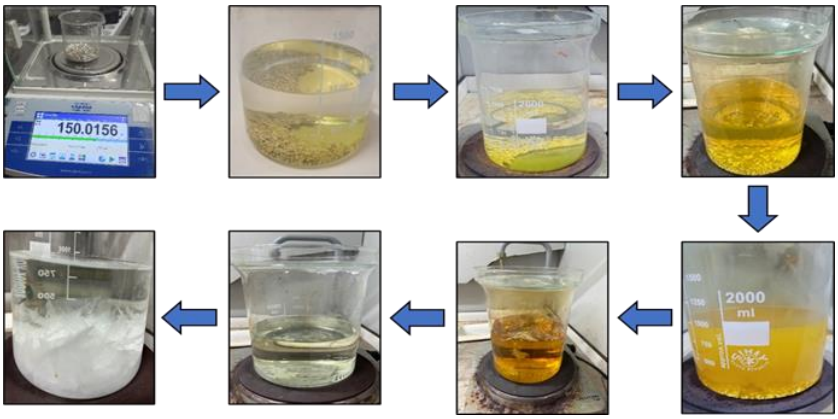
Değerli metal kil alanındaki gelişmeler, farklı alaşımların (örneğin, %75Au - %12,5Ag - %12,5Cu) sentezlenerek sinterleme sonrası renkli kıymetli alaşımlar elde edilebileceğini göstermiştir (Hoshino vd., 1993). Metal kil üretiminde ortalama partikül boyutu 20 mikron altında olan tozlar kullanılmakta olup, sinterleme sonrası gözlenen boyutsal değişimlerin asal metal tozlarının partikül boyutu, şekli, bağlayıcı miktarı ve sinterleme koşullarına bağlı olduğu bildirilmiştir (Hoshino vd., 1994). Yapılan çalışmalarda, değerli metal tozu, nişasta ve selüloz reçine içeren karışımlar için optimum sinterleme sıcaklıkları Altın için 810-990 °C, Gümüş için 710-890 °C, Platin için 1520-1700 °C ve Paladyum için 1300-1480 °C olarak rapor edilmiştir (Yukio vd., 1996). Değerli metal alaşım tozlarının ağırlıkça %0,022-3 selüloz ve %0,02-3 nişasta içermesi gerektiği ve metal kil içeriğinin ağırlıkça en az %78'nin metal tozu olması gerektiği belirlenmiştir (Fujimaru vd., 2001). Gümüş kil ile üretilen metal kil hamurlarının düşük sıcaklıklarda sinterlenmesiyle mukavemet ve sertlik açısından iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiş; bu karışımlarda ağırlıkça %15-50 oranında 2 µm'den küçük ve 3-20 µm boyutlarında gümüş tozu kullanılmıştır (Hirasawa ve Ido, 2006). Yüksek sıcaklıklarda sinterlemenin fiziksel yapıyı bozduğu ve küresel metal tozlarının yapısal korumaya katkı sağladığı tespit edilerek, metal kil tozlarının partikül boyutunun sinterleme sonucunu etkileyen önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır (Aykoç, 2012). Nano-gümüş kil hamurlarının sinterleme sıcaklığının dökme gümüşe kıyasla 250 °C gibi daha düşük bir sıcaklıkta başlayabildiği belirtilmiştir (Thongnopkun vd., 2012). Metal kil hamurlarına esneklik kazandırmak amacıyla %0-0,8

aralığında propilen glikol gibi organik katkı maddelerinin kullanılabileceği bildirilmiştir (Ido ve Otani, 2016). Genel olarak, değerli metallerle elde edilen ürünlerin teknolojinin ilerlemesiyle birlikte kültürel etkileşimler ışığında yüzyıllardır sürekli bir değişim ve gelişim içerisinde olduğu ifade edilmektedir (Paknejad ve Mannan, 2017).

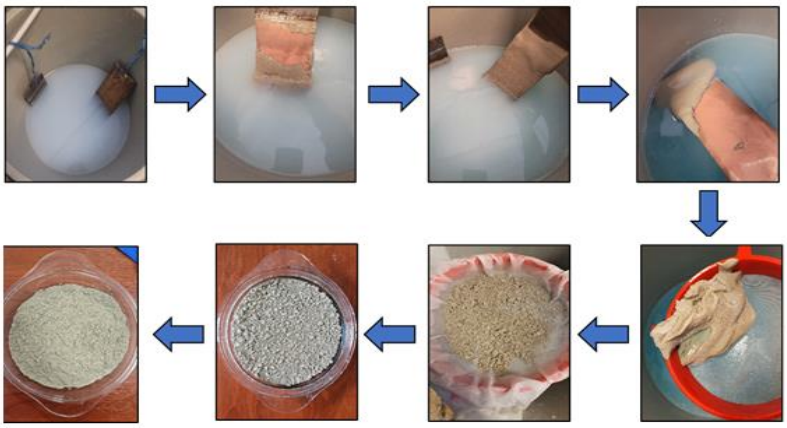
Bu çalışmanın temel amacı, değerli metal tozlarının organik bağlayıcılar ve katkı maddeleri ile hamur formuna getirilmesi, ardından şekillendirilerek ısıl işlemler sonucunda metalik yapıya dönüştürülmesidir. Metal kil hamurlarının üretim süreciyle ilgili literatürde, özellikle ülkemizde yapılmış çalışmalara kısıtlı sayıda rastlanmıştır. Bu araştırmayla, ulusal ekonomiye katkı sağlamanın yanı sıra, kuyumculuk başta olmak üzere çeşitli sanatsal disiplinlerde özgün fikir ve tasarımların geliştirilmesine zemin hazırlamak amaçlanmaktadır. Bu çalışmada değerli metal kil hamurları organik bağlayıcı metil selüloz, değerli metal (Saf Ag, 950 Ag, 925 Ag, 900 Ag, Saf Cu ve Bronz) tozları, organik yüzey ajanı zeytin yağı ve ultra saf su ile üretilmiştir. Metal kil hamuru üretiminde kullanılan saf Ag metal tozları hidrometalurji yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Üretilen metal kil hamurlarının ısıl işlem sonrası kimyasal içerikleri ve yapısal özellikleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve X ışını flüoresans analizleri ile incelenmiştir. Son olarak üretilen metal kil hamurları 3 boyutlu tasarım ile hazırlanan kalıplar kullanılarak takıya dönüştürülmüştür.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, değerli metal killerinin sentezi ve şekillendirilmesi süreçlerinde kullanılan materyaller ve uygulanan yöntemler detaylandırılmıştır. Metal kil hamuru formülasyonun ana bileşenleri olarak metiselüloz (organik bağlayıcı), çeşitli değerli metal tozları (Saf Ag, 950 Ag, 925 Ag, 900 Ag, Saf Cu ve Bronz), organik yüzey aktif ajan olarak zeytinyağı ve ultra saf su içermektedir. Üretim ve şekillendirme aşamalarında çeşitli el aletleri ve laboratuvar ekipmanlarından faydalanılmıştır. Kullanılan başlıca araçlar arasında hassas tartım için terazi, hacim ve boyut ölçümleri için kumpas ve milimetrik cetvel, karıştırma için havan, termal işlemler için kül fırını ve şaloma, ön kurutma için saç kurutma makinesi, hamur işleme ve şekillendirme için plastik rulo ve kalıplar, yüzey işleme için zımpara kağıtları yer almıştır. Ayrıca genel kuyumcu el aletleri ve yardımcı teçhizatlar, malzeme depolama için kilitli plastik poşetler, etiketler, kişisel koruyucu ekipman olarak eldiven ve toz maskesi de kullanılmıştır.



