

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015402 (529-537)

AKU J. Sci. Eng.18 (2018) 015402 (529-537)

DOI: 10.5578/fmbd.67320

Atık Baskılı Devre Kartlarından Değerli Metal Geri Kazanım Yöntemlerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri ile Değerlendirilmesi

Aysun Özkan

Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Eskişehir

aysunozkan@anadolu.edu.tr

Geliş Tarihi:08.09.2017

; Kabul Tarihi:17.08.2018

Özet

Anahtar kelimeler

Analitik serim süreci;
Baskılı devre kartı; Çok ölçütlü karar verme;
Elektronik atık,
Promethee

Son yıllarda hızlı bir şekilde artış gösteren elektronik atıkların geri kazanımı özellikle içerdikleri değerli metaller nedeniyle oldukça önem arz etmektedir. Uygulanacak geri kazanım sistemi, teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal yönlerden en uygun çözüm olmalıdır. Bu çalışmanın amacı, baskılı devre kartlarındaki (BDK) değerli metallerin geri kazanım yöntemlerinin farklı karar verme yöntemleriyle araştırılmasıdır. Bu amaçla, pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyometalurjik yöntemler, Analitik Serim Süreci (ASS) ve PROMETHEE olmak üzere iki çok ölçütlü karar verme yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, alternatiflerin fayda, maliyet ve riskleri göz önüne alınmıştır. Her iki yöntemden elde edilen öncelik sıralamasına göre, biyometalurjik prosesler en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

Evaluation of Precious Metal Recovery Processes from Waste Printed Circuit Boards by using Multi Criteria Decision Making Techniques

Abstract

Keywords

Analytic network process; Printed circuit boards; Multi criteria decision making;
Electronic waste;
Promethee

The recovery of electronic waste, which has increased rapidly in recent years, is particularly important because of the precious metals it contains. Applied management systems must be the most appropriate solution from a technical, environmental, economic and social point of view. The main objective of this study was to investigate the most appropriate treatment/disposal option by using different decision-making techniques. For this purpose, pyrometallurgical, hydrometallurgical and biometallurgical methods were evaluated according to two multi-criteria decision-making techniques: analytic network process (ANP) and PROMETHEE. In this context, benefits, costs and risks for the alternatives were taken into consideration. According to the comparisons, the biometallurgical methods was found to be the most appropriate solution in both cases.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Teknolojinin sürekli gelişimi ile birlikte elektrikli-elektronik eşya (EEE) sektöründeki ürün çeşidi her geçen gün artmakta, tüketicinin en yeni ve en güçlü araçlara olan talebine bağlı olarak kullanım süreleri kısalmaktadır. EEE kullanımındaki sirkülasyonun artmasının bir sonucu olarak da, büyük miktarlarda atık elektrikli ve elektronik eşya (AEEE) kütleleri oluşmaktadır. Büyük ev eşyaları, küçük ev aletleri, bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları, aydınlatma ekipmanları, elektrikli ve elektronik aletler (büyük ve sabit sanayi aletleri hariç olmak

üzere), oyuncaklar, eğlence ve spor ekipmanları, tıbbi cihazlar, izleme ve kontrol aletleri ve otomatlar şeklinde kategorize edilen; bu kategorilerde yer alan ürünlerin kullanım ömrü dolduğu andaki bütün bileşenleri ve içerdiği sarf malzemeler “elektronik atık (e-atık)” olarak tanımlanmaktadır.

Uluslararası bir girişim olan Solving the E-waste Problem (StEP) tarafından sunulan sonuçlara göre, 2013 yılında dünyada 48,9 milyon ton e-atık üretilmiştir. StEP, bu rakamın %33 artarak 2017’de 65,4 milyon tona ulaşacağını öngörmektedir (Ericsson ve Kuehr, 2015). 2014 yılı verilerine göre

ise, Türkiye’de 503.000 ton e-atık üretildiği tahmin edilmektedir (Balde et al. 2015).

Piyasaya arz edilen çok çeşitli tipte ve miktarda EEE bulunduğu için bunların atıklarının tüm atık akışı içindeki miktarlarını ve içlerinde barındırdıkları bileşenlerin neler olduğunu anlamak oldukça zordur. Genelde bu atıklar içindeki maddeler demir, demir dışı metaller (bakır, alüminyum, gümüş, altın, paladyum vb.), cam, plastikler ve diğer materyaller olarak beş grup altında ele alınmaktadır. EEE’de çeşitli amaçlar için kullanılan kurşun, cıva, arsenik, kadmiyum, selenyum, krom (+6) ve alev geciktirici maddeler, insan sağlığı ve çevreyi tehdit ettikleri için izin verilen limit değerleri aştıklarında, bu tür eşya atıklarının tehlikeli atık özelliği kazanmasına neden olmaktadır.

E-atıkların geri dönüşümü yalnızca atık yönetimi noktasında değil, değerli metallerin geri kazanılması yönünden de oldukça önemlidir. Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA), işlenmemiş malzemeler yerine hurda metallerin kullanılmasının enerjinin korunması ve kirliliği azaltma gibi birçok önemli avantajı olduğunu söylemiştir (Cui and Zhang 2008).

