

**ATIK ELEKTRİK-ELEKTRONİK EŞYALARIN YÖNETİMİNDE EN UYGUN
İLERİ DÖNÜŞÜM VE GERİ DÖNÜŞÜM STRATEJİLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Zehra Gizem ELMAS

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2022

25/01/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Zehra Gizem ELMAS, ATIK ELEKTRİK-ELEKTRONİK EşYALARIN YÖNETİMİNDE EN UYGUN İLERİ DöNüşüM VE GERİ DöNüşüM STRATEJİLERİNİN BELİRLENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

ÖZET

ATIK ELEKTRİK-ELEKTRONİK EŞYALARIN YÖNETİMİNDE EN UYGUN İLERİ DÖNÜŞÜM VE GERİ DÖNÜŞÜM STRATEJİLERİNİN BELİRLENMESİ

Zehra Gizem ELMAS

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2022

Danışman: Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA

Elektrik elektronik eşya üretiminin artmasıyla ortaya çıkan elektrik elektronik atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu atıklara uygulanacak geri dönüşüm ve ileri dönüşüm yöntemleri ile hem prosesler için iyileştirici ara ürün hem de daha yüksek kaliteli değerli ürünler elde edilebilmektedir. Birçok geri ve ileri dönüşüm alternatifi arasından çevresel, teknik ve ekonomik açıdan hangisinin uygun olacağını önceden belirlemek zor olabilir. Bunu belirleyebilmek için Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve çok ölçütlü karar verme teknikleri (MCDM) oldukça faydalı yöntemlerdir.

Bu noktadan hareketle hazırlanan bu tez çalışmasında, atık baskılı devre kartlarına uygulanan/uygulanabilecek ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejileri belirlenmiş, bu stratejiler sonucunda üretilen ürünlere ait LCA çalışması gerçekleştirilmiştir. LCA çalışmasından elde edilen sonuçlar MCDM’de kullanılmak üzere çevresel kriter değerlerini oluşturmuştur. MCDM çalışması için çevresel kriterlere ek olarak teknik ve ekonomik kriterler de belirlenmiş ve Entropi metodu ile ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklandırma metodundan elde edilen sonuçlar, TOPSIS metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. İleri dönüşüm stratejilerinden “Bronz Nanopartikül” üretimi için 0,9757 ve geri dönüşüm stratejilerinden “Portland Çimento” üretimi için 0,7743 ideal çözüme yakınlık ile sonuçlanmıştır. Elde edilen bu bulgular, Basitleştirilmiş Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve MCDM yönteminin beraber ele alınmış olmasıyla bilimsel açıdan önemli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Sözcükler: Baskılı Devre Kartı, Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi, Geri Dönüşüm, İleri Dönüşüm, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi.

ABSTRACT

DETERMINING THE MOST SUITABLE UPCYCLING AND RECYCLING STRATEGIES FOR MANAGEMENT OF ELECTRONIC WASTE

Zehra Gizem ELMAS

Department of Environmental Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2022

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zerrin GÜNKAYA

The electronic wastes that arise with the increase in the production of electronic goods need to be managed correctly. With the different recycling and upcycling methods to be applied to these wastes, both curative intermediate products for processes and higher quality valuable products can be obtained. It can be difficult to determine in advance which of the many recycling and upcycling alternatives will be the most environmentally, technically and economically viable. Life Cycle Analysis (LCA) and multi-criteria decision making techniques (MCDM) are very useful methods to determine this.

In this thesis study, which was prepared from this point of view, up-cycling and recycling strategies applied/can be applied to waste printed circuit boards were determined, and LCA study of the products to be produced as a result of these strategies. The results obtained from the LCA study established the environmental criteria values for use in MCDM. For the MCDM study, in addition to the environmental criteria, technical and economic criteria were also determined and weighted by the Entropy method. The results obtained from the weighting method were evaluated using the TOPSIS method. It resulted in closeness to the ideal solution of 0.9757 for the production of “Bronze Nanoparticle” from the upcycling strategies and 0.7743 for the production of “Portland Cement” from the recycling strategies. These findings have led to scientifically important results by considering the Simplified Life Cycle Assessment and the MCDM method together

Keywords: Printed Circuit Board, Multi-Criteria Decision Methods, Recycling, Upcycling, Life Cycle Analysis.

TEŞEKKÜR

Çevre ve insan sağlığı üzerinde tehdit oluşturan elektrik elektronik atıkların önlenmesi için yapılacak planlamalara bir nebze yardımcı olmasını istediğim bu tez çalışmasının gelecekteki atık yönetim uygulamalarına ilham kaynağı olmasını diliyorum.

Bu çalışmanın hazırlanmasında, değerli bilgilerini benimle paylaşan, her zaman destek olan danışman hocam Doç. Dr. Zerrin GÜNKAYA'ya,

Tez savunma jürimde olmayı kabul ederek çalışmaya destek olan Prof. Dr. Aysun ÖZKAN ve Prof. Dr. Gülbin ERDEN'e

Her zaman yanımda olan değerli aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Zehra Gizem ELMAS

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Zehra Gizem ELMAS

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ATIK ELEKTRİK-ELEKTRONİK EŞYALAR (AEEE).....	2
2.1. AEEE’lerin Çevre ve Sağlık Etkileri.....	2
2.2. Türkiye’ de ve Dünyada AEEE’lerin Durumu	5
2.3. AEEE’lerle İlgili Ulusal ve Uluslararası Mevzuat	7
3. AEEE YÖNETİMİNDE İLERİ DÖNÜŞÜM, GERİ DÖNÜŞÜM VE DÖNGÜSEL EKONOMİ.....	11
4. KONUYLA İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	18
4.1. Atık BDK’lara Uygulanan Geri Dönüşüm İle İlgili Çalışmalar	18
4.2. Atık BDK’lara Uygulanan İleri Dönüşüm İle İlgili Çalışmalar.....	23
5. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (LCA) VE ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME TEKNİKLERİ (MCDM)	29
5.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)	29
5.1.1. Ürün yaşam döngüsü.....	30

5.1.2. LCA girdi ve çıktıları.....	31
5.1.3. LCA basamakları	32
5.1.3.1. Amaç ve kapsam	32
5.1.3.2. Envanter analizi.....	33
5.1.3.3. Etki değerlendirmesi.....	34
5.1.3.4. Sonuçların yorumlanması.....	36
5.2. Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri (MCDM).....	36
5.2.1. MCDM aşamaları.....	38
5.2.2. MCDM yöntemleri	39
5.2.2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytical Hierarchy Process, AHP).....	41
5.2.2.2. Analitik Serim Süreci (Analytic Network Process, ANP)	42
5.2.2.3. ELECTRE yöntemi.....	43
5.2.2.4. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE).....	44
5.2.2.5. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS).....	45
6. MATERYAL VE METOD	47
6.1. Basitleştirilmiş LCA.....	47
6.1.1. Hedef ve kapsam tanımı.....	48
6.1.2. Yaşam döngüsü envanter analizi	52
6.1.3. Yaşam döngüsü etki analizi	54
6.2. MCDM Çalışması.....	63
6.2.1. Alternatiflerin belirlenmesi	63
6.2.2. Kriterlerin belirlenmesi	64
6.2.3. Kriterlerin ağırlıklandırılması	65
6.2.4. Kriter ağırlıklandırma sonuçları	67
6.2.5. TOPSIS sonuçları	70
6.2.6. Yorum.....	74
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	76
KAYNAKÇA.....	78
ÖZGEÇMİŞ	

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. RoHS kapsamında kullanımı sınırlandırılan maddeler	8
Çizelge 3.1. Buzdolapları ve Bilgisayarlar İçin Mevcut İleri Dönüşüm Teknolojileri	15
Çizelge 5.1. MCDM'nin Kullanım Alanları	37
Çizelge 5.2. Uygulamalarda kullanılan MCDM.....	39
Çizelge 5.3. Uygulamalarda kullanılan Önem Dereceleri	41
Çizelge 6.1. Atık BDK'lara uygulanabilecek ileri dönüşüm yöntemleri	50
Çizelge 6.2. Atık BDK'lara uygulanabilecek geri dönüşüm yöntemleri.....	51
Çizelge 6.3. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlerin Ecoinvent veri tabanı taraması	52
Çizelge 6.4. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlerin Ecoinvent veri tabanı taraması	53
Çizelge 6.5. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait etki kategorileri taraması	54
Çizelge 6.6. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait etki kategorileri taraması	55
Çizelge 6.7. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (CML)	56
Çizelge 6.8. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (CML)	57
Çizelge 6.9. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (ReCiPe).....	57
Çizelge 6.10. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (ReCiPe).....	58
Çizelge 6.11. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (CML)-	59
Çizelge 6.12. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (CML)	59
Çizelge 6.13. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (ReCiPe)	60
Çizelge 6.14. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (ReCiPe).....	61
Çizelge 6.15. MCDM için etki indikatörü seçim tablosu	62

Çizelge 6.16. İleri dönüşüm ve geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait alternatifler	64
Çizelge 6.17. İleri dönüşüm ve geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait kriterler.....	64
Çizelge 6.18. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karar matrisi	65
Çizelge 6.19. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karar matrisi.....	66
Çizelge 6.20. Entropi yöntemi normalize karar matrisi (ileri dönüşüm stratejileri).....	67
Çizelge 6.21. Entropi yöntemi normalize karar matrisi (geri dönüşüm stratejileri).....	68
Çizelge 6.22. Kriterlere ilişkin entropi değerleri (ileri dönüşüm stratejileri).....	68
Çizelge 6.23. Kriterlere ilişkin entropi değerleri (geri dönüşüm stratejileri)	69
Çizelge 6.24. e_j ve d_j değerleri (ileri dönüşüm stratejileri)	69
Çizelge 6.25. e_j ve d_j değerleri (geri dönüşüm stratejileri)	69
Çizelge 6.26. w_j değerleri (ileri dönüşüm stratejileri).....	70
Çizelge 6.27. w_j değerleri (geri dönüşüm stratejileri)	70
Çizelge 6.28. TOPSIS normalize edilmiş karar matrisi (ileri dönüşüm stratejileri).....	70
Çizelge 6.29. TOPSIS normalize edilmiş karar matrisi (geri dönüşüm stratejileri).....	71
Çizelge 6.30. Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi (ileri dönüşüm stratejileri).....	71
Çizelge 6.31. Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi (geri dönüşüm stratejileri).....	71
Çizelge 6.32. Entropi yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler (ileri dönüşüm stratejileri).....	72
Çizelge 6.33. Entropi yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler (geri dönüşüm stratejileri).....	72
Çizelge 6.34. Entropi yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları (ileri dönüşüm stratejileri)	73
Çizelge 6.35. Entropi yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları (geri dönüşüm stratejileri)	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Toplanan elektrik elektronik atık miktarının kategorisel dağılımı	7
Şekil 3.1. BDK'ların Genel Bileşimi	13
Şekil 5.1. Ürün Yaşam Döngüsü	30
Şekil 5.2. LCA Girdi ve Çıktılar.....	31
Şekil 5.3. LCA basamaklarının birbiri ile olan bağlantısı	32
Şekil 5.4. MCDM aşamaları	38
Şekil 5.5. AHP Aşamaları.....	42
Şekil 5.6. ELECTREE Aşamaları.....	44
Şekil 5.7. PROMETHEE Aşamaları.....	45
Şekil 5.8. TOPSIS Aşamaları	46
Şekil 6.1. Baskılı Devre Kartları	48
Şekil 6.2. Sistem Sınırları	49
Şekil 6.3. Akım Şeması	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	: Avrupa Birliği
AEEE	: Atık Elektrik Elektronik Eşya
Ag	: Gümüş
AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytic Hierarchy Process)
Al	: Alüminyum
ANP	: Analitik Serim Süreci (Analytic Network Process)
Au	: Altın
Ba	: Baryum
BDK	: Baskılı Devre Kartı
Be	: Berilyum
Bi	: Bizmut
CBA	: Ekolojik Ayakizi ve Maliyet - Fayda Analizi (Cost- Benefit Analysis)
Cd	: Kadmiyum
CH ₄	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
Cr ⁺⁶	: Krom 6
CRT	: Katot Işın Tüpü
Cu	: Bakır
EASEWASTE	: Environmental Assessment of Solid Waste Systems and Technologies
EIA	: Çevresel Etki Değerlendirmesi (Environmental Impact Assessment)
ELECTRE	: Elimination Et Choix Traduisant la Realité
EP	: Ötrofikasyon Potansiyeli (Eutrophication Potential)
EPA	: Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
FAETP	: Tatlı Su Ekotoksisite Potansiyeli (Freshwater Aquatic Eco-toxicity Potential)
Fe	: Demir

FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kıızıl Ötesi Spektrometresi (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy)
Ga	: Galyum
GC-MS	: Gaz Kromatografisi- Kütle Spektrometrisi
GD	: Geri Dönüşüm
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)
GWP100	: 100 yıllık zaman dilimi için Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential for time horizon 100 years)
H ₂	: Hidrojen
HFC	: Hibrit Fiber Koaksiyel (Hybrid fiber-coaxial)
Hg	: Cıva
HTP	: İnsanlar Üzerine Olan Toksik Etki Potansiyeli (Human Toxicity Potential)
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu (International Organization For Standardization)
İD	: İleri Dönüşüm
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizleri (Life Cycle Assessment)
MCDM	: Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri
MFA	: Malzeme Akış Analizi (Material Flow Analysis)
Ni	: Nikel
ODP	: Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
PCOP	: Fotokimyasal Oksidant Oluşturma Potansiyeli (Photo-chemical Creative Oxidant Potential)
Pd	: Paladyum
PP	: Polipropilen (Polypropylene)
PROMETHEE	: (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)
PROSİS	: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
PS	: Polistiren (Polystyrene)
Pt	: Platin

PVC	: Polivinil Klorür (Polyvinyl chloride)
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek (Random Access Memory)
REE	: Nadir Toprak Elementleri (Rare Earth Elements)
RoHS	: Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi
SEA	: Stratejik Çevre Değerlendirmesi (Strategic Environmental Assessment)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SETAC	: Çevresel Toksikoloji ve Kimya Birliği (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)
Sn	: Kalay
Sr	: Stronsiyum
Ta	: Talyum
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)
TOPSİS	: İdeal Çözüme Benzerlikle Tercih Düzeni Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to İdeal Solutions)
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile değişen tüketim alışkanlıklarımıza paralel olarak elektronik ürün çeşitliliği artmıştır. Her geçen gün bir üst seviyede üretilen elektronik ürünlerin piyasaya sunulması, bu cihazların kullanım sürelerinin azalmasına neden olmaktadır. Böylece, kullanım ömürleri biten veya birçok sebepten ötürü kenara atılan elektronik cihazların miktarı da artış göstermektedir. Bu tür eşyaların içeriğinde plastikler, ahşap, cam, ağır metaller, bromlu alev geciktiriciler ve birçok zararlı madde yer almaktadır. Söz konusu maddeler doğa ve insan sağlığı açısından gün geçtikçe artan büyük problemlere neden olmaktadır.

Günümüzde, daha çok üretimi ve tüketimi hedefleyen doğrusal ekonomi modeli “sürdürülebilirlik” kavramı ile yıllar öncesinde tanışmıştır. 2019 yılında, Avrupa Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile temiz, döngüsel bir ekonomiye geçerek kaynakların verimli kullanımının artırılması, biyolojik çeşitliliğin eski haline getirilmesi ve kirliliğin azaltılması hedeflenmiştir. Yeşil Mutabakat ve döngüsel ekonomi çerçevesinde bu atıkların içeriğinde yer alan değerli cevherlerin geri kazanımıyla beraber hem ekonomiye hem de birincil kaynaklara da fayda sağlanmış olacaktır (Ecer vd., 2021).

Elektrik elektronik eşya üretiminin artmasıyla ortaya çıkan elektrik elektronik atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu atıklara uygulanacak farklı geri dönüşüm ve ileri dönüşüm yöntemleri ile hem prosesler için iyileştirici ara ürün hem de daha yüksek kaliteli değerli ürünler elde edilebilmektedir. Birçok alternatif arasından hangisinin çevresel, teknik veya ekonomik açıdan daha uygun olacağını önceden belirlemek zor olabilir. Bunu belirleyebilmek için Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve çok ölçütlü karar verme teknikleri (MCDM) kullanılarak bu stratejilerin arasından en uygun seçenek belirlenebilir.

Buradan yola çıkarak bu tez çalışmasında, atık Baskılı Devre Kartlarının (BDK) ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejileri belirlenmiş, bu stratejiler sonucunda üretilen ürünlere ait LCA çalışması gerçekleştirilmiştir. LCA çalışmasından elde edilen sonuçlar MCDM’de kullanılmak üzere çevresel kriter değerlerini oluşturmuştur. Böylece, ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejileri kendi arasında çevresel, teknik ve ekonomik kriterler çerçevesinde değerlendirilmiştir. En uygun stratejinin belirlenmesi için sonuçlar sunulmuştur.

2. ATIK ELEKTRİK-ELEKTRONİK EŞYALAR (AEEE)

Elektrik elektronik atıklar, genel olarak kullanım ömrü sonlanmış, tamir edilemeyecek derecede zarar görmüş veya arızalanmış elektrikli elektronik eşyalar olarak tanımlanmaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 20.05.2012 tarihli ve 28300 sayılı Resmi Gazete yayımlanarak yürürlüğe giren Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği'nde elektrik elektronik atıklar, aşağıda sıralandığı şekilde 10 kategoriye ayrılmıştır:

1. Büyük ev eşyaları
2. Küçük ev aletleri
3. Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları (bilgisayarlar, telefonlar vb.)
4. Tüketici ekipmanları (müzik enstrümanları, video kameralar vb.)
5. Aydınlatma ekipmanları (tasarruflu ampuller, floresan vb.)
6. Elektrikli ve elektronik aletler(büyük ve sabit sanayi aletleri hariç matkaplar, testereler vb.)
7. Oyuncaklar, eğlence ve spor ekipmanları (jetonlu makineler, video oyunları vb.)
8. Tıbbi cihazlar
9. İzleme ve kontrol aletleri (ısı ayarlayıcıları , termostatlar vb.)
10. Otomatlar (para, içecek otomatları vb.) (AEEE Kontrolü Yönetmeliği, 2012).

Yukarıda verilen sınıflandırmaya göre, elektrik elektronik atıkların kompozisyonu çeşitlilik göstermekte olup ürün bazında da farklılık göstermektedir. Elektrik elektronik atıkların yapısında 1000'den fazla bileşen vardır. İçerdiği bileşene göre tehlikeli veya tehlikesiz olarak ayrılırlar. İçerdiği tehlikeli maddelere ve bunların etkilerine bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

2.1. AEEE'lerin Çevre ve Sağlık Etkileri

Elektrik elektronik eşyaların yapımında klorlu solventler, bromlu alev geciktiriciler, PVC, ağır metaller, plastik ve gazlar kullanılmaktadır. Örneğin; bir TV katot ışın tüpü (CRT) 2-4 kg kurşun içermekte olup ABD'de 1997 ile 2004 yılları arasında kullanılmaz hale gelen 315 milyon bilgisayar ve monitörde toplam 545.000 ton kurşun bulunduğu belirlenmiştir (Değirmenci, 2020). Elektrik elektronik atıklar, toprak dolgusunda bulunan kurşun elementinin %40'ını, cıva ve kadmiyum gibi ağır metallerin de %70'ni oluşturmaktadır (Yaren vd., 2014). Genel olarak elektrik elektronik atıkların bileşenleri yaklaşık %40, %30 plastik ve %30 alev geciktirici malzemelerden

oluşmaktadır. Metal içeriğini ise; %20 bakır, %8 demir, %4 kalay, %2 nikel, %2 kurşun, %1 çinko, %0,2 gümüş, %0,1 altın, %0,005 paladyum ve cıva oluşturmaktadır (Ergülen ve Büyükkeklik, 2008). Elektrik elektronik eşyaların içerdiği tehlikeli maddeler ve etkileri aşağıda açıklanmıştır.

Kurşun (Pb): Monitörlerdeki katot ışıın tüpleri, eski lehimler, entegre devreler, baskılı devre kaplamaları, cam, akü ve piller kurşun içermektedir (http-1, 2021). Kurşun, insan sağlığı üzerinde birçok olumsuz etkilere neden olmaktadır. Merkezi sinir sistemini, böbrekler ve üreme sistemlerini bozmakta, çocuklarda beyin hasarına yol açmaktadır. Yoğun miktarda kurşun alan bünyelerde reaksiyon süresinin uzaması durumunda, parmaklarda, el ve ayak bileklerinde zayıflık, hafıza kaybı ve kan hastalıkları gibi sorunlar görülmektedir (Yılmaz, 2006)

Cıva (Hg): Dünyada cıva tüketiminin %22'si elektrik elektronik eşyalardan kaynaklanmaktadır. Cıva, elektrik elektronik ürünlerin batarya kısımlarında, termostatlarda, seviye algılayıcıları cihazlarda, floresan lambalarda, tıbbi cihazlarda, mobil telefonlarda ve pillerde yüksek düzeyde bulunmaktadır (Akın ve Kuru, 2013). Düşük dozlarda dahi beyin ve böbreklere zarar veren cıvanın, kısa süre yüksek dozlarda maruziyette solunum yollarında hasar verdiği de tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra cıva konsantrasyonunun vücutta yükselmesi, hipertansiyon, miyokard infarktüsü, deride kızarıklık ve yaraların oluşması ile gözlerde zarara neden olabilmektedir (Kahvecioğlu vd., 2003).

Kadmiyum (Cd): Havaya karışan kadmiyum partikülleri uzun süre atmosferde askıda kalabilmektedir. Kadmiyum havadan solunarak, kadmiyum bulaşmış yiyeceklerin yenmesiyle, sigara dumanının solunmasıyla ve kadmiyumla kirlenmiş suların içilmesiyle vücuda alınabilmektedir. Yüksek düzeyde kadmiyumun solunması akciğer hasarına bağlı olarak ölüme neden olabilmektedir. Çok yüksek düzeyde kadmiyumun yiyeceklerle alınması kusma ve ishale neden olmaktadır. Hava, su ya da besinler yoluyla düşük düzeyde kadmiyuma uzun süreli maruziyet ile böbreklerde birikebilir ve böbrek hastalıklarına neden olabilmektedir. Akciğerde hasara yol açması ve kemiklerin kırılabilirliğinin artması diğer etkilerindendir. Hayvan deneylerinde ise kadmiyumun tansiyon yükselmesine, kandaki demir düzeyinin düşmesine, karaciğer hastalıklarına, sinir sistemi ve beyinde hastalıklara neden olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeye bindirilmiş aletler, yonga resistörleri, infrared dedektörleri, yarı iletkenler ve

eski tip monitör katot ışın tüpleri (CRT) kadmiyum içermektedir. Ayrıca, kadmiyum plastiklerde de kullanılmaktadır (Akın ve Kuru, 2013).

Krom 6 (Cr⁺⁶): Korozyon koruması ve sertleştirilmiş çelik için kullanılmaktadır. Krom içeren minerallerin endüstriyel oksidasyonu ve fosil yakıtların, ağaç ve kağıt ürünlerin yanması neticesinde doğada altı değerlikli krom oluşmaktadır. Kromun başta insan bünyesinde olmak üzere canlı organizmalardaki davranışı oksidasyon kademesine, oksidasyon kademesindeki kimyasal özelliklerine ve bulunduğu ortamdaki fiziksel yapısına bağlıdır. Yüksek dozda Cr⁺⁶ bileşiklerinin alımına bağlı olarak şiddetli ve sıklıkla ölümle sonuçlanan patolojik değişimler ortaya çıkmaktadır. Altı değerlikli krom bileşikleri deri, sindirim sistemi ve akciğerler için temas ettikleri durumlarda tahriş edici ve koroziv özellik göstermekte, DNA hasarı, astım ve bronşite sebep olmaktadır (Akın ve Kuru, 2013).

Bromlu Alev Geciktiriciler: Plastiklerde alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Bilgisayar bağlantı parçalarında, plastiklerde, basılı devrelerde, kablolarda, süngerlerde bulunmaktadır. İnsan vücudunda normal büyüme ve gelişme için hormonal fonksiyonları önemli derecede etkilemektedir. Düşük sıcaklıklarda yakılması ile zehirli atıklar oluşmaktadır (Akın ve Kuru, 2013).

Fosfor (P): Bilgisayar ekranlarında çözünürlük için kullanılan inorganik bir kimyasaldır. Kırılan tüpten oluşan tozların solunması, saçılan cam parçalarına dokunulması risk oluşturmaktadır. Fazla miktarlarda su ekosistemlerine verilen fosfor aşırı bir şekilde bitkisel üretim yapılması olan ötrofikasyona neden olmaktadır. Bu da su ekosistemini etkileyerek sudaki canlı türlerinin azalmasına ve yok olmasına neden olmaktadır (Aydın ve Kiraz, 2017).

Baryum (Ba): Yumuşak, beyaz bir metal olan baryum, kullanıcıları radyasyondan korumak amacıyla bilgisayarların ön panelinde kullanılmaktadır. Baryuma kısa dönemli maruz kalınması kas güçsüzlüklerine, beyinde, kalpte, karaciğerde ve dalakta hasara neden olmaktadır (Akın ve Kuru, 2013).

Berilyum (Be): Kanserojen olarak sınıflandırılmaktadır. Ana kart ve bağlantılarda bulunmaktadır. Elektrik elektronik eşyaların diğer bir içeriği olan plastiklerde önemli sağlık etkilerine yol açmaktadır. Ortalama bir bilgisayarda 7 kg civarında PVC içeren plastik bulunur. PVC ise en tehlikeli plastik cinsidir. Belli bir sıcaklıkta yandığında dioksin oluşturmaktadır. Araştırma sonuçlarına göre dioksin kanser yapmasının

yanında, sinir, bağışıklık ve üreme sistemlerine zarar verebilmekte, doğmamış bebeklerde bozuk oluşumlara, sakatlıklara sebep olabilmekte, endokrin sistemini bozabilmekte ve daha birçok olumsuz etkiye neden olabilmektedir (http-1, 2021).

2.2. Türkiye’ de ve Dünyada AEEE’lerin Durumu

Dünyada her yıl 50 milyon elektrik elektronik atık üretilmektedir. Elektrik elektronik atıkların oluşumunda ABD, Hindistan, Japonya ve Almanya başta gelmektedir. Oluşan bu atık cinsinin geri dönüşüm ve yeniden kullanımı ise önem arz etmeye başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre, 2019 yılında elektrik elektronik atıkların yalnızca %17,4’ünün resmi olarak toplandığı ve geri dönüştürüldüğü resmi olarak belgelenmiştir. (Forti vd., 2020).

Dünyadaki üretilen toplam elektrik elektronik atık miktarının 500 bin tonluk kısmını ise Türkiye oluşturmakta olup dünya elektrik elektronik atık üretiminde 17. sırada yer almaktadır. Oluşan elektrik elektronik atık miktarının yıllara paralel olarak %4-5 artış gösterdiği belirlenmiştir (Kaya., 2018).Dünyada ise durum bundan farklı değildir. Bu nedenle, Türkiye’de ve dünyada elektrik elektronik atıklar, bütüncül bakış açısıyla yaklaşılması ve incelenmesi gereken potansiyel bir sorunu oluşturmaktadır.

Türkiye’de ve dünyada elektrik elektronik atık sorununu aşağıdaki rakamlar çerçevesinde özetlenmektedir.