Şekil 1. Hidroliz yöntemi çözeltisi

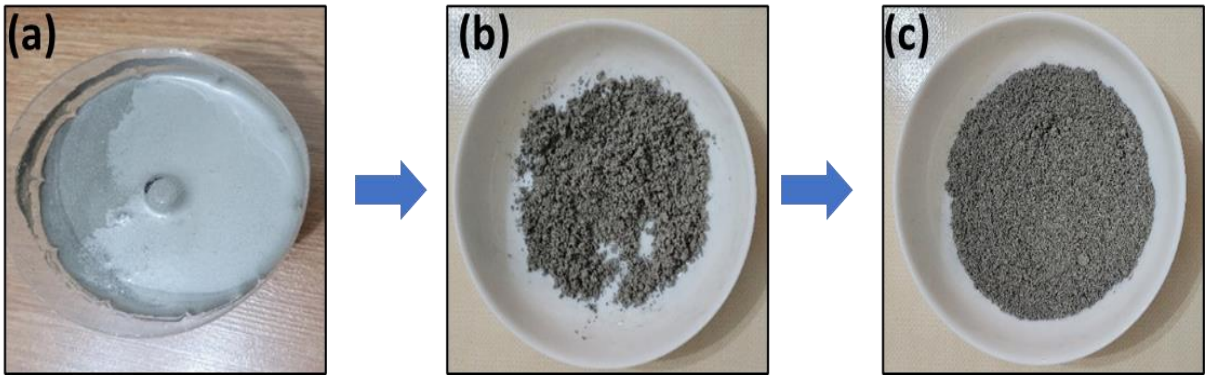


Şekil 2. Hidroliz yöntemiyle elde edilen gümüş tozları

Çalışmada kullanılan yüksek saflıkta gümüş (Ag) ve bakır (Cu) metal tozları, hidrometalurjik yöntemle sentezlenmiştir. Gümüş tozunun eldesi için izlenen süreçte nitrik asit, saf su, bakır levha ve gümüş tozları kullanılmıştır. Hidrometalurjik yöntem: 150 gram saf gümüş, 1 litre nitrik asit çözeltisi içerisinde 50-60 °C sıcaklıkta çözündürülerek reaksiyon hızı artırılmıştır. Hidrometalurjik yöntemde voltaj ve akım kullanılmamıştır. Kuyumculuk sektöründe akım voltaj kullanılmaması zaman ve enerjiden tasarruf sağlanması önemlidir. Ayrıca endüstriyel çalışmalar için uygulanabilir prosese sahiptir. Tam çözünme ve soğuma sonrasında çözeltinin renginin şeffaflaşması beklenmiştir. Doymuş nitrik asit çözeltisinin görünümü Şekil 1'de sunulmuştur. Ardından çözeltinin dört katı hacimde saf su ile seyreltilmiş ve içerisine geniş bir bakır plaka daldırılmıştır. Yaklaşık 36 saat süren çöktürme işlemi boyunca, bakır plaka üzerinde biriken gümüş tozu 8 saatlik periyotlarla toplanmıştır. Gümüş tozunun bakır levha üzerindeki birikme basamakları Şekil 2'de görselleştirilmiştir. Saf bakır tozu da benzer bir hidrometalurjik prosedür izlenerek hazırlanmıştır.

Hidrometalurjik çöktürme aşamasının tamamlanmasını takiben, reaksiyon sonucu oluşan gümüş tozunun (Ag) ayrılması, saflaştırılması ve kurutulması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen saf gümüş çökeltisi, uygun bir filtrasyon düzeneği (plastik süzgeç ve yardımcı ekipmanlar kullanılarak) vasıtasıyla çözeltiden alınmıştır. Sentez sırasında oluşabilecek asit kalıntıları ve diğer safsızlıkları gidermek amacıyla, toplanan toz sıcak ultra saf su ile üç döngü boyunca özenle yıkanmıştır. Bu yıkama prosedürü, nihai metal tozunun kimyasal saflığını sağlamak için yapılmıştır.

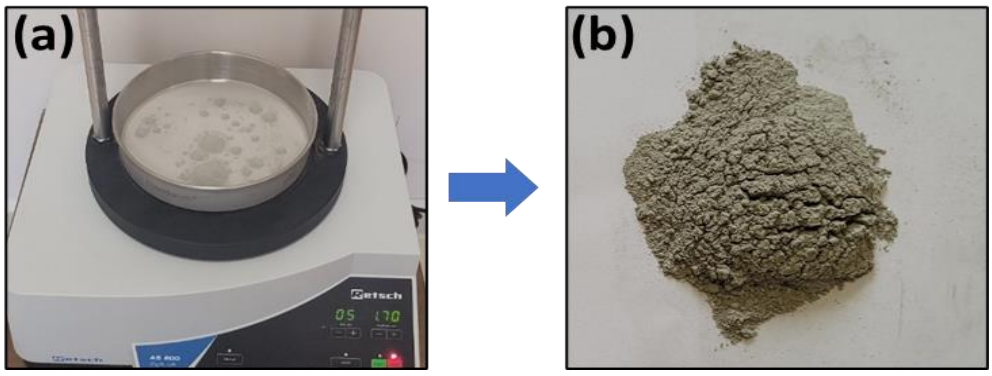
Yıkanmış Ag tozunun kurutulması, içerisinde kalan nemin tamamen uzaklaştırılması ve partikül aglomerasyonunun minimize edilmesi amacıyla, 90 °C'lik kontrollü bir sıcaklıkta etüv içerisinde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu ardışık saflaştırma ve kurutma yöntemleri sonucunda, başlangıçta kullanılan 150 gram yüksek saflıktaki gümüşten 147,5 gram işlenmiş toz elde edilmiştir. Gümüş tozunun filtrasyonu ve kurutma süreçlerine ait görsel kayıtlar Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. Ag tozlarının üretim (süzme ve kurutma) sürecindeki görüntüleri

Kurutma işleminin tamamlanmasının ardından, elde edilen gümüş tozunun metal kil formülasyonu için kritik öneme sahip olan partikül boyutu dağılımını optimize etmek amacıyla boyutlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutulmuş ve nem içeriği minimize edilmiş toz, bir cam havan içerisinde öğütülerek sentez ve kurutma aşamalarında oluşmuş olası yumuşak aglomerasyonun giderilmesini sağlamıştır. Toz numunesi, Retsch Vibratory Sieve Shaker AS 200 Digit Ca model titreşimli elek cihazına yerleştirilmiştir. Cihaz, standart test eleklerinden oluşan bir istif (80 µm, 60 µm ve 50 µm göz açıklıklarına sahip) ile donatılmış olup, eleme işlemi 15 dakika süreyle yürütülmüştür. Sinterleme performansı ve nihai ürün kalitesi açısından hedeflenen 50 µm altı partikül fraksiyonu, bu işlem sonucunda ayrıştırılarak toplanmıştır. Başlangıçtaki toplam toz miktarından, belirtilen prosedürle yaklaşık 108 gram 50 µm altı gümüş tozu fraksiyonu elde edilmiştir. Boyutlandırılan gümüş tozu, higroskopik özelliklerinden dolayı atmosferik nemden korunması amacıyla sızdırmaz kapaklı plastik veya cam kavanozlar içerisinde, metal kil hamuru hazırlığına kadar muhafaza altına alınmıştır. Gümüş tozunun titreşimli elek cihazı kullanılarak yapılan boyutlandırma işlemine dair aşamalar Şekil 4'te görselleştirilmiştir.

Metal kil hamurlarının üretiminde kullanılmak üzere çeşitli değerli metal toz karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar, daha önce hidroliz yöntemiyle sentezlenen yüksek saflıktaki gümüş tozu ile ticari olarak temin edilen saf bakır tozunun kontrollü oranlarda birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Hazırlanan her bir metal toz karışımının toplam kütlesi 5 gram olarak standardize edilmiştir. Hedeflenen farklı gümüş ayarları (milyem) doğrultusunda Çizelge 1'de kompozisyonlar belirlenmiştir.