E-atıkların %3,1’lik bir kısmını baskılı devre kartları (BDK) oluşturmaktadır (Tuncuka et al. 2012). BDK’larda ağırlıkça %18,448 bakır (Cu), %0,156 gümüş (Ag), %0,039 altın (Au) ve %0,009 paladyum (Pd) bulunmaktadır (Çizelge 1). Aynı miktarda BDK ve altın cevheri karşılaştırıldığında, BDK’lardan geri kazanılacak altın miktarının cevherden hazırlanacak olan altın miktarından 100 kat daha fazla olduğu bilinmektedir. Atık BDK’lar tipik olarak yaklaşık % 28 metal, % 23 plastik ve % 49 seramik malzemeler içermekte olup bu içerik, kullanım amacı ve yeri doğrultusunda değişiklik gösterebilmektedir (Chehade et al.2012).

Çizelge 1. BDK bileşimi (Chehade et al. 2012)

Bileşen	Ağırlıkça (%)
Bakır (Cu)	18,448
Gümüş (Ag)	0,156
Altın (Au)	0,039
Paladyum (Pd)	0,009
Diğer metaller	9,35
Metal olmayanlar	72

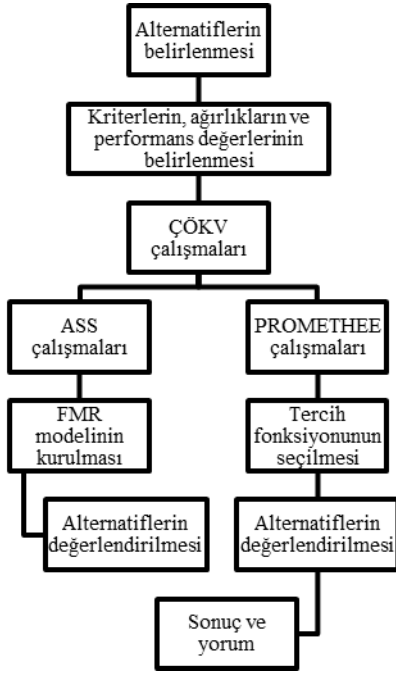
BDK’lar genellikle epoksi reçine, cam yünü, bakır, nikel, demir, alüminyum ile altın ve gümüş gibi değerli metalleri ve bu malzeme ve metalleri karta lehimlemek için kullanılan kurşun ve kalayı içerirler. BDK’lardaki değerli metal konsantrasyonlarının doğal cevherlerinden zengin olması, BDK’ların geri dönüşümünü ekonomik ve çevresel açıdan önemli hale getirmektedir. BDK’ları bu denli önemli hale getiren Cu, Ag, Au ve Pd değerli metalleri olması sebebiyle, BDK geri dönüşümünde özellikle bu metallerin geri kazanılmasına odaklanılmaktadır (Li and Zeng 2012). Atık BDK’lardaki bu değerli metallerin pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyometalurjik prosesler olmak üzere üç temel yöntemle geri kazanılmaları mümkündür. Pirometalurjik prosesler insineratörlerde, plazma reaktörlerde veya ergitme/sinterleme fırınlarında gerçekleştirilebilmekte fakat, yüksek sıcaklıklar kullanıldığı için maliyet ve emisyon oluşumundan kaynaklanan sorunlar söz konusu olabilmektedir. Diğer yandan bu prosesler, AEEE’den değerli metallerin geri kazanımında tek başına yeterli olmamaktadır. Hidrometalurjik proseslerde atıklardaki metaller, siyanür, halojenler, tiyoüre veya tiyosülfatla sıvı ortama aktarıldıktan (liçleme) sonra çöktürme, çözücü ekstraksiyonu, adsorpsiyon veya iyon değişimi ile geri kazanılabilmektedir. Bu yöntemlerin yüksek kimyasal tüketimi, bu kimyasallardan kaynaklanan toksik etkiler ve uzun işlem süreleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. Biyometalurjik prosesler ise yine liçleme ve sorpsiyon şeklinde iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla bakteriyel metal sülfür oksidasyonu ve bazı biyolojik malzemelerle (bitkiler, kitosan vb.) sorpsiyon işlemi yapılmaktadır (Cui and Zhang 2008).

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen yöntemler Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemlerinden Analitik Serim Süreci (ASS) ve PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) yaklaşımlarıyla değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elektronik atıkların yönetiminde ÇÖKV tekniklerinin kullanıldığı farklı çalışmalar olmakla birlikte (Bereketli et al. 2011; Banar et al. 2014; Queiruga et al. 2008), BDK’lardan metal geri

kazanım yöntemlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma mevcut değildir.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada, Analitik Serim Süreci (ASS)'nde Fayda Maliyet Risk (FMR) modeli ve PROMETHEE olmak üzere iki farklı Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) tekniği kullanılmıştır. Her iki yöntemde de problemin çözümü için aynı alternatifler, aynı kriterler kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın akış şeması Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması

2.1. Alternatifler

Bu çalışmada, pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyometalurjik olmak üzere 3 farklı alternatif ele alınmıştır.