- Global E-waste Monitor 2020 verilerine göre, 2019 yılında dünya çapında yaklaşık 53,6 milyon ton elektrik elektronik atık üretilmiştir. 2030 yılına kadar yılda %3–5 oranında büyüyerek 74,7 milyon ton elektrik elektronik atığa yükselmesi beklenmektedir. 2019 yılında da tek başına Asya 24,9 milyon ton elektrik elektronik atık üreterekmiş. Böylece, en büyük elektrik elektronik atık üreticisi haline gelmiştir. Beraberinde Amerika, Avrupa, Afrika ve Okyanusya izlemiştir. Küresel elektrik elektronik atık monitörü 2020’ye göre, 2019 yılında Dünyada Çin 10,1 milyon ton elektrik elektronik atık hacmi ile birinci sırada yer almaktadır. İkinci sırada 6,9 milyon ton elektrik elektronik atık hacmi ile ABD ve üçüncü sırada 3,2 milyon ton elektrik elektronik atık hacmi ile Hindistan yer almaktadır. Türkiye ise 503 bin ton elektrik elektronik atık hacmi ile 17. Sıradadır (Forti vd., 2020).
- Elektrik elektronik atık üretimi refah ile doğru orantılı olduğundan kişi başına düşen milli gelirin yüksek olduğu ülkelerde örneğin Norveç ve İsviçre’de kişi

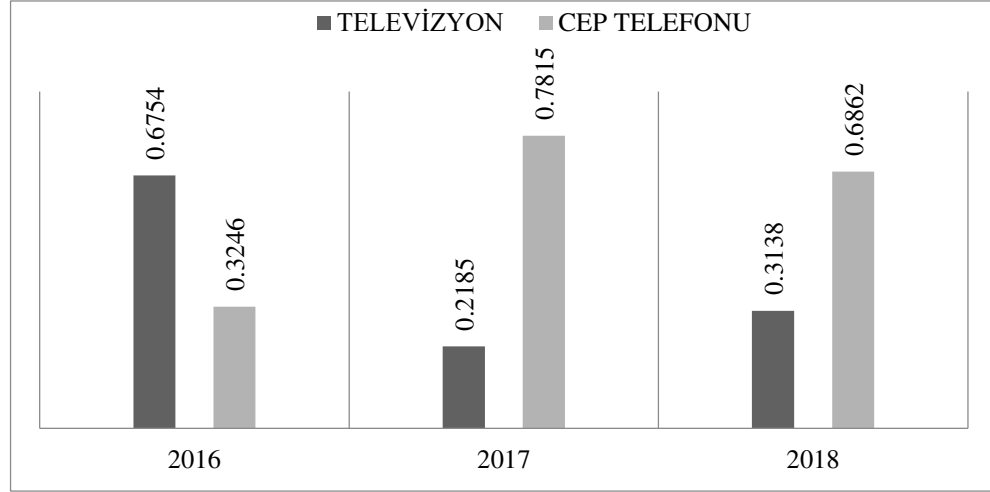
başına düşen yıllık atık miktarı 29 kg'lara kadar çıkabilmektedir. Türkiye'de ise kişi başı yıllık 6,7 kg elektrik elektronik atık üretilmektedir (http-2, 2021).

- Geri dönüşüm oranlarına göre dünyada en iyi geri dönüşüm oranı %62,6 ile İsveç'tir. Bu oran ABD'de %14, Çin'de %21, Japonya'da %23' tür. Geri dönüşüm oranı Türkiye'de ise yaklaşık %5'tir (http-2, 2021).

Türkiye'deki mevcut durum dünya genelinde olduğu gibi sürekli artmaktadır. Atığın doğru bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Fakat elektrik elektronik atığın geri dönüşümü için ilk aşama olarak kabul edilen toplama aşamasında sorunlar başlamaktadır. Elektrik elektronik atıkların pet şişe ve kağıttaki gibi kolayca toplanamadığı bilinmektedir. Bunun birçok nedeni vardır. En önemli neden ise tüketiciler tarafından alınan elektrik elektronik eşyaların fiyat yüksekliğinden dolayı kullanılsa dahi atık olarak değerlendirilmemesidir.

Aynı zamanda tüketiciler, elektrik elektronik atığın uygun toplanmasını sağlamak yerine kapı önünden geçen hurdacılara belirli bir ücret karşılığında vermeyi tercih etmektedir. Bu ise bilinçsiz bir toplanmanın beraberinde sorunları da doğurmaktadır. Hurdacılar elektrik elektronik atıkların el ile ayrılabilen değerli kısımlarını alıp kalan kısımlarını çöplüklere göndermektedir. Depolama sahalarında biriktirilmesi ile elektrik elektronik atığın içeriğindeki ağır metallerin sızıntı yoluyla toprağa karışması sağlanmış olacaktır. Bu durumda toprak ve canlı sağlığı üzerinde olumsuz durumlar ortaya çıkmaktadır.

Bilişim Sanayicileri Derneği (TÜBİSAD) AEEE Yetkilendirilmiş Kuruluşu'nun yapmış olduğu anket verilerine göre; tüketiciler tarafından en çok kullanılan ve üreticiler tarafından en çok piyasaya sürülen elektrik elektronik cihazların ilk sırasında cep telefonu yer almaktadır. Üretim ve kullanım miktarına paralel olarak en çok oluşan elektrik elektronik atıkta cep telefonudur. Ardından ikinci sırada televizyon ve bilgisayarlar yer almaktadır (TÜBİSAD, 2020). Şekil 2.1'de cep telefonu ve televizyonlara ait toplanan atık miktarları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Toplanan televizyon ve cep telefonu atık miktarının dağılımı (TÜBİSAD, 2020).

2.3. AEEE'lerle İlgili Ulusal ve Uluslararası Mevzuat

Zaman ile artan elektrik elektronik atık problemine karşı devletler çeşitli politikalar oluşturmaya başlamıştır. Avrupa'da Basel Sözleşmesi, 2002/96/EC sayılı Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıklarına yönelik WEEE Direktifi ve 2002/95/EC sayılı Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi yayımlanmıştır (Çapraz, 2013).

Basel Sözleşmesi, tehlikeli atıklar ve diğer atıkların yönetilmesi, bu atıkların insan ve çevre sağlığına zarar vermeden sınır ötesi hareketlerini ve her türlü bertaraf tesisinde bertaraf edilmesini hedefleyen ve küresel bakış açısına sahip olan bir sözleşmedir. UNEP bünyesinde çalışmaları yapılmış olan sözleşme 1989 yılında imzaya açılmıştır. 5 Mayıs 1992 yılında ise yürürlüğü girmiştir. Birleşmiş Milletler ve UNEP bünyesinde çalışmaları tamamlanmıştır. 2006 yılının haziran ayında sözleşme 168 ülke tarafından onaylanmıştır. Bu sözleşmenin ana hedefi, çevreye zararı olmayacak en güvenilir yöntemler ile zararlı atık oluşumunu en aza indirmek, çevre ve insan sağlığının korunmasıdır. Sözleşme, söz konusu ürünün, imalat aşamasından geri dönüşüm, geri kazanım, tekrar kullanım ve bertarafına kadar geçen tüm aşamaları göz önünde bulundurmaktadır. Bu sözleşme, 26 madde ve 6 ekten oluşmaktadır. Türkiye tarafından 1989 yılında imzalanmış olup 28 Aralık 1993 tarih ve 3957 sayılı kanun ile onaylanmıştır.

2002/96/EC sayılı elektrik ve elektronik ekipman atıklarına yönelik WEEE Direktifi, elektronik atıkların ayrı toplanmasını ve geri kazanımını zorunlu kılmaktadır. AEE kuralları elektronik atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım oranlarını artırmayı ve elektronik cihaz üreten firmalarında bu yönden daha bilinçli olmalarını hedeflemiştir. Bu direktife göre üreticilerin ürünlerini bu yönde tasarlama sorumluluğunu onlara vermiştir (Topçu, 2017). 2002/95/EC sayılı Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi (RoHS) ise, elektrik elektronik atıklar ayrı toplanmış olsa dahi içeriğindeki tehlikeli maddelerden dolayı risk taşımaya devam ettiği belirtilmektedir. Söz konusu bu maddeler, ağır metaller, çok bromlu bifenil ve çok bromlu difenil eterlerdir. Bu maddelerin kullanımı sınırlandırılmıştır. Çizelge 2.1’de kullanımı sınırlandırılan maddelere yer verilmiştir (Çapraz, 2013). Temmuz 2006 tarihinden itibaren yeni üretimlerde RoHS kurallarına uyma zorunluluğu getirilmiştir. Birçok firma da buna uyarak yapısal değişikliklerde bulunmuştur (Yeşilkaya, 2012).

Çizelge 2.1. RoHS kapsamında kullanımı sınırlandırılan maddeler (Çapraz, 2013)

Maddeler	Sınır değeri
Kadmiyum	0,01 ppm
Civa	0,1 ppm
Krom+6	0,1 ppm
Polibrominli bifenil	0,1 ppm
Polibrominli difenileter	0,1 ppm
Kurşun	0,1 ppm

Türkiye’de, AB Direktiflerine paralel Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 20.05.2012 tarihli resmi gazete Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği yayınlanmıştır. Bu yönetmelik ile birlikte üretici ve tüketicilere belirli sorumluluklar yüklenmiştir. Bu yönetmeliğe göre tüketiciler, perakendeci ve bayiler, üreticiler, belediyeler, büyükşehir belediyeleri ve metropolitan kentler için yükümlülükler bulunmaktadır. Tüketiciler, elektrik elektronik atıkları evsel atık türleri ile karıştırmamakla ve üreticilerin istedikleri uygun toplama noktalarına götürmekle

yükümlüdür. Perakende ve bayiler, tüketicinin getirdiği elektrik elektronik atığın kendi sattığı ile aynı özellikte olduğu sürece ücretsiz olarak geri almakla yükümlüdür. Üreticiler ise elektrik elektronik atıkları tüketicilerden, bayilerden ve belediyelerden ücretsiz almakla yükümlüdür. Üreticiler aktif olarak elektrik elektronik atıkları toplamak mecburiyetinde olmayıp bu görevi yetkilendirilmiş kuruluşlara verebilmektedir. Ancak, bu sorumluluğu tamamen devredememektedir. Bunun yanı sıra, üreticiler bu elektrik elektronik atıkların geri dönüşümü ve geri kazanımından da sorumlu kılınmışlardır. Halkı bilinçlendirme, kampanyalar düzenleme ve eğitimler vermekle yükümlüdürler. Yönetmeliğe göre, belediyeler ise elektrik elektronik atıkların çöp sahalarında evsel atıklardan ayrı tutulmasını sağlamak ile sorumlu kılınmıştır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

5 Ekim 2016 itibariyle Paris Anlaşması ile küresel sera gazı emisyonlarının %55'ini oluşturan ve 55 tarafın anlaşmayı onaylaması sonucunda 4 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Türkiye, Paris Anlaşması'nı 22 Nisan 2016 tarihinde New York'ta Yüksek Düzeyli İmza Töreni'nde 175 ülke temsilcisiyle birlikte imzalamıştır. Bu anlaşmanın amacı sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılması temeline dayanmaktadır. Bu doğrultuda, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin uygulanmasını desteklemektedir. Anlaşmanın uzun dönemli hedefi ise küresel ortalama sıcaklık artışının sanayileşme öncesine göre 2°C altında tutulmasına yönelik küresel çabaların sürdürülmesidir. Başka bir hedefi ise iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı uyum sürecinin ve iklim direncinin artırılmasıdır. Ayrıca, düşük emisyonlu ve iklim dirençli kalkınma sürecinde finans akışının istikrarlı hale getirilmesini de içermektedir. Bu hedeflere ulaşılması için ülkelerin imkanları doğrultusunda katkıda bulunmaları gerekmektedir. Bu sorumluluk kapsamında gerçekleştirecekleri azaltım, finans, teknoloji transferi vb. konusundaki hedeflerini içeren faaliyetlerin yer aldığı "Ulusal Katkı Beyanlarını" her 5 yılda bir sunmaları öngörülmüştür. Türkiye ise Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanı'nı 30 Eylül 2015 tarihinde Sözleşme Sekreteriyasına sunmuştur. Bu beyana göre sera gazı emisyonlarının 2030 yılında referans senaryoya göre artıştan %21 oranına kadar azaltılması öngörülmüştür. 7 Ekim 2021 tarihli ve 31621 sayılı Resmi Gazete'de Türkiye Büyük Millet Meclisi tarafından "Paris Anlaşmasının Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun" yayımlanarak yürürlüğe girmiştir (http-3, 2021). Bu anlaşma çerçevesinde su ve enerji tasarrufu ile beraber doğal kaynakların korunması ve kullanma dengesinin

sağlanması gerekmektedir. Oluşan atıkların geri dönüşümü ile üretimdeki hammadde ihtiyacının karşılanması ve kaynak verimliliğinin sağlanması gerekmektedir. Elektrik elektronik atıkların ileri dönüşümü ve geri dönüşümü ile bu atık türü özelinde doğal kaynaklarımız korunmuş olacaktır.

Avrupa Birliği'nin iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında getirdiği düzenlemeler, bu düzenlemelerin sağladığı teşvikler ve ileriye yönelik adımlara Paris Anlaşması'ndan sonra European Green Deal adıyla bilinen Avrupa Yeşil Mutabakatı ile devam etmektedir. 2019 da açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı 2050 yılını işaret etmektedir. 27 AB üyesi devlet ile 2050 yılına kadar AB'yi ve Avrupa kıtasının tamamını iklim açısından nötr hale getirme üzerine hedeflenmiştir. Bu yıla kadar sıfır sera gazı emisyonunun amaçlandığı adil ve rekabetçi bir ortamda AB ülkelerinin ve vatandaşlarının dönüşümünü hedeflemektedir. Bu dönüşüm AB ülkeleri kadar AB ile ticari ilişkileri olan ülkeleri de ilgilendirmektedir. AB ülkeleri ile olan ticari ilişkileri nedeniyle bu ülkelerden biri de Türkiye'dir. Bu nedenle, Türkiye yeni AB düzenlemeleri, yönetmelikler ve müktesebatlarına uyum sağlamaktadır. Döngüsel ekonominin oluşturulması ile Türkiye gerekli adımları atmıştır (Ecer vd., 2021).

Döngüsel ekonomi kapsamında elektrikli ve elektronik eşyalar özelinde AB'de getirilecek yenilikler vardır. Elektronik ve bilişim sektörüne odaklanılmıştır. Bu sektörde 2 hak kavramı uygulanacaktır. "Tamir Hakkı" ve "Eski Yazılımların Sürümünün Yükseltilmesi Hakkı" şeklinde ifade edilmektedir. Şarj aletleri daha dayanıklı hale getirilecek ve tüketiciler ortak şarj aletlerini kullanılabilecektir. Böylece, her bir cihazın yanında şarj aleti alınmasına ihtiyaç kalmayacaktır. Şarj kablolarının daha dayanıklı hale getirilmesi sağlanacaktır. Elektrik elektronik eşyaların toplanma ve işleme aşamaları iyileştirilecektir. Bunun için; geri satın alma uygulamaları kapsamında eski cep telefonları, eski tabletler ve şarj aletleri için geliştirilecektir. Elektrik elektronik eşyalar için kullanımı yasak zararlı maddelerin düzenlemeleri gözden geçirilecektir. Bu düzenlemelerin Ekotasarım ve REACH ile uyumlu olabilmesi için rehberler hazırlanacaktır. Bu döngüsel ekonomi düzenlenmesi kapsamında, elektrik elektronik eşyaların yeniden kullanılması söz konusu olacaktır. Böylece, eşyanın toplam ağırlığının sadece %15'inin yenilenmesi kabul edilecektir. Yeniden kullanımda esas olan elektrik elektronik eşyaların işleme gerek kalmaksızın yeniden kullanıma sunulabilecektir (TÜSİAD, 2021).

3. AEEE YÖNETİMİNDE İLERİ DÖNÜŞÜM, GERİ DÖNÜŞÜM VE DÖNGÜSEL EKONOMİ

Elektrik elektronik atıklar, çoğunluğu zehirli olan Pb, As, Cd, Se, Cr⁺⁶, Co, Ba, Hg gibi ağır metaller ve ısıtılma işleme uğrayınca dioksin açığa çıkaran alev önleyicilerin de bulunduğu binden fazla zararlı madde içermektedir. Elektrik elektronik atıklar düzgün bir şekilde bertaraf edilmediğinde bu maddeler insan ve çevre sağlığı açısından ciddi zararlar oluşturmaktadır. Dünyadaki atıkların %1'ini elektronik atıklar oluşturmalarına rağmen, topraktaki tehlikeli madde kirliliğinin %70'ine sebep olmaktadır. İnsan ve çevre sağlığı açısından elektrik elektronik atıklara uygun geri dönüşümün ve ileri dönüşüm yöntemlerinin uygulanması faydalı olacaktır. Bu yöntemlerin uygulanması ile döngüsel ekonomiye de katkıda bulunacaktır. Bu terimlerin asıl amacı, elektrik elektronik atıkların tekrar kullanıma alınabilmesi ve atık oluşumunun azaltılması yöneltir.

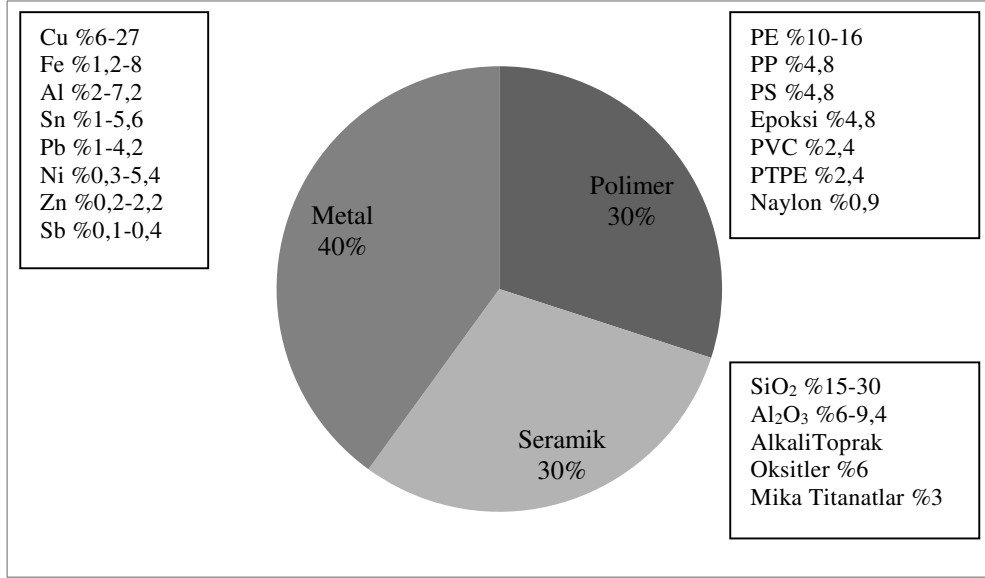
Elektrik elektronik atık geri dönüşümünde ana fikir, atığın içerisindeki epoksi, cam elyaf, plastik, takviye maddeler gibi metal olmayan kısımlarının tekrar hammadde olarak kullanılabilmesini sağlamaktır. Bunu yapabilmek için elektrik elektronik atığın metal kısımlarının ayrıştırılması gerekmektedir. Bu işlemler ilgili merkezlerde çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Devamında ise üretim tesislerinde hammadde olarak kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Geri dönüşümde iki temel amaç vardır. Birinci amaç, atığın yeniden kullanılması ile fazladan hammadde tüketimini azaltmak, hammadde maliyetini azaltmak ve dolayısı ile çevreye verilen zararı azaltmaktır. İkinci amacı ise üretilen ürünün mevcut performans değerinin artırılması hedeflenmektedir.

İleri dönüşüm ömrünü tamamlamış, artık kullanılmayacak durumda olan eşyaların asıl amacından farklı biçimde tekrardan kazanılma süreci olarak tanımlanmıştır. İleri dönüşüm, atılacak durumda olan ürünlerden yeni ve çevreye duyarlı ürünler elde edilmesini sağlayan bir sürdürülebilirlik kavramıdır (http-4, 2021). Elektrik elektronik atıkta ileri dönüşüm kavramı ise her geçen gün önem kazanmaktadır. Mevcut geri dönüşüm kavramı, değer kaybetmeye devam eden veya eş değerde geri dönüşümlü malzeme üretme durumunda iken ileri dönüşüm, beşikten-kapıya kaynak kullanımını gerçekleştiren atıkların ileri dönüşüm yoluyla değerini artırmakta olan bir kavramdır. Başka bir deyişle, ileri dönüşüm atık malzemelerin faydalı ve daha değerli bir ürüne dönüştürülmesi olarak da tanımlanmaktadır (Yi vd., 2019).

Döngüsel ekonomi terimi ise kaynakların gereksiz yere çıkarılmadığı, kullanılmadığı, boşa harcanmadığı ve kaynakların birçok yolla tekrar kazanıldığı, sürdürülebilir işler yarattığı, sanayiye daha fazla değer kattığı bir ekonomi olarak tanımlanmaktadır. Eski cihazların tekrar kullanımı, israfın ortadan kaldırılması ve elektronik eşyalara daha uzun kullanım ömrünün sağlanması ile bu döngüsel yaklaşım tamamlanmaktadır. Çalışan ürünler, bir bütün olarak içerdikleri malzemelerin ayrı ayrı değerlerinden daha büyük bir ekonomik değere sahip olduğu düşünülürse bu ürünlerin kullanım ömrünün uzatılması veya yeniden kullanılması, geri dönüşümlerinden daha da büyük bir ekonomik fayda sağlayacaktır (<http-5>, 2021).

Geri dönüşüm, tekrardan bir imalat süreci içerirken, ileri dönüşüm tekniği artık kullanmadığınız ürünlere bir düzenleme yaparak amacından farklı kullanım imkanı sunabilmektedir. Bu sayede enerji tüketimi büyük bir miktarda engellenerek atık kavramı ortadan kaldırmış olmaktadır (<http-6>, 2021).

Elektrik elektronik atıklarda değerli metallerin geri kazanımı ileri dönüşüm olarak değerlendirilmektedir. Örneğin; tüm elektrik elektronik ürünlerin önemli bir parçası olan baskılı devre kartları (BDK'lar), elektrik elektronik atıklardan çıkarılan bileşenlerin toplam ağırlığının yaklaşık %6'sını oluşturmaktadır. Atık BDK'lar, 63 farklı element içerebilen karmaşık yapıda malzemelerdir. BDK'lar, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi %30 polimer, %30 seramik ve %40 metal içerebilirler. BDK'lar, birincil kaynaklardan daha yüksek konsantrasyonda baz metaller (Cu, Ni, Al, Pb, Fe) ve değerli metaller (Au, Ag, Pt, Pd) içermektedir. Bu nedenle metal kazanımı için potansiyel bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir. Altın, BDK'larda altın cevherinden ortalama 130 kat daha yüksektir. Aynı şekilde, bakır, elektrik elektronik atıkta 1 ton cevherden 30-40 kat daha fazla içeriktir (Gautam vd., 2022).



Şekil 3.1. BDK'ların Genel Bileşimi (Gautam vd., 2022)

Bakır ve altın gibi değerli metaller, atık BDK'nın %95'inden fazlasını oluşturmaktadır. Ayrıca, küresel BDK pazarının yıllık %3,2 büyüme hızıyla büyüdüğü tahmin edilmektedir. Cep telefonu ve bilgisayar üretimi, dünya genelinde her yıl çıkarılan altının %3'ünü, gümüşün %2,5'ini, paladyumun %12'sini ve kobaltın %15'ini tüketmektedir. Bu ikincil kaynaklardan metallerin ileri dönüştürülmesi, doğal cevherlerinden çıkarılmalarına kıyasla, alüminyum için %95, nikel için %90, bakır için %85, demir ve çelik için %74, çinko için %60 oranında önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayacaktır. Bu nedenle, bu değerli metallerin bileşenlerini atıktan ileri dönüşüm yoluyla kazanmak doğal cevherlerinden daha değerli olacaktır (Gautam vd., 2022).

Dünyada tüketimin giderek artmasına paralel olarak atık oranları da artış göstermektedir. Pek çok gelişmiş ülke atıklarının büyük bir bölümünü enerji ve hammadde olarak ülke ekonomisine yeniden kazandırmaktadır. Kullan-at şeklinde özetlenebilecek doğrusal ekonominin yerini, kaynakların olabildiğince uzun süre kullanıldığı ve yeniden dönüşümü esas alan “döngüsel ekonomi” almaya başlamıştır (Balbay vd., 2021).

Çöpe atılan ömrünü tamamlamış veya kullanım dışı kalmış elektronik atıkların yıllık değeri 60 milyar Amerikan dolarının üzerindedir. Bu rakam dünya üzerindeki 120 ülkenin gayrisafi milli hasılasından daha büyüktür (http-5, 2021).

Sıfır atık politikası ile döngüsel ekonomi, finansal ve diğ r ekonomik kriz durumlarında ekonomik büyümeyi koruma potansiyeline sahiptir. Değ r zincirinin her aşamasında israfı azaltmak, döngüsel ekonomi ile ekonomik büyümenin doğal kaynak kullanımından ayrılmasında ve böylece çevrenin korunmasına yardımcı olmada önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan araştırmalara göre, elektronik sanayinde kullanılan nadir toprak elementlerinin kullanımındaki her %1’lik azalmanın 15-20 milyar dolar bir ekonomik tasarruf ve 100-200.000 yeni iş hacmi yaratacağı tahmin edilmektedir.

Elektrik elektronik atıklar döngüsel bir ekonomide, iş ve verimlilik artışı sağlamaktadır. Aynı zamanda, nadir toprak metallerine olan ihtiya ın azalması ile zararlı çevresel etkiler minimum seviyeye düşecektir (http-5, 2021).

Eski cihazlarımızın çoğunu tekrar kullanmaya ve farklı bileşenlerini yeni ürünlerde kullanmaya devam ettikçe, döngüsel ekonominin faydaları görülmeye başlanacaktır. Yeniden kullanılabilir, verimli ve sürdürülebilir bir ekonomik model elde etmek, toplumun her kesiminin kazanmasını sağlayacaktır.

Eski cihazlarımızdan özelikle cep telefonları ve diz üstü bilgisayarlarda tamir etmenin yenisini almaktan daha pahalı olduğu gibi bir gerçekte vardır. Ayrıca, geri dönüşüm aşamasında dahi cıva içerikli LCD ekranlar, PVC ve alev geciktiriciler ve plastik bileşenlerdeki diğ r toksik komponentler, elektrikli elektronik eşyaların içerisindeki zehirli kimyasallardan dolayı zorluklar yaşatmaktadır. Döngüsel ekonomi modelleri elektrikli ve elektronik eşyaların atık haline dönüştükten sonra da değerli olmasını gerektirmekle beraber, atık, emisyon ve kaynak çıkarımı esnasında oluşabilecek çevresel baskıları da azaltabilmelidir. Materyallerin arasındaki bu döngünün tamamlanması için desteklenen döngüsel ekonomi modeli, yeni “yeşil” iş dallarını desteklerken yeni iş fırsatları yaratmalı ve ekonomik büyümeye de katkıda bulunmalıdır.

Elektrik elektronik atıkta aktif bir ileri dönüşümü teşvik etmek için, mevcut düşük dereceli geri dönüşüm ürünlerini yüksek dereceli veya gelişmiş geri dönüşüme yükseltmek için teknolojilerin kullanılmasına öncelik verilmesi gerekmektedir. Çizelge 3.1’de buzdolapları ve bilgisayarlar için mevcut yükseltme teknoloji örnekleri kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır (Yi vd., 2019).

