

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARININ GERİ
KAZANIMI İÇİN TESİS KONSTRÜKSİYONU VE SİSTEM
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Cenk Tolga ÇIĞGIN

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon

HAZİRAN 2006

**ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARININ GERİ
KAZANIMI İÇİN TESİS KONSTRÜKSİYONU VE SİSTEM
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Cenk Tolga ÇIĞGIN

(503021211)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Serdar TÜMKOR

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Mehmet PALABIYIK

Doç. Dr. Erol ŞENOCAK

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Son yıllarda önemi giderek anlaşılan elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı ile ilgili yapılan bu çalışmada, konunun çevresel, yasal, ekonomik ve teknik boyutları ele alınmıştır. Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları, içerdikleri zararlı ve tehlikeli materyaller bakımından çevre açısından tehlike arz etmekle beraber, bu ekipmanların ve bileşenlerinin tekrar kullanım olanakları yanı sıra içerdikleri değerli ve geri dönüştürülebilir materyaller bakımından da ekonomik değer taşımaktadırlar.

Öngörüsüne ve yerinde tespitlerine her zaman saygı duyduğum, elektrikli ve elektronik ekipman atıkları kavramı ile tanışmama vesile olan ve bu çalışmamda yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Serdar TÜMKOR'a teşekkür ederim. Değerli görüşlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Muammer Kalyon, Sayın Prof. Dr. Güven Önal ve Sayın Dr. Ertan ÖZNERGİZ'e ve öğrenimimde katkısı bulunan diğer tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca ayırma ve boyut küçültme makineleri ile ilgili sağladıkları bilgilerden dolayı, Granutech Saturn Systems firmasından Sayın Mike Hinsey, Goudsmit Magnetic Systems firmasından Sayın Eugène van den Boomen ve Eriez Manufacturing firmasının Türkiye mümessili Troas firmasından Sayın Yunus Emre Karabulut'a teşekkür ederim.

Yetişmemde hem annelik hem babalık vazifesini üstlenen ve hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen muhterem validem Sayın Süheyla ÇİĞGIN'a bu vesileyle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2006

Cenk Tolga ÇİĞGIN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARI	6
2.1 Kavramlar ve Tanımlar	6
2.2 Tarihsel Süreç ve Yasal Düzenlemeler	9
2.3 Uluslar Arası Yasal Düzenlemeler	23
2.3.1 Basel Sözleşmesi	23
2.3.2 WEEE ve RoHS Direktifleri	25
2.4 Türkiye’de Tarihsel Süreç ve Yasal Düzenlemeler	32
3. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLARIN ÖZELLİKLERİ	37
3.1 Materyal Bileşimleri	37
3.2 Zararlı Maddeler ve Bileşenler	44
3.3 Elektrikli ve Elektronik Atıkların Fiziksel Özellikleri	47
3.3.1 Manyetik, Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Özellikleri	47
3.3.2 Tane Boyutu, Şekil ve Serbestleşme Derecesi Özellikleri	49
4. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLARIN DEMONTAJI	54
4.1 Demontaj Yöntem Planlaması	54
4.2 Demontaj Araçlarının Gelişimi ve Demontaj Uygulamaları	57
5. MEKANİK/FİZİKSEL GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ	61
5.1 Boyut Küçültme	64
5.2 Boyut Farkına Göre Ayırma	74
5.2.1 Eleme	74
5.2.2 Sınıflandırma	87
5.3 Özgül Ağırlık (Gravite) Farkına Göre Ayırma	101
5.3.1 Durgun Ortamda Ayırma	104
5.3.2 Düşey Hareketli Akışkan Ortamda Ayırma	104
5.3.3 Tabaka Halinde Akan Akışkan Ortamda Ayırma	107
5.4 Manyetik Ayırma	110
5.5 Elektrik İletkenliği Farkına Göre Ayırma	133
5.5.1 Elektrostatik Ayırma	134
5.5.2 Girdap Akımı Ayırma	141
5.5.3 Triboelektrik Ayırma	148
6. GERİ KAZANIM İÇİN TESİS TASARIMI YAKLAŞIMLARI	150

7. GERİ KAZANIM İÇİN TESİS KONSTRÜKSİYONU	159
7.1 Fonksiyon Strüktürleri ve Kabul Edilen Tasarım Prensipleri	159
7.2 Ayırıcı Sıralaması İçin Farklı Tasarım Alternatiflerinin Karşılaştırılması	176
7.2.1 Senaryo 1	177
7.2.2 Senaryo 2	184
7.2.3 Senaryo 3	186
7.2.4 Senaryo 4	188
7.2.5 Senaryo 5	190
7.2.6 Senaryo 6	192
7.2.7 Senaryoların Karşılaştırılması	194
7.3 Sistemin Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranlarının İyileştirilmesi	194
7.3.1 Senaryo 1	195
7.3.2 Senaryo 2	203
7.3.3 Senaryo 3	205
7.3.4 Senaryo 4	207
7.3.5 Senaryo 5	210
7.3.6 Senaryolarının Karşılaştırılması	213
7.4 Sistem Tasarımı İçin Gider ve Gelirlerin Tespiti	214
7.5 Örnek Sistem Tasarımı	219
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	221
KAYNAKLAR	226
EKLER	238
ÖZGEÇMİŞ	251

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Acrylonitrile Butadiene Styrene (Akrilonitril Bütadien Stiren)
ADSM	: Active Disassembly using Smart Materials (Akıllı Materyallerin Kullanıldığı Aktif Demontaj)
APME	: The Association of Plastics Manufactures in Europe (Avrupa Plastik İmalatçıları Birliği)
BFR	: Brominated Flame Retardants (Bromlu Alev Geciktiriciler)
BM	: Birleşmiş Milletler
CIA	: Central Intelligence Agency (Merkezi Haber Alma Teşkilatı)
CFC	: Chloro Fluoro Carbon (Kloro Floro Karbon)
CRT	: Cathode Ray Tube (Katot Işını Tüpü)
DAŞ	: Düşük Alan Şiddetli
DPP	: Disassembly Procces Planning (Demontaj Yöntem Planlaması)
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
EEE	: Elektrikli ve Elektronik Ekipman
EEE	: Electrical and Electronic Equipment
EEEA	: Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atığı
EHAR	: Electrical Household Appliance Recycling (Elektrikli Ev Gereçlerinin Geri Dönüşümü)
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Örgütü)
ESO	: Electronic Scrap Ordinance (Elektronik Atık Yasası)
GDFTF	: Geri Dönüşüm Faktörü Transfer Fonksiyonu
HCFC	: Hydro Chloro Fluoro Carbon (Hidro Kloro Floro Karbon)
HFC	: Hydro Fluoro Carbon (Hidro Floro Karbon)
ICER	: Industry Council For Electronic Equipment Recycling (Elektronik Ekipman Geri Dönüşüm Sanayicileri Birliği)
ICSG	: International Copper Study Group (Uluslar Arası Bakır Çalışmaları Grubu)
IVP	: Inclined Vibrated Plate (Eğimli Titreşimli Tabla)
LCD	: Liquid Crystal Display (Sıvı Kristalli Görüntüleyici)
LED	: Light Emitting Diyotes (Işık Yayan Diyot)
LPG	: Liquified Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
MILP	: Mixed Integer Linear Programming (Karma Tamsayılı Lineer Programlama)
MINLP	: Mixed Integer Non-Linear Programming (Karma Tamsayılı Lineer Olmayan Programlama)
NMH	: Nickel Metal Hydride (Nikel Metal Hidrid)
OECD	: Organization for Economic Cooperation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü)
PA	: Polyamide (Poliamid)
PBB	: Poly Brominated Biphenyl (Polibromlu Bifenil)