Pirometalurjik yöntemler (A1): Uzun zamandır, BDK'ların geri dönüşümündeki en büyük ekonomik faktör metallerin geri kazanımı olmuştur. Önceleri kontrolsüz insinerasyon, açık yakma gibi basit insinerasyon yöntemleri kullanılmaktayken; çevrenin korunmasındaki eksiklik ve insan sağlığı üzerindeki tehditler sebebiyle bu yöntemler yasaklanmıştır. Dolayısıyla, bu termal prosesler temel alınarak pirometalurji yöntemi geliştirilmiştir (Quan *et al.* 2010). Pirometalurji, atık BDK'lardaki demir dışı metallerin ve değerli metallerin geri kazanımında kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Pirometalurjik prosesler insineratörlerde, plazma

reaktörlerde veya ergitme/sinterleme fırınlarında gerçekleştirilebilmekte fakat, yüksek sıcaklıklar kullanıldığı için maliyet ve emisyon oluşumundan kaynaklanan sorunlar söz konusu olabilmektedir. Diğer yandan bu prosesler, AEEE'den değerli metallerin geri kazanımında tek başına yeterli olmamaktadır (Cui and Zhang 2008).

Hidrometalurjik yöntemler (A2): BDK'lardaki değerli metallerin geri kazanımında kullanılan diğer bir geleneksel yöntem de hidrometalurjidir. Hidrometalurjik proseslerde atıklardaki metaller; siyanür, halojenler, tiyoüre veya tiyosülfatla sıvı ortama aktarıldıktan (liçleme) sonra çöktürme, çözücü ekstraksiyonu, adsorpsiyon veya iyon değişimi ile geri kazanılabilmektedir. Bu yöntemlerin yüksek kimyasal tüketimi, bu kimyasallardan kaynaklanan toksik etkiler ve uzun işlem süreleri gibi dezavantajları bulunmaktadır (Cui and Zhang 2008). Siyanür liçi, maden endüstrisinde altın için kullanılmakta olup, elektrokimyasal bir prosesdir. Reaksiyon pH 10-10,5'te etkindir. AEEE'de geri kazanım verimleri Au>Ag>Pd>Pt şeklindedir. Siyanürün yarattığı sorunlar nedeniyle farklı kimyasallar önerilmektedir. Halojen liçinde; florlu, klorlu, iyotlu bileşikler kullanılabilir. Genellikle 3/1 oranında HCl/HNO₃ karışımı kullanılmaktadır. Reaksiyon düşük pH değerlerinde gerçekleşmektedir. Kullanılan reaktantlar korozif olduğu için ekipmanlara çok zarar verir, ayrıca toksik oldukları için de dikkat edilmesi gereken bir işlemdir. Tiyoüre ekstrakt olarak kullanıldığında asidik koşullarda kompleksler (sülfürik asitte Fe iyonu kullanımıyla demir-tiyoüre kompleksi) oluşturulursa geri kazanım verimi artırılıp %99'lara ulaşılabilir. Bu yöntemin ticari uygulaması fazla yoktur. Çünkü, siyanüre göre daha maliyetli bir prosesdir ve kimyasal tüketimi çok fazladır. Fotoğraf ve ilaç endüstrisinde kullanılan bir kimyasal olan tiyosülfat, siyanürle geri kazanıma bir alternatif olarak önerilmektedir. Amonyum sülfatla gerçekleştirilen elektrokimyasal-katalitik sistemde, altının anodik yüzeyinde altın amonyum ya da sülfatla reaksiyona girerken, Cu(II) amonyum kompleksinin stabilitesi için pH 9-10 olmalıdır. Bu yöntem, düşük çevresel etkilere sahip olsa da, yüksek geri kazanım verimleri için uzun işlem

süresine ve yüksek kimyasal tüketimine gereksinim duyar. Ayrıca, oldukça zahmetli bir prosestir (Cui and Zhang 2008).

Biyometalurjik yöntemler (A3): Biyolojik malzemeler ile metal geri kazanımı son yıllarda en ümit verici yöntemlerden birisi olmuştur. Biyometalurji, malzeme ve metal işleme endüstrisi için dönüm noktası olma yolunda büyük bir potansiyele sahip olup son yirmi yıldır yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Birçok ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşlar bu yeni teknolojiye ilgi göstermektedir. Bakır, kadmiyum, çinko, nikel, kobalt, krom, altın ve gümüş gibi metaller için araştırma ve geliştirme çalışmaları ileri seviyede sürdürülmektedir (Bhat *et al.* 2012).