Çizelge 3.1. Buzdolapları ve Bilgisayarlar İçin Mevcut İleri Dönüşüm Teknolojileri (Yi vd., 2019)

Aşama	İleri Dönüşüm Teknolojisi	Sonuç ve Etkiler
Ön arıtma	Buzdolapları için karma işlem	✓ İş verimliliğini ve alan kullanımını artırır
	Freon yönetiminde gelişme	✓ Freon konsantrasyonu için sürekli bir izleme sistemi uygulayarak Freon sızıntısını önlenebilir ✓ İşten sonra veya tatillerde soğuk arıza nedeniyle sıcaklık anormalliği meydana geldiğinde derhal yanıt vermeleri için yetkilileri otomatik olarak bilgilendirir.
	Atılan basılı devre kartlarından ikili kapasitörler gibi farklı tipte elektronik devrelerin geri kazanılması için teknoloji	✓ % 80'in üstünde saf tantal kondansatörler karışık elektronik devre atıklarından geri kazanılabilir ✓ Karışık elektronik devreler içeren çok bileşenli karışımlar, orta özgül ağırlık parçacıklarını geri kazanmak için en az iki eleme aşaması gerekir ✓ Yüksek, orta ve yüksek özgül ağırlıkta parçacıklar geri kazanılabilir ve hassas sınıflandırma ile yüksek saflıkta kaynaklar geri kazanılabilir ✓ Değerli metaller dışında pahalı nadir metaller kazanılabilir
Kaynak kurtarma	Freon ayrışma arıtımı	✓ Freon kaçağının zarar görmesini önlemek ve enerji tasarrufuna katkıda bulunmak için geri kazanılmış Freon'u ayrıştırır
	Bakır ve alüminyumun renk tanımlamasına dayalı olarak ayrılması için ileri teknoloji	✓ % 95 saf bakır elde etmek mümkündür ✓ Uygulamadan önce, bakır ve alüminyum elle ayrılmıştır: mekanik sıralama yapılması, iyileştirilmiş çalışma ortamı
	Salınım ve rüzgar enerjisi kullanarak karışık plastiklerin sınıflandırılması	✓ Karışık plastiklerde yabancı maddelerin %37'den %4'e düşürülmesi ✓ Çalışan sayısının 6'dan 1'e düşürülmesi
	Özgül ağırlık farkı kullanarak karışık plastiğin sınıflandırılması	✓ Özgül ağırlık ve su basıncı kullanımını birleştirerek yüksek kaliteli malzemeleri kurtarır, (birincil geri kazanım: PP reçine; ikincil geri kazanım: PS reçine)

Aşama	İleri Dönüşüm Teknolojisi	Sonuç ve Etkiler
	Yakın kızılötesi sensörler kullanarak üç tür plastik için eşzamanlı sıralama cihazı	✓ Flotasyon farkını azaltmak için hava akışını kontrol ederek ve yüksek hızlı, yüksek hassasiyetli seçici hava tahliye teknolojisini kullanarak eşzamanlı sıralama cihazının üç tür plastik için pratik uygulaması ✓ Üç sıralama işlemi, işlem verimliliğini iki katına çıkararak bir adımda gerçekleştirilir
Ürün Üretimi	Tel işleme ekipmanları (bakır ve tel kaplamanın verimli şekilde ayrılması için)	✓ Neredeyse %100 saf bakır elde edilebilir, kaynağın daha fazla katma değer ile yeniden kullanılmasına katkıda bulunur ✓ Geri kazanılan kablolama, iş verimliliğini artırarak olduğu gibi aygıtı yerleştirilebilir
	Buzdolabı vakumlu yalıtım panellerinin geri kazanılması (VYP) (Buzdolabı VYP lazer işleme makinesi)	✓ VYP cam elyaflarının ayrılması ve geri kazanılması: Güvenlik / hijyen tehlikelerini önler, öğütücü filtrenin ömrünü uzatır, VYP'nin geri dönüşümünü artırır (şu anda inceleme altında olan kaynak dolaşım sistemi)
	Üretan izolasyonunun katı yakıt haline dönüşümü	✓ Üretan içerisindeki hemen hemen tüm Freonları buharlaştırmada ve hacmi 1/3 seviyesine düşürmede başarılı olunabilir
	Geri dönüşümlü buzdolabı üretanın metalaşması	✓ Geri kazanılmış yüksek saflıkta poliüretan köpük yapı malzemesi olarak kullanılabilir (yalıtım levhası)
	Buzdolabı üretan köpük peletleme cihazı (peletleme ile neredeyse % 100 emülsifikasyon elde edilir)	✓ Üretan hacminde önemli azalmalar, indirgeme CO ₂ taşıma emisyonları (Yaklaşık 1/4)
	Geri dönüştürülmüş plastiklerin kullanımını genişletmek için teknolojiler geliştirmek	✓ Neredeyse %100 saf bakır elde edebilir, kaynağın daha fazla katma değer ile yeniden kullanılmasına katkıda bulunur ✓ Geri kazanılan kablolama, iş verimliliğini artırarak olduğu gibi aygıtı yerleştirilebilir
	Plastikleri tekrar tekrar kullanan, kendiliğinden dolaşan geri dönüşüm teknolojisi geliştirmek ve uygulamak	✓ VIP cam elyaflarının ayrılması ve geri kazanılması: Güvenlik / hijyen tehlikelerini önler, öğütücü filtrenin ömrünü uzatır, VIP'nin geri dönüşümünü artırır
	Plastikleri tekrar tekrar kullanan kapalı malzeme geri dönüşüm teknolojisini geliştirmek ve uygulamak	✓ Geri dönüşüm malzemelerinde sadece darbelere dayanıklılık gibi genel özellikler değil aynı zamanda alev geciktiriciliği de yeni malzemelerle aynı seviyede elde edilebilir.

Aşama	İleri Dönüşüm Teknolojisi	Sonuç ve Etkiler
	Neodim mıknatısının kompresörlerden geri kazanılması (Durum 1)	✓ Motor sökme işlemini otomatize ederek ekonomik neodim mıknatıs geri kazanımı ✓ Kurtarılan neodimyum mıknatıs, bir mıknatıs üreticisi tarafından elektronik ürünlerin imalatında kullanılmak üzere yeni neodimyum veya dispersiyumda rafine edilebilir
	Neodim mıknatısının kompresörlerden geri kazanılması (Durum 2)	✓ Her işlem için düşük maliyetli ekipman yapılandırmasına sahip neodimyum mıknatıs geri kazanım sistemi ✓ Nadir toprak elementlerini dolaştırmak için manyetik malzeme ve mıknatıs üreticileri ile işbirliği yapın (REE)
	REE mıknatıs geri kazanım cihazı (REE mıknatıslarının kullanılmış klimalardan otomatik olarak sökülmesi)	✓ REE mıknatıs demontajı için mıknatıs, klima kompresör motorundan (rotor) oda sıcaklığı koşullarında otomatik olarak söker ✓ Mevcut kompresör sökme hattı ile birlikte, otomatik sökme cihazı (alan ve işçilikten daha iyi yararlanan) REE mıknatıslarını verimli bir şekilde kurtarır
	CRT camın cam elyafına dönüştürülmesi	✓ CRT TV'lerin geri dönüştürülmüş camları buzdolapları için malzeme olarak kullanılabilir ✓ Vakum yalıtım malzemeleri elde etmek ve enerji tasarrufu sağlayan buzdolapları üretmek için gereken enerjiyi azaltmak için yeni üretilmiş buzdolaplarında vakum yalıtım paneli malzemesi olarak kullanın
	LCD panel camını kullanarak yeni arıtma malzemesi (zeolit) geliştirin	✓ Geliştirilmekte olan ürünler, LCD panel camının, gelecekte daha fazla talep görmesi beklenen ısıya, aşınmaya ve korozyona dayanıklılık gibi özelliklerini ve işlevselliğini birleştiren yeni malzemelerdir
	LCD panel camından yüksek performanslı boya geliştirin	✓ Atılan cam malzemelerin atılmasını en aza indirir ✓ Güneş ışığına, yağmura, kuma vb. Maruz kalan dış mekan kurulumlarında dayanıklılığı artırabilir. ✓ Bu boya ile uygulanan LED aydınlatma, büyük yerel ve uluslararası cevaplar almaktadır.

4. KONUYLA İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde ilk olarak atık BDK'lara uygulanan geri dönüşüm stratejilerine ardından ileri dönüşüm stratejilerine ait yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

4.1. Atık BDK'lara Uygulanan Geri Dönüşüm İle İlgili Çalışmalar

Sua-iam ve Chatveera (2022) tarafından yapılan bu çalışmada atık BDK tozlarının kendiliğinden yerleşen beton üretiminde sıradan Portland çimentonun yerine bağlayıcı olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 7 farklı oranda Portland çimento yerine atık BDK tozu ile hazırlanan karışımlar üzerinde incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan BDK tozu oranları sırası ile %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30'dur. Karışımlarda işlenebilirlik ve sertlik üzerinde incelemeler yapılmıştır. Deneysel sonuçlardan, kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğinin, BDK tozu oranı arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Çalışmada elde edilen en yüksek basınç dayanımı %5 oranında atık BDK tozu ilavesi ile gerçekleştirilmiştir.

Ganesh vd. (2021) tarafından yapılan bu çalışmada ilgi odağı, katı atıkların ortadan kaldırılması ve bu atıkların beton içeriğine eklenmesi olmuştur. Çalışmada, tüm elektrikli cihazlardan gelen atık baskılı devre kartları ezilmiştir. Belirli bir yüzdeye kadar ince agrega yerine kullanılmak için küçük toz tanelerine dönüştürülmüştür. Atık BDK tozlarının beton numunelerine eklenmesi ile betonun mukavemetinin arttığı ve BDK'nın ince agrega ikamesi olarak kısmen kullanılabileceği bulunmuştur.

Grigorescu vd. (2020) tarafından atık baskılı devre kartlarının ametal kısımları seçilerek kompozitlere dolgu maddesi olarak kullanılması üzerinde çalışılmıştır. %30 oranında bir ilave termoplastik kompozitlerin yangın direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan test sonuçlarına göre darbe dayanımında da artış gözlemlenmiştir.

Johnson vd. (2018) tarafından 2014-2020 tarihlerini kapsayacak atık elektrikli ve elektronik eşyalar ve yeniden kullanımını artırmaya yönelik destekleme araştırması yapılmıştır. Bu rapor, İrlanda'da bu faaliyetin yaygınlaştırılmasını ve geliştirilmesini destekleyecek atık elektrikli ve elektronik cihazların yeniden kullanımı için hazırlığı destekleyen bir dizi öneri sunmuştur. Raporda, yeniden kullanımı desteklemek için hangi ürün, tasarım ve özelliklerinin uygulanması gerektiği incelenmiştir. Belçika, Fransa, Avusturya, İngiltere ve İspanya'da atık elektrikli ve elektronik cihazların yeniden kullanımı için başarılı örnek olay incelemeleri yapılırken, yeniden kullanım organizasyonları için hazırlık konusundaki kilit paydaşlarla görüşülmüş ve öneri

oluşturmak için bulgular analiz edilmiştir. Avrupa genelinde yeniden kullanım organizasyonları hazırlama önemi dikkate alındığında, analiz için büyük ev aletleri ve küçük iletişim teknolojisi ekipmanları (akıllı telefonlar, bilgisayar tabletleri ve diğer BİT ekipmanı) gibi önemli cihazlar seçilmiştir. Çalışma sonucuna göre çevresel açıdan daha sürdürülebilir ve yeniden kullanılabilir ürünlerin yaşam döngüsü için öneminden bahsedilmiştir.

Tian vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada atık BDK'lardan elde edilen ametal tozların ahşap plastik kompozit ürünlerde performans artırıcı madde olarak kullanılması üzerinedir. Böyle ahşap plastik kompozit ürünlerde odun ununun yerini atık BDK'ların alabileceği belirtilmiştir. Atık BDK'ların ahşap kompozitlerine dahil edilmesi, darbe mukavemetini, su emme oranlarını ve reolojik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Çalışmaya göre %10-20 ilave ile bu özelliklerde iyileşme sağlanacaktır. Böylece atık BDK'ların yeniden kullanımı sağlanarak çevre ve kaynakların korunacağından bahsedilmiştir.

Baxter vd. (2016) atık elektrikli ve elektronik aletlerin yüksek kalitede toplanması ve bertarafının çevresel etkilerini ortaya koyan bu çalışması Norveç'te yapılmıştır. Çalışmada üç farklı elektronik atık türü ayrı ayrı ele alınmıştır. Bunlar; buzdolapları, LCD ekranlar ve cep telefonlarıdır. Çalışmanın amacı ve kapsamı, Elretur'un operasyonları ve kamu faaliyetleriyle ilgili olarak değer zincirinin parçaları boyunca yaşam döngüsü çevresel etkilerini hesaplamaktır. Çalışmada LCA yapılmıştır. Altı değer zincirinin modelleri SimaPro LCA yazılımı (v7) ve eko-invent veritabanları (v2) kullanılarak yapılmıştır. Ancak IPCC 2007 GWP 100a metodu versiyon 1.02 kullanılarak hesaplanan sadece küresel ısınma potansiyelleri bu yazıda ayrıntılı olarak sunulmuştur. HFC olarak modellenen soğutucu gaz emisyonları çok büyük bir küresel ısınma potansiyel ile sonuçlanmaktadır. Sadece 400 g'dan fazla gaz, yaklaşık 600 kg CO₂ eşdeğeri ile sonuçlanmıştır. Bu, toplam küresel ısınma potansiyel yükünün %96'sını oluşturmakta ve geri kazanılan malzemelerden ve enerjiden elde edilen faydayı bastırmaktadır. Sonuç, soğutucu akışkan kaçaklarını önlemek için soğutucu atıkların uygun şekilde kullanılmasının ve işlemdeki etkin geri kazanımının veya bertaraf edilmesinin, tüm değer zincirinin küresel ısınma potansiyeli için en önemli faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca altın ve gümüşte cep telefonlarının yapısında bulunmaktadır. Bu çalışma mobil telefon atığından iz ve değerli malzemelerin geri

kazanımının zor olduğunu göstermiştir. Kilit nokta, miligram aralığında bulunan iz materyallerinin çok önemli çevresel etkilere sahip olabileceği ve bu tür malzemelerin geri kazanılmasının, değer zinciri için iyi bir çevre hesabı geliştirilmesinde büyük önem taşıdığıdır. Fakat bunlarla ilgili spesifik LCA verileri yetersizliğinden bahsedilmiştir.

Yang vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada ise atık BDK'nın metal olmayan kısımlarının toz asfalt modifiye edici olarak kullanımı incelenmiştir. Atık BDK'ların pirolizinden bir yan ürün olarak üç modifiye edici ürün üretilmiş ve karışımların performansı incelenmiştir. Bu üç modifiye edici; heavy fraction of pyrolysis oil (HFPO), SBR ve HFPO+SBR 'dir. Stiren-bütadien kauçuk (SBR); yaygın olarak kullanılan asfalt modifiye edicidir. HFPO; atık BDK piroliz yağından yapılan asfalt modifiye edicidir. HFPO+SBR ise bu ikisinin karışımıdır. Çalışmanın sonucuna göre; HFPO eklenerek asfaltın fiziksel özellikleri iyileştirilebilmektedir. HFPO, ticari olarak temin edilebilen SBR' de olduğu gibi bir asfalt modifiye edici olarak kullanımda uygundur. Buna ek olarak, HFPO modifiye asfalt, yüksek sıcaklığa dayanıklıdır, bu da onu daha sıcak havalarda SBR modifiye asfalttan daha uygun hale getirilebilir. Asfalt karışımlarının performansı ve direnci, HFPO modifiye asfalt ilavesiyle artırılabilir. HFPO modifiye asfalt kaplama, yağmurlu ve yoğun trafik koşullarında daha iyi performans gösterebilir. Asfalt modifiye edici olarak HFPO, asfalt yol döşemesine yönelik ticari uygulamalarda iyi bir geleceğe sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bu araştırma atık BDK'ların pirolizinden oluşan piroliz yağı için yeni bir kullanım sunmaktadır.

Sun vd. (2013) tarafından yapılan bu çalışmada, gürültü azaltıcı olarak atık BDK 'lardan geri kazanılan fiberglasların kullanılabileceği gösterilmiştir. Geri kazanılan fiberglasların (RFG) ses emme performansı, malzeme kalınlığı ve kütle yoğunluğunun etkisi dikkate alınarak araştırılmıştır. Ayrıca, kaplama tabakalarının emme kabiliyeti üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, RFG'nin yüksek gözenekli yapısının, geniş bant frekans aralığında mükemmel bir ses emme yeteneğinin olduğunu göstermiştir. 30 mm RFG örneği için 100–6.400 Hz' de 0.8' in üzerinde ortalama ses emme katsayısı elde edilebilmektedir. Örnek kalınlığı arttığında, RFG'nin düşük frekanslı emiliminin önemli ölçüde iyileştirildiği görülmüştür. Tüm sonuçlar, RFG'nin gürültü azaltma için yeniden kullanılmasının atık BDK'ların yüksek katma değerli kullanımında umut verici bir yol olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, hem çevre kirliliğini hem de gürültü

kirliliği sorunlarını çözerek atık BDK'ların verimli ve karlı bir şekilde geri dönüştürülmesini sunmaktadır.

Wager vd. (2011) tarafından yayınlanmış olan bu makale elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının İsviçre toplama ve geri kazanma sistemlerinin çevresel etkileri üzerinedir. Yukarıda bahsedilmiş olan İsviçre’de yapılan çalışmanın sonuçlarını doğrulayan bir çalışmadır. Bu çalışmada, mevcut İsviçre elektrik elektronik atıkların toplama ve geri kazanım sistemleri için toplama, ön işleme ve son işleme aşamalarının genel çevresel etkilerini hesaplamayı amaçlayan MFA ve LCA çalışmasının sonuçlarına yer verilmiştir. Yaşam döngüsü envanter veri tabanının ecoinvent v2.01 versiyonu ile oluşturulmuştur. Bir önceki yapılan çalışmaya göre oluşan elektrik elektronik atıkların miktarı %45 oranında artış gösterdiği görülmüştür. Geri alınan elektrik elektronik atıkların miktarındaki artışın yanı sıra, yeni bertaraf seçenekleri de ortaya çıkmıştır. Örneğin, plastikler, artık sadece yakılmamaktadır, bir kısmı da geri dönüştürülmektedir. Bu çalışma sadece elektrikli ve elektronik cihazların ömrünün son aşamasına odaklanmıştır. Elektrik elektronik atıkların yakılması ve depolanması senaryoları üzerinde durulmuştur. Yakma ve depolanmanın sonuçlarına bakıldığında her ikisi de ekosistem ve canlı için zararlı etkiler göstermiştir. Ama geri kazanım ile hem doğal kaynak kullanımı azalmış hem de çevresel tehlikeler en aza indirilmiştir. Ele alınan senaryoların çevreye etkisi geri kazanım senaryosuna göre daha yüksektir. Elektronik atığın arıtımında (yakma-depolama senaryoları) diğerlerine göre en yüksek etkiye sahip olan Tatlı Su Suları Ekotoksikite Potansiyeli (FAETP) ve Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)’dir. FAETP'nin yüksek katkısı, yakma ve depolama işlemlerinde metallerin doğrudan havaya veya suya salınmasından dolayıdır. Bakır ve nikelin arıtımında suya doğrudan salınmasının bir sonucu olan Tatlı Su Sucul Ekotoksikite Potansiyelinden (FAETP) %90 oranında etkilenmektedir. Ötrofikasyon Potansiyeli (EP) ve Stratosferik Ozon Tabakasının Tükenmesi Potansiyeli (ODP)’ne metalin işlenmesi %60 oranında bir katkı sağlamıştır. EP, havaya verilen azot oksit emisyonlarından kaynaklanırken ODP halon 1211 (tüketilen doğal gazdan) ve halon 1301 (hızlı kireçten ve bu işlem için gerekli olan elektrikten) emisyonlarının bir sonucudur. Tek istisna plastik arıtımında bir kısmının yakılmasından gelen İnsanlar Üzerine Olan Toksik Etki Potansiyeli’dir.(HTP). Plastik yakmanın HTP üzerindeki etkisi, yakma işleminden kaynaklanan antimon emisyonlarının (suya) bir sonucudur. Plastik yakma, toplam FAETP'nin neredeyse %20'sine katkı sağlar; bakır ve nikelin suya doğrudan emisyonu ise bu payın %95'den

fazlasından sorumludur. Son olarak, plastik yakma işlemi de, sırasıyla "metal/plastik karışımı" fraksiyonunun HTP ve FAETP'nin bu iki çarpma kategorisine nispeten yüksek katkısından sorumludur. CRT cihazlarının arıtımı, Asitleştirme Potansiyeline (AP) ve Fotokimyasal Oksidasyon Oluşturma Potansiyeline (PCOP) %30'dan daha fazla katkıda bulunmuştur. Bu payın %90'dan fazlası, ikincil cam üretim prosesi için girdi olan nikel ve bakır karbonat üretimi ile ilişkili havaya çıkan kükürt dioksit emisyonlarının bir sonucudur.

Quan vd. (2010) atık BDK'larda piroliz yöntemi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Atık BDK'lardangeri kazanılan petrol ürünlerinde, epoksi reçinesinin ayrışmasından oluşan yüksek konsantrasyonlarda fenol ve türevlerini içerdiğini göstermiş ve oluşan bu piroliz yağının da fenol-formaldehit reçinesi üretimi için hammadde olarak yeniden kullanılabilceğini göstermektedir.

Zheng vd. (2009) atık baskılı devre kartlarından geri dönüştürülen ametallerin polipropilen (PP) kompozitlerde takviye dolgu maddeleri olarak kullanılabilmesini incelemiştir. Mekanik testler, PP kompozitlerin gerilme ve bükülme özelliklerinin, geri dönüştürülmüş ametal malzemelerin ilave edilmesiyle önemli ölçüde geliştirilebileceğini göstermektedir. PP kompozitlerin maksimum gerilme mukavemeti, gerilme modülü, eğilme mukavemeti ve eğilme modülünde maksimum artış yüzdelere göstermiştir. Atık BDK'lardangeri dönüştürülen ametaller, PP kompozitlere eklenebilir. Vicat Yumuşama Sıcaklığı testi, ametallerin varlığının, PP kompozitlerin potansiyel uygulamalarında ısı direncini artırabildiğini göstermiştir. Çalışmanın sonucuna göre ametallerin PP kompozitlerinde takviye dolgu maddeleri olarak kullanılmasının, hem kaynakların geri dönüşümü hem de çevre kirliliğinin çözülmesinde umut verici bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Huang vd. (2008) atık baskılı devre kartlarının geri dönüşümü sırasında genellikle endüstriyel katı atık yan ürünü olarak atılan ve yaklaşık %70 oranında ametal olmayan malzemeler üzerinde çalışmıştır. Ancak incelenen bu atık türü bol miktarda yüksek değerli cam elyaf içermektedir. Bu çalışmada, atık baskılı devre kartlarının metal olmayan malzemelerinden cam elyaflarının geri dönüşümü için proses teknolojisi incelenmiştir. Atık baskılı devre kartlarının ametal olmayan malzemelerinden yüksek değerli cam elyafların geri dönüştürülmesine yönelik bu teknoloji, kaynakların geri

dönüştürülmesi ve atık baskılı devre kartlarının geri dönüşümü sırasında çevre kirliliğinin de önlenmesi için bir yol sunmuştur.

Guo vd. (2008) fenolik kalıplama bileşiği (PMC) üretiminde atık baskılı devre kartlarının yan ürünü olan cam-ametallerin kullanılmasının uygulanabilirliğini üzerinde durmuştur. Cam ametaller kırma ve elektrostatik ayırma işlemleriyle elde edilmiştir. SEM cam elyafları ve fenolik reçineler arasında güçlü bir ara yüzey bağının oluştuğunu göstermiştir. Tüm sonuçlar ise PMC'de dolgu maddesi olarak camların kullanımının, çevre kirliliğini çözülmesinde ve PMC'nin maliyetini düşürmesinde yeni bir yöntemi temsil ettiğini göstermiştir. Böylece hem çevresel hem de ekonomik faydaların elde edileceğinden bahsedilmiştir.

4.2. Atık BDK'lara Uygulanan İleri Dönüşüm İle İlgili Çalışmalar

Rao vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, cep telefonlarının atık baskılı devre kartlarından bakır ve altının geri dönüşümü için yeni bir hidrometalurjik yöntem sunulmuştur. Bakır ve altının diğer metallerden seçici olarak ayrılmasını sağlamak için iki aşamalı bir asit liç işlemi üzerinde durulmuştur. Ardından bakır ve altın içeren çözeltiler yüksek düzeyde seçici fenolik oksim ve amid özütleyiciler ile saflaştırılmıştır. 30°C'de 3M nitrik asit kullanıldığında baz metallerin tam olarak çözünmesi sağlanmıştır. Bakırın bu liç sıvısından ayrılması amacıyla rosen içinde çözülmüş ACORGA M5640 kullanılarak solvent ekstraksiyonu kullanılmıştır. Baz metal liçten elde edilen kalıntılar 70°C'de 3M sülfürik asit ve 3M sodyum bromür karışımı ile işlenmiştir. Çalışma, altının metal sızıntı suyundan %95'ten fazla çözünmesi ile sonuçlanmıştır.

Yi vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, atık elektrik elektronik eşyaların ileri dönüşümü hedeflenmiş olup bu stratejiler üzerinde durulmuştur. Çalışmada atık malzemelerin değerlerini artıracak şekilde geri dönüşümdeki gerekliliği vurgulanmıştır. Atık buzdolapları ve bilgisayarlarının malzeme akış analizini destekleyen STAN yazılımı kullanılmıştır. MFA sonuçları ile atık buzdolapları ve bilgisayarlardan malzemelerin geri kazanılması ve geri dönüştürülmesini iyileştirmek için mevcut uygulanabilir teknolojiler gözden geçirilmiştir. Atık elektronik üzerinde yapılan malzeme akış analizleri ile dört strateji ilişkilendirilmiştir. Elektronik cihazlar, özellikle atık buzdolapları ve atık bilgisayarlar, uygulama için seçilmiştir. Kayıtlı sektör tarafından atık buzdolapları 121.642 ton/yıl ve kayıt dışı sektörde ise 63.823 ton/yıl

değerinde toplanmıştır. Atık buzdolaplarının mevcut geri dönüşüm oranı %88,53 olarak tahmin edilmiştir. Resmi sektör tarafından toplam 7.585 ton/yıl atık bilgisayar, kayıt dışı sektör tarafından ise 3.807 ton/yıl toplanmıştır. Atık bilgisayarların mevcut geri dönüşüm oranı ise %77,43 olarak tahmin edilmiştir. Buzdolabında 28 ileri dönüşüm teknolojisinin kullanılmasının mümkün olduğunu ve bilgisayarlarda ileri dönüşümü teşvik etmek için 15 teknolojinin mevcut olduğu bulunmuştur. Kapsamlı bir yükseltme kavramını içererek kaynak geri kazanımı ile evrensel çapta uygulanabilir yönergeler sunmuştur.

Parajuly vd. (2017) tarafından Danimarka'daki atık elektrikli ve elektronik aletlerin oluşumu, miktarları ve yönetimlerini içeren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma Danimarka'daki atık elektrikli ve elektronik eşyaların üzerine yapılan ilk kapsamlı çalışmadır. Mevcut elektronik atık yönetim sisteminin performansı belirlenmiştir. Bu çalışmada MFA ile elektronik atık yönetim sistemi ve bunun performans göstergeleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın amaçları, Danimarka'da üretilen elektronik atık miktarlarını ve dolayısıyla ikincil kaynakların kullanılabilirliğini bilimsel olarak değerlendirmek; ürünlerin resmi toplanmasını (yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi) içeren yaşam aşamalarını değerlendirmektir. Çalışmadaki sistem tanımı Danimarka'daki elektronik eşya ve atık yönetim sistemi ile ilgili tüm süreçleri ve akışları içermektedir. Satış verilerinin kolayca bulunabileceği 61 farklı ürün çeşidi üzerinde çalışılmıştır. Bu dört kategoriden en yaygın kullanılan ev ürünlerini içermektedir: Büyük ev aletleri, küçük ev aletleri, bilişim ve telekomünikasyon cihazları ve tüketici elektroniği. 1991-2015 yılları arasındaki satış verileri referans alınmıştır. Buradaki tahminlerin sadece 61 ürüne dayandığını ve bu nedenle tüm elektronik eşya türlerini kapsamadığını belirtmek önemlidir. İlk olarak 4 gruba ayrılarak kaynak grupları belirlenmiştir. İlk grup; Al, Cu, Fe, ikinci grup; Pb, Sn, Zn, üçüncü grup; Ba, Bi, Co, Ga, Sr, Ta ve dördüncü grup; Ag, Au, Pd. Bu gruplara bakıldığında plastik ve demirin sürekli bir artışta olduğu diğerlerinin ise 2013 yılına kadar arttığı sonrasında zaman içinde azaldığı görülmüştür. Eser miktarlarda kullanılan özel ve değerli metaller genellikle belirli işlevsellik elde etmek için daha fazla dalgalanma göstermiştir. Bu değişiklik, elektronik atığın türündeki bileşiminden kaynaklanmaktadır. Elektronik atıkta bulunan ikincil kaynaklar tarafından oluşan potansiyel gelirlerde belirlenmiştir. Toplam gelir 1990 yılında 69 milyon Euro'dan 2015 yılında 122 milyon Euro'ya yükselmiştir. Au ve plastik, toplam gelirin yarısından

fazlasını taşıyan iki temel kaynaktır. Cu, potansiyel gelirin %15'inden fazlasını temsil eden bir sonraki önemli metaldir. Geri kalanı ise büyük ölçüde Fe ve Ba tarafından sağlanır. Ayrıca, diğer bir sonuç ise sökme işlemiyle desteklenen tipik bir kurulumda, Al, Cu ve Fe gibi değerli metallerin mevcut geri dönüşüm sistemi ile etkili bir şekilde geri kazanılabilirken, plastikler ve daha az yaygın metallerin (nadir toprak elementleri dahil) oldukça düşük geri dönüşüm oranlarına sahip olmasıdır.