Şekil 4. 50 µm altı has gümüş tozu

Çizelge 1. Farklı Milyem Ayarları için Kütlece Yüzde Kompozisyonu ve Kütle Oranları

Milyem Ayarı (Gümüş Oranı)	Gümüş Tozu Kütlesi	Bakır Tozu Kütlesi
950 Milyem (95.0 %ağ. Ag)	4.75 gram gümüş tozu	0.25 gram bakır tozu
925 Milyem (92.4 %ağ. Ag)	4.62 gram gümüş tozu	0.38 gram bakır tozu
900 Milyem (90.0 %ağ. Ag)	4.50 gram gümüş tozu	0.50 gram bakır tozu

Belirlenen oranlardaki gümüş ve bakır tozları, her bir kompozisyon için hassas terazi kullanılarak ayrı ayrı tartılmıştır. Tartılan tozlar, homojen bir dağılım elde etmek amacıyla, her bir alaşım türü için ayrı ayrı bir havan içerisinde kuru karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.

Hazırlanan bu farklı ayarlardaki (%950, %925 ve %900) homojen metal toz karışımları, ilgili metal kil hamuru formülasyonlarının üretiminde ana metal fazı olarak kullanılmıştır. Metal kil hamurları 20 mm çapında disk şeklinde üretilmiştir. Elde edilen kil hamuru 90 °C'de kurutulmuş daha sonra 850 °C'de 1 saat kül fırınında sinterlenerek metal form kazandırılmıştır. Sinterleme sonrası metal kil hamurları oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Metal kil hamurlarının üretimi, kurutulması, polisajı ve sinterleme işlemleri Şekil 5'de sunulmuştur. Sinterleme sonrası metal kil hamurlarının X ışını flüoresans analizi, taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop görüntüleri alınarak fiziksel ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır.

Bu çalışmada, üretilen metal kil hamurunun ve sinterlenmiş ürünlerin yapısal, morfolojik ve kimyasal özellikleri çeşitli modern analiz teknikleri kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Numunelerin üretim sürecindeki morfolojik değişimlerini ve sinterleme sonrası yüzey/kesit yapısını gözlemlemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu incelemeler için ZEISS EVO LS10 model SEM cihazından kullanılmıştır.

Metal kil hamurlarının ve sinterlenmiş numunelerin mikro yapısal detayları, Stereo optik mikroskop ile analiz edilmiştir. Mikroskobik görüntülemeler, Nikon SMZ1500 model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Metal kil hamurlarının sinterleme ve sonraki süreçleri

Hazırlanan metal kil hamurlarının başlangıçtaki elementel kimyasal kompozisyonları, X-ray Floresans (XRF) spektrometresi ile belirlenmiştir. Kimyasal içerik analizleri için FISCHERSCOPE X-ray XDV marka model XRF cihazı kullanılmıştır. Sinterleme işleminin ardından elde edilen metal numunelerin yoğunlukları belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri, Arşimet prensibine dayalı olarak, AXIS ACN 220 model terazi ile yapılmıştır. Hassas yoğunluk tayini sağlamak amacıyla, yoğunluk ölçümüne alınarak sinterlenmiş numunelerin yüzeyleri öncelikle zımparalama ve ardından parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımpara işlemleri P400C english abrasives ile yapılmıştır. Daha sonra beyaz dialux blanc ve kırmızı dialux rouge cila ile sırasıyla parlatma işlemler yapılmıştır. Numunelerin gerçek yoğunluğu aşağıdaki Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır:

$$d_{gerçek} = \left(\frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{su}} \right) \times d_{su} \qquad (1)$$

3. Bulgular

Metil selüloz kullanılarak saf gümüş, 950 ayar gümüş, 925 ayar gümüş, 900 ayar gümüş, saf bakır ve bronz metal tozlarıyla kuru formda ve sinterlenmiş olarak metal kil hamurları elde edilmiştir. Üretim aşamasında kullanılan metal tozları ve metil selülozun morfolojik özellikleri optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve kimyasal içeriklerine X-ışını flüoresans spektroskopisi (XRF) ile analiz edilmiştir. Bunun yanında metal kil hamurlarının sinterleme sonrasında ki mikroyapıları, kimyasal içerikleri ve yoğunlukları (Arşimet yöntemiyle) incelenmiştir.

Metal kil hamuru üretiminde kullanılmış olan değerli metal tozlarının kimyasal olarak nitel ve nicel analiz sonuçları Şekil 6-8'te sunulmuştur. Şekil 6'de, hidroliz yöntemiyle elde edilen saf gümüşlerin XRF analiz sonucunda %99 ±0,5 saflıkta olduğu gözlenmiştir. Ticari olarak temin edilen saf bakırın XRF sonuçları Şekil 7'de yer almakta ve bakırın %98 ±0,5 saflıkta olduğu tespit edilmiştir. Bronz tozlarının XRF sonuçları ise Şekil 8'te sunulmuştur; bronz tozlarının içeriğinde bakır oranı %89 ±0,5 ve kalay oranı %10 ±0,5 olarak belirlenmiştir. Genel olarak, XRF analizleri metal kil hamuru üretiminde kullanılan tozların uygun kimyasal bileşenlere sahip olduğunu ortaya koymuştur

		Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean	-o/oo	999.2o/oo	0.287o/oo	0.236o/oo	-o/oo	0.098o/oo	0.079o/oo	0.311o/oo	
Standard deviation		0.177	0.327	0.148	0.064	0.047	0.104	0.247	0.175
C.O.V. (%)		--------	0.03	--------	27.05	--------	--------	--------	--------

Şekil 6. Saf Ag metal tozunun XRF analiz sonucu

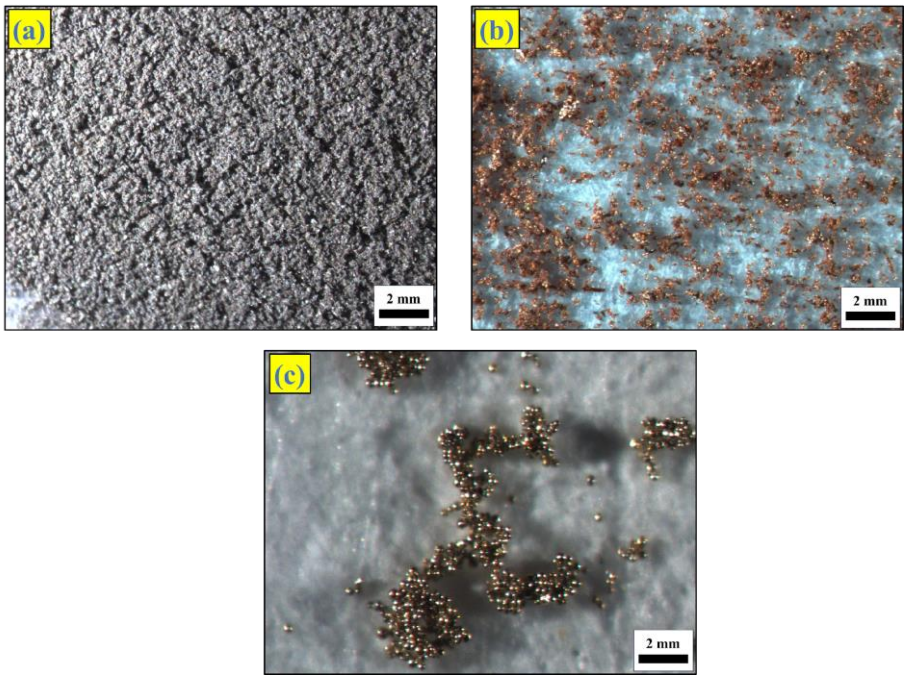
		Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean	-o/oo	1.211o/oo	998.7o/oo	0.001o/oo	-o/oo	0.080o/oo	0.283o/oo-o/oo		
Standard deviation		0.147	0.176	0.477	0.033	0.149	0.124	0.030	0.112
C.O.V. (%)		--------	14.50	0.05	--------	--------	--------	10.65	--------
Range (‰)		0.294	0.324	0.840	0.066	0.297	0.247	0.057	0.203
Number of readings		3	3	3		3	3	3	3
Min. reading		-o/oo	1.088o/oo	998.2o/oo	-o/oo	-o/oo	-o/oo	0.249o/oo	-o/oo
Max. reading		-o/oo	1.413o/oo	999.0o/oo	0.034o/oo	0.085o/oo		0.209o/oo	0.306o/oo
0.038o/oo									

