

Atık Seramik CPU ve Telefon Kartlarında Altın ve Diğer Değerli Metallerin Geri Kazanımı

Alaaddin GÜNDEŞ^{1,2}, Ali DEĞİRMENCİ², Ali Kemal SOĞUKSU^{3*}

¹ Üniversite - Sanayi - Kamu İşbirliği Geliştirme, Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Kahramanmaraş

² Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş

³ Kahramanmaraş NP Bilim ve Sanat Merkezi, Kahramanmaraş

¹<https://orcid.org/0000-0001-9030-0776>

²<https://orcid.org/0000-0002-4805-3983>

³<https://orcid.org/0000-0002-8370-5369>

*Sorumlu yazar: kemalsoguksu@gmail.com

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 08.04.2022

Kabul tarihi: 28.07.2022

Online Yayınlanma: 10.03.2023

Anahtar Kelimeler:

Altın

Değerli metal

E-Atık

Hidrometalurji

Artan dünya nüfusu ile gelişen teknolojik yeniliklerden dolayı hızla artan hammadde tüketimi ve bunun sonucunda oluşan atık ürünlerinden hammadde geri dönüşümü önem kazanmıştır. Özellikle değerli metaller açısından geri kazanım çok büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, bilgisayarlarda bulunan seramik işlemci (CPU) ve cep telefonu kartlarından değerli metallerin geri kazanımı amaçlanmıştır. Çalışmada ömürlerinin sonuna gelmiş Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarından (EEE) olan seramik CPU ve telefon kartlarında bulunan değerli metaller fiziksel, hidrometalurji ve pirometalurjik yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Bu değerli metalleri içeren minerallerin yüksek değeri ve sınırlı rezervleri, değerli metallerin kentsel madenciliğini çok çekici kılmaktadır. Uygulanan yöntemler sürecinde değerli metal miktarları ICP-OES ile ölçülmüştür. Çalışmada diğer değerli metallerin yanı sıra seramik CPU'da altın (Au) oranı yaklaşık olarak 1119 mg/kg olarak bulunmuştur. Atık cep telefon kartlarında ise yaklaşık 54,40 mg/kg altın (Au) tespit edilmiştir.

Recovery of Gold and Other Precious Metals in Waste Ceramic CPUs and Phone Cards

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 08.04.2022

Accepted: 28.07.2022

Published online: 10.03.2023

Keywords:

Gold

Precious metal

E-Waste

Hydrometallurgy

Due to the increasing world population and the developing technological innovations, the rapidly increasing consumption of raw materials and as a result, the recycling of raw materials from waste products has gained importance. Especially in terms of precious metals, recovery is of great importance. In this study, it is aimed to recover precious metals from ceramic processors (CPU) in computers and mobile phone cards. This study, precious metals found in ceramic CPUs and telephone cards, which are electrical and electronic equipment (EEE) that have reached the end of their life, were obtained by using physical, hydrometallurgical and pyrometallurgical methods. The high value and limited reserves of minerals containing these precious metals make urban mining of precious metals very attractive. During the applied methods, precious metal amounts were measured with ICP-OES. In the study, besides other precious metals, the rate of gold (Au) in ceramic CPU was found to be approximately 1119 mg/kg. On the other hand, approximately 54.40 mg/kg of gold (Au) was detected in waste mobile phone cards.

To Cite: Gündeş A., Değirmenci A., Soğuksu AK. Atık Seramik CPU ve Telefon Kartlarında Altın ve Diğer Değerli Metallerin Geri Kazanımı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 140-150.

1. Giriş

Son yüzyılda gelişen teknoloji ile birlikte EEE kullanımında hızlı artış, sürekli değişkenlik ve hızlı tüketim olmaktadır. Teknolojik olarak modeli eskiyen teknolojik ürünlerin birikmesi çevresel ve hammadde sorununu beraberinde getirmektedir. Elektronik ürünlerde kullanılan hammaddelerin çevreye etkisi ve geri kazanımı stratejik önem kazanmaktadır. Geri kazanım, özellikle içerdikleri değerli metaller nedeniyle oldukça önem arz etmektedir. Avrupa Birliğinin WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment) ve RoHS(Restriction of Hazardous Substances) direktifleri ülkemizi yakından ilgilendirmektedir. Bu sebepten dolayı sanayide, e-atıkların bertaraf edilmesi ve geri dönüşümü zaruri hale gelmektedir. Bununla beraber yeni üretilen EEE'lerde tehlikeli ve zehirli metal kullanımının azaltılması da önem arz etmektedir. E-atıklar içeriklerindeki değerli metal oranları dikkate alındığında önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir. Tipik bir altın cevherinde ton başına genellikle 0,5 ila 15 g altın bulunurken, 1 ton genişletme kartları ve merkezi işlem birimleri(CPU) genellikle sırasıyla yaklaşık 150 ve 10.000 g'ın üzerinde altın içerebilir (Barbieri ve ark., 2009). Böylece, e-atıktan altının geri kazanılması, hem ekonomik sürdürülebilir kalkınma hem de çevre koruma açısından giderek daha çekici hale geliyor (Bisceglie ve ark., 2017; Lu ve ark., 2017).