Maroufi vd. (2017) günümüzdeki en önemli atık miktarını oluşturan elektronik atıklardan silikon karbür nanotellerinin sentezi için yeni bir süreç üzerinde çalışmıştır. İki elektronik atık çeşidinin karbotermal indirgenmesiyle, 30-200 nm çaplı ve 10 µm'ye kadar uzunluğa sahip silikon karbür nanotelleri sentezlemiştir. Atık bilgisayar monitörünün cam kısmı silika kaynağı olarak, atık bilgisayarın plastik kabuğu ise karbon kaynağı olarak seçilmiştir. Bilgisayar monitörünün ve atık bilgisayarın plastik kabuğunun kompozisyonunun tanımlanmasından sonra, her iki bileşenin stokiyometrik bir karışımı hazırlanmış ve daha sonra 1550°C'de ısıtılmasına tabi tutulmuştur. Elde edilen ürün karakterize edilmiş ve sonuçlar, silikon karbür nanotellerin üç farklı morfolojisinin oluşumunu doğrulamıştır. Bunlar; pürüzsüz yüzey nanoteller, bambu benzeri nanoteller ve yüksek yoğunluklu istifleme hatalarına sahip altıgen prizma nanotellerdir. Artan küresel elektronik atık sorunu göz önüne alındığında, silikon karbür nanotelleri sentezlemek ve potansiyel ekonomik ve çevresel faydalar sağlamak için yeni ve düşük maliyetli bir yöntem sunmuştur .

Shokri vd. (2017) eski model BDK'ların seçici termal dönüşümü ile 900°C' de Cu-Sn nanoparçacıklarının üretilmesi ve Pb açısından zengin fazda toksik Pb'den ayrılması üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu termal dönüşüm mekanizması SEM ve TEM kullanılarak araştırılmıştır. 900°C'de ısıtılma sırasında önce Sn-Pb alaşımı erimeye başlamış ve bu alaşım Cu üzerindeki parçacıkları kaplamıştır. Bu sıcaklıkta, Sn'nin Cu'ya difüzyonu tetiklenmiştir. Cu-Sn alaşımının oluşumu ve Cu'da Pb'nin düşük çözünürlüğü, %0.04'ten az ve Sn'nin yüksek çözünürlüğü nedeniyle Pb'den ayrılmasıyla sonuçlanmıştır. BDK numunelerinin organik bileşenlerinin bozulması, sıvı Cu-Sn alaşımını mikronize eden ve ayrıca nanoparçacıkları oksidasyondan koruyan bir “termal mikronize edici” ortam olarak işlev gören bir indirgeme ortamı yaratmıştır. Bu çalışma, elektrik elektronik atıklardaki metallerin kontrollü dönüşümü ve yenilikçi bir “termal

mikronize” işlemle faydalı bir bronz nanopartikül olan Cu-Sn nanopartiküllerinin doğrudan üretimi için yeni bir yol oluşturmıştır.

Zhan vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada atık BDK’ların Pb içeren lehim kısımlarından kurşunun vakumlu buharlaştırma ile ayrılabilmesi ve yoğunlaşma ile kurşun nanopartiküllerin elde edilebileceği üzerinde çalışılmıştır. Nispeten yüksek bir buhar basıncı ile Pb vakum buharlaştırma yoluyla atık Pb/Sn lehimlerinden kolayca ayrılabilmesi belirtilmiştir. Pb’nin atık lehimlerden ayrılması ağırlıkça %98 saflıkta olmaktadır. Bu çalışma, atık Pb/Sn lehimlerinden veya diğer Pb içeren katı atıklardan yüksek katma değerli Pb’nin ileri dönüşümü için teorik bir temel sağlayacağı belirtilmiştir.

Rajagopal vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada atık BDK’ların ametal kısımları üzerinde çalışılmıştır. Hızla artan ve çevreye için tehdit oluşturan atık BDK’lar, yüksek performanslı süper kapasitör elektrotları için fiziksel aktivasyon işlemiyle yüksek değerli aktif karbon üretmek için hammadde kaynağı olarak kullanımı detaylandırılmıştır. Bu çalışma, enerji depolama uygulamalarına uygun elektrokimyasal davranış sergileyen atık BDK’lardan katma değerli aktif karbon üretmek için yeni ve etkili bir yaklaşım sunmaktadır.

Silvas vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada atık BDK’lardan fiziksel ve hidrometalurjik yöntem ile doğal cevherlerdeki gibi değerli bakır metaller elde edilmiştir. Çalışmada manyetik ayırma, asitle parçalama ve kimyasal analizler yapılmıştır. Hidrometalurjik işlemin sonunda, bakır ekstraksiyonunun %100’ü elde edilmiş ve geri kazanım faktörü, 100 kg PCB’de 32 kg Cu’ya karşılık gelerek %98,46 oranında olmuştur.

Ünal vd. (2015) Ram Belleklerdeki Metalik Değerlerin Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanımı çalışması ile atık RAM’lerde öncelikle lehimleme işlemini uygulayıp baskılı devre kartı ve entegre kısımlarını birbirinden ayırmıştır. Baskılı devre kartlarına kırma ve öğütme; entegrelere ise kırma ve manyetik ayırma gibi fiziksel işlemleri uygulamıştır. Ardından baskılı devre kartlarına önce nitrik asit sonra kral suyu çözümlendirmesi yaparak sementasyon ve altın çöktürme işlemleri ile soy metallerin geri kazanılmasını incelemiştir.

Xing ve Zhang (2013) atık BDK’lardan metalleri geri kazanmak için alt ve süperkritik su kullanılmıştır. Cam elyaf içerikli bromlu epoksi reçinesinden oluşan atık

laptopların bromlu alev geciktirici içeren plastik kısımları seçilmiştir. Bu tip bromlu alev geciktirici, süperkritik organik sıvılar tarafından hızla ekstrakte edilebilmektedir. Bromlu epoksi reçinelerden cam elyaflar ve bakır kolayca geri kazanılmıştır.

Bigum vd. (2012) yüksek kaliteli atık elektrikli ve elektronik aletlerden alüminyum, bakır, altın, demir, nikel, paladyum ve gümüşün geri kazanımı LCA ile modellemiştir. Atık yönetiminin çevresel olarak değerlendirilmesi için özel olarak geliştirilmiş bir araç olan EASEWASTE modeli kullanılarak yapılmıştır. Çevresel etkileri ve kaynak tüketimini ölçmek için EDIP yöntemi ve eko-invent veritabanı kullanılmıştır. Elektrik elektronik atıkların ön işleminde manuel ayırma, parçalama, manyetik ayırma, Eddy Current ile ayırma, hava ve optik ayırma yer almıştır. Modellenen metalürjik arıtma tesisi olan Kaldo tesisi, bir dönüştürücü koridor, bir anot rafinerisi ve değerli bir metal rafinerisi içermektedir. Metalurjik arıtma, çevresel yükünün aynı miktarda metalin üretilmesinden kaçınılması ve cevherin rafine edilmesiyle çevresel tasarruf sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, ön işlem sırasında sadece %12-26 oranında gümüş, altın ve paladyum geri kazanılmıştır. Elektrik elektronik atıkların ön işlem sırasında paladyum, altın ve gümüş gibi değerli metallerin görünür kayıplarının azaltılmasının çevresel öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Zhu vd. (2012) atık BDK'larının geri dönüşümünün sadece çevrenin korunması için değil, aynı zamanda değerli malzemelerin geri kazanılması için de önemli bir konu olduğunun üzerinde durmuştur. Atık BDK'larından bakırın geri kazanılmasında brom epoksi reçineleri çözmek için bir fizibilite çalışması yapmıştır. Deneysel aşamaların sonucunda atık baskılı devre kartlarından bakır folyolar ve cam elyaflar ayrılmıştır. Bu analiz ile atığın içeriğindeki değerli malzemeleri geri dönüştürmek ve çevre kirliliğini etkili bir şekilde önlemesinde yeni bir yaklaşım gösterilmiştir.

Zhou vd. (2011) atık baskılı devre kartlarından değerli hammaddeleri elde etmeyi ve çevre kirliliğini önlemeyi amaçlamıştır. Vakumlu piroliz-santrifüj bağlama teknolojisi ile atık baskılı devre kartlarının geri dönüştürülmesi üzerine incelemeler gerçekleştirmiştir. Piroliz işlemlerinin ardından GC-MS ve FT-IR analizleri yapılmıştır. İkame edilmiş fenollerden oluştuğunu gözlemlemiştir. Piroliz yağı, diğer işlemler için yakıt veya kimyasal besleme stoğu olarak kullanılabileceğinden bahsedilirken geri kazanılan lehimin de doğrudan geri dönüştürülebilir veya rafine etmek için iyi bir kurşun ve kalay kaynağı olabileceği üzerinde durmuştur. Piroliz artıklarından ise çeşitli

metaller, cam elyaflar ve diğ er inorganik malzemeler içermesinden dolayı geri kazanabileceğinden bahsetmiştir. Piroлиз gazları ise esas olarak toplanabilen ve geri dönüştürülebilir CO, CO₂, CH₄ ve H₂'den oluştuğu belirtilmiştir.

Yukarıda incelenen geri dönüşüm ve ileri dönüşüm stratejilerini elektrik ve elektronik atıklar üzerinde farklı aşamalarda uygulayabilmek sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi için sağlam bir temel atılmasına imkan sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak; ileri dönüşüm ve geri dönüşüm yöntemleri birlikte ele alınmış olup LCA ve MCDM yöntemlerinin beraber değerlendirilmesi açısından farklılık oluşturmaktadır. Bu da tezin özgün değerini ortaya koymaktadır.



5. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (LCA) VE ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME TEKNİKLERİ (MCDM)

Bu tez çalışmasında atık BDK'lara uygulanan geri dönüşüm ve ileri dönüşüm stratejilerinin karşılaştırılması için LCA ve MCDM yöntemleri kullanılmıştır. Bu bölümde ilk olarak LCA, ardından MCDM yöntemleri açıklanmıştır.

5.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Nüfusun, sanayileşme hacminin ve kentleşmenin artması ile beraber çevre sorunlarının da artışı hız kazanmıştır. Bu problem, günümüzde çözüme kavuşması gereken en önemli hususlardan biridir. Problemin çözümü için çevrenin korunması ve iyileştirilmesi amacıyla planlanan çalışmaların artışı ve uygulama aşamasına geçilmesi düşünceleri hız kazanmıştır.

Doğal kaynakların bilinçsizce kullanımının başlanması ile ozon tabakasının incilmesi, küresel ısınma, sera etkisi, asit yağmurlarının oluşumu, çölleşme ve toprak erozyonu gibi çok fazla sorun daha da ön plana çıkmıştır. Bu önemli çevresel etkilere paralel olarak “sürdürülebilirlik” kavramının da önemi dikkat çekmeye başlamıştır. Sürdürülebilirliğin ilerleyebilmesi için ekonomik verimlilik artırılmalı, refah düzeyi yükseltilmeli ve ekolojik sistemlerin korunması gereklidir. Bunların sağlanabilmesi amacıyla bir yaşam döngüsü yaklaşımı ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Yaşam döngüsü kelimesinin ana mantığı çevresel açıdan üretim, tüketim, kullanım ve oluşacak atığın aşamalarını içeren zincirin tüm aşamalarını ayrıntılı olarak incelemektir. Böyle bütünsel ve analitik bir sistem, ürünün yaşamı boyunca rol alan tüm paydaşların arasındaki işbirliğini de zorunlu hale getirmektedir.

Çevrenin daha az kirletilerek ürünün üretilmesi için LCA başta olmak üzere birçok uygulama, yöntem ve araç geliştirilerek faaliyete geçirilmiştir (Çokaygil, 2005). LCA dışındaki yöntemlerden bazılarını, Çevresel Etki Değerlendirmesi (EIA), Stratejik Çevre Değerlendirmesi (SEA), Çevresel Risk Değerlendirmesi (ERA), Malzeme Akış Analizi (MFA), Ekolojik Ayakizi ve Maliyet - Fayda Analizi (CBA) oluşturmaktadır.

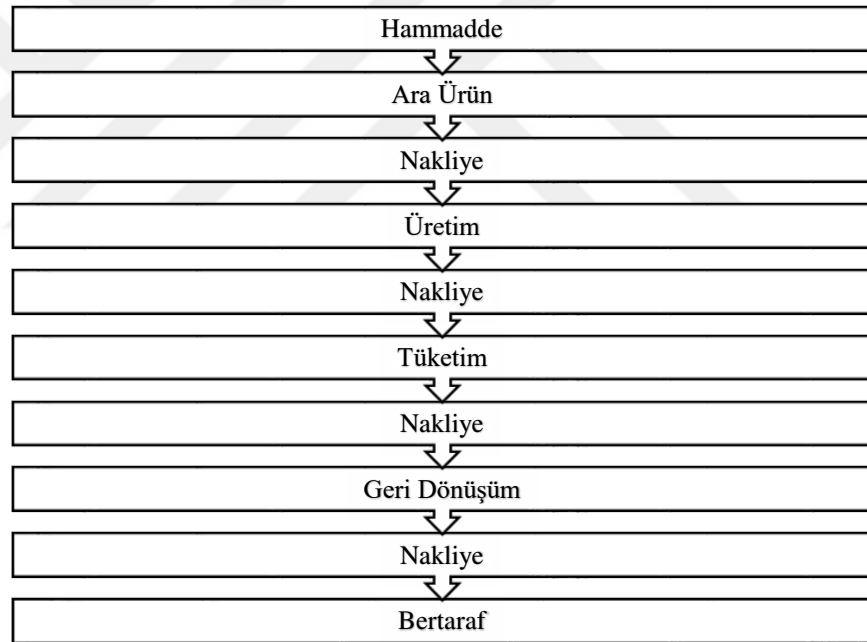
LCA, bir ürünün veya bir prosesin ilk aşaması olan hammaddenin elde edilmesinden başlayarak, işlenmesi, üretimi, kullanımı, yaşam sonu ve bertarafına kadar geçen tüm yaşam döngüsü süresince çevresel etkilerinin hesaplandığı, ölçülebildiği, raporlanabildiği, kaynak verimliliği ve atık oluşum miktarı bilgilerini veren bir değerlendirme yöntemidir.

LCA, hem doğrudan hem de dolaylı etkileri belirlemek ve ölçmek amacı ile kullanılmaktadır. Doğrudan etkiler üretim aşamasında oluşan emisyonları ve kullanılan enerji gibi girdileri kapsarken, dolaylı etkiler ise hammadde eldesi, ürünün dağıtımı, tüketici tarafından kullanımı ve atığın bertarafını kapsamaktadır.

Sistematik bir yaklaşım olan LCA, belirli bir ürün veya sistemin etkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlar. Bir tesise ve sadece sahada oluşacak atığın aktivitesine odaklanmak yerine firmanın tedarikçileri ve müşterileri ile arasındaki ilişkileri dahi ele almaktadır. Böylece, bir ürün veya sistemin çevresel etkilerinin beşikten mezara kadar olan zincirin toplam analizini vermektedir (Çokaygil, 2005).

5.1.1. Ürün yaşam döngüsü

Şekil 5.1’de ürün yaşam döngüsü gösterilmektedir. Yaşam döngüsüne ait kavramlar aşağıda yer almaktadır.



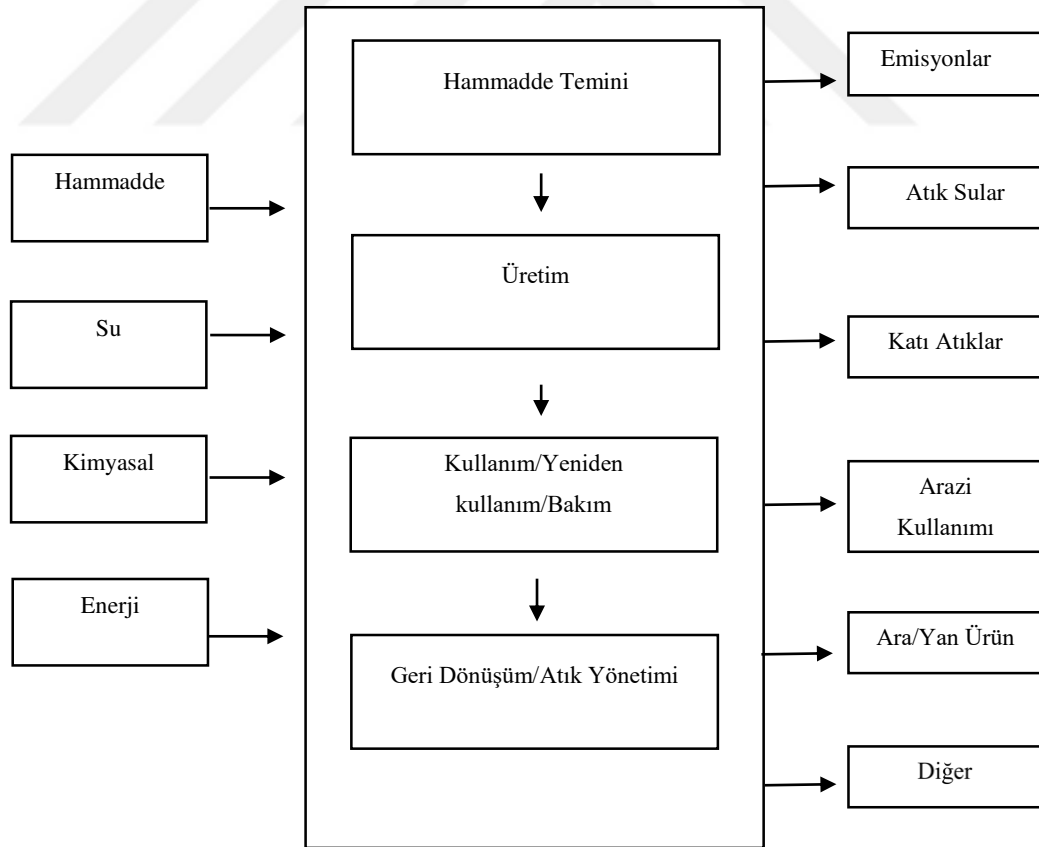
Şekil 5.1. Ürün Yaşam Döngüsü (Ötleş, 2015)

- Hammadde Üretimi: İlk aşama olan hammadde üretim basamağı ürünü oluşturmak için gereken bir ya da birden fazla hammaddenin üretimini teslim etmektedir.
- Üretim: Ürün veya hizmetlerin imalat veya meydana getirilme aşamasıdır.

- Tüketim/Kullanım: Ürünün müşteriye teslim edilmesinden sonraki kullanım aşamasıdır.
- Geri Dönüşüm: Ürünün aynı veya bir başka proseste tekrar hammadde olarak kullanılması amacıyla uygulanan geri dönüşüm yöntemleridir.
- Bertaraf: Ürünlerin geri dönüşüme tabi olamayacağı durumlardaki imha etme aşamasıdır.
- Nakliye: Tüm ara adımlarda dahil olmak üzere ürün veya hizmetin lojistik aşamasını temsil etmektedir.

5.1.2. LCA girdi ve çıktıları

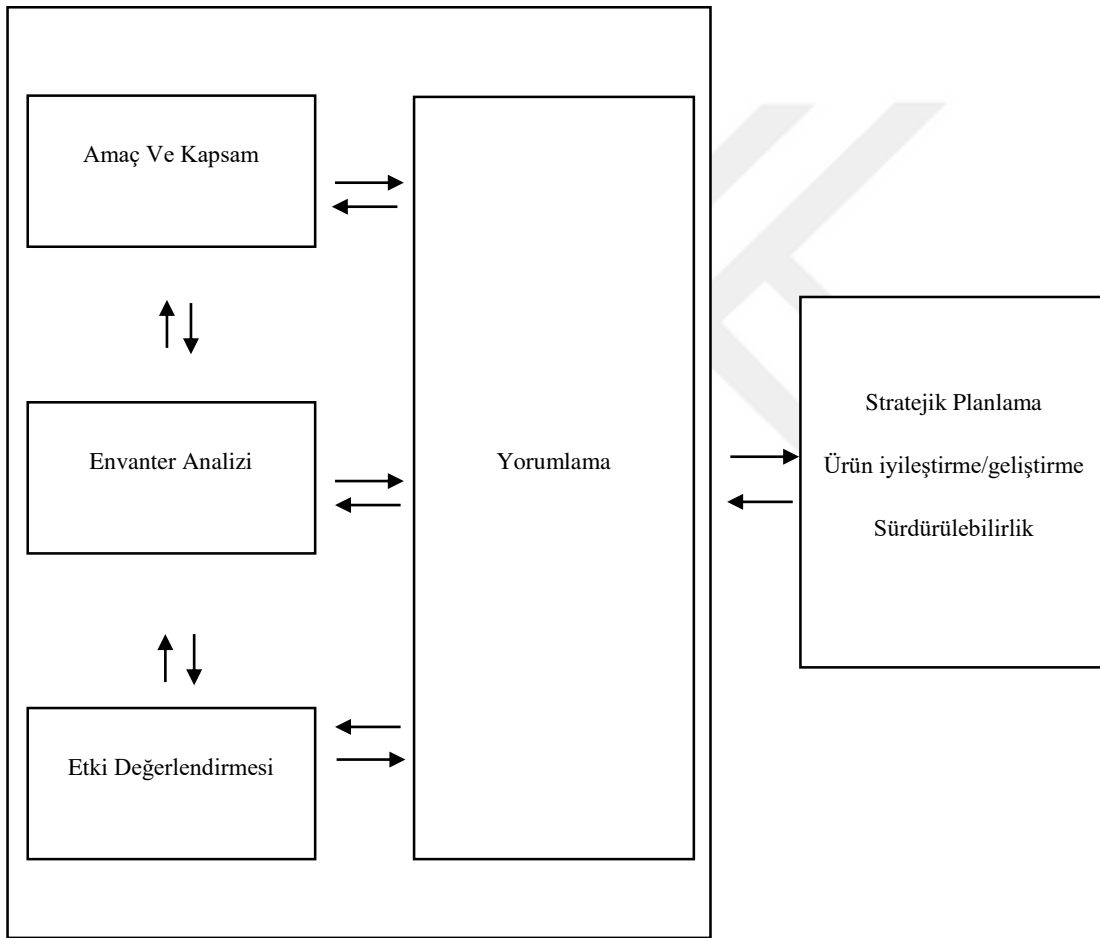
LCA yapılırken tüm girdilerin özenle ele alınması gerekmektedir. Bu girdi ve çıktıları içeren sistem sınırları ise araştırmacı tarafından belirlenir. Sistem sınırları, girdi ve çıktıların şema halinde gösterimine Şekil 5.2’de yer verilmiştir.



Şekil 5.2. LCA Girdi ve Çıktılar (Demirer, 2011)

5.1.3. LCA basamakları

ISO'nun 14001 Çevre Yönetim Sistemlerinin 14040 sayılı serisinde LCA yer almaktadır. 1994 yılından bu yana ISO'nun geliştirmekte olduğu 14040 standart serisi LCA'nın hem teknik hem de organizasyonel yapısı ile ilgilidir (Demirer, 2011). Şekil 5.3'de bu standartlar çerçevesinde LCA basamaklarının birbiri ile olan ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.3. LCA basamaklarının birbiri ile olan bağlantısı (Demirer, 2011)

5.1.3.1. Amaç ve kapsam

Bir LCA çalışmasının bağlamı ortaya koyulmaktadır. Çalışmanın amacı ve kapsamı açık bir ifade edilir. Bu basamak önemli bir aşamadır. Çalışmanın konusu,

nedeni, ulaşılmak istenen hedefleri ve sınırları içermektedir. ISO standartlarına göre amaçlanan uygulama ile konu ve sınırların tutarlı olması gerekir. Kapsam, ürün sisteminin fonksiyonunu, fonksiyonel birimini ve sistem sınırlamalarını içermelidir.

a) Fonksiyon/Fonksiyonel/Birim Ünite: Prosesin veya ürünün tanımlanabilmesi için bu ürünün bir işlevinin olması gerekir. Sahip olduğu birden çok fonksiyondan bazıları amaç ve kapsama bağılı olarak seçilmektedir. Bu fonksiyonların nicel ölçüsü ise fonksiyonel birim olarak adlandırılmaktadır. Eğer birden fazla ürün karşılaştırılacak ise her ürünün farklı işlevlerinin ortaya konması gerekir. Örneğin; elektronik bir alet olan cep telefonlarının çevresel etkileri kıyaslanacak ise bunların sahip oldukları işlevler ve farklarının dikkate alınması gerekir.

b) Sistem Sınırları: Sistemdeki birim süreçleri ifade eder. LCA çalışmasında hangi sürecin sisteme dahil olup hangilerinin haricinde tutulacağını ifade eder. LCA aşamasında sınırlar dikkate alınmalıdır. Bu sınırlara araştırmacı karar vermekte olup 4 ana başlık altında aşağıda özetlenmiştir.

- **Kapıdan Kapıya:** Bu süreç sadece üretim aşamasını kapsamakta olup üretimin çevresel etkilerini belirler.
- **Kapıdan Mezara:** Ürünün üretim aşamasından sonraki tüketimin ve yaşam sonu aşamalarını kapsamakta olup üretim ve sonrası için çevresel etkilerini belirler.
- **Beşikten Kapıya:** Üretimde kullanılacak hammaddenin eldesinden başlayarak üretim aşamalarını kapsamakta olup çevresel etkilerini belirler.
- **Beşikten Mezara:** Hammaddenin eldesinden, taşınmasından, üretiminden ve bertarafından olan tüm aşamaları kapsamakta olup üretim ve sonrası için çevresel etkilerini belirler (Bayrak, 2014).

5.1.3.2. Envanter analizi

Envanter analizi, sistem sınırları içerisindeki girdi ve çıktıların miktarını ölçerek verileri toplar. Bu veriler;

- Enerji girdileri
- Hammadde girdileri
- İkincil girdiler
- Diğer fiziksel girdiler

- Ürünler
- Atıklar
- Hava, suya, toprağa yayılımlar

Bu girdiler Şekil 5.3’de de belirtildiği gibi hammaddeler, geri dönüştürülmüş kaynaklar su ve enerjidir. Çıktılar ise havaya salınan emisyonlar, atık suya ve toprağa karışan yayılımlardır. Bunlar ile beraber ara/yan ürünlerde de atık olarak değerlendirilmektedir.

Bir LCA çalışmasının geçerli kılınması için araştırmacı tarafından güncel verilerin elde edilmesi gerekir. Yeni ve kompleks malzemelerin üretimi ile sürekli piyasaya ürünlerin sunulması ise veri toplanması aşamasını uzun ve zorlu kılabilir.

5.1.3.3. Etki değerlendirme

Envanter analizi sonuçları kullanılarak potansiyel çevresel etkilerinin değerlendirilme sürecidir. Etki değerlendirilmesi aşamasında, sistemin olası çevresel salınımlarının önemi ve miktarı tanımlanarak çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilir. Bu aşamada yapılacak olan analiz, bir çok emisyon arasından aynı derecede etki oluşturacak olan emisyonların bir arada toplanmasını, ilişkilendirilmesini kapsar. Ek olarak, olası etkinin ortak bir birimde ifade edilmesi için emisyonların stres etkeni-etki zincirlerinin, karakterizasyon katsayılarının ve ağırlık katsayılarının belirlenmesini kapsamaktadır (Taşkın, 2018).