PBDE	: Poly Brominated Diphenyl Ether (Polibromlu Difenil Eter)
PBT	: Polybutylene Terephthalate (Polibütülen Tereftalat)
PC	: Polycarbonate (Polikarbonat)
PCB	: Polychlorinated Biphenyl (Poliklorlanmış Bifenil)
PDP	: Plasma Display Panel (Plazma Görüntüleyici Panel)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PET	: Polyethylene Terephthalate (Polietilen Tereftalat)
POM	: Polyoxymethylene (Polioksimetilen)
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
PS	: Polystyrene (Polistiren)
PU	: Polyurethane (Poliüretan)
PUR	: Polyurethane (Poliüretan)
PVC	: Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorid)
PVDF	: Polyvinylidene Fluoride (Polivinilidin Florid)
RECS	: Ramp Eddy Current Separator (Eğimli Girdap Akımı Ayırıcı)
RDS	: Rotating Disc Separator (Döner Disk Ayırıcı)
RoHS	: Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances (Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması)
SBR	: Styrene Butadiene Rubber (Stiren Butadien Kauçuk)
SMD	: Surface Mounted Device (Yüzeye Monte Edilmiş Eleman)
SMP	: Shape Memory Polymer (Şekil Hafızalı Polimer)
TC	: Türkiye Cumhuriyeti
TESİD	: Türk Elektronik Sanayicileri Derneği
TNO	: The Netherlands Organization
TOBB	: Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği
TÜRKBESD	: Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği
TÜSİAD	: Türk Sanayicileri ve İşadamları Derneği
UNEP	: United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
US	: United States (Birleşik Devletler)
USA	: United States of America (Amerika Birleşik Devletleri)
VECS	: Vertical Eddy Current Separator (Dikey Girdap Akımı Ayırıcı)
WECS	: Wet Eddy Current Separator (Yaş Girdap Akımı Ayırıcı)
WEEE	: Waste Electrical and Electronic Equipment (Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atığı)
YAŞ	: Yüksek Alan Şiddetli

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1:	Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlara İlişkin Farklı Ömürler 10
Tablo 2.2:	Fonksiyonel ve Teknolojik Ömürlerinin Karşılaştırılması 10
Tablo 2.3:	Ülkelerin Sahip Olduğu Mobil Telefon Adetleri 11
Tablo 2.4:	Kullanımdaki Bilgisayar Adetleri ve Artış Oranları 11
Tablo 2.5:	2000 Yılı İtibariyle Batı Avrupa’da EEE Kullanımı 12
Tablo 2.6:	Bazı Ülkelere Ait EEEA Oluşum Miktarları 13
Tablo 2.7:	Türkiye’de 1982–2004 Dönemi Renkli Televizyon İmalatı 13
Tablo 2.8:	Türkiye’de Dayanıklı Tüketim Mallarının İmalat Miktarları 14
Tablo 2.9:	Türkiye’de Dayanıklı Tüketim Mallarının Satış Miktarları 14
Tablo 2.10:	Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İmalat Rakamları 15
Tablo 2.11:	Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İhracat Rakamları 15
Tablo 2.12:	Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İthalat Rakamları 15
Tablo 2.13:	Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İç Satış Rakamları 16
Tablo 2.14:	Türk Beyaz Eşya Sektörü İhracat ve İthalat Rakamları 16
Tablo 2.15:	Türk Elektronik Sanayisinin İthalat ve İhracat Oranları 17
Tablo 2.16:	Türk Elektronik Sanayisinin İmalat Rakamları 17
Tablo 2.17:	Türk Elektronik Sanayisinin İthalat Rakamları 17
Tablo 2.18:	Türk Elektronik Sanayisinin İhracat Rakamları 17
Tablo 2.19:	Atık Demir ve Çelik Kullanılmasının Yararları 18
Tablo 2.20:	Geri Dönüştürülmüş Materyal Kullanımı ve Enerji Tasarrufu 18
Tablo 2.21:	Bazı Ülkelerin EEEA Geri Dönüşüm Oranları ve Hedefleri 21
Tablo 2.22:	EEEA ve EEEA Geri Dönüşümü İle İlgili Tüketici Görüşleri 22
Tablo 2.23:	WEEE Direktifine Göre Hedefler 27
Tablo 2.24:	WEEE Direktifi İçin Anahtar Tarihler 29
Tablo 2.25:	RoHS Direktifi İçin Anahtar Tarihler 29
Tablo 2.26:	Bazı Avrupa Ülkelerine Ait EEEA Toplama Oranları 30
Tablo 2.27:	WEEE ve RoHS Mevzuatı Özeti 31
Tablo 2.28:	EEEA Toplama Oranları 34
Tablo 2.29:	EEEA Geri Kazanım Oranları 35
Tablo 2.30:	EEEA Geri Dönüşüm Oranları 35
Tablo 2.31:	Beko Elektronik Tarafından İmal Edilen TV Adetleri 36
Tablo 3.1:	EEE Materyal İçerikleri 38
Tablo 3.2:	EEE Kategorilerine Göre Materyal İçerikleri 38
Tablo 3.3:	Büyük ve Küçük Beyaz Eşyaların Materyal İçerikleri 39
Tablo 3.4:	Kahverengi Eşyaların Materyal İçerikleri 40
Tablo 3.5:	Gri Eşyaların Materyal İçerikleri 40
Tablo 3.6:	Karmaşık Bileşenlerin Materyal İçerikleri 40
Tablo 3.7:	Kişisel Bilgisayarlar İçin Element Analizi 41
Tablo 3.8:	Mobil Telefonlar İçin Element Analizi 43
Tablo 3.9:	Baskılı Devre Levhaları İçin Element Analizi 44
Tablo 3.10:	Çeşitli Kaynaklara Göre Atık Materyal Fiyatları 45
Tablo 3.11:	EEE Atıklarında Yer Alan Önemli Zararlı Materyaller 46