Bu proses yine liçleme ve sorpsiyon şeklinde iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Biyokütle ile anyonik ve katyonik kimyasal türleri (ağır metaller, pestisitler vb.) arasında etkileşim olduğu iyi bilinmektedir. Biyokütlenin (canlı veya ölü) hedef kimyasal iyonları hücre içinde veya yüzeyinde tutma potansiyelleri vardır. Bakteriler, mantarlar, mayalar, algler, bitkiler ve organik atıkların sulu çözeltilerdeki metalleri bağlama yeteneği olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Bu olay, “biyosorpsiyon” olarak bilinmekte ve süreçten sorumlu biyokütle de “biyosorbent” olarak adlandırılmaktadır. Biyosorpsiyon; elektrostatik etkileşimler, iyon değişimi, kompleks oluşturma, iyonik bağların oluşumu, çökelme ve çekirdeklenme gibi proseslerin kombinasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyosorpsiyon tabanlı süreçler geleneksel metotlarla kıyaslandığında; düşük işletim maliyeti, düşük kimyasal kullanımı, hızlı proses ve yüksek verim sağlaması gibi pek çok avantajı olduğu görülmektedir (Bhat *et al.* 2012).

Sulardan metal giderimi veya geri kazanımı için kullanılan kimyasal çöktürme, buharlaştırma, elektrokimyasal arıtma ve iyon değiştirme gibi mevcut teknolojiler pahalı olmalarının yanı sıra düşük metal konsantrasyonlarında da etkili olamamaktadır. Bu sebeple; uçucu kül, torf, mikrobik biyokütle ve tarımsal yan ürünler gibi metal adsorplamada ucuz ve etkili yöntemler geliştirmek için çeşitli yaklaşımlar üzerinde çalışılmaktadır. Elma, muz, portakal gibi meyvelerin kalıntılarında elde edilen ucuz materyaller de

adsorpsiyon için özellikle uygun olmaktadır. Yüksek selüloz, pektin (galakturonik asit), hemiselüloz ve lignin içeriği sebebiyle portakal kabukları; adsorban olarak kullanılma konusunda güçlü bir imkan sunmaktadır. Bu bileşikler, fenolik ve karboksilik asit gibi metal bağlamada yetenekli çeşitli polar fonksiyonel gruplar ve biyopolimerler içermektedir (Feng and Guo, 2012). Yüksek verim sağlamaları, kolay ulaşımları ve ekonomik olmaları, portakal kabuklarının biyosorbent olarak kullanımında motive edici olmaktadır (Izquierdo *et al.* 2013).

2.2. Kriterler

Çalışmada kullanılan kriterler ve özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir. ASS ve PROMETHEE çalışmalarında aynı kriterler kullanılmıştır. Ayrıca, ASS’de “fayda fırsat maliyet risk” analizinde fayda ve fırsat kümesi birleştirilmiş ve “fayda maliyet risk” analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2. ASS ve PROMETHEE çalışmalarında kullanılan kriterler

Kriter no	Kriter adı	Birim, tercih yönü	Açıklama
Fayda kümesi (ASS için)			
g1	Sosyal kabul edilebilirlik	Puan (1-9), artan	Çevresel etkilerinden dolayı toplumun kabulü
g2	Sürdürülebilirlik	Puan (1-9), artan	Proses ve çevre için daimi olma durumu
g3	Geri dönüşüm oranı	%, artan	Geri dönüşüm prosesleri sonucu elden edilen ürün miktarı
g4	Saflık	%, artan	Elde edilen ürünlerin saflığı
Maliyet kümesi (ASS için)			
g5	Yatırım maliyeti	Puan (1-9), azalan	Proses için gerekli arazi, bina ve ekipman maliyetleri
g6	İşletme maliyeti	Puan (1-9), azalan	Proses için gerekli personel, enerji vb. harcamalar
Risk kümesi (ASS için)			
g7	Atık oluşumu	Puan (1-9), azalan	Proses sonucunda oluşabilecek atık yükü
g8	Sağlık etkisi	Puan (1-9), azalan	Proses sırasında kullanılan kimyasal vb. nedeniyle oluşabilecek olumsuz sağlık etkileri
g9	Ön işlem gereksinimi	Puan (1-9), azalan	Proses öncesinde atıklar için gerekli olabilecek farklı ön işlem prosesleri
g10	İşlem süresi	Saat, azalan	Proses için gerekli olan toplam süre
g11	Emisyon oluşumu	Puan (1-9), azalan	Proses sırasında ortaya çıkabilecek su ve hava emisyonları

2.3. Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) Çalışmaları

ÇÖKV çalışmalarında amaç, belirlenen kriterlerle sınırlı sayıdaki alternatif arasından en uygunu belirlemektir (Vincke, 1992). ÇÖKV problemlerini çözmek için hedef programlama, Analitik Hiyerarşi Süreci, ASS, PROMETHEE, TOPSIS ve ELECTRE gibi farklı yöntemler mevcuttur (Figueira *et al.* 2005). Bu çalışmada, farklı matematiksel yaklaşımları nedeniyle ASS ve PROMETHEE yöntemleri tercih edilmiş ve her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

En basit ASS yapısı, tek bir serimden ibarettir, en karmaşık halde ise, her bir seçeneğin doğurabileceği fayda, maliyet, fırsat ve riskler birlikte analiz edilebilir. Çeşitli formüller kullanılarak, seçeneklerin her bir model için aldığı değerler tek bir değere dönüştürülürler. Dikkat edilmesi gereken konu; faydalar, maliyetler, fırsatlar ve risklerin, problemin yapısına göre farklı önem derecelerine sahip olabilecekleridir. Bu ağırlıklandırmaya “Fayda- Fırsat-Maliyet-Risk” (Benefit Opportunity Cost Risk) (BOCR) analizi denir (Saaty, 1994).