LCA çalışmaları için geliştirilmiş çok fazla yazılım programları ve etki değerlendirme yöntemleri mevcuttur. Etki değerlendirme basamağında kullanılan tüm yöntemlerde aşağıda yer alan adımlar bulunmaktadır.

- **Kategori tanımlama**

Etki Değerlendirmesinin ilk aşaması olup etki kategorilerinin tanımlanması gereken bölümdür. Hedef ve kapsam aşamasında alınan kararların devamını temsil etmektedir. Bu bölümün asıl amacı, çevresel kategorilerin seçilmesi ve tanımlanması için bir yol bulmaktır. Birçok çevresel kategori bulunmakta olup bunların seçiminde çalışmanın hedef ve kapsamıyla tutarlı olması gerekir. Etki kategorileri seçilirken ele alınacak ürün veya sistemden kaynaklanacak olan etkilerin, doğru tanımlanabilmesi amacıyla seçilmelidir. Ele alınan etki kategorileri; abiyotik ve biyotik kaynaklar, alan kullanımı, küresel ısınma, stratosferik ozon tahribatı, ekotoksikolojik etkiler, insanlar

üzerinde toksikolojik etkiler, fotokimyasal oksidasyon oluşumu, asidifikasyon ve ötrofikasyondur (Çokaygil, 2005).

- **Sınıflandırma**

Veri toplama aşamasında elde edilen emisyon, enerji ve malzemeler ile ilgili bilgilerin daha kolay yorumlanması amacıyla sınıflandırma yapılması gerekir. Bu nedenle, tüm Etki Değerlendirmesi yöntemlerinde zorunlu olan sınıflandırma aşaması uygulanmaktadır. Bu sınıflandırma en basiti ile şu şekilde gerçekleştirilmektedir. CO₂ ve CH₄ iklim değişikliği kategorisinde yer alırken SO₂ ve NH₃ asidifikasyon kategorisinde sınıflandırılmaktadır (İşler, 2012). Bazı çıktılar ise farklı etki kategorilerine birden katılabilmektedir. Bu nedenle iki kez bahsedilmeleri gerekir. Aynı etki zincirinde farklı etkilerin olması durumunda buna izin verilmezken etkiler birbirinden bağımsız olduğunda kabul edilebilir.

Etki kategorileri 3 farklı gruba ayrılabilir. Bunlar; global etkiler, bölgesel etkiler ve yerel etkileridir. Fakat bu gruplandırmayı, çevresel toksikoloji gibi hem global hem bölgesel hem de yerel bazda olabilecek olan böyle kapsamlı etkiler içinde uygun olamayacağını belirtmek gerekir (Çokaygil, 2005).

- **Karakterizasyon**

Sınıflandırmanın ardından etkiler belirlenir. Önceden toplanan veriler ile belirli etkilere denk gelecek şekilde karakterize edilir. Yani, emisyonların etki kategorilerine olan katkıları bu aşamada hesaplanmaktadır. Karakterizasyon sonuçlarında, hesaplanan her bir etki kendi birimiyle ifade edilmektedir. Sonuçlar ise yüzde cinsinden verilebilmektedir.

- **Normalizasyon**

Bu aşama, Etki Değerlendirmesi yöntemlerinde diğer basamaklar gibi zorunlu olmayıp isteğe bağlı olarak gerçekleştirilen bir aşamadır. Burada amaç, hangi etkinin toplam çevresel etkiler üzerinde en çok paya sahip olduğunu belirlemektir. Bunun hesaplanabilmesi için karakterizasyon değerleri bir normal sabite bölünür. Genellikle bu değer bölgede sene boyunca yaşayan kişi sayısıdır. Böylece, tüm etkiler birimsiz ifade edilir ve karşılaştırmalar kolayca gerçekleştirilebilir.

- **Ağırlıklandırma:**

Ağırlıklandırma aşaması da isteğe bağlıdır. Normalizasyon ile elde edilen değerlere göre sadece etkinin hangisinin en büyük olduğu ortaya koyulur. Bu değerlere göre etkilerin önem derecesini belirten bir ağırlıklandırma faktörü uygulanarak etkilerin önemi ortaya koyulmaktadır (İşler, 2012).

5.1.3.4. Sonuçların yorumlanması

Envanter analizi ile etki değerlendirmesi basamaklarından elde edilen sonuçların sistematik bir teknik ile değerlendirildiği basamaktır. Her iki aşamadan gelen sonuçlar burada yorumlanarak özetlenir. Diğer bir deyişle, toplanan verilerden etki değerlendirilmesi yöntemi ile elde edilen sonuçların yorumlanması ile istenen ürün veya sistemin seçilmesi gerçekleştirilecektir. Yapılacak olan yorumlamanın çıktısı ile sonuç ve öneriler ortaya koyulmuş olur. İlk aşama olan amaç ve kapsama paralel olacak şekilde, anlaşılır ve tutarlılığı sağlamak hedeflenmiştir.

5.2. Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri (MCDM)

Karar verme, belirli bir amaca yönelik kişilerin veya bir kurumun karşılaştığı alternatif davranış şekillerinden birini veya bir kaçını seçme süreci olarak tanımlanmaktadır. MCDM, Karar Bilimlerinin bir alt dalı olup karar sürecini kriterlerine göre modellemek ve analiz etme sürecine dayanmaktadır. Ana amacı, farklı alternatifleri kıyaslayarak farklı boyutlardaki verilerin toplanmasıdır. İlk olarak, kişi veya kurum hedefini gerçekleştirmeye yönelik ölçütleri belirlemelidir. Daha sonra bu alternatiflerin ölçütlerle olan uyumluluğu saptanmaktadır. Hedef ve stratejiler ise, sistemin bütünleşik bir şekilde algılanmasını gerektirmektedir. Hedefler, hedeflere ulaşılırken izlenecek yollar, bilgi kaynakları, bilgi ve işlem teknikleri gibi şartların değişmesi ile meydana gelen bu yeni durumlara uygun karar vermek amacıyla kullanılan çeşitli yöntem, analiz ve teknikler bulunmaktadır (Özkan, 2008).

Diğer bir tanımla, MCDM çok sayıda kritere göre alternatiflerinin avantaj ve dezavantajlarını değerlendiren analitik yöntemler topluluğudur. Karar verme sürecine destek olmak ve genellikle çalışmakta olan kriterlerin farklı özelliklere sahip alternatifler kümesinden bir ya da birden fazla alternatifin seçimi veya bu alternatiflerin sıralanabilmesinde kullanılmaktadır. Diğer bir ifade ile de karar vericiler farklı özelliğe sahip olan alternatifleri birçok kritere göre değerlendirerek sıralamakta kullanılır.

1960'lı yıllarda karar vermeye yardımcı olacak bir takım araçların gerekli görülmesiyle MCDM geliştirilmeye başlanmıştır. MCDM'nin asıl gelişme nedeni ise; insanların hedefleri için çeşitli kaynaklardan gelen farklı ve değişik bilgilerin yeterli bir şekilde değerlendirilemediğindendir (Karakaşoğlu, 2008).

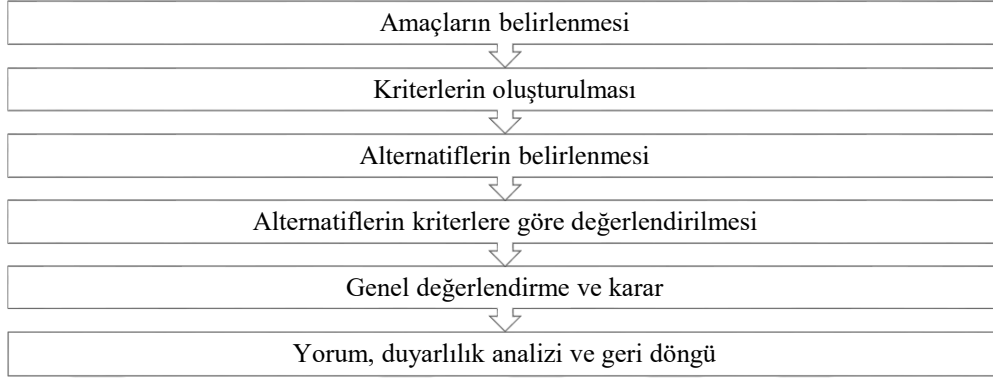
MCDM, en iyi performansa sahip alternatifin seçilmek istendiği veya ulaşılmak istenen amacın yolunda performans bakımından en iyiden en kötüye doğru sıralamanın istendiği tüm alanlarda kullanılabilmektedir. MCDM'nin mikro ölçekte, orta ölçekte ve makro ölçekte kullanım alanlarına aşağıda yer verilmiştir. Sektör olarak kullanım alanları ise Çizelge 5.1'de gösterilmektedir. MCDM mikro ölçekte aile bütçesi planlaması, yatırım kararları, gayrimenkul alımı, araba alımı, kariyer planlaması gibi kişilerin almış olduğu günlük kararlarda kullanılmaktadır. Orta ölçekte kullanımı işletme ve örgüt kararları içerisinde stratejik kararlar, üretim planlaması ve yatırım kararlarında kullanılmaktadır. MCDM makro ölçekte ise bütçe dağıtım aşamaları, yatırım kararları ve büyük çaplı ekonomik hedeflerin belirlenmesi gibi devlette alınan önemli kararlarda kullanılmaktadır. (Özkan, 2019) Kullanım alanları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. MCDM Kullanım Alanları (Özden, Ders notu)

Ekonomi	Yönetim	Muhasebe
Finans	Sermaye Yatırımı	Üretim
İnsan Kaynakları	Pazarlama	Planlama
Risk Analizi	Başvuru Değerlendirmeleri	Grup Karar Verme
Tesis Yeri Seçimi	Kaynak Tahsisi	Çatışma Analizi
Politika	Strateji	Ulaştırma
Eğitim	Sağlık	Çevresel Kararlar
Bilgi İşlem	Karar Destek	Silah Seçimi
Kamu Sektörü	Portföy Seçimi	Pazar Seçimi

5.2.1. MCDM aşamaları

MCDM altı aşamadan oluşmakta olup bu aşamalar Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. MCDM aşamaları (Karakaşoğlu, 2008)

Bir karar verici ya da analist tarafından karar verilmesi istendiği durumda, ilk önce problem anlaşılmalı ve ortaya koymaya çalışılır. Burada durumun ortaya koyulması en önemli aşama olacaktır. Bu aşamada çeşitli alternatifler, neticeler ve önemli kriterler, bilginin nitelik ve nicelik gibi konularda karar verilmesini kapsamaktadır. Daha sonra duruma en uygun MCDM seçilmekte ve uygulanmaktadır. Uygulamanın aşamalarında ise dikkat edilmesi ve bilinmesi gereken hususlardan aşağıda bahsedilmiştir (Karakaşoğlu, 2008).

- MCDM’de amaç, iyileştirmeyi ve geliştirmeyi hedeflediğimiz yönlerde olmalıdır. Amacımız net olarak belli, gerçekçi ve ölçülebilir olmalıdır.
- Kriterler amacı net olarak kapsamlı, ölçülebilir, minimal ve fark yaratan özelliklerde olmalıdır. Ayrıca, kriterler tekrarlanmamalıdır.
- Alternatifler, amaca göre gelişmeye yönelik olmalıdır. Alternatifler önceden belli olabileceği gibi amaçlara ve kriterlere göre yeni alternatifler de oluşturulabilir olmalıdır.
- Her alternatif, her kriter üzerinden değerlendirilmelidir.
- Numerik olmayan tercihler de numerik değerlendirmeye dönüştürülebilmelidir.

- Bazı metodlarda da alternatifler kriterler üzerinden ikili karşılaştırma ile değerlendirilmelidir.
- Genel değerlendirme ve karar aşamasında, alternatiflerin birbirlerine göre önemleri saptanmalıdır. Bir alternatifin toplam puanı, o alternatiflerin kriterler üzerinden aldığı puanların toplamı demektir. Analizden gelen sonuç analizcinin değerlendirmesine sunulur.
- Yorum, duyarlılık analizi ve geri döngü, analizcinin değerlendirmesiyle gerekli noktalarda değişiklikler yapılır. Duyarlılık analizi özellikle yakın sonuçlarda hangi kriter puan değeri değişikliklerinde sonucun yani seçimin farklılaşacağını gösterir.

5.2.2. MCDM yöntemleri

Literatürde MCDM problemlerin çözümü için kullanılan birbirinden farklı yöntemler olup bu yöntemlerin bir diğerine göre üstünlük sağlayıp sağlamamasından bahsedilmemektedir. Sadece bu yöntemlerin hepsinin en önemli avantajı nicel ve nitel kriterleri bir arada değerlendirmesi ve kıyaslayabilmesidir. Uygulamalarda kullanılan MCDM'nin birçoğu Çizelge 5.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Uygulamalarda kullanılan MCDM yöntemleri

SAW (Simple additive weighting)	WSM (Weighted sum model)
WTM (Weighted product model)	OCRA (Operational competitiveness rating)
SWARA (Step-wise weight assessment ratio analysis)	EATWOS (Efficiency analysis technique with output satisficing)
(SMART)Simple multi-attribute ranking technique	EATVIOS (Efficiency analysis technique with input and output satisficing)
ARAS(Additive ratio assessment)	DEA (Data envelopment analysis) MACBETH (Measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique)
AHP (Analytic hierarchy process)	UTA (Utility additive method)
ANP (Analytic network process)	UTADIS (Utilities additives discriminantes)

PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluations)	STEM (Step method)
MOORA (Multi-objective. optimization by ratio analysis)	PAPRIKA (Potentially all pairwise rankings of all possible alternatives)
MULTIMOORA (Multiple objective optimization on the basis of ratio analysis plus full multiplicative form)	GRIP (Generalized regression with intensities of preference)
ELECTRE (Elimination and choice expressing reality)	ERA (Extreme ranking analysis)
TOPSIS (Technique for order of preference by similarity to ideal solution)	DEMATEL (Decision making trial and evaluation laboratory)
VIKOR (Vise kriterijumska optimizacija i kompromisno resenje)	LINMAP (The linear programming technique for multidimensional analysis of preference)
VASPAS (Weighted aggregated sum product assessment)	GRA (Grey relational analysis)
EXPROM (Extension of PROMETHEE)	COPRAS-G (The complex proportional assessment of alternatives to grey relations)
MAUT (Multi-attribute utility theory)	FMEA (Failure mode and effects analysis)
MAVT (Multiattribute value theory)	NSGA (Non-dominated sorting genetic algorithm)
DRSA (Dominance-based rough set approach)	SMAA-TRI (Stochastic multicriteria acceptability analysis)
MCHP (Multiple criteria hierarchy process)	GIS (Multi-criteria decision making approach with geographic information systems)
EVAMIX (Evaluation matrix)	TRIZ (Theory of solving inventive problems)
ROVM (The range of value method)	FDM (Fuzzy decision making method)
COPRAS (Complex proportional assessment of alternatives)	GP (Goal programming)
CP(Compromise programming)	RUTA

5.2.2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytical Hierarchy Process, AHP)

Thomas L Saaty tarafından geliştirilen AHP, çok kriterli karar problemlerinde karar vermek amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Özden, Ders notu). AHP'nin birçok uygulama alanı vardır. Bunlar; finans, makro ekonomik tahminleme, çeşitli ürün tasarımı, portföy seçimleri, veritabanı seçimleri, kaynak dağıtımları (bütçe, enerji, sağlık), politik stratejiler, ulaşım, eğitim, tesis yeri seçimidir. AHP, kararı etkileyebileceği halde, çözüm sürecindeki doğrudan ele alınamayacak faktörlerin ele alınabilmesi konusunda yol göstereci çok ölçütlü karar verme tekniklerindendir. Karar vericilerin karmaşık bir problemi, amaçları, kriterleri, alt kriterleri ve alternatifleri arasındaki ilişkinin hiyerarşik yapıda modellenenbilmesi sağlamaktadır. Uygun verilerin ikili karşılaştırılması yapılarak elde edilir ve kullanılan önem dereceleri sayesinde ölçütlerin aynı birimler ile ifade edilmelerini sağlamaktadır. Önem dereceleri Çizelge 5.3'de, AHP aşamaları ise Şekil 5.5'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 5.3. Uygulamalarda kullanılan Önem Dereceleri

Önem Derecesi	Kavramsal Karşılığı	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	İki seçenek eşit derecede önemli
3	Orta derecede önemli	Bir seçenek diğerine göre biraz daha önemli
5	Kuvvetli derecede önemli	Bir seçenek diğerine göre oldukça önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir seçenek diğerine göre çok önemli
9	Kesin önemli	Bir seçeneğin diğerinden önemli olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahiptir
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Yakın cevaplar uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerler



Şekil 5.5. AHP Aşamaları (Özden, Ders notu)

5.2.2.2. Analitik Serim Süreci (Analytic Network Process, ANP)

Karar verici mekanizmalara yardımcı olmak amacıyla Thomas L Saaty tarafından geliştirilen AHP gibi ANP teknikleri de kararı etkilediği halde çözüm sürecinde doğrudan ele alınamayacak faktörlerin nasıl ele alınabilecekleri konusunda yol gösterici olarak kullanılan çok ölçütlü karar verme teknikleridir.

ANP, AHP'nin genel bir şekli olup bileşenler arasındaki ilişkileri ve yönleri tanımlar ve bunu serim şeklinde ifade eder. Bu serim şeklindeki yapı sayesinde, doğrudan ilişkilendirilmemiş bileşenlerin arasında oluşabilecek dolaylı etkileşimler ile geri bildirimler de dikkate alınmaktadır. Sistem, analistçinin kişisel düşüncesi ve değerlendirmelerine paralel olacak şekilde seçenekleri en önemliden en önemsiz doğru sıralar. Ayrıca, bu seçeneklerin önem derecesini de belirleyerek seçeneklerin birbirlerine ne kadar yakın veya uzak olduğunu gösterecektir. Bununla beraber bir seçeneğin de belirlenen hedefi ne kadar temsil edeceğini de gösterecektir.

ANP'nin en basit yapısı tek bir serimden ibaret olup en karmaşık hali ise her bir seçeneğin oluşturabileceği fayda, maliyet, fırsat ve risklerin birlikte analiz edilebildiği

yapıdır. Çeşitli formüller yardımı ile seçeneklerin her bir model için aldığı değerler tek bir değere dönüştürülmektedir. Dikkat edilmesi gereken durum ise faydalar, maliyetler, fırsatlar ve risklerin, problemin yapısına göre farklı önem derecelerine sahip olabilecekleridir. Bu önem derecelerine bağlı ağırlıklandırmaya “Fayda- Fırsat- Maliyet- Risk” analizi denir.

ANP’de ölçütlerin ve seçeneklerin birbirine göre önem derecelerini belirleyebilmek için ikili karşılaştırmalar yapılmaktadır. Her bir ölçüt için seçeneklerin karşılaştırılması ayrı ayrı yapılmaktadır. Ölçütlerin sayısal olarak ifade edilebilmesiyle seçenekleri karşılaştırmada bir sorun olmayacaktır. Fakat sayısal olarak ifade edilemeyen ölçütlerin diğer seçenekten ne kadar önemli olduğunu belirlemek kolay değildir. Sayısal olarak ifade edilemeyen bu ölçütlerin karşılaştırılmasında ise Çizelge 5.3.’de yer alan ölçütler kullanılmaktadır. Çizelgeye göre belli bir ölçütteki seçeneğin biri diğerinden çok daha önemli ise 9 değerini, seçenekler arasında eşitlik varsa veya önem derecesi açısından bir aynı olduğu düşünülüyorsa 1 değerini kullanmak gereklidir. Analistçinin kararsız kaldığı durumlarda ise 2, 4, 6, 8 olan ara değerleri kullanmak gereklidir (Özkan, 2008).

5.2.2.3. ELECTRE yöntemi

Çok ölçütlü karar verici mekanizmalardan biri olan ELECTRE yöntemi 1960’lı yılların sonlarına doğru Bernard Roy tarafından ortaya atılmış, daha sonra Nijkamp ve Van Delft ile Voogd tarafından geliştirilmiştir. Alternatiflerin performanslarına göre birbirleriyle kıyaslanarak seçim yapılması temeline dayanmaktadır. ELECTRE tekniği, optimizasyon amaçlı matematiksel programlama tekniklerinden olup ELECTRE I, II, III ve IV teknikleri olarak yer almaktadır (Özkan, 2008).

ELECTRE yöntemi farklı alternatiflerin mümkün olabilecek çiftlerini kriterler bazında karşılaştıran ve alternatiflerin kriterler bazında skorlarını ortaya koyan sistematik bir analizdir. Bu yöntemde de diğer yöntemlerde olduğu gibi; karar matrisinde bulunan tüm bilgiler kullanılarak, her bir kriter için alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılmaktadır. ELECTRE aşamaları Şekil 5.6’da yer almaktadır.

ELECTRE yöntemi ile analistçi, çok sayıdaki nicel ve nitel ölçütü karar verme sürecine dahil etmekte ve ölçütleri amaçları doğrultusunda ağırlıklandırabilmektedir. Ölçütlerin verimlilik seviyelerinin büyüklüklerini seçebilmekte ve ağırlıklarını toplayarak en uygun alternatifi belirlemektedir. Genel olarak ELECTRE tekniğine göre karar verme sürecinde aşamalar aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.6. ELECTRE Aşamaları

Bu tekniğe göre bir başlangıç tablosundan hareket edilir ve bu tabloda, sütunlar seçeneklere, satırlar ise ölçütlere ayrılır. Diğer yandan her bir ölçüte, diğerlerine kıyasla taşıdığı önemi belli edecek şekilde ağırlık verilir. İkinci aşamada, alternatiflerin karşılaştırmasını sağlayan uyumluluk ve uyumsuzluk matrisleri oluşturulmaktadır. Üçüncü aşamada ise uyumluluk ve uyumsuzluk matrisleri için belirlenen eşik değerlere göre bu iki tablonun sonuç değerlendirme tablosunda birleştirilir ve en uygun alternatif belirlenir.

5.2.2.4. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)

PROMETHEE yöntemi, 1986 yılında Brans tarafından geliştirilmiş olan çok kriterli karar verme yöntemlerinden bir tanesidir. Çok kriterli karar verme analizler için önerilen diğer yöntemler ile kıyaslandığında, uygulama ve kavram bakımından daha kolay bir sıralama yöntemidir.

PROMETHEE yöntemi, birbiriyle çelişmekte olan birden fazla kriterin göz önünde tutulması ile sınırlı sayıda alternatifin sıralanmasının istendiği problemlerde daha çok uygulanmaktadır. Bu yöntem, alternatifleri farklı tercih fonksiyonları temelinde değerlendirilerek alternatiflere ilişkin kısmi ve tam önceliklerin elde edilmesini sağlayarak ayrıntılı analizlerin yapılmasını sağlamaktadır. PROMETHEE yönteminde izlenecek adımlar Şekil 5.7’de özetlenmiştir.



Şekil 5.7. PROMETHEE Aşamaları (Özkan, 2019)

5.2.2.5. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*

TOPSIS yöntemi ELECTRE yöntemine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde alternatifler en iyi çözüme (pozitif-ideal çözüme) olan yakınlıkları dikkate alarak sıralanmasını sağlanmaktadır. 1981 yılında ilk olarak Hwang ve Yoon tarafından alternatiflerin pozitif-ideal çözüme en kısa mesafe ve negatif-ideal çözüme en uzak mesafe düşüncesinden yola çıkılarak önerilmiştir.

TOPSIS yönteminin içeriği yalın ve anlaşılabilir. Hesaplama yeteneği güçlüdür. Bu sayede alternatifler arasındaki farklılıklar ve kriterlerin birbirine göre farkı sayısal değerler ile iyi bir görüş elde edilmesini sağlamaktadır. Karar alternatiflerinin ilişkisi belirlenirken basit bir matematiksel formda sunulabilmektedir. Bu yöntemde alternatiflerin belirli kriterler doğrultusunda ve kriterlerin alabileceği maksimum ve minimum değerler arasında ideal duruma göre karşılaştırılması sağlanabilmektedir. Ayrıca, nitel bir dönüştürmeye gerek duyulmadan doğrudan verilere uygulanabilmektedir (Özden, Ders notu) TOPSIS yönteminin aşamaları Şekil 5.8’de özetlenmiştir.



Şekil 5.8. TOPSIS Aşamaları (Özden, Ders notu)

6. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında, yapılan literatür araştırması kapsamında 5 adet geri dönüşüm ve 5 adet ileri dönüşüm stratejisi belirlenmiştir. Elde edilecek yeni ürünlere ait literatürdeki LCA çalışmaları incelenmiştir. Literatür incelemesi sonucunda etki kategorileri belirlenmiş ve bu etki kategorilerine ulaşmak için CML-IA baseline (v3.06) ve ReCiPe 2016 Midpoint (V1.04) karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Normalizasyon yapılarak seçilecek kriterler bir sonraki aşama olan MCDM çalışması için çevresel etki kategorisini oluşturmuştur. LCA, Basitleştirilmiş (Streamlined) LCA olarak gerçekleştirilmiştir.

6.1. Basitleştirilmiş LCA

EPA Birleşik Devletler Koruma Ajansı bilim envanterinde yayınlanan ve 1999 yılında gerçekleştirilen SETAC Kuzey Amerika Streamlined LCA Çalışma Grubunun hazırladığı raporda Basitleştirilmiş LCA aracından bahsedilmiştir. Rapora göre, eskiden bir ürün veya prosesin beşikten mezara sistem sınırı ile değerlendirilmesi için geniş bir bilgi ve veri birikimine ihtiyaç olduğunu ve bu sürecin daha kolaya indirgenebileceğine inanılmıştır. Çalışma grubu, Basitleştirilmiş LCA'yı LCA'nın bir parçası olarak kabul etmiştir. Basite indirgeyen en önemli unsurun da hedef ve kapsamın süreçle en doğru biçimde ilişkilendirilmesi gerektiğini ve aynı LCA gibi çalışma sınırlarının ve veri seçiminin olduğundan bahsedilmiştir. Bu rapor, Basitleştirilmiş LCA'nın gelişimine ciddi katkılarda bulunmuştur (Todd ve Curran, 1999).

Yaygın olarak kullanılan Basitleştirilmiş LCA, bir ürün veya prosesin karmaşıklığına bağlı olarak tam bir LCA yapılmasının daha zor, uzun ve kompleks olacağı durumlarda tercih edilen uygulamasıdır. Ayrıca, sürdürülebilirlik hedefiyle ilişkili olarak sistem sınırlarını tanımlayan alternatif bir yaklaşımdır. Basitleştirilmiş LCA, çalışmayı daha kolay yönetilebilecek bir hale getirir. Yapılan literatür taramalarına göre aşağıda belirtildiği gibi birçok yolla gerçekleştirilebilir.

- Diğerlerine göre daha az önem taşıyan LCA aşamalarının veya çevre üzerinde ihmal edilebilecek etkiye sahip süreçlerin ortadan kaldırılması, kapsamın sınırlandırılması,
- Nitel bilgilerin kullanımı,
- Yukarı veya aşağı akış bileşenlerinin çıkarılması,

- Spesifik etki kategorisinin kullanımı.

Bu yöntemin temeli, sadeleştirme, daha sınırlı bir kapsamın ele alınması ve etkilerin değerlendirilmesi amacıyla nitel ve nicel yaklaşımların bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Basitleştirilmiş LCA'nın ana amacı ise, zamandan tasarruf ederek detaylı bir LCA gibi aynı sonuçları vermektir.