Tablo 3.12:	EEE Atıklarında Yer Alan Önemli Zararlı Bileşenler	46
Tablo 3.13:	Bakır Alaşımlarının Manyetik Çekimleri	48
Tablo 3.14:	Metallerin Bazı Fiziksel Karakteristikleri	48
Tablo 3.15:	Plastiklerin Bazı Fiziksel Karakteristikleri	48
Tablo 3.16:	Kişisel Bilgisayar Atıklarındaki Ana Metaller İçin SD	50
Tablo 3.17:	Baskılı Devre Levhası Atıklarındaki Ana Metaller İçin SD	51
Tablo 5.1:	Materyal Özellikleri ve Fiziksel Ayırma Yöntemleri	62
Tablo 5.2:	Ayrırma İşlemleri ve Uygulama Boyutları	63
Tablo 5.3:	Bazı Materyallerin Özgül Ağırlıkları ve İş Endeksleri	67
Tablo 5.4:	Çift Merdaneli İnce Kırıcılarda Kavranabilecek Tane Boyutu	70
Tablo 5.5:	Tane - Akışkan Ortam Etkileşimi	88
Tablo 5.6:	Metal – Ametal Ayırımında Kullanılan Yoğunluk Bazlı Ayrırma İşlemleri	103
Tablo 5.7:	Demir Dışı Metal Karışımlarının İşlenmesinde Kullanılan Jig İşlemindeki Hafif ve Ağır Mamul Dağılımına Göre Kütle Geri Dönüşüm ve Yoğunluk Kompozisyonu	107
Tablo 5.8:	Materyallerin Demire Göre Çekim Kuvvetleri	118
Tablo 5.9:	Elektrik İletkenliği Farkına Göre Ayrırma İşlemleri	133
Tablo 5.10:	Elektrostatik Ayırıcıların Kullanım Alanları	141
Tablo 5.11:	Girdap Akımı Ayırıcılarının Karşılaştırılması	145
Tablo 5.12:	Girdap Akımı Ayırıcılarının Tipik Uygulamaları	145
Tablo 6.1:	Kütlesel Geri Dönüşüm Prensipleri	156
Tablo 6.2:	Geri Kazanım Tesislerine Ait Veriler	158
Tablo 6.3:	Geri Dönüşüm İşlemleri Maliyetleri	158
Tablo 7.1:	Seçilen Mamul Tipleri İçin Demontajı Gerekli Olan Bileşen	161
Tablo 7.2:	Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları	162
Tablo 7.3:	Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri	163
Tablo 7.4:	Seçilen Mamullerin Materyal Özellikleri (Fiziksel)	164
Tablo 7.5:	Materyal İçeriğine Bağlı Ayırıcı Alternatifleri	165
Tablo 7.6:	Boyut Küçültme ve Ayrırma Yöntemleri İçin Tane Boyutu Kriterleri	166
Tablo 7.7:	Geri Dönüşüm Fonksiyonu Transfer ve Tamamlayıcı Matrisi	168
Tablo 7.8:	Kabul Edilen Mamul Adetleri ve Materyal Miktarları	175
Tablo 7.9:	Kabul Edilen Mamullere Ait Materyal Miktarları Toplamı	176
Tablo 7.10:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 1)	183
Tablo 7.11:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 2)	184
Tablo 7.12:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 3)	186
Tablo 7.13:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 4)	188
Tablo 7.14:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 5)	190
Tablo 7.15:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 6)	192
Tablo 7.16:	Geri Dönüşüm Oranlarının Karşılaştırılması	194
Tablo 7.17:	Saflık Oranlarının Karşılaştırılması	194
Tablo 7.18:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 1)	203

Tablo 7.19:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 2)	205
Tablo 7.20:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 3)	207
Tablo 7.21:	Materyal Geri Dönüşüm Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 4)	210
Tablo 7.22:	Materyal Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 4)	210
Tablo 7.23:	Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 5)	212
Tablo 7.24:	Geri Dönüşüm Oranlarının Karşılaştırılması	213
Tablo 7.25:	Saflık Oranlarının Karşılaştırılması	213
Tablo 7.26:	Cu ve Al İçin Geri Dönüşüm Oranlarının Karşılaştırılması	213
Tablo 7.27:	Cu ve Al İçin Saflık Oranlarının Karşılaştırılması	213
Tablo 7.28:	Boyut Küçültme ve Ayırma Makineleri İçin Fiyat Aralıkları	215
Tablo 7.29:	İlk Yatırım Maliyetleri	215
Tablo 7.30:	İşletme Giderleri	216
Tablo 7.31:	Birim Materyal Satış Gelirleri	217
Tablo 7.32:	Toplam Materyal Satış Gelirleri	218
Tablo 7.33:	Gider – Gelir Sonuç Tablosu	220
Tablo 7.34:	Geri Dönüşüm Sistemi Özet Tablosu	216
Tablo B.1:	Türk Elektronik Sanayisinin Bileşenler Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri	242
Tablo B.2:	Türk Elektronik Sanayisinin Bileşenler Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri	242
Tablo B.3:	Türk Elektronik Sanayisinin Tüketim Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri	243
Tablo B.4:	Türk Elektronik Sanayisinin Tüketim Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri	243
Tablo B.5:	Türk Elektronik Sanayisinin Telekomünikasyon Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri	243
Tablo B.6:	Türk Elektronik Sanayisinin Telekomünikasyon Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri	244
Tablo B.7:	Elektronik Sanayisinin Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri	244
Tablo B.8:	Elektronik Sanayisinin Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri	244
Tablo D.1:	Kütle Akış Diyagramlarında Kullanılan Sistem Elemanlarına Ait Şematik Gösterimlerin Açıklamaları	246
Tablo E.1:	Çekiçli Kırıcılar	247
Tablo E.2:	Kesmeli Kırıcılar ve Öğütücüler	247
Tablo E.3:	Havalı Sınıflandırıcılar	247
Tablo E.4:	Girdap Akımı Ayırıcıları	248
Tablo E.5:	Tamburlu Manyetik Ayırıcılar	248
Tablo E.6:	Bantlı Elektro Mıknatıslı Manyetik Ayırıcılar	249
Tablo E.7:	Bantlı Doğal Mıknatıslı Manyetik Ayırıcılar	249
Tablo E.8:	Tek Katlı Titreşimli Elekler (20°)	249