ASS’de ölçütlerin ve seçeneklerin birbirine göre önemlerini belirleyebilmek için ikili karşılaştırmalar yapılır. Seçeneklerin karşılaştırılması, her bir ölçüt için ayrı ayrı yapılır. Sayısal olarak ifade edilebilen ölçütler için seçenekleri karşılaştırmada bir sorun yoktur. Fakat sayısal olarak ifade edilemeyen ölçütler için bir seçeneğin diğerinden ne kadar önemli olduğunu belirlemek kolay değildir. Sayısal olarak ifade edilemeyen ölçütlerin karşılaştırılmasında Saaty tarafından geliştirilmiş 1-9 aralığındaki ölçek kullanılır.

PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) 1982 yılında Brans tarafından geliştirilmiş ve 1985 yılında Brans ve Vincke tarafından genişletilmiştir (Behzadian *et al.* 2007). Bu yöntemde ikili karşılaştırma yapılmadan veriler doğrudan kullanılabilir. PROMETHEE’nin uygulanması için iki tip bilgi gerekir: birincisi, kriterlerin göreceli önem değerleri (ağırlıkları), ikincisi ise karar vericinin tercihinin (fonksiyonuna) göre alternatiflerin kritere ilişkin değerleridir (Ballı *et al.* 2007). Yöntem, karar vericinin ağırlıklandırmayı doğru şekilde yapabileceğini kabul eder. Tercih fonksiyonu ise, her bir kriter için tercih derecesi 0 ya da 1 olan iki

alternatif arasındaki farkın uyarlamasını yapar. 6 adet tercih fonksiyonu vardır, olağan, U-tipi, V-tipi, kademeli, lineer ve Gaussian. Her bir kriter için, fonksiyon tipi U-tipi ise kayıtsızlık eşik değeri (q), V-tipi ve Gauss ise tercih eşik değeri (p), lineer ve kademeli ise hem tercih hem kayıtsızlık eşik değeri belirlenmelidir. Olağan fonksiyon tipinde eşik değer tanımlanmaz. PROMETHEE yöntemi 5 adımdan oluşur. Prosedür ikili karşılaştırmalara dayanan sapmaların tespit edilmesi ile başlar. Daha sonra her bir kriter için uygun tercih fonksiyonu kullanılarak global tercih indeksi hesaplanır (2. ve 3. aşamalar). 4. aşamada her bir alternatif için pozitif ve negatif baskın akımlar hesaplanır ve kısmi sıralama yapılır. Son aşamada prosedür her bir alternatif için net baskın akımın hesaplanması ve tam sıralamanın yapılmasıyla tamamlanır (Behzadian *et al.* 2007; Mergias *et al.* 2007).

2.3.1. ASS çalışmaları

BDK’lardan değerli metal geri kazanımı yöntemlerini değerlendirmek için Super Decision yazılımı kullanılmıştır. Bunun için, “fayda fırsat maliyet risk” analizinde fayda ve fırsat kümesi birleştirilmiş ve “fayda maliyet risk (FMR)” analizi gerçekleştirilmiş ve Çizelge 2’deki değerler kullanılmıştır. g3-g4 ve g10 kriterleri için direk veri girişi yapılmış, diğer kriterler içinde de ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. İkili karşılaştırmalar, uyumsuzluk değeri, %10’un altında olacak şekilde yapılmıştır. Programda aşağıdaki formülasyon kullanılmıştır:

$$\text{Formül: } bB + oO + c(1/C) + r(1/R) \quad (1)$$

Burada öncelikle her bir küme içerisinde değerlendirmeler yapılmış ve her bir kümenin ağırlıkları $r = 1/2$; $c = 1/3$; $b = 1/6$; ve $o = 0$ şeklinde kullanılarak sonuca ulaşılmıştır.

2.3.2. PROMETHEE çalışmaları

PROMETHEE yöntemi uygulanmasında lisanslı D-Sight yazılımının akademik sürümü kullanılmıştır. Çizelge 3’de verilen matris kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Sayısal değer kullanılan kriterlerde, en uygun ve en yaygın olan “Gauss” fonksiyonu kullanılırken, puanı (1-9) olarak değerlendirilen kriterlerde “olağan” tipte fonksiyon kullanılmıştır. Kriterlerin birim, maksimum/minimum olmak üzere tercih yönü ve fonksiyon özellikleri, tercih eşik değerleri ve ağırlıklandırılması Çizelge4’de görülmektedir.