Şekil 7. Saf Cu metal tozunun XRF analiz sonucu

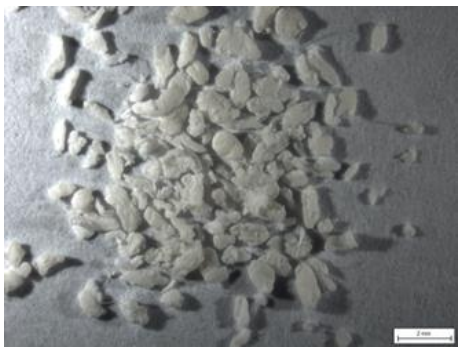
	Au	Ag	Pt	Pd	Cu	Zn	Sn	Pb
	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo
Mean value:	-	0.387	-	0.056	893.1	0.051	106.6	-
Standard Dev.:	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------
COV [%]:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Şekil 8. Saf bronz metal tozunun XRF analiz sonucu

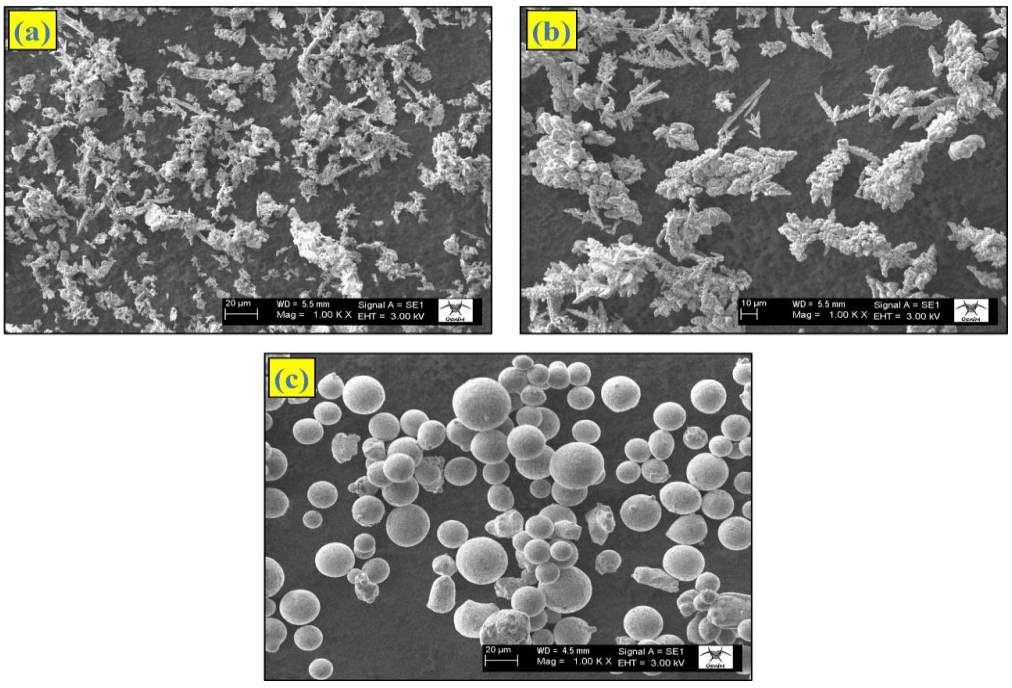
Değerli metal kil üretiminde kullanılan saf gümüş, bakır ve bronz metal tozlarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 9'de sunulmuştur. Şekil 9a-b'de saf gümüş ve bakır tozlarının OM görüntülerinde parçacık boyutları 50 µm'den küçük ve homojen olarak dağılımı gözlenmiştir. Şekil 9c'de bronz tozlarının OM görüntülerinde gümüş ve bronzdan farklı olarak küresel şekillerde morfolojiye sahip olduğu ve parçacıkların boyutları 50 µm'den küçük homojen dağılıma sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar metal kil hamur üretiminde uygun boyutta parçacık boyutlarına sahip metal tozları kullanıldığı kanıtlamıştır. Değerli metal kil hamurlarının üretiminde organik bağlayıcı olarak metil selüloz kullanılmış ve OM görüntüsü Şekil 10'de verilmiştir. OM görüntüsü incelendiğinde metil selülozun parlak ve beyaz renkli olduğu Image J programı kullanılarak tanecik boyut dağılımları 1 mm ile 5 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca metil selülozun suda çözünme özelliği bulunmaktadır. Bu durum metil selüloz tanelerinin küçük boyutlarda olmasıyla suda çözünme hızının artması ve üretim sürecini hızlandırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan metil selülozların parçacık boyutlarının optimum aynı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 9. (a) saf Ag, (b) saf Cu ve (c) bronz metal tozlarının OM görüntüleri



Şekil 10. Metil selüloz organik bağlayıcısının OM görüntüleri



Şekil 11. Metal kil hamur üretiminde kullanılan **(a)** saf Ag, **(b)** saf Cu ve **(c)** Bronz metal tozlarının x1000 kat büyütme SEM görüntüleri

Değerli metal kil hamuru üretiminde saf gümüş metal tozu, bakır ve bronz metal tozlarının taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 11'de sunulmuştur. Şekil 11a'da saf gümüş tozlarının iğnemsi ve şekilsiz partiküllerden oluştuğu gözlenmiştir (Katzensteiner vd. 2020). Şekil 11b'de saf bakır tozları omurilik yapısına sahip karakteristik morfolojik yapısı tespit edilmiştir (Kargul vd. 2021). Şekil 11c'de bronz tozlarının küresel formlarda olduğu ve yaklaşık 20 µm'den düşük olduğu gözlenmiştir (Bao vd. 2022).

Metil selüloz organik bağlayıcısı kullanılarak saf gümüş, 950, 925, 900 ayar gümüş, saf bakır ve bronz metal tozlarından hazırlanan ve başarıyla sinterlenen metal kil numuneleri, kimyasal kompozisyonlarının belirlenmesi amacıyla X-ışını Flüoresans Spektroskopisi (XRF) analizine tabi tutulmuştur. Ayrıca, mikroyapısal incelemeler için Optik Mikroskop (OM) analizleri de gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş numunelere ait XRF analiz sonuçları, Şekil 12 ila 17 arasında sunulmaktadır. Yapılan XRF analizleri (Şekil 12-17), elde edilen metal kil numunelerinin kimyasal bileşimlerinin, başlangıçta hesaplanan stokiyometrik oranlar ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

Sinterlenmiş saf gümüş metal kil numunesinin (Şekil 12) %99 ±0,5 oranında gümüş içerdiği tespit edilmiştir. 950 ayar gümüş numunesinin (Şekil 13) kimyasal kompozisyonunun %93 ±0,5 gümüş ve %6 ±0,5 bakır içerdiği belirlenmiştir.

925 ayar gümüş numunesinde (Şekil 14) %89 ±0,5 gümüş ve %10 ±0,5 bakır saptanmıştır. 900 ayar gümüş numunesinin (Şekil 15) ise %87 ±0,5 gümüş ve %12 ±0,5 bakır içerdiği belirlenmiştir. Sinterlenmiş saf bakır metal kil numunesinin (Şekil 16) kompozisyonunun %99 ±0,5 oranında bakırdan oluştuğu görülmüştür. Sinterlenmiş bronz metal kil numunesinin (Şekil 17) kimyasal yapısında %89 ±0,5 bakır ve %10 ±0,5 kalay bulunduğu saptanmıştır.