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1:	Uyarı İşareti 28
Şekil 2.2:	TS EN 50419 Standardına Göre İşaretleme 34
Şekil 3.1:	Mobil Telefonlarda Ağırlık Değişimi 42
Şekil 3.2:	Mobil Telefonlarda Boyut Değişimi 42
Şekil 3.3:	Mobil Telefonlarda Ağırlık ve Boyut Değişimi 42
Şekil 3.4:	Plastiklerin Özgül Ağırlık Aralıkları 49
Şekil 3.5:	Kişisel Bilgisayarlarda Boyut Aralığına Bağlı Metal Dağılımı 51
Şekil 3.6:	Öğütülmüş Bakır Plakaları İçin Tane Boyutu Dağılımı 52
Şekil 3.7:	Öğütülmüş Baskılı Devre Levhaları İçin Tane Boyutu Dağılımı 53
Şekil 3.8:	Açısal Hızın ve Elek Açıklığının Ayırma Verimine Etkisi 53
Şekil 4.1:	Demontaj ve Geri Dönüşüm İşlemlerinin Sınıflandırılması 59
Şekil 5.1:	Boyut Küçültme Makinelerinin Sınıflandırılması 65
Şekil 5.2:	Kırma Makinelerinde Karşılaşılan Zorlama Tipleri 66
Şekil 5.3:	Merdaneli Kırıcıların Şematik Görünüşü 68
Şekil 5.4:	Kesmeli Kırıcı Kesiti 71
Şekil 5.5:	Çekiçli Kırıcı Kesiti 71
Şekil 5.6:	Çekiç Şekilleri 72
Şekil 5.7:	Bir Çember Tip Öğütücünün Kesiti 73
Şekil 5.8:	Eleklerde Verim, Kapasite, Elek Boyu ve Elek Altı Miktarı İlişkileri 77
Şekil 5.9:	Elek Çeşitlerinin Sınıflandırılması 79
Şekil 5.10:	Sac Elek Yüzey Şekillerine Ait Bazı Örnekler 80
Şekil 5.11:	Kare ve Dikdörtgen Delikli Tel Örgü Elekler 80
Şekil 5.12:	Paralel Çubuklu Elek 80
Şekil 5.13:	Sabit Elekler 81
Şekil 5.14:	Hareketli Izgara Elek 82
Şekil 5.15:	Dönme Hızına Göre Verim Değişim Eğrisi 83
Şekil 5.16:	Hareketli Dönen Elek (Tromel) 83
Şekil 5.17:	Hareketli Sallantı Elek 84
Şekil 5.18:	Titreşimli Eleklerde Kapasite Hesapları İçin C, M, K Katsayıları 85
Şekil 5.19:	Çift Yüzeyli Titreşimli Elek 86
Şekil 5.20:	Titreşimli Konveyör Eleği 86
Şekil 5.21:	Düzeltilmiş Performans Eğrisi Örneği 89
Şekil 5.22:	Çöktürme Konisi Kesiti 92
Şekil 5.23:	Evans Sınıflandırıcısı 93
Şekil 5.24:	Richards Sınıflandırıcısı 93
Şekil 5.25:	Spiral Sınıflandırıcı 93
Şekil 5.26:	Siklon Kesiti 94
Şekil 5.27:	Düşey Havalı Sınıflandırıcı 95
Şekil 5.28:	Düşey Havalı Sınıflandırıcı Kanalı Örnekleri 95
Şekil 5.29:	Yatay Havalı Sınıflandırıcı 96
Şekil 5.30:	Tipik Bir Havalı Sınıflandırma Sistemi 96

Şekil 5.31:	Düşey Hava Akımlı Karşı Akışlı Havalı Sınıflandırıcı	97
Şekil 5.32:	Yatay Hava Akımlı Çapraz Akışlı Havalı Sınıflandırıcı	98
Şekil 5.33:	Yılankavi Tip Kademeli Havalı Sınıflandırıcı	98
Şekil 5.34:	Plakalı Tip Kademeli Havalı Sınıflandırıcı	99
Şekil 5.35:	Yatay Hava Akımlı Kademeli Havalı Sınıflandırıcı	99
Şekil 5.36:	Akışkan Yataklı Havalı Sınıflandırıcı	100
Şekil 5.37:	Akışkan Yataklı Direkt Geçişli Havalı Sınıflandırıcı	100
Şekil 5.38:	Elek Üstünden Beslemeli Akışkan Yataklı Sınıflandırıcı	101
Şekil 5.39:	Özgül Ağırlık Farkına Göre Ayırma Mekanizmaları	102
Şekil 5.40:	Şematik Jig Görünüşü	105
Şekil 5.41:	Jig Devresinin Basitleştirilmiş Temsili Şeması	105
Şekil 5.42:	Sürekli Islak Jig	107
Şekil 5.43:	Sarsıntılı Tabla	108
Şekil 5.44:	Havalı Masa	109
Şekil 5.45:	Standart Humphrey Spirali	110
Şekil 5.46:	Humphrey Spiral Kesiti	110
Şekil 5.47:	Ferromanyetik, Paramanyetik ve Diamanyetik Materyallerin Mıknatıslanma Eğrileri	112
Şekil 5.48:	Tanelerin Manyetik Olarak Ayrılmasında Etkili Olan Kuvvetler	116
Şekil 5.49:	Üç Farklı Manyetik Alan	121
Şekil 5.50:	Düz Bir Kutupla Dilimli Bir Kutup Arasındaki Alan	121
Şekil 5.51:	Manyetik Ayırıcıların Sınıflandırılması	124
Şekil 5.52:	Yaş Manyetik Tamburlu Ayırıcılar	126
Şekil 5.53:	İndüklenmiş Silindirik Manyetik Ayırıcı	127
Şekil 5.54:	Çapraz Bantlı Manyetik Ayırıcı	128
Şekil 5.55:	Döner Diskli Manyetik Ayırıcı	128
Şekil 5.56:	Gill Manyetik Ayırıcısının Yandan Görünüşü	129
Şekil 5.57:	Jones Manyetik Ayırıcısı	130
Şekil 5.58:	Carpco Manyetik Ayırıcısı	130
Şekil 5.59:	Konveyör Banda Dik Tip Elektromanyetik Ayırıcı	131
Şekil 5.60:	Konveyör Banda Paralel Tip Elektromanyetik Ayırıcı	131
Şekil 5.61:	Tambur Tip Kuru Manyetik Ayırıcı	132
Şekil 5.62:	Makaralı Tip Manyetik Ayırıcı	132
Şekil 5.63:	Tüp Elektrotlu Elektrostatik Ayırıcılarda Tane Ayrılması	136
Şekil 5.64:	Taç Elektrotlu Elektrostatik Ayırıcılarda Tane Ayrılması	136
Şekil 5.65:	Tüp ve Taç Elektrotların Bir Arada Kullanıldığı Elektrostatik Ayırıcılarda Tane Ayrılması	137
Şekil 5.66:	Laboratuvar Ölçekli Taç Elektrostatik Ayırıcı	138
Şekil 5.67:	Yüksek Voltaj ve Tane Boyutuna Bağlı Materyal Geri Kazanımı	138
Şekil 5.68:	Rotor Hızı ve Tane Boyutuna Bağlı Materyal Geri Kazanımı	138
Şekil 5.69:	Nem Oranına Bağlı PVC Geri Kazanım ve Safılık Oranları	139
Şekil 5.70:	Nem Oranına Bağlı Al Geri Kazanım ve Safılık Oranları	139
Şekil 5.71:	Girdap Akımı Ayırıcısı	142
Şekil 5.72:	Girdap Akımı Ayırma Deneyinin Şematik Gösterimi	146
Şekil 5.73:	Toplama Kutularındaki Al Dağılımı	147
Şekil 5.74:	Toplama Kutularındaki PVC, Zn, Cu ve Al Dağılımı	147
Şekil 5.75:	Döner Tip Girdap Akımı Ayırıcısı Vasıtasıyla Seçilen Metal – Metal Ayırımı İçin Dört Ayırma Kriteri	148
Şekil 5.76:	Plastikler İçin Triboelektrik Yüklenme Sıralaması	149
Şekil 5.77:	Triboelektrik Yüklü Plastiklerin Ayrılması	149