Ağırlık değerleri toplam 1 olacak şekilde ve risk kriterleri en etkin olacak şekilde verilmiştir. Biyolojik proseslerin daha çevreci olduğu algısı nedeniyle sosyal kabul edilebilirliğinin daha yüksek olacağı ve bunu pirometalurjik proseslerin takip edeceği ve kimyasal kullanımı nedeniyle en son sırada hidrometalurjik yöntemin yer alacağı düşünülmüştür. Tüm proseslere bakıldığında hem enerji hem de malzeme temini gerektirdikleri, bunlarda herhangi bir problem olması durumunda sistemde aksaklıkların söz konusu olabileceği ancak enerji ihtiyacının yüksek olması nedeniyle pirometalurjik proseslerin sürdürülebilirliğinin diğerlerine kıyasla daha az olacağı düşünülmüştür. Pirometalurjik prosesler metallerin BDK'lardan geri kazanılması için tek başına yeterli olamamakta, hidrometalurjik veya elektrokimyasal yöntemlere de ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla bu yöntemin verimi ve saflığı diğerlerine göre daha düşük olacaktır. Biyometalurjik proseslerde ise BDK'lardan metali çözmek herhangi bir kimyasal kullanılmadığı sürece oldukça zor ve düşüktür. Dolayısıyla geri kazanılan metal miktarı az ancak saflığı hidrometalurjik prosesle benzerdir. Yatırım ve işletme maliyetleri için literatürde ve uygulamada herhangi bir bilgiye ulaşılamadığı için 1-9 ölçeklendirme sistemi kullanılmıştır. Pirometalurjik proseslerin yüksek enerji tüketen sistemler olması nedeniyle hem kurulum hem işletme aşamasında yüksek maliyetler gerektireceği düşünülmüştür. Hidrometalurjik proseslerde ise, kimyasal tüketimi yüksek olacağından biyometalurjik proseslere göre daha yüksek işletme maliyetine sahip olacağı ancak yatırım maliyeti açısından biyometalurjik proseslerle benzer olacağına karar verilmiştir. Hidrometalurjik proseslerde yoğun kimyasal kullanımı nedeniyle oluşacak atık miktarının da fazla olacağı bunu biyometalurjik ve pirometalurjik proseslerin takip edeceği düşünülmüştür. Sağlık etkisi özellikle işyeri ortamı açısından düşünüldüğünde, kimyasal kullanımı nedeniyle hidrometalurjik prosesle en fazla, takiben ısı işlem uygulanması sebebiyle pirometalurjik proseslerde ve en az biyometalurjik proseslerde olacak şekilde puanlanmıştır. BDK'lardan metal geri kazanım çalışmalarına başlanmadan önce bu atıkların parçalanması işlem verimini de etkileyecektir. Bu

durumun özellikle biyometalurjik proseslerde en etkin olacağı bunu hidrometalurjik ve pirometalurjik proseslerin takip edeceği düşünülmüştür. İşlem süresi her ne kadar seçilen prosesin detaylarına bağlı olsa da genel olarak incelendiğinde biyometalurjik proseslerin en uzun süreli prosesler olduğu, sonrasında hidrometalurjik ve pirometalurjik proseslerin geldiği görülmektedir. Proses sırasında oluşabilecek emisyonlar incelendiğinde pirometalurjik proseslerde ısı işlem uygulamasından dolayı dioksin/furan gibi emisyonların oluşumu söz konusu olabilir. Bu prosesi, hidrometalurjik ve biyometalurjik prosesler takip etmektedir.

Çizelge 3. Kriterlerin performans değerleri

Kriter no	A1	A2	A3
g1	5	4	8
g2	4	6	6
g3	70	99	80
g4	60	90	90
g5	9	5	5
g6	9	7	5
g7	3	7	4
g8	3	5	2
g9	2	3	5
g10	5	24	300
g11	8	5	3

A1: pirometalurjik yöntemler, A2: hidrometalurjik yöntemler, A3: biyometalurjik yöntemler

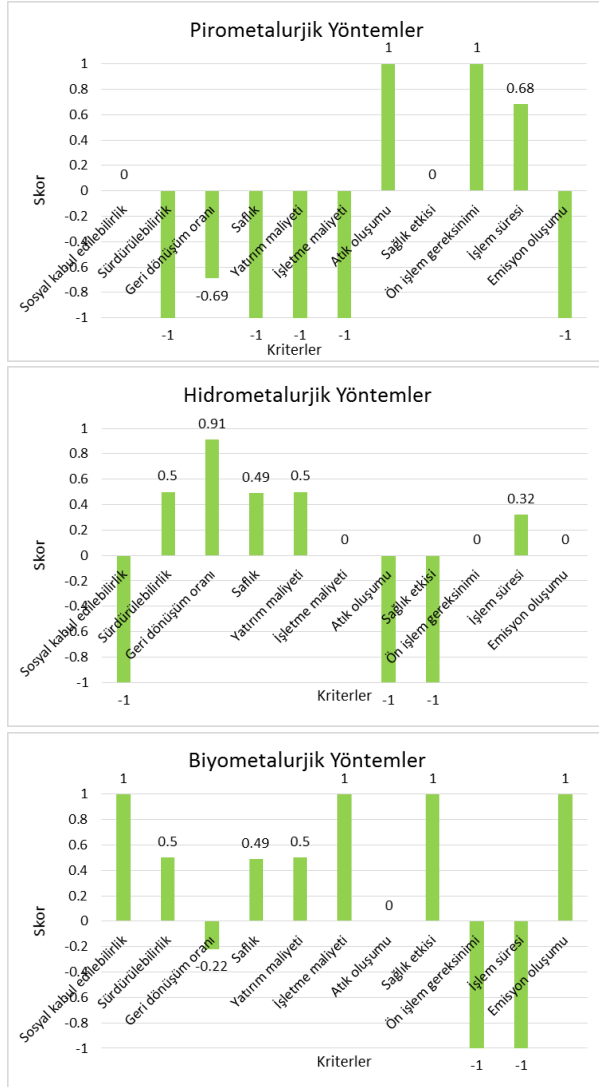
Çizelge 4. PROMETHEE için kullanılan kriter özellikleri