Bu çalışmada, atık elektrik elektronik cihazlarla ilgili ileri dönüşüm uygulamalarının çoğunlukla deneysel ölçekte gerçekleştirilmesi ve LCA yapabilmek için deneysel verilerin tamamına ulaşmanın zorluğu nedeniyle ileri dönüşüm ve geri dönüşüm sonucunda hedeflenen ürünler baz alınmış ve bu ürünlerin mevcut yaşam döngüsü envanter analizleri kullanılarak bir LCA analizi gerçekleştirilmiştir. Basitleştirilmiş LCA olarak ifade edilebilecek olan bu LCA uygulaması standartlara uygun olarak 4 aşamada gerçekleştirilmiş olup çalışmanın hedef ve kapsam tanımı 6.1.1'de, Envanter Analizi 6.1.2'de, Yaşam Döngüsü Etki Analizi 6.1.3'de sunulmuştur. En son aşama olan yorumlamaya ise 6.1.4'de yer verilmiştir.

6.1.1. Hedef ve kapsam tanımı

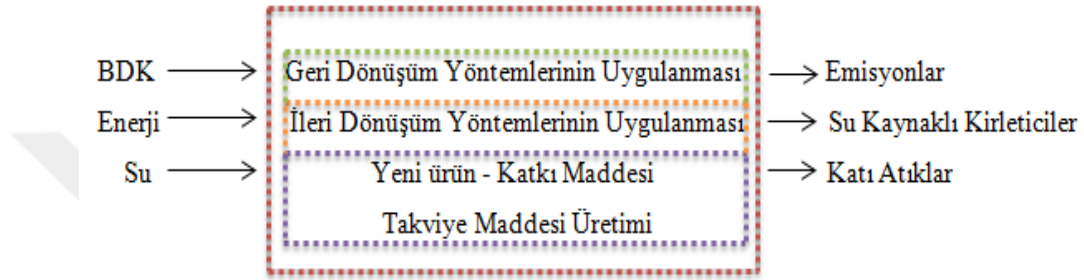
Bu LCA çalışmasının amacını, bir elektronik atık türü olan atık BDK'lara uygulanan/uygulanabilecek olan geri dönüşüm ve ileri dönüşüm stratejilerinin çevresel açıdan karşılaştırılması oluşturmaktadır.

Fonksiyonel Birim: Bu çalışma, 1 ton atık baskılı devre kartı (BDK) için gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Baskılı Devre Kartları

Sistem Sınırları: Bu çalışma oluşan atık BDK'ya uygulanacak olan geri dönüşüm ve ileri dönüşüm yöntemiyle elde edilecek yeni ürünün mevcut ürün ile yer değiştirmesini kapsamaktadır. Sistem sınırları, Şekil 6.2'de belirtildiği gibi yeni ürünün yerini alacağı mevcut ürün için hammadde eldesinden başlayıp ürünün üretim sürecini kapsayacak şekilde beşikten-kapıya olarak ele alınmıştır.



Şekil 6.2. Sistem Sınırları

İleri Dönüşüm Yöntemleri: Atık BDK'lardan değerli metallerin kazanımı ileri dönüşüm (İD) yöntemi olarak ele alınmıştır. Atık BDK'lara uygulanabilecek, literatür çalışmalarından seçilen ileri dönüşüm yöntemleri ve elde edilecek yeni ürünlere Çizelge 6.1'de yer verilmiştir.

Geri Dönüşüm Yöntemleri: Atık BDK'lara uygulanabilecek, literatür çalışmalarından seçilen geri dönüşüm (GD) yöntemleri ve elde edilecek ürünlere Çizelge 6.2'de yer verilmiştir.

Çizelge 6.1. Atık BDK'lara uygulanabilecek ileri dönüşüm yöntemleri

Kaynak	Malzeme	İleri Dönüşüm Yöntemi	Elde Edilecek Ürün	İkame edeceği ürün	Açıklama	Kod
Rao vd., 2021	Atık BDK'ların metal kısımları	Hidrometalurjik yöntem	Altın	Altın madeni	Çalışmada, atık BDK'ların toz haline uygulanacak olan iki aşamalı bir asit liç işlemi ile altının geri kazanımını gerçekleştirilmiştir. Makalede, elde edilen altının birincil hammaddelerin yerini başarı ile alabileceği belirtilmiştir.	İD1
Shokri vd., 2017	Atık BDK'ların metalik, polimer,se ramik ve organik kısımları	Termal dönüşüm	Bronz nanoparti kül	Bronz madeni	Çalışmada, piroliz yağının ağır fraksiyonunun "termal mikronize etme" süreci ile bronz nanopartikül olan Cu-Sn nanopartiküllerinin doğrudan üretiminde kullanılmıştır.	İD2
Zhan vd., 2016	Atık BDK'ların lehim kısımları	Vakumlu buharlaştırma ve zorlanmış inert gaz ile yoğunlaştırma	Kurşun nanoparti kül	Kurşun madeni	Çalışmada, atık BDK'ların lehim kısımlarından kurşunun vakumlu buharlaştırma ile ayrılabilmesi ve yoğunlaşma ile kurşun nanopartiküllerin eldesi gerçekleştirilmiştir.	İD3
Rajagopal vd., 2016	Atık BDK'ların metal olmayan kısımları	Fiziksel, kimyasal analiz ve piroliz	Aktif karbon	Aktif karbon	Çalışmada, atık BDK'ların ametal kısımları aktif karbon kaynağı olarak kullanılmıştır. Sentezlenen aktif karbon süper katalizör elektrotları olarak kullanılmıştır.	İD4
Silvas vd., 2015	Atık BDK'lar	Fiziksel ayırma ve hidrometalurjik yöntem	Bakır	Bakır madeni	Çalışmada, atık BDK'lardan fiziksel ve hidrometalurjik yöntem ile doğadaki cevherlerdeki gibi değerli bakır metaller kazanılmıştır.	İD5

Çizelge 6.2. Atık BDK'lara uygulanabilecek geri dönüşüm yöntemleri

Kaynak	Malzeme	Geri dönüşüm yöntemi	Elde edilecek ürün	İkame edeceği ürün	Açıklama	Kod
Sua-iam ve Chatveera 2022	Atık BDK'ların metal olmayan kısımları	Mekanik ve fiziksel ayırma	Kendiliğinden yerleşen beton için kullanılacak dolgu maddesi	Portland çimentosu	Çalışmada, atık BDK tozlarının kendiliğinden yerleşen beton üretiminde sıradan Portland çimentonun yerine bağlayıcı olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen en yüksek basınç dayanımı %5 oranında atık BDK tozu ilavesi ile gerçekleştirilmiştir.	GD1
Ganesh vd., 2021	Atık BDK'ların metal olmayan kısımları	Mekanik ve fiziksel ayırma, mekanik karıştırma	Çimento ve inşaat endüstrilerinde kullanılacak dolgu maddesi	Agrega	Çalışmada, tüm elektronik cihazlardan çıkarılan atık BDK'ların toz haline getirilmesi ile çimento ve inşaat endüstrilerinde dolgu maddesi ürünü olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. Betondaki ince agregalar için % 15-20'ye varan kısmi bir ikame oranında yapıyı değiştirdiği ve mekanik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmektedir. Endüstriyel ölçekte agregalar ve kumlar için %15 oranında ikame olacaktır.	GD2
Tian vd., 2017	Atık BDK'ların metal olmayan kısımları	Mekanik ve fiziksel ayırma	Ahşap plastik kompozit ve performans artırıcı madde	Odun unu	Çalışmada, atık BDK'lardan elde edilen ametal tozlar, ahşap plastik kompozit ürünlerde performans artırıcı madde olarak kullanılmış olup odununun yerini alabileceği belirtilmiştir. Çalışmaya göre %10-20 ilave yeterli olacaktır.	GD3
Sun vd., 2013	Atık BDK'ların metal olmayan kısımları	Piroliz	Ses yalıtım maddesi	Fiber glass	Çalışmada, atık BDK'ların içeriğindeki fiberglasın geri kazanımının mükemmel bir ses emici madde olarak kullanılması gerçekleştirilmiştir.	GD4

					Piyasadaki diğer absorpsiyon malzemelerine ikame olacağı belirtilmiştir. Böylece, çevrede oluşan gürültü kirliliğinin önlenmesi amacıyla kullanılabilir.	
Yang vd., 2013	Atık BDK'ların metal olmayan kısımları	Piroliz	Asfalt modifiye edici ürün	Stiren bütadien kauçuğu	Çalışmada, atık BDK'ların içeriğindeki epoksi plakalara ait piroliz yağının ağır fraksiyonunun ticari değeri olan Stiren bütadien Kauçuğu gibi asfalt modifiye edici ürün olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. %4'lük bir ilave ile modifiye edilmiş asfaltın sıcaklık dayanımı iyileştirilmiştir.	GD5

6.1.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

Bu tez çalışması için öncelikle Ecoinvent veri tabanı taraması yapılmıştır. Ecoinvent veri taramasının ardından SimaPro yazılımından buna karşılık gelecek verilere ulaşılmıştır. Bu taramaya göre, ileri dönüşümle elde edilecek ürünlere karşılık gelen veriler Çizelge 6.3'de, geri dönüşümle elde edilecek ürünlere karşılık gelen veriler ise Çizelge 6.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.3. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlerin Ecoinvent veri tabanı taraması

İleri Dönüşümle Elde Edilecek Ürün	İkame Edeceği Ürün	Ecoinvent Verisi	Kaynak	SimaPro karşılığı
Altın	Altın madeni	gold production	Ruiz E., AU, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Gold, primary, at refinery/GLO U
Bronz Nanopartikül	Bronz madeni	bronze production	Hischier R., bronze production, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Bronze, at plant/CH U
Kurşun Nanopartikül	Kurşun madeni	primary lead production	Dones R., primary lead production	Lead, primary, at plant/GLO U

		from concentrate	from concentrate, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	
Aktif karbon	Aktif karbon	activated carbon production, granular from hard coal	Muñoz Ortiz I., activated carbon production, granular from hard coal, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Activated carbon, granular (ROW)
Bakır	Bakır madeni	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process	Emilia Moreno R., copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Copper, primary, at refinery /GLO U

Çizelge 6.4. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlerin Ecoinvent veri tabanı taraması

Geri Dönüşümle Elde Edilecek Ürün	İkame Edeceği Ürün	Ecoinvent Verisi	Kaynak	SimaPro karşılığı
Kendiliğinden yerleşen beton için kullanılacak dolgu maddesi	Portland çimento	cement production, Portland	Doka G., cement production, Portland, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Portland calcareous cement, at plant/CH U
Çimento ve inşaat endüstrilerinde kullanılacak dolgu maddesi	Agrega	sand quarry operation, open pit mine	Kellenberger D., gravel and sand quarry operation, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Gravel, round, at mine/CH U
Ahşap plastik kompozite performans artırıcı madde	Odun unu	suction, sawdust	Wernet G., suction, sawdust, GLO, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Sawdust, Scandinavian softwood, at plant/NORDEL U
Ses yalıtım maddesi	Fiber glass	glass fibre production	Kellenberger D., glass fibre production GLO,	Glass fibre, at plant/RER U

			Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	
Asfalt modifiye edici ürün	Stiren- bütadien kauçuğu	synthetic rubber production	Hischier R., synthetic rubber production, RER, Undefined, ecoinvent database version 3.7.1	Synthetic rubber, at plant/RER U

6.1.3. Yaşam döngüsü etki analizi

Literatürde yer alan LCA uygulamaları incelenmiş olup analizi yapılan ileri dönüşüm malzemelerine ait çevresel etki kategorileri Çizelge 6.5’de, geri dönüşüm malzemeleri için ele alınan çevresel etki kategorileri ise Çizelge 6.6’da belirtilmiştir. LCA kullanıcılarının bu çizelgeye göre çoğunlukla GaBi yazılımını ve SimaPro yazılımını tercih ettiği görülmüştür. Etki kategorilerinde ise ağırlıklı olarak; küresel ısınma, ekotoksikolojik etkiler, insanlar üzerinde toksikolojik etkiler, asidifikasyon, ötrofikasyon ve fotokimyasal oksidasyon oluşumlarına yer verilmiştir.

Çizelge 6.5. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait etki kategorileri taraması

Kaynak	Analizi Yapılan Malzeme	Etki Değerlendirme Yöntemi/Veri Tabanı/Yazılımı	Etki Kategorileri
Grimaldi vd., 2020	Altın	ILCD	Asidifikasyon İklim Değişikliği Tatlı Su Ekotoksitesitesi Ötrofikasyon İnsanlar Üzerine Olan Toksisite Ozon Tabakasının İncelmesi Partiküler Madde Oluşumu İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynak Tüketimi
Slotte ve Zevenhoven, 2017	Bronz Nanopartikül	IMPACT 2002 +	İnsanlar Üzerine Olan Toksisite İklim Değişikliği Kaynak Tüketimi
Farjana vd., 2019	Kurşun nanopartikül	ILCD	İklim Değişikliği Ozon Tabakasının İncelmesi İnsanlar Üzerine Olan Toksisite Partiküler Madde Oluşumu İyonlaştırıcı Radyasyon Asidifikasyon Tatlı Su Ekotoksitesitesi Ötrofikasyon Arazi Kullanımı Su Kullanımı

			Kaynak Tüketimi
Surra vd., 2021	Aktif karbon	ReCiPe2016 (orta nokta)	Kaynak Tüketimi Küresel Isınma Partiküler Madde Oluşumu İnsanlar Üzerine Olan Toksisite Ozon Tabakasının İncelmesi Asidifikasyon İyonlaştırıcı Radyasyon Arazi Kullanımı Ötrofikasyon Tatlı Su Ekotoksitesitesi Tuzlu Su Ekotoksitesitesi Su Kullanımı
Bigum vd., 2012	Bakır	EDIP	Küresel Isınma Ozon Tabakasının İncelmesi Asidifikasyon Fotokimyasal Sis İnsanlar Üzerine Olan Toksisite Toprak Toksisitesi Su Toksisitesi Kaynak Tüketimi

Çizelge 6.6 Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait etki kategorileri taraması

Kaynak	Analizi Yapılan Malzeme	Etki Değerlendirme Yöntemi/Veri Tabanı/Yazılımı	Etki Kategorileri
Stafford vd., 2016	Kendiliğinden yerleşen beton için kullanılacak dolgu maddesi	CML 2001	Asidifikasyon Fotokimyasal Oksidasyon Küresel Isınma Ötrofikasyon Kaynak Tüketimi
Batuecas vd., 2021	Çimento ve inşaat endüstrilerinde kullanılacak dolgu maddesi	ILCD	İklim Değişikliği Ozon Tabakasının İncelmesi İnsanlar Üzerine Olan Toksisite Partiküler Madde Oluşumu İyonlaştırıcı Radyasyon Fotokimyasal Dumanlı Sis Asidifikasyon Ötrofikasyon Tatlı Su Ekotoksitesitesi Arazi Kullanımı Su Kullanımı Kaynak Tüketimi
Beigbeder vd., 2019	Ahşap plastik kompozite performans artırıcı madde	ReCiPe2016 (orta nokta)	İklim Değişikliği Ötrofikasyon Karasal Zehirlilik Fotokimyasal Dumanlı Sis Ozon Tabakasının İncelmesi Kaynak Tüketimi Su Toksisitesi
Yılmaz vd., 2019	Ses yalıtım maddesi	CML-IA baseline ver.3.01	Kaynak Tüketimi Küresel Isınma Ozon Tabakasının İncelmesi İnsanlar Üzerine Olan Toksisite Tatlı Su Ekotoksitesitesi Tuzlu Su Ekotoksitesitesi Toprak Toksisitesi

			Fotokimyasal Oksidasyon Asidifikasyon
Samieadel vd., 2018	Asfalt modifiye edici ürün	Dönüşüm Faktörleri	Küresel Isınma

Literatür taramasının ardından Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'daki etki kategorilerine ulaşmak için, CML-IA baseline (v3.06) ve ReCiPe 2016 Midpoint (V1.04) karakterizasyon yöntemleri ve bu yöntemlerde sırasıyla yer alan EU25+3,2000 ve World (2010) normalizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Karakterizasyon ve normalizasyon sonuçları ileri dönüşüm ile elde edilecek ürünler için Çizelge 6.7-6.10, geri dönüşüm için elde edilecek ürünler için ise Çizelge 6.11-6.14 arasında verilmiştir.

Çizelge 6.7. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (CML)

Etki Kategorileri	Birim	Altın	Bronz Nanopartikül	Kurşun Nanopartikül	Aktif karbon	Bakır
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Element Bazlı)	kg Sb ed.	5,81E+01	2,05E-03	6,81E-03	9,97E-07	2,02E-03
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Fosil Yakıt Bazlı)	MJ	2,27E+05	2,97E+01	1,75E+01	9,33E+01	3,22E+01
Küresel Isınma (Gwp100a)	kg CO ₂ ed.	1,80E+04	2,57E+00	1,99E+00	8,29E+00	2,79E+00
Ozon Tabakasının İncelmesi (Odp)	kg CFC-11 ed.	1,69E-03	1,91E-07	7,02E-08	1,14E-07	2,21E-07
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite	kg 1,4-DB ed.	1,01E+04	2,62E+01	1,69E+00	1,35E+00	1,34E+02
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DB ed.	4,85E+03	4,65E-01	1,32E-01	2,88E-02	2,19E+00
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DB ed.	1,30E+07	3,41E+03	8,26E+02	4,48E+03	1,35E+04
Karasal Ekotoksitesite	kg 1,4-DB ed.	5,96E+02	7,30E-02	9,78E-03	7,27E-03	3,62E-01
Fotokimyasal Oksidasyon	kg C ₂ H ₄ ed.	4,53E+00	5,80E-03	1,99E-03	2,41E-03	2,08E-02
Asidifikasyon	kg SO ₂ ed.	1,63E+02	1,57E-01	5,28E-02	5,24E-02	5,47E-01
Ötrofikasyon	kg PO ₄ ed.	4,36E+02	6,46E-02	5,38E-03	3,74E-03	2,19E-01

Çizelge 6.8. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (CML)

Etki Kategorileri	Altın	Bronz Nanopartikül	Kurşun Nanopartikül	Aktif karbon	Bakır
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Element Bazlı)	9,64E-06	3,40E-10	1,13E-09	1,66E-13	3,35E-10
	96,1%	69,4%	97,6%	0,1%	34,3%
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Fosil Yakıt Bazlı)	6,48E-09	8,45E-13	4,98E-13	2,66E-12	9,16E-13
	0,1%	0,2%	0,0%	2,4%	0,1%
Küresel Isınma (GWP100a)	3,45E-09	4,93E-13	3,82E-13	1,59E-12	5,36E-13
	0,0%	0,1%	0,0%	1,4%	0,1%
Ozon Tabakasının İncelmesi (ODP)	1,65E-10	1,87E-14	6,88E-15	1,12E-14	2,16E-14
	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite	2,02E-08	5,25E-11	3,37E-12	2,70E-12	2,67E-10
	0,2%	10,7%	0,3%	2,4%	27,3%
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	2,32E-08	2,23E-12	6,34E-13	1,38E-13	1,05E-11
	0,2%	0,5%	0,1%	0,1%	1,1%
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	2,92E-07	7,67E-11	1,86E-11	1,01E-10	3,04E-10
	2,9%	15,7%	1,6%	89,3%	31,1%
Karasal Ekotoksitesite	5,14E-09	6,28E-13	8,42E-14	6,26E-14	3,12E-12
	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%
Fotokimyasal Oksidasyon	2,62E-09	3,35E-12	1,15E-12	1,40E-12	1,20E-11
	0,0%	0,7%	0,1%	1,2%	1,2%
Asidifikasyon	9,70E-09	9,31E-12	3,14E-12	3,11E-12	3,25E-11
	0,1%	1,9%	0,3%	2,8%	3,3%
Ötrofikasyon	2,35E-08	3,49E-12	2,91E-13	2,02E-13	1,18E-11
	0,2%	0,7%	0,0%	0,2%	1,2%
Toplam	1,00E-05	4,90E-10	1,16E-09	1,13E-10	9,77E-10
	100%	100%	100%	100%	100%

Çizelge 6.9. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (ReCiPe)

Etki Kategorileri	Birim	Altın	Bronz Nanopartikül	Kurşun Nanopartikül	Aktif karbon	Bakır
Küresel Isınma	kg CO ₂ ed.	1,83E+04	2,61E+00	2,02E+00	8,54E+00	2,84E+00
Stratosferik Ozon İncelmesi	kg CFC-11 ed.	1,32E-02	3,19E-06	9,96E-07	1,59E-06	6,70E-06
İyonlaştırıcı Radyasyon	kBq Co-60 ed.	1,57E+02	5,76E-02	1,76E-02	1,29E-02	5,36E-02
Ozon Oluşumu, İnsan Sağlığı	kg NO _x ed.	1,65E+02	2,74E-02	1,07E-02	1,82E-02	5,20E-02
Partiküler Madde Oluşumu	kg PM 2,5 ed.	4,83E+01	4,85E-02	1,34E-02	1,67E-02	1,59E-01
Ozon Oluşumu, Karasal Ekosistem	kg NO _x ed.	1,67E+02	2,79E-02	1,09E-02	1,83E-02	5,30E-02
Karasal Asidifikasyon	kg SO ₂ ed.	1,34E+02	1,31E-01	4,40E-02	4,28E-02	4,58E-01
Tatlı Su Ötrofikasyonu	kg P ed.	1,35E+02	1,97E-02	1,19E-03	4,23E-04	6,90E-02
Tuzlu Su	kg N ed.	6,84E-01	3,31E-04	9,39E-05	1,10E-05	1,09E-03

Ötrofikasyonu						
Karasal Ekotoksosite	kg 1,4-DCB	9,60E+04	1,16E+03	3,49E+01	3,81E+00	5,37E+03
Tatlı Su Ekotoksitesi	kg 1,4-DCB	2,83E+03	2,27E-02	2,42E-02	1,56E-03	8,06E-02
Tuzlu Su Ekotoksitesi	kg 1,4-DCB	6,56E+03	5,38E-01	4,53E-02	3,95E-03	2,44E+00
İnsanlar Üzerine Olan Toksikite (Kanserojen)	kg 1,4-DCB	1,36E+02	3,29E-01	1,89E-01	2,29E-02	1,60E+00
İnsanlar Üzerine Olan Toksikite (Kanserojen Olmayan)	kg 1,4-DCB	1,11E+05	4,72E+01	4,78E+01	1,13E+00	2,31E+02
Arazi Kullanımı	m ² a crop ed.	6,67E+02	1,43E-01	2,05E-02	5,44E-01	3,28E-01
Maden Kaynak Tüketimi	kg Cu ed.	4,26E+03	1,31E+00	5,31E-01	5,32E-04	1,89E+00
Fosil Kaynak Tüketimi	kg oil ed .	5,41E+03	7,00E-01	4,07E-01	2,14E+00	7,61E-01
Su Tüketimi	m ³	8,21E+04	5,12E+01	3,58E+00	1,58E-02	1,17E+02

Çizelge 6.10. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (ReCiPe)

Etki Kategorileri	Altın	Bronz Nanopartikül	Kurşun Nanopartikül	Aktif karbon	Bakır
Küresel Isınma	2,29E+00 0,0%	3,26E-04 0,0%	2,53E-04 0,1%	1,07E-03 3,3%	3,56E-04 0,0%
Stratosferik Ozon İncelmesi	2,21E-01 0,0%	5,33E-05 0,0%	1,66E-05 0,0%	2,66E-05 0,1%	1,12E-04 0,0%
İyonlaştırıcı Radyasyon	3,28E-01 0,0%	1,20E-04 0,0%	3,66E-05 0,0%	2,68E-05 0,1%	1,12E-04 0,0%
Ozon Oluşumu, İnsan Sağlığı	8,00E+00 0,1%	1,33E-03 0,1%	5,22E-04 0,1%	8,84E-04 2,7%	2,53E-03 0,0%
Partiküler Madde Oluşumu	1,89E+00 0,0%	1,90E-03 0,1%	5,26E-04 0,1%	6,53E-04 2,0%	6,20E-03 0,1%
Ozon Oluşumu, Karasal Ekosistem	9,42E+00 0,1%	1,57E-03 0,1%	6,14E-04 0,1%	1,03E-03 3,2%	2,99E-03 0,0%
Karasal Asidifikasyon	3,28E+00 0,0%	3,20E-03 0,1%	1,07E-03 0,2%	1,04E-03 3,2%	1,12E-02 0,1%
Tatlı Su Ötrofikasyonu	2,08E+02 2,1%	3,03E-02 1,3%	1,83E-03 0,4%	6,51E-04 2,0%	1,06E-01 1,0%
Tuzlu Su Ötrofikasyonu	1,49E-01 0,0%	7,17E-05 0,0%	2,04E-05 0,0%	2,38E-06 0,0%	2,36E-04 0,0%
Karasal Ekotoksosite	9,27E+01 0,9%	1,11E+00 47,9%	3,36E-02 6,7%	3,68E-03 11,4%	5,18E+00 50,3%
Tatlı Su Ekotoksitesi	2,32E+03 22,9%	1,85E-02 0,8%	1,98E-02 3,9%	1,27E-03 3,9%	6,57E-02 0,6%
Tuzlu Su Ekotoksitesi	6,36E+03 62,9%	5,21E-01 22,5%	4,39E-02 8,7%	3,83E-03 11,8%	2,36E+00 22,9%
İnsanlar Üzerine Olan Toksikite (Kanserojen)	4,90E+01 0,5%	1,19E-01 5,1%	6,82E-02 13,5%	8,25E-03 25,5%	5,77E-01 5,6%
İnsanlar Üzerine Olan Toksikite (Kanserojen Olmayan)	7,48E+02 7,4%	3,16E-01 13,6%	3,21E-01 63,5%	7,61E-03 23,5%	1,55E+00 15,0%
Arazi Kullanımı	1,08E-01	2,31E-05	3,32E-06	8,81E-05	5,31E-05

	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%
Maden Kaynak Tüketimi	3,55E-02	1,09E-05	4,42E-06	4,43E-09	1,57E-05
	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fosil Kaynak Tüketimi	5,52E+00	7,14E-04	4,15E-04	2,19E-03	7,76E-04
	0,1%	0,0%	0,1%	6,8%	0,0%
Su Tüketimi	3,08E+02	1,92E-01	1,34E-02	5,93E-05	4,39E-01
	3,0%	8,3%	2,7%	0,2%	4,3%
Toplam	1,01E+04	2,32E+00	5,05E-01	3,24E-02	1,03E+01
	100%	100%	100%	100%	100%

Çizelge 6.11. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (CML)-

Etki Kategorileri	Birim	Portland çimento	Agrega	Odun unu	Fiber glass	Stiren-bütadien kauçuğu
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Element Bazlı)	kg Sb ed.	1,19E-08	4,54E-10	7,28E-08	1,87E-06	6,88E-05
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Fosil Yakıt Bazlı)	MJ	2,35E+00	2,54E-02	2,69E+01	3,22E+01	7,42E+01
Küresel Isınma (GWP100a)	kg CO ₂ ed.	7,14E-01	1,90E-03	2,00E+00	2,57E+00	2,52E+00
Ozon Tabakasının İncelmesi(ODP)	kg CFC-11 ed.	2,02E-08	2,50E-10	2,44E-07	2,22E-07	6,31E-07
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite	kg 1,4-DB ed.	1,82E-02	1,86E-04	2,26E-01	1,49E+00	2,34E-01
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DB ed.	6,30E-04	8,69E-06	1,33E-02	1,31E-02	1,54E-02
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DB ed.	1,03E+01	2,27E-01	3,24E+02	1,97E+03	4,70E+02
Karasal Ekotoksitesite	kg 1,4-DB ed.	7,84E-04	9,34E-07	1,21E-03	1,72E-03	1,07E-03
Fotokimyasal Oksidasyon	kg C ₂ H ₄ ed.	3,61E-05	3,50E-07	5,76E-04	5,66E-04	5,32E-04
Asidifikasyon	kg SO ₂ ed.	9,92E-04	1,23E-05	1,29E-02	1,52E-02	9,81E-03
Ötrofikasyon	kg PO ₄ ed.	1,53E-04	2,44E-06	3,37E-03	1,45E-03	1,01E-03

Çizelge 6.12. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (CML)