Şekil 6.1:	Mamul Ömür Çevrimi	152
Şekil 6.2:	Bir EEEA Geri Dönüşüm Tesisi Örneği	153
Şekil 6.3:	Tipik Toptan Geri Dönüşüm Sıralaması	154
Şekil 7.1:	Geri Kazanım Tesisi Temel Fonksiyon Strüktürü	160
Şekil 7.2:	Temel Fonksiyon Strüktürü	161
Şekil 7.3:	Alt Fonksiyon Strüktürü	162
Şekil 7.4:	Birim Eleman Modeli	166
Şekil 7.5:	Kırıcı, Elek, Havalı Sınıflandırıcı, Siklon ve Manyetik Ayırıcı İçin Birim Eleman Modeli	168
Şekil 7.6:	Girdap Akımı Ayırıcı ve Elektrostatik Ayırıcı İçin Birim Eleman Modeli	168
Şekil 7.7:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 1)	178
Şekil 7.8:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 1)	183
Şekil 7.9:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 2)	184
Şekil 7.10:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 2)	185
Şekil 7.11:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 3)	186
Şekil 7.12:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 3)	187
Şekil 7.13:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 4)	188
Şekil 7.14:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 4)	189
Şekil 7.15:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 5)	190
Şekil 7.16:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 5)	191
Şekil 7.17:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 6)	192
Şekil 7.18:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 6)	193
Şekil 7.19:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 1)	196
Şekil 7.20:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 1)	202
Şekil 7.21:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 2)	203
Şekil 7.22:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 2)	204
Şekil 7.23:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 3)	205
Şekil 7.24:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 3)	206
Şekil 7.25:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 4)	208
Şekil 7.26:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 4)	209
Şekil 7.27:	Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 5)	211
Şekil 7.28:	Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 5)	212
Şekil F.1	Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları İçin Geri Dönüşüm Sistemi Tasarımı	250

SEMBOL LİSTESİ

A	: Efektif elek yüzey alanı
b	: Merdane aralığının yarısı
b	: Merdane genişliği
B	: Manyetik alan
β	: Kavrama açısı
β	: Saflık oranı
β_{Fe}	: Demirin saflık oranı
β_{Cu}	: Bakırın saflık oranı
β_{Al}	: Alüminyumun saflık oranı
$\beta_{Plastik}$	: Plastiğin saflık oranı
c	: Üst akımdaki belirli bir tane boyutunun toplam elek altı yüzdesi
C	: Materyal miktarı
d	: İki kutup arasındaki mesafe
d₁	: Giren malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı
d₂	: Çıkan malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı
d_m	: Materyal tanesinin çapı
d_o	: Ferromanyetik ortamın çapı
D	: Elek çapı
D	: Tambur çapı
δ_m	: Materyalin özgül ağırlığı
δ	: Ortamın veya akışkanın özgül ağırlığı
δ_1	: Ağır materyalin özgül ağırlığı
δ_2	: Hafif materyalin özgül ağırlığı
E	: Elektrik alanı
f	: Gevşeklik faktörü
f	: Beslemedeki belirli bir tane boyutunun toplam elek altı yüzdesi
F_c	: Merkezkaç kuvveti
F_d	: Hidrodinamik direnç (sürüklenme) kuvveti
F_e	: Elektrik kuvveti
F_g	: Yerçekimi kuvveti
F_L	: Lorentz kuvveti
F_m	: Manyetik kuvvet
ϕ_d	: Mıknatıs kutupları arasındaki açı
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Manyetik alan şiddeti
B_d	: Tambur yüzeyindeki manyetik alan şiddeti
I	: Birim matris
k	: Ayırma kriteri
k	: Merdane katsayısı
K	: Materyal boyutu oranına bağlı elek katsayı
K	: Manyetik duyarlılık