Baskılı devre kartları (PCB), tüm EEE'ler de bulunmakla birlikte bilgisayar ana kartlarında önemli ölçüde bulunmaktadır. Baskılı devre kartları (PCB), genel olarak seramikler, polimerler, metaller ve yapı malzemeleri içermekle birlikte bu malzemeler farklı oranlarda heterojen olarak bulunmaktadır (Carvalho ve ark., 2018). PCB içeriğinde bulunan metalik elementlerin yaklaşık olarak % 30'unu oluşturmaktadır. Bu metalik kısım incelendiğinde ise Cu, Fe, Al, Ni, Zn, Sn, Ag, Au ve Pd gibi değerli metaller ile Hg, Cd ve Pb gibi potansiyel toksik metaller dahil olmak üzere birçok metal içermektedir (Carvalho ve ark., 2018; Havlik ve ark., 2011; Cayumil ve ark., 2016; Arshadi ve ark., 2018).

EEE'ler içerisinde TV'ler, cep telefonları, PC'ler, dizüstü bilgisayarlar, tabletler, ev aletleri, elektrikli bileşenler, DVD'ler ve hesap makineleri gibi elektronik atıklar oldukça çeşitlilik göstermektedir. Aynı zamanda bu atıkların % 38 ile % 50 arasında değişen bir metal içeriğine sahiptirler (Karamanoğlu ve ark., 2016). Elektronik atıklardan metallerin geri dönüşüm süreci çevresel etki ve ekonomik yönden avantajlara sahiptir.

Geri dönüşüm çalışmaları içerisinde altın(Au)'nın geri kazanımı önem taşımaktadır. Elektronik atıkların içerisindeki değerli metallerin geri kazanılmasında uygulanan üç ayrı yöntem vardır. Bunlar; hidrometalurjik, pirometalurjik ve mekanik/fiziksel ayırma yöntemleridir.

Hidrometalurjik yöntem; katı maddelerin asit veya aşındırıcı liç işlemlerine tabi tutulmasıyla oluşturulmaktadır. Bu işlemlerden sonra çözeltiler metal konsantrasyonunun artırılması ve safsızlaştırılması için solvent ekstraksiyonu, iyon değişimi ve adsorpsiyon gibi işlemleri içermektedir. Bu çözeltilerdeki metal geri kazanımı için kristalizasyon, kimyasal redüksiyon ya da elektrolitik arıtım işlemleri uygulanmaktadır. Pirometalurjik yöntem; elektronik atıkların içerisinde bulunan demir içermeyen metallerin geri kazanılması için kullanılan metottur. Bu prosesin amacı paladyum ve platin gibi metallerin konsantre halde geri kazanılmasını sağlamaktır. Mekanik ve fiziksel ayırma

yöntemleri; elektrik iletkenlik temelli ayırıcılar, manyetik ayırma, eleme/ayırma ve şekil ayrımı vasıtası ile gerçekleştirilir.

E-atıkların geri dönüşümü için Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA), işlenmemiş malzemeler yerine atık metallerin kullanılmasının enerjinin korunması ve kirliliği azaltma gibi birçok önemli avantajı olduğunu belirtmektedir (Cui ve ark., 2008).

E-atıkların %3,1'lik bir kısmını PCB'ler oluşturmaktadır (Tuncuk ve ark., 2012). PCB'lerde ağırlıkça %18,448 bakır(Cu), %0,156 gümüş(Ag), %0,039 altın(Au) ve %0,009 paladyum(Pd) bulunmaktadır. PCB bileşimleri (Chehade ve ark., 2012) yüzde ağırlıkça bakır(Cu) için 18,448, gümüş(Ag) için 0,156, altın(Au)'da 0,039, paladyum(Pd) için 0,009'dur. PCB'lerdeki değerli metal konsantrasyonlarının doğal cevherlerinden zengin olması, PCB'lerin geri dönüşümünü ekonomik ve çevresel açıdan önemli hale getirmektedir.

PCB'ler, Cu, Ag, Au ve Pd değerli metal kaynağı açısından önemli olması sebebiyle geri dönüşümlerde özellikle bu metallerin geri kazanılmasına odaklanılmaktadır (Li ve ark., 2012).