Genel olarak, XRF sonuçlarının incelenmesi, üretilen metal kil numunelerinin yapısında herhangi bir istenmeyen veya yabancı katkı maddesinin bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, üretim öncesi hesaplanan stokiyometrik oranların ve kullanılan hammaddelerin saflığının, nihai ürünün kimyasal kompozisyonu açısından başarıyla korunduğunu doğrulamaktadır.

		Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean	-o/oo	998.7o/oo	0.436o/oo	0.057o/oo	-o/oo	0.257o/oo	0.092o/oo	0.573o/oo	
Standard deviation		0.135	0.200	0.090	0.029	0.027	0.196	0.127	0.053
C.O.V. (%)		--------	0.02	20.62	--------	--------	--------	--------	9.19
Range (‰)		0.267	0.393	0.156	0.057	0.054	0.387	0.238	0.098
Number of readings		3	3	3		3	3	3	3
Min. reading		-o/oo	998.5o/oo	0.333o/oo	0.028o/oo	-o/oo	0.080o/oo	-o/oo	0.513o/oo
Max. reading		0.090o/oo	998.9o/oo	0.488o/oo	0.085o/oo	-o/oo	0.467o/oo		0.237o/oo
0.611o/oo									

Şekil 12. Metil Selüloz Bazlı Sinterlenmiş Saf Gümüş Metal Kili Numunesinin XRF Analizi

		Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean	-o/oo	935.8o/oo	63.64o/oo	0.039o/oo	-o/oo	0.374o/oo	-o/oo	0.450o/oo	
Standard deviation		0.097	1.055	0.859	0.061	0.067	0.116	0.054	0.047
C.O.V. (%)		--------	0.11	1.35	--------	--------	30.95	--------	10.41
Range (‰)		0.189	2.097	1.719	0.122	0.133	0.229	0.106	0.090
Number of readings		3	3	3		3	3	3	3
3									
Min. reading		-o/oo	934.8o/oo	62.79o/oo	-o/oo	-o/oo	0.268o/oo	-o/oo	0.398o/oo
Max. reading		-o/oo	936.9o/oo	64.50o/oo	0.097o/oo	0.030o/oo	0.498o/oo	-o/oo	0.488o/oo

Şekil 13. Metil Selüloz Bazlı Sinterlenmiş 950 Gümüş Metal Kili Numunesinin XRF Analizi

		Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean	-o/oo	897.5o/oo	101.7o/oo	0.071o/oo	0.032o/oo	0.351o/oo	0.070o/oo	0.414o/oo	
Standard deviation		0.107	0.637	0.488	0.028	0.078	0.090	0.030	0.071
C.O.V. (%)		--------	0.07	0.48	39.70	--------	25.50	--------	17.20
Range (‰)		0.210	1.210	0.970	0.050	0.157	0.179	0.052	0.138
Number of readings		3	3	3		3	3	3	3
3									
Min. reading		-o/oo	897.0o/oo	101.2o/oo	0.053o/oo	-o/oo	0.264o/oo	0.036o/oo	0.335o/oo
Max. reading		-o/oo	898.2o/oo	102.1o/oo	0.103o/oo	0.110o/oo	0.443o/oo	0.088o/oo	
0.474o/oo									

Şekil 14. Metil Selüloz Bazlı Sinterlenmiş 925 Gümüş Metal Kili Numunesinin XRF Analizi

		Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean	-o/oo	878.2o/oo	121.2o/oo	0.056o/oo	-o/oo	0.329o/oo	0.030o/oo	0.506o/oo	
Standard deviation		0.136	0.965	0.709	0.074	0.050	0.105	0.132	0.354
C.O.V. (%)		--------	0.11	0.58	--------	--------	31.96	--------	--------
Range (‰)		0.259	1.929	1.387	0.133	0.097	0.210	0.236	0.672
Number of readings		3	3	3		3	3	3	3
3									
Min. reading		-o/oo	877.2o/oo	120.6o/oo	0.009o/oo	-o/oo	0.226o/oo	-o/oo	0.106o/oo
Max. reading		-o/oo	879.2o/oo	122.0o/oo	0.142o/oo	0.016o/oo	0.436o/oo		0.182o/oo

Şekil 15. Metil Selüloz Bazlı Sinterlenmiş 900 Gümüş Metal Kili Numunesinin XRF Analizi

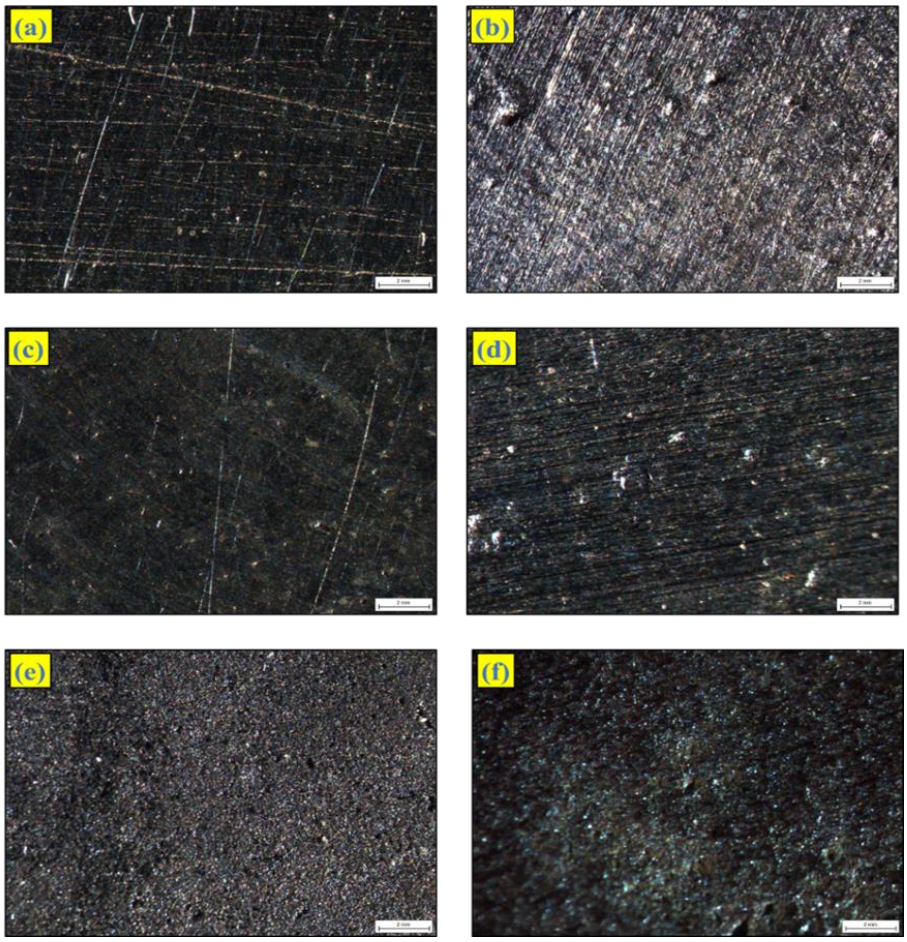
	Au	Ag	Cu	Zn	Ni	Pd	Cd	Fe
Mean -o/oo	1.295o/oo	998.2o/oo	0.064o/oo	-o/oo	0.155o/oo	0.033o/oo	0.247o/oo	
Standard deviation	0.221	0.081	0.503	0.217	0.037	0.098	0.090	0.076
C.O.V. (%)	--------	6.26	0.05	--------	--------	--------	--------	30.97
Range (‰)	0.440	0.154	0.982	0.379	0.065	0.187	0.171	0.152
Number of readings	3	3	3		3	3	3	3
Min. reading	-o/oo	1.232o/oo	997.8o/oo	-o/oo	-o/oo	0.078o/oo	-o/oo	0.176o/oo
Max. reading	0.181o/oo	1.386o/oo	998.8o/oo		0.193o/oo	0.024o/oo		0.264o/oo
0.136o/oo	0.328o/oo							