K_s	: Cismin manyetik duyarlılığı
K_m	: Cismin içinde bulunduğu ortamın manyetik duyarlılığı
m_1	: Kutup şiddeti
m_2	: Kutup şiddeti
M	: Elenecek materyal elek üstü oranına bağlı elek katsayı
M	: Cismin iç mıknatıslanma şiddeti
μ	: Manyetik geçirgenlik
n	: Sayılan örnek sayısı
n	: Dönme hızı
N_{fi}	: i numaralı örnekteki istenen materyallerin serbest taneleri
N_{li}	: i numaralı örnekteki aynı materyallerin bağlı taneleri
N_k	: Kritik hız
η	: Akışkan viskozitesi
η	: Akışkan ortamının viskozitesi
η	: Geri dönüşüm oranı
η_{Fe}	: Demirin geri dönüşüm oranı
η_{Cu}	: Bakırın geri dönüşüm oranı
η_{Al}	: Alüminyumun dönüşüm oranı
$\eta_{Plastik}$	: Plastiğin geri dönüşüm oranı
q	: Elektrik yükü
Q	: Teorik kapasite
Q	: Özgül ağırlık, yüzey rutubeti, eğim gibi unsurlara bağlı elek katsayısı
Q_d	: Mıknatıs kutupları arasındaki açı
P	: Güç
r	: Merdanelerin içeri çektiği (kavradığı) en büyük tane yarıçapı
R	: Merdane çapı
R	: Tambur yarıçapı
R	: Geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu (GDFTF) matrisi
R'	: Geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu tamamlayıcı matrisi
R''	: Geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu tamamlayıcı matrisi
Re	: Reynold sayısı
R_e	: Elek GDFTF matrisi
R_e'	: Elek GDFTF matrisi
R_{es}	: Elektrostatik ayırıcı GDFTF matrisi
R_{es}'	: Elektrostatik ayırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
R_{es}''	: Elektrostatik ayırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
R_g	: Girdap akımı ayırıcı GDFTF matrisi
R_g'	: Girdap akımı ayırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
R_g''	: Girdap akımı ayırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
R_{hs}	: Havalı sınıflandırıcı GDFTF matrisi
R_{hs}'	: Havalı sınıflandırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
R_k	: Kırıcı geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu matrisi
R_k'	: Kırıcı geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu tamamlayıcı matrisi
$R_{mdaş}$	: Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı GDFTF matrisi
$R_{mdaş}'$	: Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
$R_{myaş}$	: Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı GDFTF matrisi
$R_{myaş}'$	: Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı GDFTF tamamlayıcı matrisi
R_s	: Siklon GDFTF matrisi
R_s'	: Siklon GDFTF tamamlayıcı matrisi
s	: Aralık açıklığı

S	: Geri dönüşüm miktarı
SD	: Serbestleşme derecesi
t	: Alt akımdaki belirli bir tane boyutunun toplam elek altı yüzdesi
T	: Saatte eleğe beslenen materyal miktarı
θ	: v hızı ve B manyetik alanı arasındaki açı
U	: Giren materyal dağılım vektörü
v	: Materyal içindeki ferromanyetik parçaların oranı
v	: Hız
v	: Mardane çevresel hızı
v_t	: Terminal hızı
V	: Materyal tanesinin sıvı ortama göre (çökelme) hızı
V	: Hacim
V_m	: Materyal tanesinin hacmi
W	: Elek kapasitesi
W	: Boyut küçültmede ton başına harcanan enerji
W_i	: İş endeksi
ω	: Açısal hız
ω_k	: Kritik hız
x	: Materyal dağılım vektörü
X	: Çıkan materyal dağılım vektörü
Y	: Çıkan materyal dağılım vektörü

ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARININ GERİ KAZANIMI İÇİN TESİS KONSTRÜKSİYONU VE SİSTEM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışma kapsamında elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için bir tesis konstrüksiyonun; sistem parametreleri, maliyet ve gelir analizleri göz önüne alınarak tasarımı yapılmıştır. Öncelikli olarak geri kazanım tesisi tasarımı için fonksiyon strüktürleri ve kabul edilen tasarım prensipleri tespit edilmiştir. Geri kazanımı hedeflenen elektrikli ve elektronik ekipman atığı tipleri belirlenerek, demontajı yapılacak bileşenler seçilmiş ve demontaj sonrasında kalan ekipman atığının içerdiği materyal miktarları ve oranları hesaplanmıştır. Akabinde bu materyaller tiplerinin ayırt edici fiziksel özellikleri ve bu özelliklere dayanan uygulanabilir ayırma yöntemleri ve ayırma makinesi alternatifleri tespit edilmiştir. Her bir boyut küçültme ve ayırma makinesi için geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu kullanılarak birim modelleri oluşturulmuştur. Geri dönüşüm sistemi için en uygun ayırıcı sıralamasının belirlenmesi amacıyla farklı senaryolar geliştirilmiş ve her bir senaryoda elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda öncelikli olarak MATHCAD programı kullanılmış ve akabinde MATLAB ve SIMULINK programları kullanılarak geri dönüşüm sisteminin elemanları için birim modeller oluşturulmuş ve her bir senaryo için sistem benzetimleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en uygun senaryo temel sistem tasarımı olarak kabul edilmiştir. Tespit edilen temel sistem tasarımının geri dönüşüm ve saflık oranlarının iyileştirilmesi amacıyla, temel sistem tasarımı üzerinden farklı senaryolar geliştirilerek, her bir iyileştirme senaryosu için elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geri kazanım ve saflık oranları için en uygun tasarım belirlenmiştir. Geliştirilen senaryolar için uygun makine seçimleri yapılarak, senaryoların ilk yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri ve geri dönüşüm sonucunda elde edilecek materyal satışından elde edilecek gelirler hesaplanarak karşılaştırılmış ve yatırım maliyeti geri ödeme süreleri belirlenmiştir. Geri ödeme süresi en uygun tasarım seçilerek, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanım için tesis konstrüksiyonu yapılmıştır.

PLANT DESIGN FOR RECOVERY OF THE WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENTS AND RESEARCH OF THE SYSTEM PARAMETERS

SUMMARY

In this study, a recovery plant has been designed for the waste electrical and electronic equipments according to system parameters, costs and revenue analysis. First of all, function structures and design principles have been determined for the recovery plant design. Waste electrical and electronic equipment types for the recovery have been identify, the components for the disassembly have been selected and material mass and material rates of the waste electrical and electronic equipments have been calculated after the disassembly stage. Then characteristic physical features of the material types and feasible separation methods and separators have been determined according to these characteristic physical features. Recovery factor transfer function (RFTF) have been use generate the unite model for each size reduction and separation machine. Alternative recycle scenarios have been developed for determining the optimum separation sequences and material recovery and material purity rates have been calculated for each alternative scenario. For the calculations have been used firstly MATHCAD program and then have been generated the unite model for each recycle system element and have been simulated each recycle scenario using MATLAB and SIMULINK programs. The results have been compared each other and optimum recycle scenario have been selected as a basis recycle design. Alternative improving scenarios have been developed for increase material recovery and purity rates of the basis recycle design. Material recovery and material purity rates have been calculated for each alternative improving scenario and the results have been compared than optimum recycle design have been determined according to results. Feasible size reduction and separation machines have been selected for each scenario and then investment cost, operating cost and material sell revenue have been calculated and compared. Repayment terms have been calculated for each scenario and recycle system have been designed for waste electrical and electronic equipments according to short repayment term.