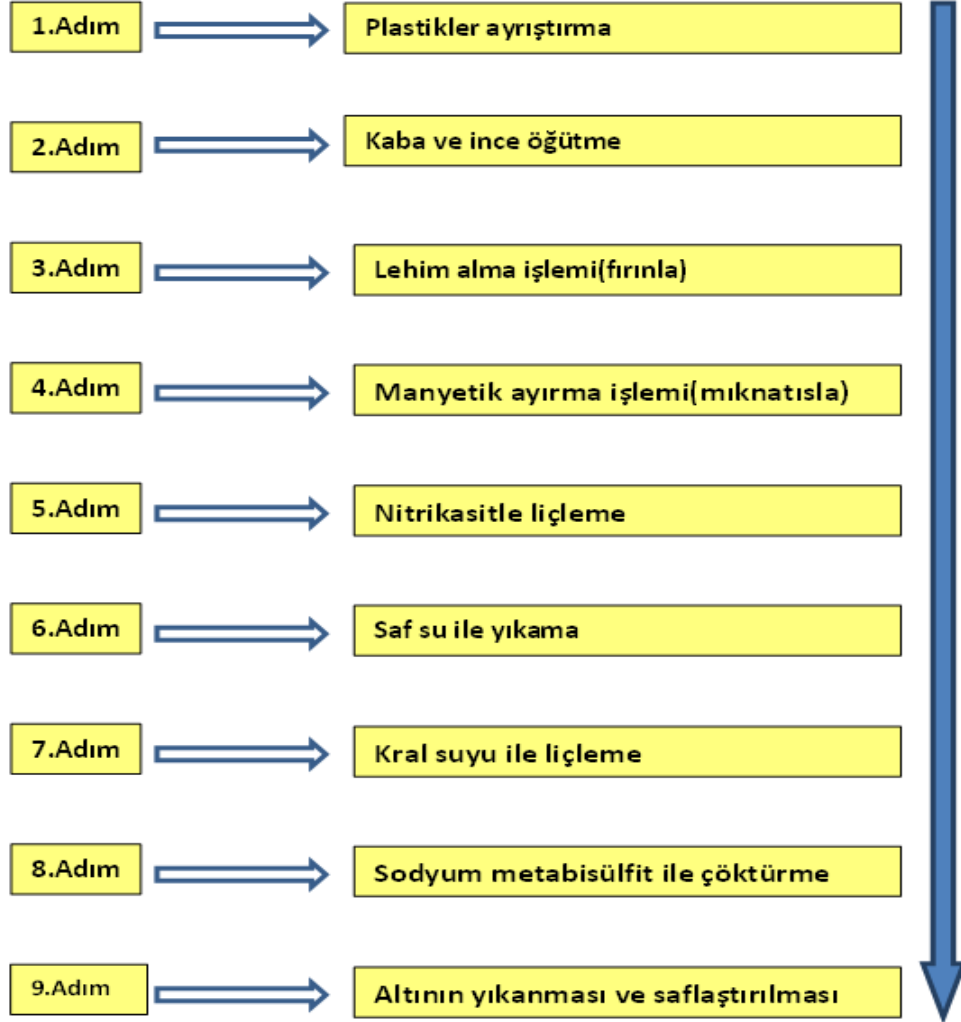
Yapılan çalışmada atık durumda bulunan bilgisayarların seramik işlemci (CPU) ve telefon kartlarından değerli metallerin fiziksel, hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemler ile geri dönüşüm şeklinde elde edilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca değerli metallerin kazanımı çalışmalarında fiziksel ayırıştırma sonra genellikle hidrometalurjik yada pirometalurjik yöntemlerden sadece biri kullanılırken (Li ve ark., 2018; Ashiq, 2019; Wang ve ark., 2017; Ma, 2019) çalışmamızda bu her iki yöntem beraber kullanılmıştır. Çalışmamızda aynı yöntem ve süreçler kullanılarak, CPU işlemcileri ve telefon kartı atıklarından elde edilebilecek malzemelerin karşılaştırılmasına bakılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

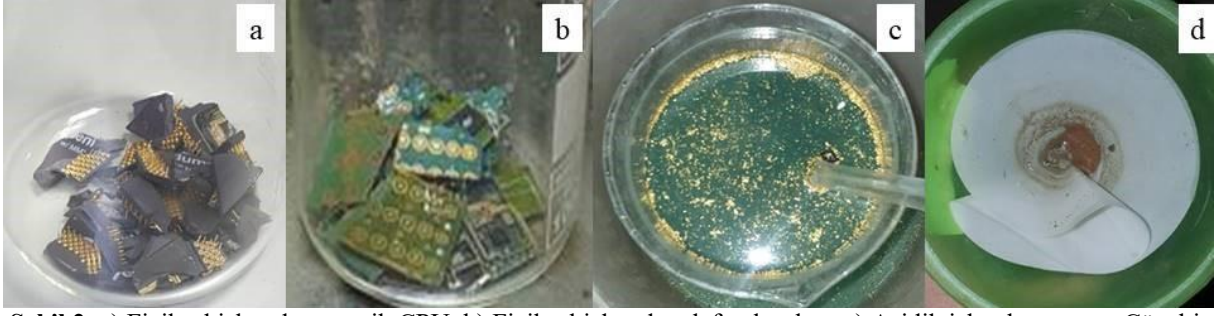
Bu çalışmada seramik CPU ve telefon kartlarının Fiziksel, hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemlerle geri dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kimyasal maddeler; Hidroklorik Asit (HCl--Merck), Nitrik Asit (HNO₃--Sigma-Aldric), Sodyum metabisülfid (Na₂S₂O₅--Sigma-Aldric) şeklindedir. Çalışmamızda altın ve diğer değerli metal içeren atıklara sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de ayırıştırma yönelik temel işlem basamaklarının şeması gösterilmektedir. Temin edilen baskılı devre kartları fiziksel ayırışmaya tabi tutulmuştur. Birinci adımdan, dördüncü adıma kadarki süreci kapsayan fiziksel ayırışma işleminde, öncelikle plastik ayırıştırma işlemi yapılmış ardından kaba ve ince öğütmelerle malzeme bir sonraki lehim alma işlemine hazırlanmış hale getirilmiştir. Lehim alma işlemi fırın kullanılarak yapılmıştır. Lehim alma işleminden sonra mıknatısla manyetik ayırma işlemi uygulanarak manyetik özelliğe sahip malzemeler öğüntü içerisinden ayrılmıştır. Ardından beşinci adımdan sekizinci adıma kadarki süreci kapsayan işlemler hidrometalurjik süreci göstermektedir. Baskılı devre kartlarında ana metal olan bakır ve nikel, 10M nitrik asit konsantrasyonunda, 65