Şekil 16. Metil Selüloz Bazlı Sinterlenmiş saf bakır Metal Kili Numunesinin XRF Analizi

Single values:

n	Au [o/oo]	Ag [o/oo]	Pt [o/oo]	Pd [o/oo]	Cu [o/oo]	Zn [o/oo]	Sn [o/oo]	Pb [o/oo]	Fe [o/oo]	Cr [o/oo]	Ni [o/oo]	Mo [o/oo]	Co [o/oo]	Rh [o/oo]	Ru [o/oo]	In [o/oo]	Ir [o/oo]	W [o/oo]	Bi [o/oo]	Mn [o/oo]	Ga [o/oo]	Cd [o/oo]
1	-	1.743	-	0.083	891.2	-	106.8	-	0.141	0.049	0.258	-	0.199	0.032	0.020	-	-	-	0.013	-	0.011	0.055

Şekil 17. Metil Selüloz Bazlı Sinterlenmiş saf bronz Metal Kili Numunesinin XRF Analizi



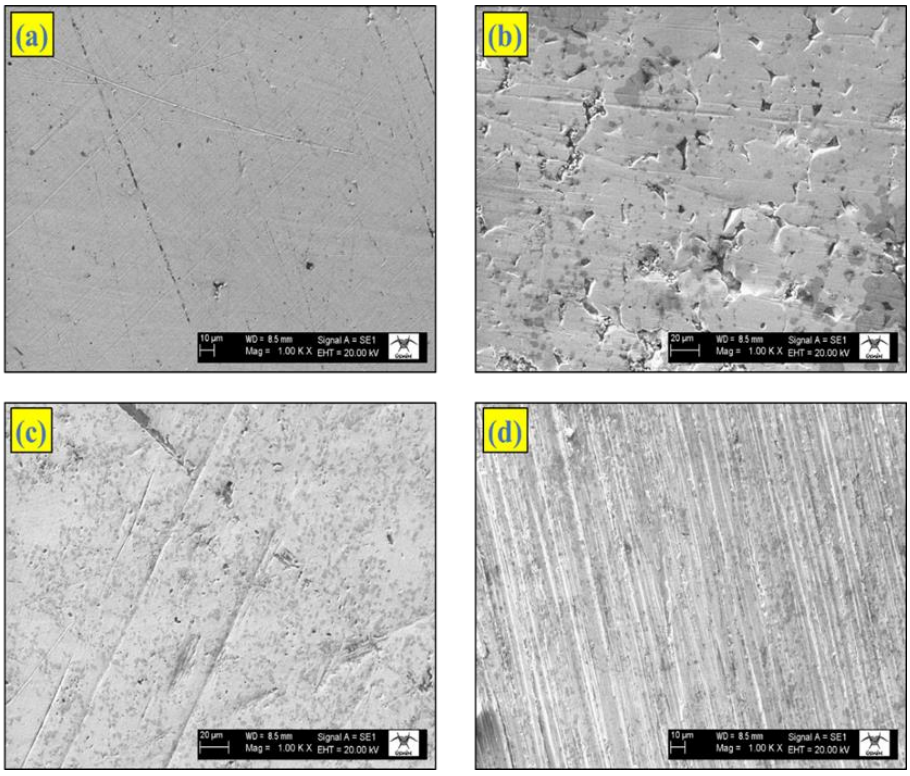
Şekil 18. Metil selüloz kullanılarak üretilen (a) saf Ag, (b) 950 Ag, (c) 925 Ag, (d) 900 Ag, (e) saf Cu ve (f) Bronz sinterlenmiş metal kil hamurlarının OM görüntüleri

Çeşitli değerli metal tozları (saf Ag, 950 Ag, 925 Ag, 900 Ag, saf Cu ve Bronz) ve metil selüloz organik bağlayıcısı kullanılarak üretilen metal kil hamurlarının sinterleme işlemi sonrasında elde edilen numunelerin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. 2 mm ölçeğinde alınan temsili görüntüler Şekil 18'de sunulmaktadır. Yapılan mikroyapısal analizlerde, tüm numunelerin sinterleme prosesini başarıyla tamamlayarak metalik forma dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu dönüşüm sırasında, metal kil hamurunun başlangıç yapısında bulunan organik bağlayıcı ve yüzey ajanlarının termal işlem sonucunda yapıdan tamamen uzaklaştırıldığı, elde edilen metalik yapının sürekliliğinden anlaşılmaktadır. Numunelerin yüzeyinde, optik mikroskopi öncesinde uygulanan standart zımparalama ve parlatma işlemlerinden kaynaklanan karakteristik çizgi izleri mevcuttur. Bu izlerin belirginliği, sinterlenmiş metal yüzeylerinin nispeten düşük sertlikte olduğunu düşündürmektedir.

Farklı metal kompozisyonlarının mikroyapıları karşılaştırıldığında, partiküller arası sinterlenme derecesi ve metalik bütünlük açısından farklılıklar saptanmıştır. Özellikle saf gümüş (Şekil 18a) ve saf bakır (Şekil 18e) numunelerinin, diğer gümüş alaşımlı kompozisyonlara kıyasla daha üstün bir partikül sinterlenmesi ve daha homojen bir metalik yapı sergilediği belirlenmiştir.

Metil selüloz organik bağlayıcısı kullanılarak saf gümüş, 950, 925 ve 900 ayar gümüş metal tozlarından formüle edilip sinterlenmiş metal kil numunelerinin morfolojik ve mikroyapısal özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) aracılığıyla incelenmiştir. Seçilen numunelere ait temsili SEM görüntüleri Şekil 19'da sunulmaktadır.

SEM analizleri, sinterleme işlemi sonrasında elde edilen yapıların morfolojisi ve partiküller arası sinterlenme başarısı hakkında detaylı bilgi sağlamıştır. Şekil 19a'da yer alan saf gümüş numunesine ait görüntüde, metal partiküller arasında yüksek derecede sinterlenme ve güçlü bir bağlanma oluştuğu net bir şekilde görülmektedir; bu durum, bağlayıcının sinterleme sürecindeki etkin rolünün bir göstergesidir. Buna karşılık, sinterlenmiş 950, 925 ve 900 ayar gümüş alaşım numunelerinin yüzey morfolojileri değerlendirildiğinde, taneler arasında belirgin boşlukların (intergranüler porozite) varlığı dikkat çekmiştir. Yapıdaki bu gözenekliliğin, söz konusu alaşımlı numunelerin beklenen mekanik performanslarını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 19. Sinterlenmiş (a) Saf Ag, (b) 950 Ag, (c) 925 Ag ve (d) 900 Ag metil selüloz metal kil hamurlarının SEM görüntüleri