1. GİRİŞ

Elektrikli ve elektronik ekipmanların imalatı tüm dünyada giderek artmaktadır. Bu konudaki teknolojik gelişim ve pazarın genişlemesi yeni ekipmanların yer edinmesini sürekli olarak hızlandırmış ve kayda değer oranda elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının artışına sebep olmuştur. Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları kentsel atıklardan farklıdır. Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları kentsel atıklar içinde en hızlı büyüyen katı atık cinsidir ve artış oranları kentsel atıklardan 3 kat daha büyüktür. Elektrikli ve elektronik ekipmanların mamul ömrü sonunda geri dönüşümü ve yeniden kullanılması bir ana problem olarak gün geçtikçe daha iyi tanınır hale gelmesine rağmen, günümüzde halen elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının toplama, işleme ve yenileme oranları düşük ve bu atıkların işlenmesi de çoğunlukla güçlükle yapılmaktadır

Elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü sadece atıkların bertarafı açısından değil aynı zamanda değerli materyallerin geri kazanımı açısından da önemlidir. Saf metaller yerine geri dönüştürülmüş materyallerin kullanılması öncelikle kayda değer enerji tasarrufu sağlamaktadır. Elektrikli ve elektronik atıklar içerdikleri tehlikeli materyaller nedeniyle eğer atık değerlendirilmesi safhasında doğru olarak işlenmez ise çevre sorunlarına sebep olabilirler. Birçok ülke bu gibi atıkların miktarının azaltılması ve yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve diğer yeniden değerlendirme şekillerinin kontrolü için kanun tasarısı düzenlemişlerdir.

Tehlikeli Atıkların Sınırlar Ötesi Taşınmasının ve Bertarafının Kontrolüne ilişkin Basel Sözleşmesi, bu sözleşmeyi imzalayan devletleri bağlayıcı bir uluslararası hukuk belgesidir. Tehlikeli atıklar konusunda tek küresel bakış açısına sahip Basel Sözleşmesi elektronik atıkları da etkileyen uluslar arası geçerli bir anlaşmadır. Türkiye, taraf olduğu Basel Sözleşmesinin getirdiği, atıkların çevreyle uyumlu yönetimi koşullarını sağlamakla yükümlü olduğundan sözleşmede belirtilen atık türlerinin söz konusu olduğu tüm sanayi dallarının bu sözleşmeden etkilenmeleri beklenmektedir.

Diğer yandan Avrupa Birliği mevzuatına uyum çalışmalarının devam ettiği bu dönemde, Avrupa Birliği'nin elektrikli ve elektronik ekipman atıkları (WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment) ve elektrikli ve elektronik ekipmanlarda bazı zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması (RoHS – The Restriction of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment), direktiflerine paralel olarak Türkiye'de orta vadede yürürlüğe girecek olan yasal düzenlemeler Türk Sanayisi açısından önem arz etmektedir.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları homojen olmamakla beraber aynı zamanda materyaller ve bileşenler bakımından da karmaşıktırlar. Ayrıca elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ayrıştırma işlemleriyle uzaklaştırılması gerekli olan farklı büyüklük ve şekilde çok miktarda zararlı bileşen içerirler. Uygun maliyetli ve çevre dostu bir geri dönüşüm sistemi geliştirmek için bu atıkların içerdiği değerli materyallerin ve zararlı maddelerin tanımlanması, saptaması ve dahası bu atıkların fiziksel özelliklerinin anlaşılması önemlidir. Bu materyallerin efektif bir şekilde ayrıştırılması için geliştirilecek olan bir mekanik geri dönüşüm sistemi bu materyallerin fiziksel karakteristiklerini temel alır. Bu nedenle bu çok özel materyal akışlarının karakteristiklerini derinlemesine bilmek zorunludur.

Bir mamulü oluşturan çeşitli materyallerin kimyasal yapılarını bozmadan endüstrinin ihtiyacı olan en uygun hammadde haline getirmek ve ekonomik değer taşıyan materyalleri ekonomik olmayan materyallerden ayırmak için farklı birçok mekanik ve fiziksel geri dönüşüm işlemleri uygulanır. Materyallerin endüstride kullanılabilmesi için kullanım alanlarının farklılığına göre değişik şartlar aranır. Materyal tanelerinin belirli bir büyüklükte olması, materyal kompozisyonunun içerdiği kıymetli element yüzdesinin belirli bir yüzdenin üstünde olması ve materyal kompozisyonunun içerdiği zararlı element yüzdesinin belirli bir yüzdenin altında olması gibi bu şartlar geri dönüşüm yöntemleriyle sağlanır.

Mekanik ve fiziksel geri dönüşüm metotları dışında flotasyon, pirometalurji, hidrometalurji ve elektrometalurji metotları da mevcuttur. Mekanik ve fiziksel ayırma yöntemleri diğer sayılan yöntemlere göre birim başına sabit yatırım ve enerji sarfiyatı daha düşük olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca mekanik ve fiziksel geri dönüşüm yöntemlerinde ayırma işlemleri için pahalı kimyasallar ve teknikler gerekmemekte çevre kirlenmesi yönünden daha uygun bir atık oluşmaktadır.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için elektrikli ve elektronik ekipman atığının türüne bağlı olarak; tersine tedarik, hasarlı veya hasarsız demontaj, kusurlu veya zararlı olan farklı bileşenlerin veya materyallerin ayrılması, boyut küçültme, ayırma ve işleminden arta kalan geri dönüşümsüz materyallerin güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi gibi bir takım adımlar izlenir.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının miktarının ve çeşitliliğinin sürekli olarak artması, özellikle de taşınabilir elektrikli ve elektronik ekipmanların sayısındaki artış, ve bunun doğal sonucu olarak bu ekipmanların atık miktarının da yeni ekipmanların pazarda yerini almasıyla orantılı olarak artması, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının çevre problemlerine neden olacak zararlı ve tehlikeli materyaller içermelerinin yanı sıra yeniden değerlendirilebilecek değerli materyaller de içermeleri, kanunların çok daha zorlaşması, atıklar için depolama alanlarının daha maliyetli olması, çevre bilincinin gelişmesi, bu ekipman atıklarının geri dönüşümü sırasında yalnızca değerli metallerin ayrılması için elverişli olan pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrometalurjik metotlar yerine fiziksel metotların kullanılmasının gerekliliği, bu atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanılmasıyla kayda değer enerji ve materyal tasarruflarının sağlanması ve bu atıkların toplanması, geri dönüşümü ve yeniden kullanılmasının diğer ülkelerde olduğu gibi Türkiye için de yakın bir gelecekte yasal bir zorunluluk haline geleceğinden dolayı elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir bir fiziksel ayırma teknolojisi gereklidir. Şu an için Türkiye’de elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının toplanması, geri dönüşümü ve yeniden değerlendirilmesi çok yeni bir konu olmasına rağmen, bu alandaki boşluk, ticari kaygılar, mühendislik yaklaşımları, ahlaki ve gelecekte oluşacak yasal sorumluluklar dikkate alındığında bu konunun bir çok önemli unsuru ihtiva ettiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanım için bir tesis konstrüksiyonun; sistem parametreleri, maliyet ve gelir analizleri göz önüne alınarak tasarımı yapılmıştır.