°C sıcaklıkta 500 ml nitrikasit çözeltisi içerisinde 200 rpm/dk hızla 2 saat süre ile karıştırma işlemi ile liçleme yapılarak ayrıştırılmıştır. Son ayrışma işlemi ile bakır ve nikelinden ayrılan öğüntü malzeme saf suyla yıkandıktan sonra dokuzuncu adım olan pirometalujik işlemine geçilmiştir.



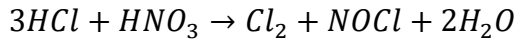
Şekil 1. Temel işlem şeması.

Şekil 2’de ise deneysel çalışmalara ait görsellerden örnekler görülmektedir.

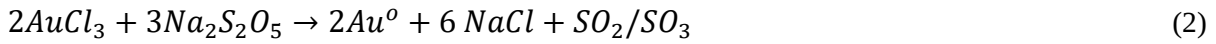
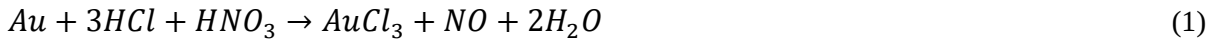


Şekil 2. a) Fiziksel işlemlerde seramik CPU, b) Fiziksel işlemlerde telefon kartları, c) Asidik işlemler sonrası Çözelti, d) Süzme işlemi sonrası değerli metal

90 ml kral suyu konsantrasyonunda, 50 °C sıcaklığında 500 ml çözelti içerisine konulan öğütü malzeme 2 saat süre ile 200 rpm/dk karıştırma hızı ile işleme alınmıştır. Asit konsantrasyonu ve sıcaklığın etkisinin e-atıklar içerisinden değerli metallerin geri kazanımında önemli rol oynamaktadır (Ünal, 2015). Kral suyu, altın ve platin metaliyle tepkimeye girebilen güçlü bir asit çözeltisidir. Kral suyu çözeltisi 3/1 oranda hidroklorik asit/nitrik asit karışımıdır.



Kral suyunun çözelti içerisinde tamamen çözünen altının çöktürülmesinde sodyum metabisülfid kimyasalı kullanılmıştır. Reaksiyon formülü;