Metil selüloz organik bağlayıcısı ile çeşitli metal tozlarından (saf Ag, 950 Ag, 925 Ag, 900 Ag, saf Cu ve Bronz) formüle edilip sinterlenmiş metal kil numunelerinin yoğunlukları, Arşimet prensibine dayalı yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel yoğunluk değerleri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Karşılaştırma amacıyla, saf gümüşün teorik yoğunluğu 10.46 g/cm³, saf bakırın 8.96 g/cm³ ve bronzun 8.80 g/cm³ olarak literatürde rapor edilmektedir. Bu inceleme deneysel olarak yapılmıştır. Altı farklı içeriğe sahip metal kil hamurları hem metal tozları hem de metil selüloz gibi organik bağlayıcıların kullanılması ile elde edilen metal kil hamurlarının fiziksel özelliklerindeki değişimlerin deneysel veriler ile ortaya konması amaçlanmıştır. Metal tozlar hamur üretiminde ana matrisi oluşturmaktadır. Dolayısıyla yoğunluk değişiminde beklenen sonuçlar vardır. Metil selüloz ile işlem yapılıp ve sinterleme sonrasında hamurların gözenek yapısındaki ilişkinin nasıl olduğunun araştırılması yapılmıştır. Çizelge 2'de sunulan deneysel sonuçların bu teorik değerler ile mukayese edilmesi sonucunda, sinterlenmiş metal kil numunelerinin genel olarak daha düşük yoğunluklara sahip olduğu saptanmıştır. Bu gözlem, numunelerin mikroyapılarında sinterleme sonrası kaçınılmaz olarak kalan gözenekli yapının (porozite) varlığından kaynaklanmaktadır ve daha önceki SEM ile optik mikroskop analizleri ile elde edilen

mikroyapısal bulgularla uyumludur. Ayrıca, saf gümüş numunelerinin yoğunluğunun, alaşımlandırılmış gümüş numunelerine (950, 925 ve 900 milyem) kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, gümüşe göre daha düşük teorik yoğunluğa sahip olan bakırın alaşım elementi olarak kompozisyona dahil edilmesinin, nihai alaşım yoğunluğunu düşürmesi beklenen fiziksel prensiple tutarlıdır. Üretilen farklı ayardaki metal kil numunelerinin yoğunluk analiz sonuçları, bu öngörülen etkiyi teyit etmektedir.

Çizelge 2. Sinterlenmiş metal kil hamurlarının yoğunlukları

Metal kil hamuru	Yoğunluk (g/cm³)
Selüloz saf Ag	8.58
Selüloz 950 Ag	7.19
Selüloz 925 Ag	6.23
Selüloz 900 Ag	5.89
Selüloz saf Cu	6.35
Selüloz bronz	6.57

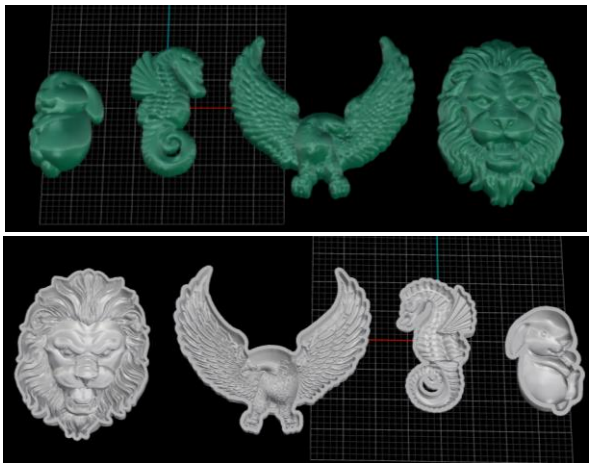
Bu çalışma kapsamında, metal kilin kuyumculuk ve sanatsal üretimlerde kullanım potansiyelini artırmak amacıyla Üç Boyutlu (3B) tasarım ve kalıplama teknolojisinden faydalanılmıştır. Şekillendirme kalıpları dijital tasarımları, 3D Gemvision Matrix 9.0 ve ZBrush gibi endüstri standardına uygun tasarım yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Tasarlanan 3B kalıpların iç ve dış yüzey geometrileri, Şekil 20'de görsel olarak sunulmaktadır. Dijital tasarımların fiziksel kalıplara dönüştürülmesi için akrilik reçine bazlı fotopolimerik malzemeler kullanılmıştır. Kalıp üretimi, Envisiontec P4k model yüksek çözünürlüklü bir reçine bazlı 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Yazdırma işleminin ardından, reçine kalıplar yapılarının nihai sertliğe ulaşması için uygun post-polimerizasyon (kürleme) işlemine tabi tutulmuştur. Kalıpların çözünürlüğü 0,01 mm çözünürlükte Stl model dosyası olarak reçine makinasında yapılmıştır.

3B tasarım ve kalıplama yönteminin benimsenmesindeki temel gerekçe, geleneksel el işçiliğiyle üretilmesi zaman alıcı veya geometrik olarak karmaşık olan özgün parçaların yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik ile üretilebilmesini sağlamaktır. Ayrıca, 3B tasarım programlarının sunduğu ölçeklendirme ve modifikasyon yetenekleri sayesinde, reçine prototip kalıplar aracılığıyla metal kil hamuruna istenen formun etkin bir şekilde verilmesi mümkün olmuştur. Bu yaklaşım, metal kilin şekillendirme ve genel üretim süreçlerine ivme kazandırmıştır.

Yöntemin karmaşık formlar üzerindeki yetkinliğini sergilemek amacıyla çeşitli hayvan figürleri (aslan, kartal, tavşan ve deniz atı) uygulama örnekleri olarak seçilmiştir. Bu detaylı tasarımlar, metal kil hamurunun 3B kalıplama ile birleştirildiğinde, el sanatlarıyla zor olarak addedilen formların başarıyla üretilebildiğini göstermek için kullanılmıştır. Kalıplama işlemi sonrasında elde edilen, henüz sinterlenmemiş (veya ön-sinterlenmiş) ham formdaki üretimlerin görüntüleri Şekil 21'de yer almaktadır.

Şekillendirme sonrası, metal kil numunelerine sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Bu termal konsolidasyon adımı, kalıplanan hayvan figürlerinin şaloma veya kül fırını gibi uygun ısıtma ekipmanları kullanılarak metalik formlarına dönüştürülmesini içermiştir. Sinterleme aşamalarına ait süreç görselleri Şekil 22'de sunulmaktadır. Üretim sürecinin son aşaması olarak, sinterlenmiş metal figürlere yüzey kalitesini artırmak amacıyla cilalama işlemi uygulanmış ve üretim tamamlanmıştır. Cilalama sonrası elde edilen bitmiş ürünlerin görüntüleri Şekil 23'te gösterilmektedir.

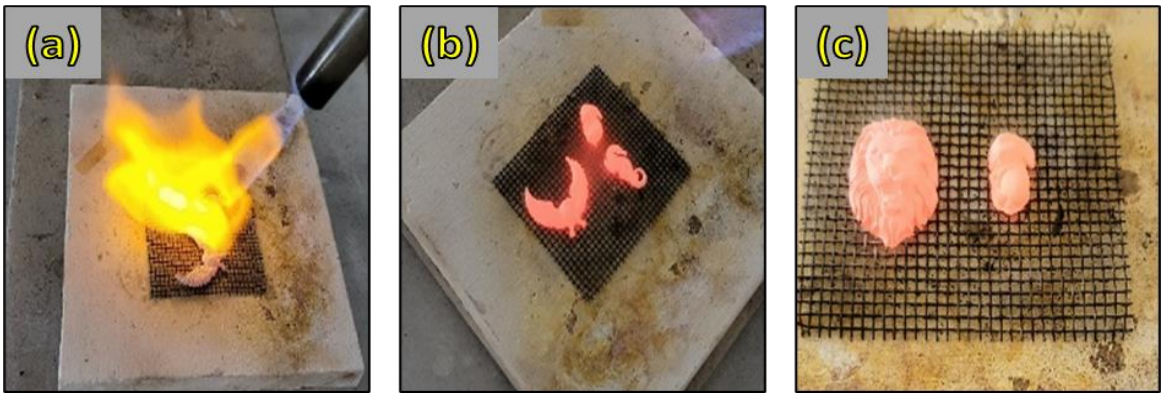
Bu çalışma, metil selüloz bazlı saf gümüş metal kil hamuru ve 3B baskı ile üretilen kalıplar kullanılarak, tasarımı geleneksel yöntemlerle zorlu olan hayvan figürlerinin başarıyla üretilebildiğini net bir şekilde ortaya koymuştur. Geliştirilen bu yöntemle üretilen metal kil parçalarının, kuyumculuk ve sanatsal uygulamalar bağlamında, geleneksel döküm teknolojisi ile üretilen benzer parçalarla karşılaştırılabilir estetik ve yapısal özellikler sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 20. Metal kil hamuru üretiminde Matrix 9.0'da yapılan 3B modelin iç ve dış yüzeyi