Kriter no	Fonksiyon tipi	Tercih eşik değeri	Ağırlıklandırma
g1	Olağan		0,05
g2	Olağan		0,05
g3	Gauss	10	0,05
g4	Gauss	10	0,05
g5	Olağan		0,12
g6	Olağan		0,12
g7	Olağan		0,08
g8	Olağan		0,15
g9	Olağan		0,08
g10	Gauss	20	0,1
g11	Olağan		0,15

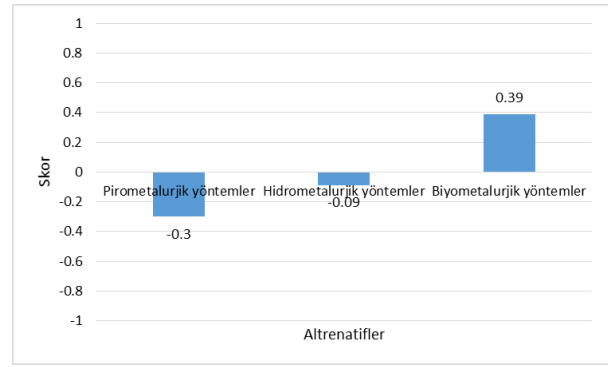
3. Bulgular ve Tartışma

Baskılı devre kartlarından değerli metallerin geri kazanım yöntemleriyle ilgili olarak 3 farklı alternatif ASS ve PROMETHEE yöntemleri ile değerlendirilmiştir. PROMETHEE'den elde edilen sonuçlar ekran görüntüleri halinde Şekil 2-3'de verilmiştir. Şekil 2'de her bir alternatife kriterlerin etkisi görülürken, Şekil 3'de alternatiflerin tercih yönleri verilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde, pozitif akış değerleri toplamı pirometalurjik,

hirometalurjik ve biyometalurjik yöntemler için sırasıyla 2,68; 2,72 ve 5,49 iken; negatif akış değerleri 5,69; 3 ve 2,22'dir. Bu sonuçlar biyometalurjik yöntemlerin tercih edilme durumunun yüksek olduğunu göstermektedir. Pirometalurjik yöntemlere atık oluşumu ve ön işlem gereksinimi kriterlerinin, hidrometalurjik yöntemlere geri dönüşüm oranı kriterinin ve biyometalurjik yöntemlere sosyal kabul edilebilirlik, işletme maliyeti, sağlık etkisi ve emisyon oluşumu kriterlerinin en fazla pozitif yönde etki eden kriterler olduğu belirlenmiştir. Şekil 3'de ise, biyometalurjik yöntemler, pozitif yönlüken, hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemlerin negatif etkilere sahip olduğu görülmektedir.

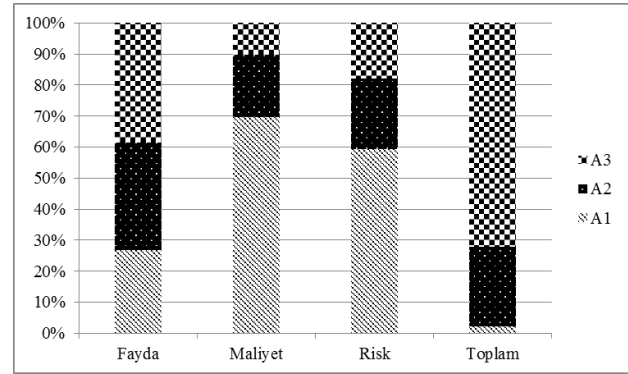


Şekil 2. Kriterlerin alternatiflere etkisi



Şekil 3. PROMETHEE'den elde edilen alternatiflerin sıralaması

ASS için yukarıda verilen kriterlere ve formüle göre alternatiflerin sıralaması ve herbir küme için (fayda, maliyet, risk) elde edilen sonuçlar yüzde dağılım olarak Şekil 4'de verilmiştir. Fayda, maliyet ve risk kümelerinden elde edilen sonuçlar, Eşitlik 1'de verilen denklem ve küme ağırlıklandırmaları kullanılarak nihai sonuçlar hesaplanmış ve Şekil 4'de toplam sütununda verilmiştir. Buna göre, biyometalurjik yöntemler %72 ile ilk sırada yer alırken, bunu %26 ile hidrometalurjik ve %2 ile pirometalurjik yöntemler takip etmektedir.