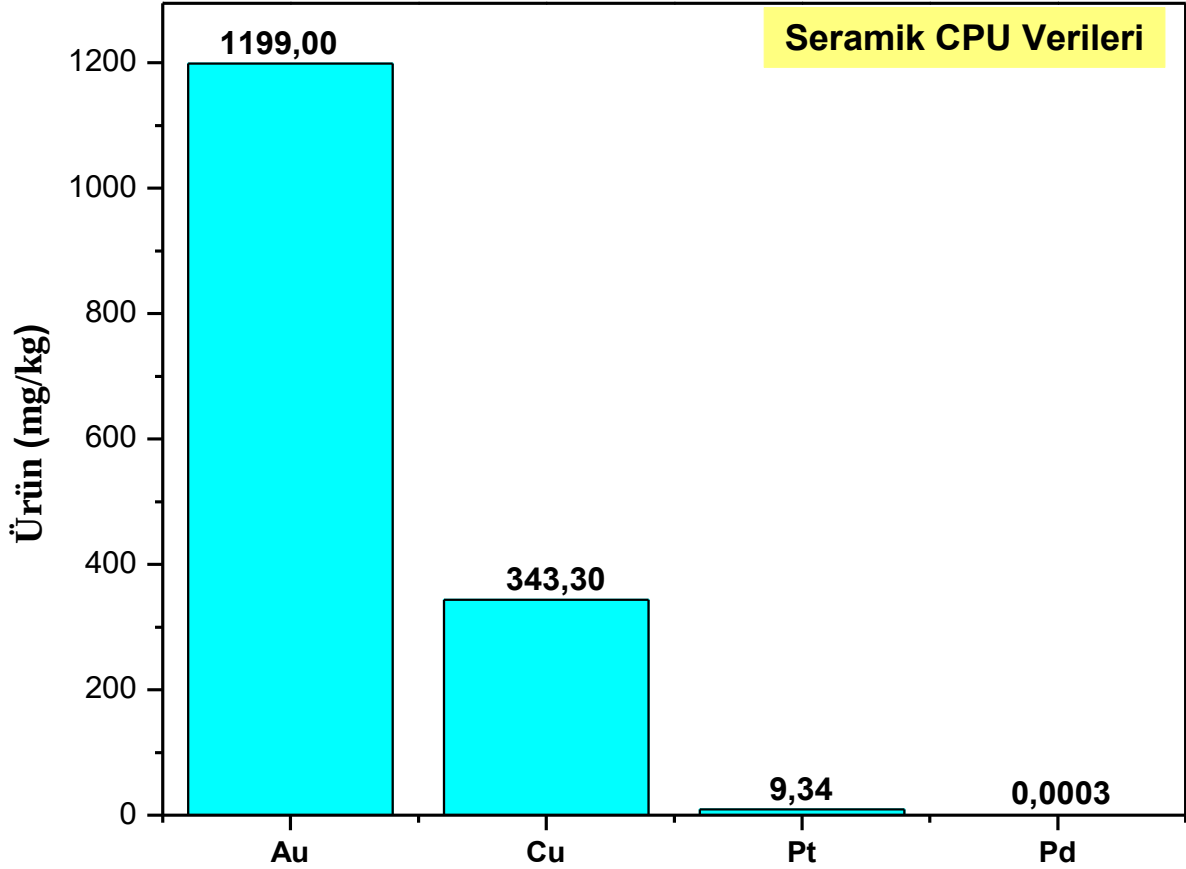
Kral suyu ($3HCl + HNO_3$) içindeki çözünen altın iyonları redüklenerek çöktürme işlemi tamamlandıktan sonra vakum nüce yardımı ile katı sıvı ayrımı yapılmıştır. Çözelti içerisindeki metal konsantrasyonunun artırılması ve safsızlaştırılması için, iyon değişimi, adsorpsiyon ve solvent ekstraksiyonu gibi işlemler gerçekleştirilmektedir. Çözeltilerdeki metallerin geri kazanılması için; kristalizasyon, kimyasal redüksiyon veya elektrolitik arıtım işlemleri uygulanmaktadır (Ritcey ve ark., 2006; Safarzadeh ve ark., 2007). Elde edilen çözelti sıvılardan 10 ml alınarak ICP-OES(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrophotometers) ile analizi yapılmıştır. Elde edilen sıvı örneklerinden altın(Au), bakır(Cu), çinko(Zn), demir(Fe), kalay(Sn), paladyum(Pd) ve platin(Pt) değerli metallerin analizi yapılmıştır. Mutlak konsantrasyonlarının belirlenmesi için ICP-OES analizleri üç okuma şeklinde Perkin Elmer Optima 2100 DV model cihaz