Şekil 21. 3B kalıplardan üretilmiş saf gümüş metal kil hamurları



Şekil 22. Metal kil hamurlarının sinterlenme işlemi



Şekil 23. Cilalanmış saf gümüş metal kil ürünleri

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma ile, değerli metal tozları ve seçilmiş organik bağlayıcılar kullanılarak, el ve standart aletler vasıtasıyla yüksek derecede şekillendirilebilirlik sergileyen bir metal kil hamuru formülasyonu başarıyla geliştirilmiştir. Sentezlenen bu malzeme, özellikle mücevherat sanatı alanında estetik değeri yüksek, özgün takı ve süs eşyası üretiminde değerlendirilebilecek önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Geliştirilen bu özel üretim yöntemi, geleneksel metal işleme tekniklerine kıyasla üretim süreçlerine belirgin bir kolaylık ve esneklik kazandırmaktadır. Bu durum, özellikle kuyumculuk sektörü ve genel olarak sanatsal tasarım ve imalat süreçlerinde, özgün fikirlerin daha hızlı ve ekonomik bir şekilde gerçeğe dönüştürülmesine olanak tanıyarak kayda değer bir ekonomik katma değer sağlama potansiyeli taşımaktadır. Elde edilen sonuçlar, metal kil teknolojisinin küçük ölçekli ve sanatsal üretimler için geçerli ve umut verici bir alternatif üretim rotası olduğunu göstermektedir. Metil selüloz ile saf gümüş, 950 ayar gümüş, 925 ayar gümüş, 900 ayar gümüş, saf bakır ve bronz metal kil hamurları üretilmiş ve sinterleme sonrası başarıyla bir şekilde metal form elde edilmiştir. Sinterlenmiş metal kil hamuru formlarının mikroyapısı ve kimyasal kompozisyonları OM, SEM, XRF ve Arşimet yoğunluk testi ile incelenmiştir. Metal kil hamurlarında kullanılan ve hidrometalurji yöntemiyle elde edilen saf gümüş metal tozlarının parçacık boyutunun 50 mikron altı olarak şekilde üretildiği tespit edilmiştir. Metal kil hamur üretiminde metil selüloz organik bağlayıcısı saf gümüşe en iyi bağlayıcılık özelliği gösterdiği tespit edilmiştir. Metil selüloz ile üretilen metal kil hamurlarda metal içerisindeki bakır oranı arttıkça bağlayıcılığın azaldığı tespit edilmiştir. Metil selüloz kullanılarak üretilen metal kil hamurlarında saf gümüş hariç diğer 950 ayar gümüş, 925 ayar gümüş, 900 ayar gümüş, bakır ve bronz numunelerinde oksitlenme ve renk değişimi gözlenmiştir. Kuyumculuk ve sanatsal alanlara yeni yöntemler, fikirler ve farklı bakış açıları kazandırarak özgün modellerin oluşturmasında yeni tekniklerin ortaya çıkmasına katkı sağlayacaktır. Seramik alanında kullanılan 3D printer makinaların metal

kil hamurun gelişmesi ile birlikte gelecekte kullanılması öngörülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma orijinal taslak Görselleştirme, Yazma, orijinal taslak,

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Proje Yöneticisi, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak,

Yazar 3: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 4: Araştırma, Deney tasarımı, Görselleştirme, Yazma

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu araştırma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi (BAP Proje No:2022/3-11 YLS) tarafından desteklenmiştir. KSÜ Bilimsel Araştırma Birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Aykoç, M. 2012. Metal clays sintering at low temperature, Wipo PCT Uluslararası Patent, No: WO2013126022A2.

Bao, Q., Guo, L., Qi, T., Guo, Z., 2022. The preparation of spherical tin bronze alloy powder via the flash remelting spheroidization method. Powder Technology, 397, 117036. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117036

Fujimaru, A., Shimamoto. K., Araki, H., Miyata, M., 2001. Sinter of noble metal and method for production thereof, Amerika Birleşik Devletleri Patent, No: US6290744B1.

Hoshino, K., Kohno, T., Morikawa, M., 1993. Development of Precious Metals Clay. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 40, 837–840.

Hoshino, K., Kohno, T., Hirasawa, J., Morikawa, M., 1994. Precious Metals Clay. Material Japan. 33, 420–422.

Hirasawa, J., Ido, Y., 2006, Silver Powder For Silver Clay And Silver Clay Containing This Silver Powder, Amerika Birleşik Devleti Patent, No: US007081149B2.

Boyl, İ., 2022. Elektronik atıklardan metallerin geri kazanımı için yeni hidrometalurjik yöntemlerin araştırılması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tabzon, pp:225.

Ido, Y., ve Otani, S. 2016., Clay-Lıke Composıtıon For Noble Metal Sıntered Compact Avrupa Patent Ofisi, No: EP3075467B1.

Katzensteiner, A., Rosalie, J.M., Pippan, R., Bachmaier, A., 2020. Synthesis of nanodiamond reinforced silver matrix nanocomposites: Microstructure and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, 782, 139254. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139254

Kargul, M., ve Konieczny, M., 2021. Copper matrix composites reinforced with steel particles. AIMS Materials Science, 8(3), 321-342. https://doi.org/10.3934/matersci.2021021

McCreight, T., Wardell, RA., Devos, K., 2006. PMC Decade: The First Ten Years of Precious Metal Clay. Brynmorgen Press. ISBN: 978-1-929565-19-1. Honkong, pp:253.

Paknejad, S.A., Mannan, S.H., 2017. Review of silver nanoparticle based die attach materials for high power/temperature applications. Microelectronics Reliability, 70, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.01.010

Thongnopkun, P., Jamkratoke, M., Ekgasit, S., 2012. Thermal behavior of nano-silver clay in the application of handmade jewelry. Materials Science and Engineering: A, 556, 849-854. https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.079

Yeşilmen, N., 2018. Takının tarihsel gelişim süreci ve 21. yüzyılda takı anlayışı: seramik-metal kili ile çağdaş takı yorumlamaları. Sanatta Yeterlik Tezi, Anadolu Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, Eskişehir, pp:210.

Yukio, O., Hino, K., Ishigaki, S., Araki, H., Nakata, Y., Fujimaru, A., 1996. Clayish Composition For Molding Shaped Article of Noble Metal And Method for Productıon of Sintered Article of Noble Metal, Amerika Birleşik Devletleri Patent, No: US005702501A.

İnternet Kaynakları

1. About Metal Clay. 2024. https://amcaw.org/about-metal-clay/. (06.06. 2024)
2. Discover Aussie Metal Clay. 2024. https://www.aussiemetalclay.com/. (06.06. 2024
3. Welcome to the World of Goldie Metal. 2013. https://goldieclay.com/. (06.06. 2024
4. Jacobson H. Art in Metal Clay. 2024. https://www.artinsilver.com/. (06.06. 2024)
5. Prometheus Gümüş Killeri. 2024. https://www.prometheushobby.com/. (06.06. 2024)

6. Basic steps of making. 2024. https://www.artclay.co.jp/htm/. (06.06. 2024)
7. Metal Clay. 2024. https://cooltools.us/collections/clay. (06.06. 2024)
8. Project X Silver Clays. 2024. https://clayrevolution.com/. (06.06. 2024)
9. Hadar's Clay. 2024. https://www.artinsilver.com/. (06.06. 2024)
10. Han K. 2020. What is Carboxymethyl Cellulose (CMC)/Cellulose Gum (E466) in Food and Uses. https://foodadditives.net/thickeners/cellulose-gum/. (06.06. 2024)