Şekil 4. ASS sonuçları (A1: pirometalurjik yöntemler, A2: hidrometalurjik yöntemler, A3: biyometalurjik yöntemler)

Her iki ÇÖKV tekniğinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir. Her iki yöntemde de BDK'lardan değerli metal geri kazanımı için en uygun yöntem biyolojik yöntemler olarak bulunmuştur. İkinci sırada hidrometalurjik yöntemler gelirken, pirometalurjik yöntemler son sırada yer almıştır.

Çizelge 5. BDK'lardan değerli metal geri kazanım yöntemlerinin ASS ve PROMETHEE ile karşılaştırma sonuçları

Alternatifler	ASS (sıralama)	PROMETHEE (sıralama)
Pirometalurjik yöntemler	3	3
Hidrometalurjik yöntemler	2	2
Biyometalurjik yöntemler	1	1

4. Sonuç

Elektronik atıkların özellikle baskılı devre kartlarının geri kazanımı sadece atık arıtımı açısından değil aynı zamanda değerli metallerin geri kazanımı açısından da oldukça önemlidir. Bunun için temel olarak pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyometalurjik olmak üzere 3 yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada da bu yöntemler teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal bakış açılarıyla değerlendirilmiş ve en uygun yöntem olarak biyometalurjik prosesler belirlenmiştir. Bu prosesler, uzun yıllardır madenlerden bakır ve değerli metal geri kazanımında kullanılmakta olup, elektronik atıklarda kullanımı sınırlıdır. Ancak önümüzdeki yıllarda hem çevresel etkilerinin az olması hem de düşük maliyet ve riskler nedeniyle söz konusu yöntemin uygulamalarının artması beklenmektedir.

Kaynaklar

Baldé, C. P., Wang, F., Kuehr, R. and Huisman, J., 2015. The global e-waste monitor – 2014. United Nations University, IAS– SCYCLE, Bonn, Germany.

Ballı, S., Karasulu, B. and Korukoğlu, S., 2007. En Uygun Otomobil Seçimi Problemi İçin Bir Bulanık PROMETHEE Yöntemi Uygulaması. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, **22(1)**, 139-147.

Banar, M., Tulger, G. and Özkan, A., 2014. Plant Site Selection for Recycling Plants of Waste Electrical and Electronic Equipment in Turkey By Using Multicriteria Decision Making Methods. *Environmental Engineering and Management Journal*, **13 (1)**, 163-172.

Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A. and Aghdasi, M., 2007. PROMETHEE: A Comprehensive Literature Review on Methodologies and Applications. *European Journal of Operational Research*, **200**, 198–215.

Bereketli, İ., Genevois, M., Albayrak, Y.E. and Ozyol, M., 2011. WEEE treatment strategies' evaluation using fuzzy LINMAP method. *Expert Systems with Applications*, **38**, 71-79.

Bhat, V., Rao, P. and Patil, Y., 2012. Development of an integrated model to recover precious metals from electronic scrap - A novel strategy for e-waste management. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, **37**, 397 – 406.

Chehade, Y., Siddique, A., Alayan, H., Sadasivam, N., Nusri, S. and Ibrahim, T., 2012. Recovery of gold, silver, palladium, and copper from waste printed circuit boards. International Conference on Chemical, Civil and Environment Engineering (ICCEE'2012), pp: 226-234.

Cui, Z. and Zhang, L., 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of Hazardous Materials*, **158**, 228–256.

Feng, N. and Guo, X., 2012. Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, 1224-1231.

Ericsson, D. and Kuehr, R., 2015. Solving the e-waste problem Annual Report 2013/2014, Stockholm/Bonn.

Figueira, J., Greco, S. and Ehrgott, M., 2005. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, Springer, Boston, MA, USA, 1045 pp.

Izquierdo, M., Marzal, P. and Lens, PNL., 2013. Effect of organic ligands on copper(II) removal from metal plating wastewater by orange peel-based biosorbents. *Water, Air, Soil Pollution*, **224 (1507)**, 1-15.

Mergias, I., Moustakas, K., Papadopoulos, A. and Loizidou, M., 2007. Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for ELVs: The case of Cyprus. *Journal of Hazardous Materials*, **147**, 706–717.

Queiruga, D., Walther, G., Gonzalez-Benito, J. and Spengler, T., 2008. Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management*, **28 (1)**, 181-190.

Saaty TL., 1994. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the AHP, RWS Publications, Pittsburgh, PA, USA, 527 pp.

Tuncuka, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E.Y. and Deveci, H., 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, **25**, 28-37.

Vincke P., 1992. *Multicriteria Decision Aid*. Wiley, NewYork, NY, USA, 174 pp.