ile yapılmıştır. ICP-OES cihaz kalite kontrolleri, standart referans maddeleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Sonuçlar analizler için ortalama şeklinde ifade edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada Seramik CPU ve telefon kartlarında değerli metallerin geri kazanımı yapılarak ICP-OES ile geri kazanımı sağlanan metallerin analizleri yapılmıştır.

3.1. Seramik CPU Analizi

Seramik CPU malzemelerine ait analiz sonuçları Şekil 4



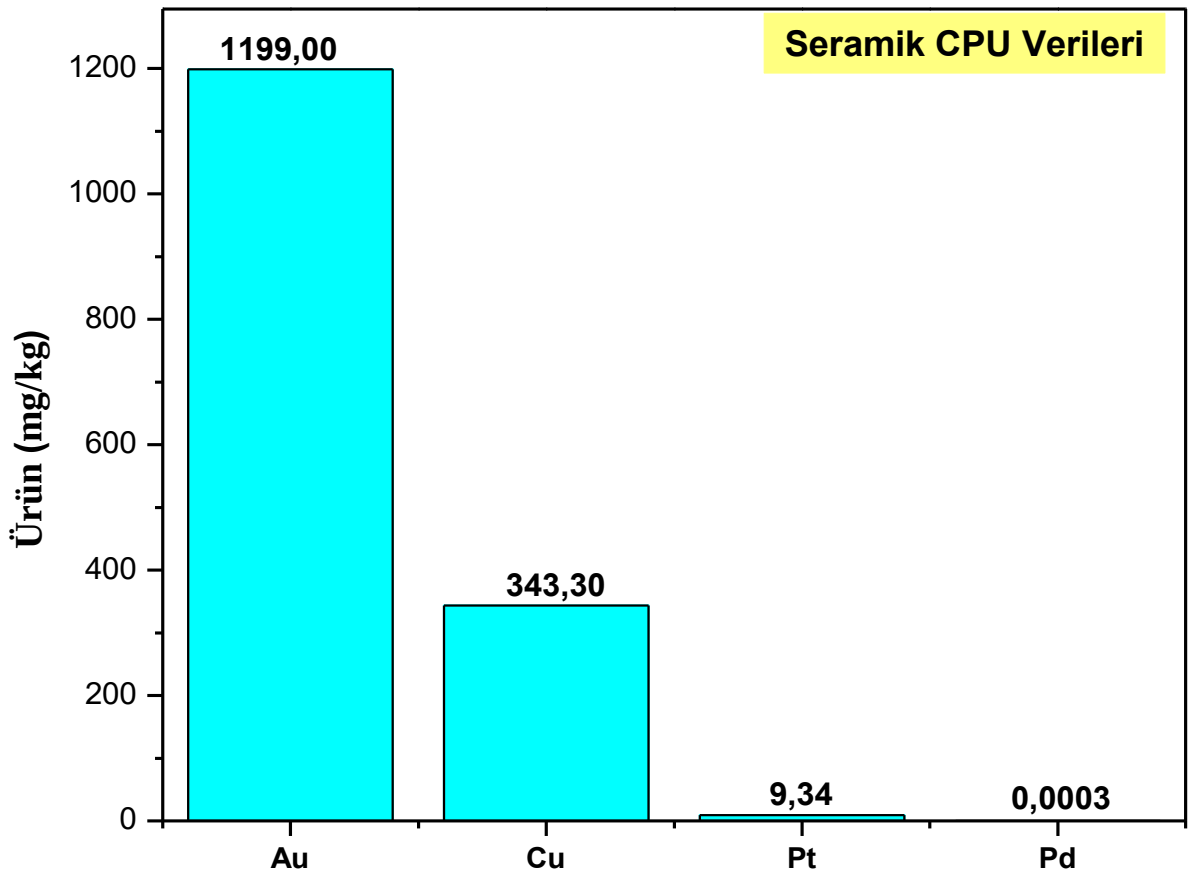
Şekil 'te gösterilmiştir. Şekil 3 ise çalışmada kullanılan CPU görsellerine aittir. İncelenen değerli metaller içerisinde en fazla oran 1199 mg/kg Altın(Au) değerli metaline aittir. Seramik CPU'lerden elde edilen ikinci en yüksek oran ise 343,30 mg/kg ile nitrik asitten sonra altınla birlikte ayrışamayan bakır(Cu) metaline aittir. ICP-OES sonuçlarına göre 0,0003 mg/kg ile en az miktar Paladyum(Pd) malzemesine aittir.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan CPU