Etki Kategorileri	Portland çimento	Agrega	Odun unu	Fiber glass	Stiren-bütadien kauçuğu
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Element Bazlı)	1,97E-15	7,53E-17	1,21E-14	3,11E-13	1,14E-11
	0,3%	1,0%	0,1%	0,6%	43,6%
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Fosil Yakıt Bazlı)	6,69E-14	7,25E-16	7,67E-13	9,18E-13	2,11E-12
	11,7%	9,3%	7,5%	1,8%	8,1%
Küresel Isınma (GWP100a)	1,37E-13	3,64E-16	3,85E-13	4,94E-13	4,84E-13
	23,9%	4,7%	3,7%	1,0%	1,9%
Ozon Tabakasının İncelmesi	1,98E-15	2,45E-17	2,39E-14	2,18E-14	6,18E-14

(ODP)	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%	0,2%
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite	3,63E-14	3,72E-16	4,52E-13	2,98E-12	4,68E-13
	6,3%	4,8%	4,4%	5,9%	1,8%
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	3,02E-15	4,16E-17	6,38E-14	6,28E-14	7,39E-14
	0,5%	0,5%	0,6%	0,1%	0,3%
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	2,31E-13	5,12E-15	7,28E-12	4,43E-11	1,06E-11
	40,3%	65,7%	70,8%	87,9%	40,5%
Karasal Ekotoksitesite	6,75E-15	8,04E-18	1,05E-14	1,48E-14	9,23E-15
	1,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%
Fotokimyasal Oksidasyon	2,08E-14	2,03E-16	3,33E-13	3,27E-13	3,07E-13
	3,6%	2,6%	3,2%	0,6%	1,2%
Asidifikasyon	5,90E-14	7,29E-16	7,66E-13	9,03E-13	5,83E-13
	10,3%	9,4%	7,5%	1,8%	2,2%
Ötrofikasyon	8,25E-15	1,32E-16	1,82E-13	7,84E-14	5,43E-14
	1,4%	1,7%	1,8%	0,2%	0,2%
Toplam	5,73E-13	7,79E-15	1,03E-11	5,04E-11	2,62E-11
	100%	100%	100%	100%	100%

Çizelge 6.13. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karakterizasyon sonuçları (ReCiPe)

Etki Kategorileri	Birim	Portland çimento	Agrega	Odun unu	Fiber glass	Stiren-bütadien kauçuğu
Küresel Isınma	kg CO ₂ ed.	7,01E-01	1,85E-03	1,88E+00	2,39E+00	2,33E+00
Stratosferik Ozon İncelmesi	kg CFC-11 ed.	4,89E-08	1,48E-09	3,27E-06	4,99E-06	2,76E-06
İyonlaştırıcı Radyasyon	kBq Co-60 ed.	2,94E-02	9,14E-04	3,73E-01	3,40E-01	2,56E-01
Ozon Oluşumu, İnsan Sağlığı	kg NO _x ed.	1,05E-03	1,71E-05	1,88E-02	7,79E-03	4,95E-03
Partiküler Madde Oluşumu	kg PM 2,5 ed.	2,65E-04	4,33E-06	5,52E-03	3,98E-03	3,03E-03
Ozon Oluşumu, Karasal Ekosistem	kg NO _x ed.	1,07E-03	1,74E-05	1,93E-02	7,90E-03	5,38E-03
Karasal Asidifikasyon	kg SO ₂ ed.	7,83E-04	9,30E-06	9,78E-03	1,23E-02	7,97E-03
Tatlı Su Ötrofikasyonu	kg P ed.	2,49E-06	3,61E-08	2,32E-05	1,03E-04	9,72E-05
Tuzlu Su Ötrofikasyonu	kg N ed.	3,31E-07	7,48E-09	5,29E-04	3,43E-05	9,34E-06
Karasal Ekotoksitesite	kg 1,4-DCB	1,73E-01	1,58E-03	6,31E+00	1,24E+01	1,76E+00
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	7,11E-05	7,41E-07	3,07E-03	3,71E-03	1,66E-03
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB	1,04E+00	1,19E-02	5,69E+01	2,47E+01	2,11E+01
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (Kanserojen)	kg 1,4-DCB	8,06E-03	3,34E-04	1,40E-01	1,64E+00	4,61E-01
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (Kanserojen Olmayan)	kg 1,4-DCB	9,95E-01	1,10E-02	4,86E+01	1,25E+02	1,86E+01
Arazi Kullanımı	m ² a crop ed.	3,92E-04	2,12E-04	9,26E+01	4,91E-03	3,18E-02
Maden Kaynak Tüketimi	kg Cu ed.	1,28E-04	3,69E-06	1,49E-03	2,58E-03	3,33E-03
Fosil Kaynak Tüketimi	kg oil ed.	5,40E-02	5,93E-04	6,38E-01	7,77E-01	1,74E+00
Su Tüketimi	m ³	1,21E+00	2,30E-02	1,61E+01	7,31E+00	5,44E+00

Çizelge 6.14. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait normalizasyon sonuçları (ReCiPe)

Etki Kategorileri	Portland çimento	Agrega	Odun unu	Fiber glass	Stiren-bütadien kauçuğu
Küresel Isınma	1,21E-04	3,18E-07	3,24E-04	4,12E-04	4,01E-04
	1,6%	0,2%	0,2%	0,1%	0,3%
Stratosferik Ozon İncelmesi	6,94E-07	2,10E-08	4,64E-05	7,09E-05	3,93E-05
	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
İyonlaştırıcı Radyasyon	4,21E-05	1,31E-06	5,33E-04	4,87E-04	3,66E-04
	0,6%	0,7%	0,4%	0,1%	0,2%
Ozon Oluşumu, İnsan Sağlığı	5,11E-05	8,30E-07	9,14E-04	3,79E-04	2,41E-04
	0,7%	0,4%	0,7%	0,1%	0,2%
Partiküler Madde Oluşumu	1,03E-05	1,69E-07	2,16E-04	1,56E-04	1,19E-04
	0,1%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%
Ozon Oluşumu, Karasal Ekosistem	6,00E-05	9,77E-07	1,09E-03	4,45E-04	3,03E-04
	0,8%	0,5%	0,8%	0,1%	0,2%
Karasal Asidifikasyon	1,91E-05	2,27E-07	2,39E-04	2,99E-04	1,95E-04
	0,3%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%
Tatlı Su Ötrofikasyonu	3,84E-06	5,56E-08	3,58E-05	1,58E-04	1,50E-04
	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Tuzlu Su Ötrofikasyonu	7,18E-08	1,62E-09	1,15E-04	7,44E-06	2,03E-06
	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
Karasal Ekotoksosite	1,57E-04	1,43E-06	5,73E-03	1,13E-02	1,60E-03
	2,1%	0,8%	4,2%	2,3%	1,0%
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	5,09E-05	5,31E-07	2,20E-03	2,65E-03	1,19E-03
	0,7%	0,3%	1,6%	0,5%	0,8%
Tuzlu Su Ekotoksitesitesi	1,02E-04	1,17E-06	5,59E-03	2,42E-03	2,07E-03
	1,4%	0,6%	4,1%	0,5%	1,3%
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (Kanserojen)	2,16E-03	8,95E-05	3,75E-02	4,39E-01	1,24E-01
	28,9%	48,5%	27,6%	87,9%	80,1%
İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (Kanserojen Olmayan)	1,06E-04	1,18E-06	5,20E-03	1,34E-02	1,99E-03
	1,4%	0,6%	3,8%	2,7%	1,3%
Arazi Kullanımı	6,36E-08	3,43E-08	1,50E-02	7,96E-07	5,15E-06
	0,0%	0,0%	11,1%	0,0%	0,0%
Maden Kaynak Tüketimi	1,07E-09	3,07E-11	1,24E-08	2,15E-08	2,77E-08
	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fosil Kaynak Tüketimi	5,50E-05	6,05E-07	6,50E-04	7,92E-04	1,77E-03
	0,7%	0,3%	0,5%	0,2%	1,1%
Su Tüketimi	4,54E-03	8,62E-05	6,03E-02	2,74E-02	2,04E-02
	60,7%	46,7%	44,4%	5,5%	13,2%
Toplam	7,48E-03	1,85E-04	1,36E-01	4,99E-01	1,55E-01
	100%	100%	100%	100%	100%

Çizelge 6.7-6.14 arasında verilen karakterizasyon ve normalizasyon çizelgeleri birlikte incelenerek, MCDM yöntemi için seçilecek olan etki indikatörleri belirlenmiştir. Etki indikatörlerinin seçiminde, öncelikle normalizasyon değerleri bazında toplam etkiye katılım oranı %5'den fazla olan etki indikatörleri seçilmiş (Çizelge 6.15, Aşama I), bu etki indikatörleri içerisinde en yüksek normalizasyon

değerlerine sahip olanlar alınmış (Çizelge 6.15, Aşama II) ve MCDM’de kullanılmak üzere ekotoksosite ve toksisite indikatörleri bir araya getirilmiştir (Çizelge 6.15, Aşama III). MCDM yönteminde, element bazlı abiyotik kaynakların tükenmesi için CML-IA 2000 yönteminden, toplam ekotoksosite ve toksisite değerleri için ise ReCipe yönteminden alınan değerler kullanılmıştır.

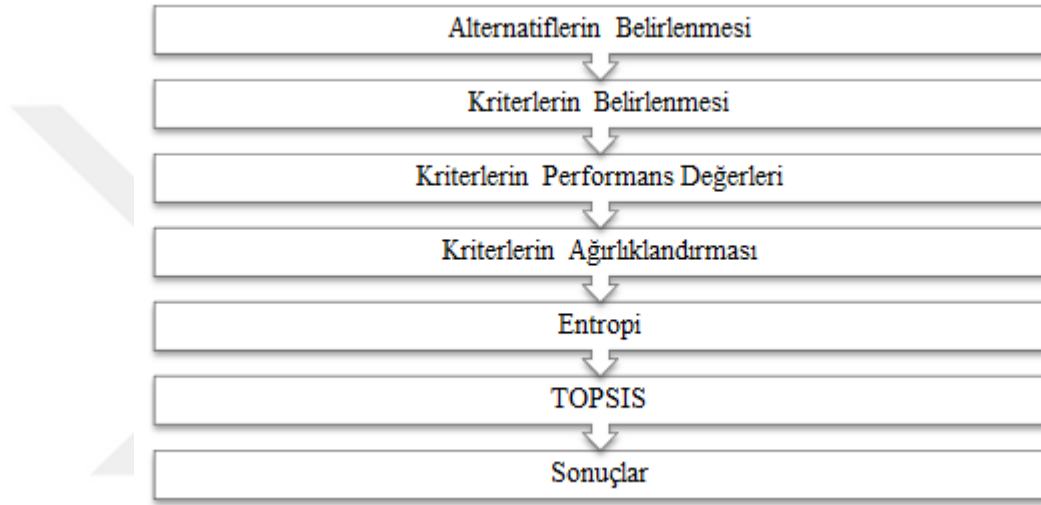
Çizelge 6.15 MCDM için etki indikatörü seçim tablosu

	Aşama I		Aşama II	Aşama III
	Baskın etki indikatörü (En yüksek normalizasyon değeri)			
	CML	ReCipe		
İleri Dönüşüm	Abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) (9,64E-06) İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (2,02E-08) Tuzlu Su Ekotoksitesisi (2,92E-07)	Karasal ekotoksosite (5,18E+00) Tatlısu Ekotoksitesisi (2,32E+03) Tuzlu Su Ekotoksitesisi (6,36E+03) İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (kanserojen) (8,25E-03) İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (kanserojen olmayan) (3,21E-01)	Abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) Karasal ekotoksosite Tatlısu Ekotoksosite Tuzlu Su Ekotoksitesisi İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (kanserojen) İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (kanserojen olmayan)	Abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı)
Geri Dönüşüm	Abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) (1,14E-11) Abiyotik kaynakların tükenmesi (Fosil yakıt bazlı) (2,11E-12) Küresel Isınma (4,94E-13) Tuzlu Su Ekotoksitesisi (4,43E-11) Asidifikasyon (9,03E-13)	İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (kanserojen) 2,16E-03 Su tüketimi 4,54E-03	İnsanlar Üzerine Olan Toksisite (kanserojen olmayan)	Ekotoksosite İnsanlar Üzerine Olan Toksisite
^a Karasal ekotoksosite, Tatlısu ekotoksosite ve Tuzlusu ekotoksosite’nin toplam değeridir.				

^b İnsanlar üzerine olan toksisite (kanserojen) ve insanlar üzerine olan toksisite (kanserojen olmayan)' nin toplam değeridir.

6.2. MCDM Çalışması

Bu çalışmada MCDM yöntemlerinden TOPSIS kullanılmıştır. Bu yöntem ile ileri dönüşüm ve geri dönüşümle elde edilecek ürünler, Şekil 6.3'de verilen akım şeması kapsamında karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.3. Akım Şeması

6.2.1. Alternatiflerin belirlenmesi

Alternatiflerin belirlenmesi ilgili detaylar Bölüm 6.1.1'de verilmiş olup. Çizelge 6.16'da özetlenmiştir.

Çizelge 6.16. İleri dönüşüm ve geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait alternatifler

İleri Dönüşüm İle Elde Edilecek Ürün Alternatifleri		Geri Dönüşüm İle Elde Edilecek Ürün Alternatifleri	
Kod	Ürün	Kod	Ürün
İD1	Altın	GD1	Portland Çimento
İD2	Bronz Nanopartikül	GD2	Agrega
İD3	Kurşun Nanopartikül	GD3	Odun Unu
İD4	Aktif Karbon	GD4	Fiber Glass
İD5	Bakır	GD5	Stiren Bütadien Kauçuğu

6.2.2. Kriterlerin belirlenmesi

Çalışmada kullanılacak olan kriterler çevresel, teknik ve ekonomik olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir. Çevresel kriterleri Çizelge 6.15’de verilen abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı), toplam ekotoksosite ve insanlar üzerine olan toksosite oluşturmıştır. Teknik kriterler işlem kolaylığı, işlem süresi ve malzeme kalitesini kapsamaktadır. Ekonomik kriterleri ise enerji maliyeti, işlem maliyeti ve üretilen ürünün ekonomik değeri oluşturmıştır. Kriterlerde nicel değerlere sahip olanlar birimleri ile ele alınmış olup nicel değerlere sahip olmayanlar ise 1-9 arasında puanlandırılmıştır (Çizelge 6.17). Değerlerin tercih yönü de ayrıca Çizelge 6.17’de belirtilmiştir.

Çizelge 6.17. İleri dönüşüm ve geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait kriterler

Kriter No	Kriter Grubu	Kriter Adı	Birim/Puan	Tercih Yönü
k1	Çevresel	Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Element Bazlı)	kg Sb ed.	Azalan
k2		Toplam Ekotoksosite	kg 1,4-DCB	Azalan
k3		İnsanlar Üzerine Olan Toksisite	kg 1,4-DCB	Azalan
k4	Teknik	İşlem Kolaylığı ^a	Puan (1-9)	Artan
k5		İşlem Süresi ^b	Puan (1-9)	Azalan
k6		Malzeme Kalitesi ^c	Puan (1-9)	Artan

k7	Ekonomik	Enerji Maliyeti	\$/ton	Azalan
k8		İşlem Maliyeti ^d	Puan (1-9)	Azalan
k9		Üretilen Ürünün Ekonomik Değeri	\$/ton	Artan

^a: Fiziksel işlem=7, fiziksel işlem+ısıtıl işlem=6, fiziksel işlem+piroliz=5, kimyasal=4, kimyasal+lıç=3, kimyasal işlem+piroliz=2

^b: İD prosesleri için: İşlem süresi > 11 saat=7, 11 saat> işlem süresi>3 saat=4, işlem süres<4 saat=3

GD prosesleri için: İşlem süresi > 30 gün=9, 30 gün > işlem süresi>1 gün=8, 1gün > işlem süresi>10 saat=7, 10 saat >işlem süresi=6

^c: İD prosesleri için: %98>ürün elde oranı > %95 =6, ürün elde oranı > %98=8, ürün elde oranı < %95 =3,

GD prosesleri için: ürün ilave oranı> %5=6, : ürün ilave oranı< %5=5

^d : Farklı kimyasal kullanımı baz alınarak puanlandırılmıştır. Eğer çalışmada kimyasal kullanımı yoksa 3 puan verilmiştir.

6.2.3. Kriterlerin ağırlıklandırılması

Kriterlere ait performans değerleri Çizelge 6.18 ve 6.19’da verilen karar matrislerinde sunulmuştur. Karar matrisinde verilen kriterlerin ağırlıklandırılması Entropi yöntemiyle yapılmıştır.

Çizelge 6.18. İleri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karar matrisi

Kriter No ^a	Birim Puan	İleri Dönüşüm Alternatifleri ^a				
		İD1	İD2	İD3	İD4	İD5
k1	kg Sb ed.	5,81E+01	2,05E-03	6,81E-03	9,97E-07	2,02E-03
k2	kg 1,4-DCB	1,05E+05	1,16E+03	3,50E+01	3,82E+00	5,37E+03
k3	kg 1,4-DCB	1,11E+05	4,75E+01	4,80E+01	1,15E+00	2,33E+02
k4 ^c	puan ^b	3	6	7	2	4
k5 ^d	puan	7	3	4	7	4
k6 ^e	puan	6	3	8	8	7

k7	\$/ton	0,3456	0,5834	0,3888	1,296	0,594
k8 ^f	puan	7	3	4	5	6
k9	\$/ton	58.500 (http-7, 2021)	50.000 (http-8, 2021)	2.400 (http-8, 2021)	1.600 (http-8, 2021)	11.200 (http-8, 2021)
^a İD1: Altın (Rao vd., 2021), İD2: Bronz Nanopartikül (Shokri vd., 2017), İD3: Kurşun Nanopartikül (Zhan vd., 2016), İD4: Aktif Karbon (Rajagopal vd., 2016), İD5: Bakır (Silvas vd., 2015) ^b Sayısal olmayan değerler 1'den 9'a ölçeklendirilmiştir: artan yönlü kriterler için; mükemmel = 9; çok iyi = 8; iyi = 7; az ya da çok iyi = 6; kayıtsız = 5; biraz kötü = 4; kötü = 3; çok kötü = 2; berbat = 1 ve azalan yönlü kriterler için; mükemmel = 1; çok iyi = 2; iyi = 3; az ya da çok iyi = 4; kayıtsız = 5; biraz kötü = 6; kötü = 7; çok kötü = 8; kötü = 9. ^c İD1: kimyasal+liç=3, İD2: fiziksel işlem+ısıtma işlem=6, İD3: Fiziksel işlem=7, İD4: kimyasal işlem+piroliz=2, İD5: kimyasal=4 ^d İD1: ortalama işlem süresi 13 saat, İD2: ortalama işlem süresi 1.5 saat, İD3: ortalama işlem süresi 4 saat, İD4: ortalama işlem süresi 12 saat, İD5: ortalama işlem süresi 4.5 saat, ^e İD1: %95'ten fazla altın çözünmesi ile sonuçlandı. İD2: %8'ten fazla bronz çözünmesi ile sonuçlandı. İD3: %98'ten fazla kurşun eldesi ile sonuçlandı. İD4: %98 tutma kapasitesinde aktif karbon üretimi ile sonuçlandı. İD5: %98,46 bakır eldesi ile sonuçlandı. ^f İD1: 2M amonyak çözelti+800g/l kerosen+0.1M org amid+1M sodyum hidroksit kullanımı var. İD2: kimyasal kullanımı yok. İD3: nitrojen gazı kullanımı var. İD4: CO₂ kullanımı var. İD5: nitrik asit, sülfürik asit, hidrojen peroksit kullanımı var.						

Çizelge 6.19. Geri dönüşüm ile elde edilecek ürünlere ait karar matrisi

Kriter No ^a	Birim Puan	Geri Dönüşüm Alternatifleri ^a				
		GD1	GD2	GD3	GD4	GD5
k1	kg Sb ed.	1,19E-08	4,54E-10	7,28E-08	1,87E-06	6,88E-05
k2	kg 1,4-DCB	1,21E+00	1,35E-02	6,32E+01	3,71E+01	2,29E+01
k3	kg 1,4-DCB	1,00E+00	1,13E-02	4,87E+01	1,27E+02	1,91E+01
k4 ^b	puan	7	7	6	6	5
k5 ^c	puan	9	8	7	3	8
k6 ^d	puan	5	6	6	7	5
k7	\$/ton	0,063	0,324	4,3578	0,1296	0,4428
k8 ^e	puan	4	3	5	4	6

k9	\$/ton	85 (http-8, 2021)	0,080 (http-9, 2021)	210 (http-10, 2021)	1.000 (http-10, 2021)	1.900 (http-8, 2021)
^a GD1: Portland Çimento (Sua-iam ve Chatveera 2022), GD2: Agregat (Ganesh vd., 2021), GD3: Odun Unu (Tian vd., 2017), GD4: Fiber Glass (Sun vd., 2013), GD5: Stiren Bütadien Kauçuğu (Yang vd., 2013) ^b GD1: Fiziksel işlem=7, GD2: Fiziksel işlem=7, GD3: fiziksel işlem+ısıtıl işlem=6, GD4: fiziksel işlem+ısıtıl işlem=6, GD5: fiziksel işlem+piroliz=5 ^c GD1: ortalama işlem süresi 180 gün, GD2: ortalama işlem süresi 28 gün, GD3: ortalama işlem süresi 14 saat, GD4: ortalama işlem süresi 1 saat, GD5: ortalama işlem süresi 2 gün ^d GD1: Atık BDK ilavesi %5 yeterli. GD2: Atık BDK ilavesi %10-25 yeterli. GD3: Atık BDK ilavesi %10-20 yeterli. GD4: Saf fiber glass üretimi var. GD5: Atık BDK ilavesi %4 yeterli. ^e GD1: Polikarboksilat Asit Süperakışkanlaştırıcı kullanımı var. GD2: kimyasal kullanımı yok. GD3: KH550kullanımı var. GD4: karbon tozu kullanımı var. GD5 SBR kullanımı var.						

6.2.4. Kriter ağırlıklandırma sonuçları

Bu tez çalışmasında, performans değerleri belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması Entropi tekniği kullanılarak yapılmıştır. Entropi yöntemi kullanılarak yapılan kriter ağırlıklandırma sonuçları aşağıdaki çizelgelerde aşamalı olarak verilmiştir. İleri dönüşüm stratejileri için karar matrisi olarak Çizelge 6.11, geri dönüşüm stratejileri için karar matrisi olarak Çizelge 6.12 kullanılmıştır.

Normalize edilmiş karar matrisinin elde edilmesi: Her bir kritere ait değerler normalize edilmiştir. Normalize edilmiş karar matrisi ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.20’de, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.21’de yer almaktadır.

Çizelge 6.20. Entropi yöntemi normalize karar matrisi (ileri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
İD1	0,9998	0,9411	0,9970	0,1364	0,2800	0,1875	0,1077	0,2800	0,4729
İD2	0,0000	0,0104	0,0004	0,2727	0,1200	0,0938	0,1819	0,1200	0,4042
İD3	0,0001	0,0003	0,0004	0,3182	0,1600	0,2500	0,1212	0,1600	0,0194
İD4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0909	0,2800	0,2500	0,4040	0,2000	0,0129
İD5	0,0000	0,0481	0,0021	0,1818	0,1600	0,2188	0,1852	0,2400	0,0905

Çizelge 6.21. Entropi yöntemi normalize karar matrisi (geri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
GD1	0,0002	0,0097	0,0051	0,2258	0,2571	0,1724	0,0118	0,1818	0,0266
GD2	0,0000	0,0001	0,0001	0,2258	0,2286	0,2069	0,0609	0,1364	0,0000
GD3	0,0010	0,5079	0,2487	0,1935	0,2000	0,2069	0,8196	0,2273	0,0657
GD4	0,0264	0,2982	0,6486	0,1935	0,0857	0,2414	0,0244	0,1818	0,3130
GD5	0,9724	0,1840	0,0975	0,1613	0,2286	0,1724	0,0833	0,2727	0,5947

Kriterlere ilişkin entropi değerlerinin bulunması: Bu aşamada Çizelge 6.20’de ve Çizelge 6.21’de yer alan normalize edilmiş değerler (r_{ij}) ile bu değerlerin logaritma değerleri ($\ln(r_{ij})$) çarpılarak elde edilen değerler toplanmıştır. Ardından aşağıdaki eşitlik ile hesaplanan kriterlere ilişkin entropi değerleri (e_j) ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.22’de, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.23’de gösterilmiştir.

$$e_j = -k \sum r_{ij} \cdot \ln(r_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n)$$

Burada;

$k = \text{Entropi sayısı} = 1/\ln(m)$

$m = \text{Karar alternatif sayısı}$

$r_{ij} = \text{Normalize edilmiş değerler}$

$e_j = \text{Entropi değeri}$

Çizelge 6.22 Kriterlere ilişkin entropi değerleri (ileri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
İD1	-0,0002	-0,0571	-0,0030	-0,2717	-0,3564	-0,3139	-0,2400	-0,3564	-0,3541
İD2	-0,0004	-0,0475	-0,0033	-0,3543	-0,2544	-0,2219	-0,3100	-0,2544	-0,3661
İD3	-0,0011	-0,0025	-0,0033	-0,3644	-0,2932	-0,3466	-0,2558	-0,2932	-0,0765
İD4	0,0000	-0,0004	-0,0001	-0,2180	-0,3564	-0,3466	-0,3662	-0,3219	-0,0562
İD5	-0,0004	-0,1460	-0,0129	-0,3100	-0,2932	-0,3325	-0,3123	-0,3425	-0,2175

Çizelge 6.23. Kriterlere ilişkin entropi değerleri (geri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
GD1	-0,0015	-0,0451	-0,0270	-0,3360	-0,3492	-0,3031	-0,0526	-0,3100	-0,0965
GD2	-0,0001	-0,0010	-0,0006	-0,3360	-0,3374	-0,3260	-0,1705	-0,2717	-0,0003
GD3	-0,0071	-0,3441	-0,3461	-0,3179	-0,3219	-0,3260	-0,1631	-0,3367	-0,1789
GD4	-0,0960	-0,3608	-0,2808	-0,3179	-0,2106	-0,3431	-0,0905	-0,3100	-0,3636
GD5	-0,0272	-0,3115	-0,2270	-0,2943	-0,3374	-0,3031	-0,2070	-0,3543	-0,3091

Bilginin farklılaşma derecesinin (dj) hesaplanması: Bir önceki adımda elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan entropi değerleri 1'den çıkartılmıştır. Elde edilen bilginin farklılaşma derecesinin (dj) değerleri, ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.24'de, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.25'de verilmiştir.

Çizelge 6.24. ej ve dj değerleri (ileri dönüşüm stratejileri)

ej	0,0012	0,1575	0,0141	0,9434	0,9654	0,9702	0,9222	0,9745	0,6651
dj	0,9988	0,8425	0,9859	0,0566	0,0346	0,0298	0,0778	0,0255	0,3349

Çizelge 6.25. ej ve dj değerleri (geri dönüşüm stratejileri)

ej	0,0819	0,6601	0,5477	0,9954	0,9670	0,9949	0,4248	0,9834	0,5892
dj	0,9181	0,3399	0,4523	0,0046	0,0330	0,0051	0,5752	0,0166	0,4108

Entropi kriter ağırlıklarının hesaplanması: Kriterlere ilişkin entropi değerleri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.26'da, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.27'de gösterilmiştir.

$$w_j = \frac{dj}{\sum_{i=1}^n (dj)}$$

Eşitlikte yer alan dj değeri kriterlere ait bilginin farklılaşma değerlerini göstermektedir. wj değeri ise kriterlerin önem düzeylerinin göstergesi olan ağırlık değerlerini ifade etmektedir. Entropi olasılık değerlerinin toplamı her zaman 1'e eşittir.

Çizelge 6.26. *wj değerleri (ileri dönüşüm stratejileri)*

wj	0,2949	0,2488	0,2911	0,0167	0,0102	0,0088	0,0230	0,0075	0,0989
-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Çizelge 6.27. *wj değerleri (geri dönüşüm stratejileri)*

wj	0,3332	0,1233	0,1642	0,0017	0,0120	0,0019	0,2088	0,0060	0,1491
-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

6.2.5. TOPSIS sonuçları

Elektrik elektronik atık türü olarak seçilen atık BDK'lara ait ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejilerinin değerlendirilmesi için oluşturulan modelin TOPSIS yöntemine göre 7 adımdan oluşan çözümü Microsoft Office Excel programı kullanılarak yapılmıştır. Entropi yöntemi değerlendirme sonuçları ise aşağıda sırası ile yer almaktadır.