Bir ton PC(kişisel bilgisayar) atığından elde edilen altının miktarı, 17 ton altın cevherinden elde edilen altın miktarından çok daha fazladır (Çiftlik ve ark., 2009). Seramik CPU'lar önemli miktarda altın içermektedir (Sinioros ve ark., 2015). Seramik CPU analizlerinde bulunan değerli metal miktarları sırasıyla Au>Cu>Pt>Pd şeklinde olduğu görülmüştür. Altın, bakır, gümüş, paladyum ve platin gibi metaller, e-atıkların geri kazanımı karlı bir süreç haline dönüştüren değerli metaller olarak bilinmektedir (Onay, 2019). Yapılan çalışmada en yüksek miktar ise altın(Au)'a aittir. Farklı yöntemlerin kullanılması sonucunda geri dönüşümden elde edilen madde miktarları değişiklik gösterebilmektedir. Analizler de platin eldesi sağlanmıştır.

Seramik CPU ile yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Farklı oranlar olmasının sebepleri arasında seramik CPU olarak farklı firma ürünleri kullanılması ve kullanılan metodun farklılık göstermesi olduğu öngörülmektedir.



Şekil 4. Seramik CPU' dan değerli metal bulguları

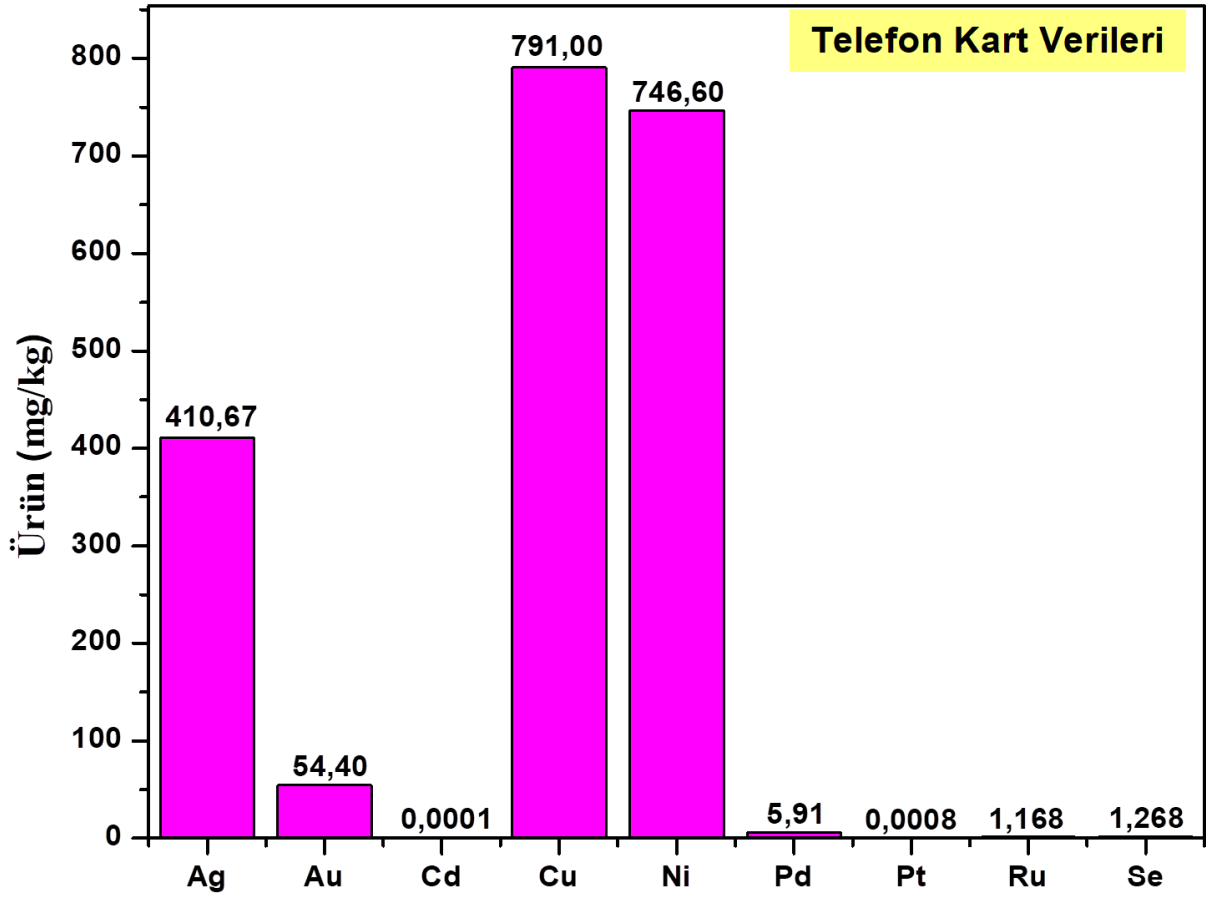
3.2. Telefon Kartı Analizi

Çalışmada kullanılan telefon kartlarına ait basit görsel örneği ise Şekil 5'te verilmiştir. Telefon kartları, temel işlem şemasındaki (Şekil 1) işlemlerden geçirilmiştir. Şekil 6'da Telefon kartları malzemelerine ait ICP-OES analiz verileri görülmektedir. Analiz bulgularına göre altın oranı 54,40 mg/kg olarak bulunmuştur. En düşük veri ise kadmilyum(Cd) metaline ait 0,0001 mg/kg olduğu

görülmüştür. Kadmiyum çok küçük miktarlarda çıkması literatür taramaları ile uyumludur (Rao ve ark., 2022). Şekil 6’da verilen ICP-OES analiz verilerine göre sıralama yapılacak olursa Bakır(Cu)>Nikel(Ni)>Gümüş(Ag)>Altın(Au)>Paladyum(Pd)>Selenyum(Se)>Rutenyum(Ru)>Platin(Pt)>Kadmiyum(Cd) şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Çalışmada kullanılan telefon kartları



Şekil 6. Telefon Kartları Verileri

Cep telefonu ağırlığının yaklaşık %23 metallerden oluşmaktadır ve bu oranın oldukça büyük bir bölümü bakırdır. Arta kalan kısım ise seramik ve plastiktir (Yaren ve ark., 2014). Farklı araştırmacılar, değerli metallerin (özellikle altın) elektronik atıklardan etkin bir şekilde geri kazanımının mümkün olduğunu belirtmişlerdir (Syed ve ark., 2012; Sum, 1991; Dehchenari ve ark., 2017).

Geri dönüşüm teknolojisi, e-atıkların, milyarlarca dolarlık eritme tesislerinin kurulumu ile ilgili maliyetlerin bir kısmında, yüksek verimlilik ve düşük karbon ayak izi ile çevre dostu bir şekilde işlenmesi sağlanmalıdır. Bunun sonucunda enerji verimliliği artar ve yeni hammadde madenciliğine bir nebze de olsun katkı sağlar (Kaya, 2016). Geri kazanımının yüksek maliyeti ve zorlukları, endüstriyel uygulamalarını sınırlamaktadır. Geri kazanım uygulamalarında çevreye zararında minimize edilmesi önem taşımaktadır.

4. Sonuç

Hem elektronik atık yönetimi hem de geri dönüşüm, minimum çevresel etki ve maksimum değerli metal geri kazanımı açısından önemlidir. Buna ekonomik analiz ve fizibilite çalışmalarının sonuçlarına göre karar verilmelidir.

Bu çalışmada CPU işlemci kartları ve cep telefonu kartları gibi atık baskı kartlar üzerindeki değerli metallerin geri kazanımı amaçlanmıştır. E-atıkların geri kazanımında daha ekonomik olan yöntemler kullanılmıştır.

Seramik CPU'lar üzerinde yapılan çalışma sonucunda 1199 mg/kg oranında altın(Au) geri kazanımı sağlanmıştır. Ayrıca altın dışında da yapılan sıvı analizlerinde tespit edilen diğer değerli metaller ise sırasıyla bakır(Cu), platin(Pt), ve paladyum(Pd) şeklinde olmuştur. En düşük oran 0,003 mg/kg ile paladyum metaline aittir.

Ayrıca cep telefon kartları üzerinde değerli metal analizlerinde ise 54,40 mg/kg altın geri kazanımı gerçekleştirilmiştir. Geri kazanımı sağlanan diğer metaller ise bakır(Cu), nikel(Ni), gümüş(Ag), paladyum(Pd), selenyum(Se), rutenyum(Ru), platin(Pt) ve kadmiyum(Cd) şeklinde olmuştur.