Entropi ağırlıklandırma yöntemine göre TOPSIS sonuçları: Entropi yöntemi ile kriter ağırlıklandırması yapılan değerlerin TOPSIS sonuçları aşağıdaki çizelgelerde sırasıyla yer almaktadır.

1. Adım: Karar matrisinin oluşturulması: İleri dönüşüm stratejileri için karar matrisi olarak Çizelge 6.18, geri dönüşüm stratejileri için karar matrisi olarak Çizelge 6.19 kullanılmıştır.

2. Adım: Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması: Bu adımda Çizelge 6.18 ve Çizelge 6.19'daki sütunlarda bulunan değerlerin, ilgili sütundaki tüm değerlerin kareleri toplamının kareköküne bölünmesiyle normalize edilmiş karar matrisi elde edilmiştir. Elde edilen değerler ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.28'de, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.28. *TOPSIS normalize edilmiş karar matrisi (ileri dönüşüm stratejileri)*

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
İD1	1,0000	0,9986	1,0000	0,2810	0,5937	0,4027	0,2126	0,6025	0,7517
İD2	0,0000	0,0110	0,0004	0,5620	0,2545	0,2013	0,3588	0,2582	0,6425
İD3	0,0001	0,0003	0,0004	0,6556	0,3393	0,5369	0,2391	0,3443	0,0308
İD4	0,0000	0,0000	0,0000	0,1873	0,5937	0,5369	0,7971	0,4303	0,0206
İD5	0,0000	0,0511	0,0021	0,3746	0,3393	0,4698	0,3653	0,5164	0,1439

Çizelge 6.29. TOPSIS normalize edilmiş karar matrisi (geri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
GD1	0,0002	0,0158	0,0073	0,5013	0,5508	0,3824	0,0143	0,3961	0,0394
GD2	0,0000	0,0002	0,0001	0,5013	0,4896	0,4588	0,0737	0,2970	0,0000
GD3	0,0011	0,8230	0,3546	0,4297	0,4284	0,4588	0,9916	0,4951	0,0973
GD4	0,0272	0,4831	0,9246	0,4297	0,1836	0,5353	0,0295	0,3961	0,4632
GD5	0,9996	0,2982	0,1391	0,3581	0,4896	0,3824	0,1008	0,5941	0,8800

3. Adım: Normalize karar matrisinin ağırlıklandırılması: Bu adımda ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.26’da gösterilen kriter ve kriter önem ağırlıklarının Çizelge 6.28’de elde edilen değerlerle çarpılarak Çizelge 6.30’daki ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmiştir. Aynı şekilde geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.27’de gösterilen kriter ve kriter önem ağırlıklarının Çizelge 6.29’da elde edilen değerlerle çarpılarak Çizelge 6.31’deki ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmiştir.

Çizelge 6.30. Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi (ileri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
İD1	0,2949	0,2485	0,2911	0,0047	0,0061	0,0035	0,0049	0,0045	0,0743
İD2	0,0000	0,0027	0,0001	0,0094	0,0026	0,0018	0,0082	0,0019	0,0635
İD3	0,0000	0,0001	0,0001	0,0110	0,0035	0,0047	0,0055	0,0026	0,0030
İD4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0031	0,0061	0,0047	0,0183	0,0032	0,0020
İD5	0,0000	0,0127	0,0006	0,0063	0,0035	0,0041	0,0084	0,0039	0,0142

Çizelge 6.31. Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi (geri dönüşüm stratejileri)

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9
GD1	0,0001	0,0019	0,0012	0,0008	0,0066	0,0007	0,0030	0,0024	0,0059
GD2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0059	0,0009	0,0154	0,0018	0,0000
GD3	0,0004	0,1015	0,0582	0,0007	0,0051	0,0009	0,2070	0,0030	0,0145
GD4	0,0091	0,0596	0,1518	0,0007	0,0022	0,0010	0,0062	0,0024	0,0690
GD5	0,3330	0,0368	0,0228	0,0006	0,0059	0,0007	0,0210	0,0036	0,1312

4. Adım: Pozitif ideal ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi: Bu adımda ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.30'da ve geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.31'de elde edilen değerlerin pozitif ideal çözümü için; ağırlıklandırılmış matrisin her bir sütunundaki en büyük değer, negatif ideal çözüm ise ağırlıklandırılmış matrisin her bir sütunundaki en küçük değer belirlenmektedir. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.32'de, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.33'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.32. Entropi yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler (ileri dönüşüm stratejileri)

V⁺	0,0000	0,0000	0,0000	0,0110	0,0026	0,0047	0,0049	0,0019	0,0743
V⁻	0,2949	0,2485	0,2911	0,0031	0,0061	0,0018	0,0183	0,0045	0,0020

Çizelge 6.33. Entropi yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler (geri dönüşüm stratejileri)

V⁺	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0022	0,0010	0,0030	0,0018	0,1312
V⁻	0,3330	0,1015	0,1518	0,0006	0,0066	0,0007	0,2070	0,0036	0,0000

5. Adım: Pozitif ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinin hesaplanması: Bu adımda her iki strateji için kriter değerlerini gösteren sütun değerlerinden pozitif ideal ve negatif ideal değerler çıkartılmıştır. Ardından sırasıyla pozitif ve negatif ideal çözüme uzaklık değerleri belirlenmiştir.

6. Adım: İdeal çözüme göreli yakınlığın hesaplanması: Bir önceki adımda elde edilen negatif ideal çözüm değerleri, kendi değeri ve aynı sütundaki alternatifin pozitif ideal çözüm değerlerinin toplamına bölünmesiyle elde edilmiştir.

7. Adım: Alternatiflerin sıralanması ve nihai sonuç: Pozitif ideal ve negatif ideal ayırım ölçüleri, ideal çözüme göreli yakınlık ve nihai sıralaması ileri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.34'de, geri dönüşüm stratejileri için Çizelge 6.35'de yer almaktadır.

Bu çizelgeler kendi içlerinde değerlendirildiğinde; ileri dönüşüm stratejileri için “Bronz Nanopartikül (İD2)” alternatifinin öncelikli tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bronz nanopartikül alternatifini sırasıyla Kurşun Nanopartikül (İD2), Aktif Karbon (İD4), Bakır (İD5) ve Altın (İD1) takip etmektedir. Geri dönüşüm stratejileri için “Portland çimento (GD1)” alternatifinin öncelikli tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sırayı Agregat (GD2), Fiber Glass (GD4), Odun Unu (GD3) ve Stiren Bütadien Kauçuğu (GD5) takip etmektedir.

Çizelge 6.34. Entropi yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları (ileri dönüşüm stratejileri)

	Si ⁺	Si ⁻	Pi	Sıralama
İD1	0,4833	0,0736	0,1321	5
İD2	0,0121	0,4858	0,9757	1
İD3	0,0713	0,4833	0,8714	2
İD4	0,0740	0,4832	0,8671	3
İD5	0,0618	0,4767	0,8853	4
İD1: Altın, İD2: Bronz Nanopartikül, İD3: Kurşun Nanopartikül, İD4: Aktif Karbon, İD5: Bakır				

Çizelge 6.35. Entropi yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları (geri dönüşüm stratejileri)

	Si ⁺	Si ⁻	Pi	Sıralama
GD1	0,1254	0,4303	0,7743	1
GD2	0,1318	0,4254	0,7634	2
GD3	0,2626	0,3459	0,5685	4
GD4	0,1747	0,3897	0,6904	3
GD5	0,3363	0,2695	0,4448	5
GD1: Portland Çimento, GD2: Agregat, GD3: Odun Unu, GD4: Fiber Glass, GD5: Stiren Bütadien Kauçuğu				

6.2.6. Yorum

İleri dönüşüm stratejilerine ait TOPSİS genel sonuçları Çizelge 6.34’de, geri dönüşüm stratejilerine ait TOPSİS genel sonuçları ise Çizelge 6.35’de gösterilmiştir. Bu çizelgeler kendi içlerinde değerlendirildiğinde; ileri dönüşüm stratejileri için “Bronz Nanopartikül (İD2)” alternatifinin öncelikli tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bronz nanopartikül alternatifini sırasıyla Kurşun Nanopartikül (İD3), Aktif Karbon (İD4), Bakır (İD5) ve Altın (İD1) takip etmektedir. Geri dönüşüm stratejileri için “Portland çimento (GD1)” alternatifinin öncelikli tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sırayı Agregat (GD2), Fiber Glass (GD4), Odun Unu (GD3) ve Strien Bütadien Kauçuğu (GD5) takip etmektedir.

İleri dönüşümde “Bronz Nanopartikül (İD2)” alternatifinin öncelikli tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bronz Nanopartikül üretiminde çevresel etkilere bakıldığı zaman diğer alternatiflere göre yakın değerler gösterdiği görülmektedir. Entropi sonucu ön plana çıkan en önemli ilk iki kriter olan abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) ve insanlar üzerine olan toksisite değeridir. Bu çevresel kriter grubuna bakıldığı zaman, İD2 alternatifi diğer alternatiflere göre yakın değerler göstermektedir. Fakat, bu iki kriterden sonra gelen üçüncü en önemli kriter ise üretilen ürünün ekonomik değeridir. İD2 için bu değer 50.000,00 \$/ton ile diğer 3 alternatifle kıyasla daha değerli bir ürün üretildiği görülmektedir. İD2 alternatifinde değerli ürün elde edilirken diğer alternatiflere göre en düşük işlem süresi ve en ucuz işlem maliyetine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle teknik ve ekonomik açıdan en iyi alternatif olduğu sonucuna varılmaktadır. Ek olarak, atık BDK içerisinde en yüksek konsantrasyonda olan metal bakır ve dikkat çekilebilir oranda da kalay metali bulunmaktadır. Bronz ise bakır ve kalay karışımı olduğundan atık BDK’lardan en yüksek oranda elde edilmesi ve tercih edilen bir uygulama olması öngürebilir bir sonuçtur.

Geri dönüşümde “Portland Çimento (GD1)” alternatifinin öncelikli tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Portland Çimento üretiminde çevresel etkilere bakıldığı zaman diğer alternatiflere göre yakın değerler gösterdiği görülmektedir. Entropi ile ağırlıklandırma sonucunda çevresel kriterlerden abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) ve ekonomik kriterlerden enerji maliyeti öne çıkan kriterlerdir. Öne çıkan kriterlerin TOPSİS sonuçlarında seçilecek alternatif üzerinde

ağırlığı olacaktır. Bu nedenle, abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) kriterinde GD1 alternatifi 2. sırada yer alırken diğer etkisi yüksek ekonomik kriter olan enerji maliyetinde alternatiflerine göre en ekonomik değere sahip olduğu görülmektedir. Bu ekonomik değer in uygunluğu diğer alternatiflere göre GD1 için avantaj oluşturmıştır. Portland Çimento üretiminde insan üzerine olan toksisitede 2. sırada yer aldığı görülmektedir. Ayrıca, Türkiye için çimento yapı sektörü her geçen gün ihtiyaç duyulan ve gelişime açık bir sektördür. Bu sektörün ana malzesi olan çimentonun bu süreçte en iyi alternatif olması öngürebilen bir sonuçtur.



7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Günümüzde, çevre ve insan sağlığı açısından tehdit oluşturan elektrik elektronik atıkların yönetiminin yetersiz olması nedeniyle döngüsel ekonomiye katkılarının kısıtlı olduğu görülmektedir. Elektrik elektronik atıkların geniş bir yelpazede kullanımı mümkün olmasına rağmen döngüsel ekonomide yönetilebilmesi için karar verme aşaması çevresel, teknik ve ekonomik bileşenleri içeren bir süreci kapsamaktadır. Bu süreçte hem çevreye olan etkinin belirlenmesi için LCA hem de yönetimde en uygun alternatifin seçilebilmesi için MCDM kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, elektrik elektronik atık yönetime ait ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejileri incelenerek çevresel, teknik ve ekonomik açıdan hangi yöntemin daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. 5 ileri dönüşüm stratejisi, 5 geri dönüşüm stratejisi belirlenmiştir. Bu stratejilerin literatür taraması ile etki kategorileri belirlenmiştir. Belirlenen tki kategorilerine ulaşmak için CML-IA baseline (v3.06) ve ReCiPe 2016 Midpoint (V1.04) karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Ardından MCDM yöntemi olarak TOPSIS tercih edilmiştir. Bu yöntemde ileri dönüşüm stratejileri kendi içinde geri dönüşüm stratejileri kendi içinde değerlendirilmiştir. Böylece 5 alternatif ileri dönüşüm ve 5 alternatif geri dönüşüm için kullanılmıştır. Çevresel, teknik ve ekonomik olarak 9 tane kriter belirlenmiştir. Çevresel kriterler abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı), toplam ekotoksosite ve insanlar üzerine olan toksosite oluşturmıştır. Teknik kriterler işlem kolaylığı, işlem süresi ve malzeme kalitesini kapsamaktadır. Ekonomik kriterleri ise enerji maliyeti, işlem maliyeti ve üretilen ürünün ekonomik değeri oluşturmıştır.

Kriter ağırlıklandırılması entropi metodu ile yapılmıştır. Elde edilen değerler ile TOPSIS modeli çözümlenmiş ve alternatifler sıralandırılmıştır. İleri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejilerinde entropi ile ağırlıklandırma sonucunda abiyotik kaynakların tükenmesi (element bazlı) ve insanlar üzerine olan toksosite en önemli kriter olduğu görülmektedir. Önem ağırlığı fazla olan kriterin çevresel açıdan riski de fazla olacaktır.

TOPSIS yönteminde, Entropi metodu kullanılarak ağırlıklandırma yapılmış ve ileri dönüşüm stratejileri için en iyi alternatifin “Bronz Nanopartikül (İD2)” ve geri dönüşüm stratejileri için en iyi alternatifin “Portland çimento (GD1)” olduğu görülmüştür.

Elektrik elektronik atıkların ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejilerinde uygun karar verme yönteminin kullanılması ile hem hammadde kullanımı azalacak, doğal

kaynaklar korunacak hem de olası çevre risklerinin engellenmesi mümkün olacaktır. Bu süreçte uygun karar verme yöntemini seçerken de birçok parametre dikkate alınması gerekecektir. Bu süreci daha doğru ilerletebilmek için MCDM yöntemleri ile daha bilimsel ve teknik dayanakları olan bir yöntem ile yapmak mümkün olacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında elektrik elektronik atıkların ileri dönüşüm ve geri dönüşüm stratejilerinin çevresel, teknik ve ekonomik açıdan değeri ortaya sunulmuştur. Bu atık türünün doğru bir şekilde yönetimi ile hem doğal kaynakların korunacağı hemde döngüsel ekonomiye olan katkının artacağına değinilmiştir.



KAYNAKÇA

- Akın, B. ve Kuru, A. (2013). Elektrikli Ve Elektronik Atıkların (E-Atık) Zararları, Yönetimi Ve Türkiye'deki Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi (İAÜD)*, 3(12), 1–12.
- Aydın, Ç.Y. ve Kiraz, E.D.E. (2017). Elektronik Atıklar ve Çevre Sağlığı. *Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi*, 1(1), 39–52.
- Balbay, Ş., Sarihan, A. ve Avşar, E. (2021). Dünya’da ve Türkiye’de “Döngüsel Ekonomi / Endüstriyel Sürdürülebilirlik” Yaklaşımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 27, 557–569.
- Batuecas, E., Liendo, F., Tommasi, T., Bensaid, S., Deorsola, F.A. ve Fino, D. (2021). Recycling CO₂ from flue gas for CaCO₃ nanoparticles production as cement filler: A Life Cycle Assessment. *Journal of CO₂ Utilization*, 45.
- Baxter, J., Lyng, K., Askham, C., ve Hanssen, O.J. (2016). High-quality collection and disposal of WEEE: Environmental impacts and resultant issues. *Waste Management*, 57, 17–26.
- Bayrak, F. (2014). Elektrik Üretiminde Kullanılan Linyitin Madencilik Aşamasına Ait Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Beigbeder, J., Soccalingame, L., Perrin, D., Benezet, J.C. ve Bergeret, A. (2019). How to manage biocomposites wastes end of life? A life cycle assessment approach (LCA) focused on polypropylene (PP)/wood flour and polylactic acid (PLA)/flax fibres biocomposites. *Waste Management*, 83, 184–193.
- Bigum, M., Brogaard, L. ve Christensen, T.H. (2012). Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 207-208, 8–14.
- Çapraz, O. (2013). E-atık Geri Kazanım Sistemlerinde Demontaj Tesis Yerleşim

Planlaması. *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2012). Atık Elektrikli Ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği

Çokaygil, Z. (2005). Atık Yönetimi Planlamasında Yaşam Döngüsü Analizi. *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*

Değirmenci, A., (2020). Atık Baskı Devre (Pcb) Kartlarının Değerlendirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*

Demirer, G.N. (2015). Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları – I, Yaşam Döngüsü Analizi

Ecer, K., Güner, O. ve Çetin, M. (2021). Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye Ekonomisinin Uyum Politikaları. *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 9(2), 125–144.

Ergülen, A. ve Büyükkelik, A. (2008). Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye Ekonomisinin Uyum Politikaları. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(2), 19–30.

Farjana, S.H., Huda, N. ve Mahmud, M.A.P. (2019). Life cycle analysis of copper-gold-lead-silver-zinc beneficiation process. *Science of The Total Environment*, 659, 41–52.

Forti, V., Baldé, C.P., Kuehr, R. ve Bel, G. (2020). The global e-waste monitor – 2020,. *United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany.*

Ganesh, S., Danish, P., ve Bhat, K.A. (2021). Utilization of waste printed circuit board powder in concrete over conventional concrete. *Materials today proceedings*, 42(2), 745–749.

Gautam, P., Behera, C.K., Sinha, I., Gicheva, G. ve Singh, K. (2022). High added-value materials recovery using electronic scrap-transforming waste to valuable products.

Journal of Cleaner Production, 330.

Grigorescu, M.R., Ghioca, P., Iancu, L., David, M.E., Andrei, E.R., Filipescu, M.I., Ion, R.M., Vuluga, Z., Anghel, I., Sofran, I.E., Nicolae, C.A., Gabor, A.R., Gheboianu, A. ve Bucurica, I.A. (2020). Development of thermoplastic composites based on recycled polypropylene and waste printed circuit boards. *Waste Management*, 118, 391–401.

Grimaldi, F., Pucciarelli, M., Gavriilidis, A., Dobson, P. ve Lettieri, P. (2020). Anticipatory life cycle assessment of gold nanoparticles production: Comparison of milli-continuous flow and batch synthesis. *Journal of Cleaner Production*, 269.

Guo, J., Rao, Q. ve Xu, Z. (2008). Application of glass-nonmetals of waste printed circuit boards to produce phenolic moulding compound. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2), 728–734.

http-1, <https://cevreonline.com/elektronik-atiklar-e-atik/> Erişim Tarihi: 13.02.2021

http-2, <https://www.eagd.org.tr/turkiyede-ve-dunyada-e-atik/> Erişim Tarihi: 13.02.2021

http-3, <https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587> Erişim Tarihi: 13.02.2021

http-4, <https://www.macromore.com/geri-donusum-vs-ileri-donusum/> Erişim Tarihi: 13.02.2021

http-5, <http://www.gclcevre.com/sifir-atik-ve-dongus-el-ekonomi> Erişim Tarihi: 13.02.2021

http-6, <https://upcycleturkey.com/ileri-donusum-upcycling-nedir/> Erişim Tarihi: 13.02.2021

http-7, https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/c7c09a5753_1753210255_ek.pdf?tipi=37&tu ru=X&sube=0 Erişim Tarihi: 15.01.2022

http-8, <http://www.sunsirs.com/tr/prodetail-492.html> Erişim Tarihi: 15.01.2022

http-9, <https://www.guncelfiyatlari.com/kum-cakil-fiyatlari/> Erişim Tarihi: 15.01.2022

http-10, https://www.alibaba.com/product-detail/E-glass-Glass-E-glass-Fiberglass_763760037.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.29241a0esbJ5zX&s=p Erişim Tarihi: 15.01.2022

İşler, A. (2012). Aspir Yağı Etil Esteri Ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.*

Johnson, M., McMahon, K., ve Fitzpatrick, C. (2015). Research of Upcycling Supports to Increase Re-use, with a Focus on Waste Electrical and Electronic Equipment (UpWEEE). *EPA Research Report.*

Karakaşoğlu, N. (2018). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemler Ve Uygulama. *Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.*

Kaya, Ü. ve Koruca, H.İ. (2018). Elektronik Atıkların Çevreye Etkisi Ve Topluma Farkındalık Kazandırmak İçin Öneriler. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 6(73), 368–378.

Maroufi, S., Mayyas, M. ve Sahajwalla, V. (2017). Waste materials conversion into mesoporous silicon carbide nanocermics: Nanofibre/particle mixture. *Journal of Cleaner Production*, 157, 213–221.

Ötleş, S., Atalay, S., Güneş, S., Ertekin, F., Yıldız, H., Sayer, S., Özden, H., ALVER, N., Yeşilay, R.B. ve Bulut, H. (2015). Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM). Ege Üniversitesi PLM Proje Grubu

Özden, Prof.Dr. Ünal H., Çok Krüterli Karar Verme Yöntemleri. *İstanbul Ticaret Üniversitesi. Ders notu.*

Özkan, A. (2008). Kentsel Katı Atık Yönetim Sistemlerinin Oluşturulmasında Farklı Karar Verme Tekniklerinin Kullanımı. *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.*

Özkan, A (2019), Özel Atık Programlarının Planlanması: Farklı Karar Verme

- Parajuly, K., Habib, K. ve Liu, G. (2017). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Denmark: Flows, quantities and management. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 85–92.
- Quan, C., Li, A., Gao, N., Gao, N. ve Dan, Z. (2010). Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), 102–106.
- Rajagopal, R.R., Aravinda, L.S., Rajarao, R., Bhat, B.R. ve Sahajwalla, V. (2016). Activated carbon derived from non-metallic printed circuit board waste for supercapacitor application. *Electrochimica Acta*, 211, 488–498.
- Rao, M.D., Singh, K.K., Morrison, C.A. ve Love, J.B. (2021). Recycling copper and gold from e-waste by a two-stage leaching and solvent extraction process. *Separation and Purification Technology*, 263.
- Samieadel, A., Schimmel, K. ve Fini, E.H. (2018). Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 191–200.
- Shokri, A., Pahlevani, F., Levick, K., Cole, I. ve Sahajwalla, V. (2017). Synthesis of copper-tin nanoparticles from old computer printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 2586–2592.
- Silvas, F.P.C., Correa, M.M.J., Caldas, M.P.K., Moraes, V.T., Espinosa, D.C.R. ve Tenorio, J.A.S. (2015). Printed circuit board recycling: Physical processing and copper extraction by selective leaching. *Waste Management*, 46, 503–510.
- Slotte, M. ve Zevenhoven, R. (2017). Energy requirements and life cycle assessment of production and product integration of silver, copper and zinc nanoparticles. *Journal of Cleaner Production*, 148, 948–957.
- Stafford, F., Dias, A.C., Arroja, L., Labrincha, J. ve Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study.

Journal of Cleaner Production, 126, 159–165.

- Sua-iam, G., ve Chatveera, B. (2022). Effect of printed circuit board dust on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete: A preliminary study. *Case Studies in Construction Materials*, 16.
- Sun, Z., Shen, Z., Ma, S., ve Zhang, X. (2013). Sound absorption application of fiberglass recycled from waste printed circuit boards. *Materials and Structures*, 48, 387–392.
- Surra, E., Esteves, I.A.A.C., ve Lapa, N. (2021). Life cycle analysis of a biorefinery for activated carbon and biomethane production. *Biomass and Bioenergy*, 149.
- Taşkın, E. (2018). Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral İçin Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. *Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Tian, S., He, H., Yu, P., Zhou, L., Luo, Y. ve Jia, D. (2017). Sustainable utilization of waste printed circuit boards powders in HDPE-wood composites: Synergistic effects of multicomponents on structure and properties. *Journal of Cleaner Production*, 164, 840–847.
- Todd, J.A. ve MA. Curran. (1999). Streamlined Life Cycle Assessment: A Final Report From The Setac-North America Streamlined Lca Workgroup. *Science Inventory*.
- Topçu, F.H. (2017). Uluslararası Düzeyde Elektrikli Ve Elektronik Atıkların (E-atık) Ticareti ve Sorunlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(Kayfor15), 1689-1705
- TÜBİSAD, Evsel AEEE Envanter Çalışması (2020)
- TÜSİAD, Avrupa Yeşil Mutabakatı Döngüsel Ekonomi Eylem Planı Türk İş Dünyasına Neler Getirecek? (2021)
- Ünal, Ö. (2015). Ram Belleklerdeki Metalik Değerlerin Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanımı. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

- Wager, P.A., Hirschier, R., ve Eugster, M. (2011). Environmental impacts of the Swiss collection and recovery systems for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): A follow-up. *Science of The Total Environment*, 409(10), 1746–1756.
- Xing, M. ve Zhang, F. (2013). Degradation of brominated epoxy resin and metal recovery from waste printed circuit boards through batch sub/supercritical water treatments. *Chemical Engineering Journal*, 219, 131–136.
- Yang, F., Sun, S., Zhong, S., Li, S., Wang, Y. ve Wu, J. (2013). Performance of the heavy fraction of pyrolysis oil derived from waste printed circuit boards in modifying asphalt. *Journal of Environmental Management*, 126, 1–6.
- Yaren, M.F., Taşkın, M.F., Uygun, Ö. Ve Alp, A., (2014). Atık Ekonomisi Ve Elektronik Atıkların Değerlendirilmesinin Önemi. *Akademik Platform*.
- Yeşilkaya, M. (2012). Elektronik Atık Yönetimi, Uygulamaların Analizi ve Öneriler. *Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, İdari Uzmanlık Tezi*.
- Yılmaz, E. (2006). Elektrikli Ve Elektronik Atıkların Geri Kazanımı Ve Muğla İli Pilot Proje Uygulaması. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Yılmaz, E., Arslan, H. Ve Bideci, A. (2019). Environmental performance analysis of insulated composite facade panels using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 202, 806–813.
- Yi, S., Lee, H., Lee, J. ve Kim, W. (2019). Upcycling strategies for waste electronic and electrical equipment based on material flow analysis. *Environ. Eng. Res.*, 24(1), 74–81.
- Zhan, L., Xiang, X., Xie, B. ve Sun, J. (2016). A novel method of preparing highly dispersed spherical lead nanoparticles from solders of waste printed circuit boards. *Chemical Engineering Journal*, 303, 261–267.
- Zheng, Y., Shen, Z., Cai, C., Ma, S. ve Xing, Y. (2009). The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the

polypropylene composites. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 600–606.

Zhou, Y., Wu, W. ve Qiu, K. (2011). Recycling of organic materials and solder from waste printed circuit boards by vacuum pyrolysis-centrifugation coupling technology. *Waste Manag.*, 31(12), 2569–76.

Zhu, P., Chen, Y., Wang, L.Y. ve Zhou, M. (2012). A new technology for recycling solder from waste printed circuit boards using ionic liquid. *Waste Manag Res*, 30(11), 1222–6.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Zehra Gizem ELMAS

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016, Esart A.Ş., Stajyer Mühendis
- 2017, ASKİ Tatlar Atıksu Arıtma Tesisi, Stajyer Mühendis
- 2017, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- 2019, UNDP, Stajyer Mühendis
- 2019, Çınar Çevre Laboratuvarı A.Ş., İş Geliştirme Uzmanı / Teklif Birimi Sorumlusu
- 2020, Çınar Mühendislik A.Ş., İş Geliştirme Uzmanı / ÇED ve Danışmanlık Birimi
- 2021, NCH İthalat ve İhracat LTD. ŞTİ., Teknik Satış Uzmanı
- 2022, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tezli Yüksek Lisans