Geri kazanımı sağlanan bu değerli metallerden altın, gümüş, bakır, paladyum kuyumculuk-mücevher ve elektronik alanlarında, alüminyum, bakır ve nikel ise döküm sektöründe hammadde olarak kullanılabilir. Ayrıca platin otomotiv-kimya sektörü, rutenyum ise elektronik sanayisinde kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Çalışmamız olan “2018/3-11 YLS” numaralı bu proje Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca çalışmamız Kosgeb Arge İnovasyon program desteği almıştır. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve KOSGEP’e teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Arshadi M., Yaghmaei S., Mousavi SM. Content evaluation of different waste PCBs to enhance basic metals recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 2018; 139: 298-306.
- Ashiq A. Hydrometallurgical recovery of metals from e-waste. *Electronic Waste Management and Treatment Technology* 2019; 225–246.
- Barbieri L., Giovanardi R., Lancellotti I., Michelazzi M. A new environmentally friendly process for the recovery of gold from electronic waste. *Environmental Chemistry Letters* 2009; 8(2): 171-178.
- Bisceglie F., Civati D., Bonati B., Faraci FD. Reduction of potassium cyanide usage in a consolidated industrial process for gold recovery from wastes and scraps. *Journal of Cleaner Production* 2017;142: 1810–1818.
- Carvalho MA., Caldas MPK., Tenório JAS., Espinosa DCR. Characterization of PCBs from obsolete computers aiming the recovery of precious metals. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2018; 147-154.
- Cayumil R., Khanna R., Rajarao R., Mukherjee PS., Sahajwalla V. Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. *Waste management* 2016; 57: 121-130.
- Chehade Y., Siddique A., Alayan H., Sadasivam N., Nusri S., Ibrahim T. Recovery of gold, silver, palladium, and copper from waste printed circuit boards. In *Proceedings of the international conference on chemical, civil and environment engineering (ICCEE)*, 2012; 226-234, Dubai.
- Cui J., Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of hazardous materials* 2008; 158(2-3): 228-256.
- Çiftlik S., Handırı İ., Beyhan M., Utku A., Ilgar M., Gönüllü T. Elektrikli ve elektronik Atıkların (E-Atık) yönetimi, ekonomisi ve metal geri kazanım potansiyeli bakımından değerlendirilmesi. *Türkiye'de katı atık yönetimi sempozyumu*, 2009; TÜRKAY2009.
- Dehchenari MA., Hosseinpour S., Aali R., Iran NS., Mehdipour M. Simple method for extracting gold from electrical and electronic wastes using hydrometallurgical process. *Environmental Health Engineering and Management Journal* 2017; 4(1): 55–58.
- Havlik T., Orac D., Petranikova M., Miskuliova A. Hydrometallurgical treatment of used printed circuit boards after thermal treatment. *Waste Management* 2011; 31(7): 1542-1546.
- Karamanoğlu P., Aydın S. An economic analysis of the recovery of gold from CPU, boards, and connectors using aqua regia. *Desalination and Water Treatment* 2016; 57(6): 2570-2575.
- Kaya M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management* 2016; 57: 64-90.
- Li H., Eksteen J., Oraby E. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review. *Resources, Conservation and Recycling* 2018; 139(), 122–139.

- Li J., Zeng X. Recycling printed circuit boards. In Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook 2012; 287-311.
- Lu Y., Xu Z. Recycling non-leaching gold from gold-plated memory cards: Parameters optimization, experimental verification, and mechanism analysis, Journal of Cleaner Production 2017; 162: 1518-1526.
- Ma E. Recovery of waste printed circuit boards through pyrometallurgy. Electronic Waste Management and Treatment Technology 2019; 247-267.
- Onay P. Elektronik atıklardan kimyasal yöntemlerle değerli metallerin geri kazanımı. İstanbul Üniv-Cerrahpaşa, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- Rao MD., Singh KK., Morrison CA., Love JB. Selective recovery of nickel from obsolete mobile phone PCBs. Hydrometallurgy 2022; 210: 105843
- Ritcey GM. Solvent extraction in hydrometallurgy: present and future. Tsinghua Science and Technology 2006; 11(2): 137-152.
- Safarzadeh MS., Bafghi MS., Moradkhani D., Ilkhchi MO. A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources. Minerals Engineering 2007; 20(3): 211-220.
- Sinioros P., Lasithiotakis M., Akidil ME. Small-capacity gold production tests from waste desktop computers. Environmental Quality Management 2015; 25(2): 5-6.
- Sum EY. The recovery of metals from electronic scrap. JOM 1991; 43(4): 53-61.
- Syed S. Recovery of gold from secondary sources-A review. Hydrometallurgy 2012; 115-116: 30-51.
- Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici EY., Devci H. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. Minerals Engineering 2012; 25(1): 28-37.
- Ünal Ö. Ram belleklerdeki metalik değerlerin hidrometalurjik yöntemlerle geri kazanımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- Wang H., Zhang S., Li B., Pan D., Wu Y., Zuo T. Recovery of waste printed circuit boards through pyrometallurgical processing: A review. Resources, Conservation and Recycling 2017; 126(): 209-218.
- Yaren MF., Taşkin MF., Uygun Ö., Alp A. Atık ekonomisi ve elektronik atıkları değerlendirilmesinin önemi. ISEM2014, 2014; sayfa no: 630-642, Adıyaman.