Öncelikli olarak Bölüm 2’de elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı ile ilgili temel kavramlar, tarihsel süreç ve uluslar arası ve ulusal yasal düzenlemeler ele alınmıştır.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının içerdiği materyallerin efektif bir şekilde ayrıştırılması için geliştirilecek olan bir mekanik geri dönüşüm sistemi bu materyallerin fiziksel karakteristiklerini temel alır. Bu amaçla elektrikli ve elektronik ekipmanların materyal bileşimleri, bu ekipmanların içerdikleri zararlı ve tehlikeli materyaller ve yine bu ekipmanlarda yer alan materyallerin fiziksel özellikleri Bölüm 3’de sunulmuştur.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının, tekrar kullanım olanakları bulunan değerli bileşenlerin ve kontrollü bertaraf edilmesi gerekli olan zararlı ve tehlikeli bileşenlerinin ve materyallerin ayrılarak geri dönüşüm işlemine hazırlanması için demontaj işlemi yapılması zorunludur. Bölüm 4’de elektrikli ve elektronik ekipmanların demontajı ele alınarak, demontaj yöntem planlaması, demontaj araçlarını gelişimi ve demontaj uygulamaları üzerinde durulmuştur.

Materyallerin geri dönüşüm işlemlerinde uygulanan fiziksel ayırma yöntemleri Bölüm 5’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Özellikle katı atıkların işlenmesinde ve cevher zenginleştirme işlemlerinde kullanılan ayırma yöntemleri ele alınarak, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının içerdikleri materyallerin ayrılmasında kullanılabilecek yöntemler hakkında bilgi verilmiştir.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için tesis tasarımında; geri kazanım stratejilerinin belirlenmesini ve kütleli geri dönüşüm yöntemi prensiplerini içeren yaklaşımlar Bölüm 6’da ele alınmıştır.

Bölüm 7’de öncelikli olarak geri kazanım tesisi tasarımı için fonksiyon strüktürleri ve kabul edilen tasarım prensipleri tespit edilmiştir. Geri kazanımı hedeflenen elektrikli ve elektronik ekipman atığı tipleri belirlenerek, demontajı yapılacak bileşenler seçilmiş ve demontaj sonrasında kalan ekipman atığının içerdiği materyal miktarları ve oranları hesaplanmıştır. Akabinde bu materyaller tiplerinin ayırt edici fiziksel özellikleri ve bu özelliklere dayanan uygulanabilir ayırma yöntemleri ve ayırma makinesi alternatifleri tespit edilmiştir. Her bir boyut küçültme ve ayırma makinesi için geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu kullanılarak birim modelleri oluşturulmuştur. Geri dönüşüm sistemi için en uygun ayırıcı sıralamasının belirlenmesi amacıyla farklı senaryolar geliştirilmiş ve her bir senaryoda elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalarda öncelikli olarak MATHCAD programı kullanılmış ve akabinde MATLAB ve SIMULINK programları kullanılarak geri dönüşüm sisteminin elemanları için birim modeller oluşturulmuş ve her bir senaryo için sistem benzetimleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en uygun senaryo temel sistem tasarımı olarak kabul edilmiştir. Tespit edilen temel sistem tasarımının geri dönüşüm ve saflık oranlarının iyileştirilmesi amacıyla, temel sistem tasarımı üzerinden farklı senaryolar geliştirilerek, her bir iyileştirme senaryosu için elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geri kazanım ve saflık oranları için en uygun tasarım belirlenmiştir. Geliştirilen senaryolar için uygun makine seçimleri yapılarak, senaryoların ilk yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri ve geri dönüşüm sonucunda elde edilecek materyal satışından elde edilecek gelirler hesaplanarak karşılaştırılmış ve yatırım maliyeti geri ödeme süreleri belirlenmiştir. Geri ödeme süresi en uygun tasarım seçilerek, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanım için tesis konstrüksiyonu yapılmıştır.

Bulunan sonuçlar ve yorumlar Bölüm 8’de sunulmuştur.

2. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMAN ATIKLARI

2.1 Kavramlar ve Tanımlar

Bu çalışmada geçen elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı ile ilgili önemli kavramlar ve bu kavramlara ilişkin tanımlar, farklı kaynaklardan derlenerek bu bölümde sunulmuştur.

Atık (Waste): Bertaraf edilen, bertaraf edilmesi tasarlanan veya bertaraf edilmesi gerekli olan maddeler ve materyallerdir [1,2]. AB 75/442/ECC Waste direktifi ve T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı 25755 sayılı Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre atıkların sınıflandırılması EK A.1'de verilmiştir [1,2].

Elektrikli ve Elektronik Ekipman - EEE (Electrical and Electronic Equipment - EEE): Asıl işlevini yerine getirmek için elektrik akımına veya elektromanyetik alana ihtiyaç duyan ve bu gibi akımı ve alanı üreten, ileten ve ölçen ve de 1000 Volt alternatif akım veya 1500 Volt doğru akım kullanımını geçmeyecek şekilde tasarlanmış ekipmanlardır [3-6]. AB 2002/96/EC WEEE direktifine göre elektrikli ve elektronik ekipmanların sınıflandırılması EK A.2'de verilmiştir [4,7].

Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atığı - EEEA (Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE): Tüm bileşenleri, alt montajları ve atıldığında mamulün bir parçası olan sarf malzemeleri dâhil olmak üzere atık olarak tanımlanan elektrikli veya elektronik ekipmandır [3,4].

Tekrar Kullanım (Reuse): Atıkların toplama ve temizleme dışında hiçbir işleme tabi tutulmadan aynı şekli ile ekonomik ömrü doluncaya kadar defalarca kullanılmasıdır [8]. Elektrikli elektronik ekipmanların bir takım bileşenlerinin aynı amaç doğrultusunda tekrar kullanılmasıdır [9].

Geri Dönüşüm (Recycling): Atıkların bir üretim prosedürüne tabi tutularak, orijinal amaçlı ya da enerji geri kazanımı hariç olmak üzere, organik geri dönüşüm dahil diğer amaçlar için yeniden işlenmesidir [8]. Parçanın ömrü tamamlandığında malzemelerinin tekrar hammadde olarak üretim sürecine kazandırılabilmesi işlemleridir [9].

Geri Kazanım (Recovery): Tekrar kullanım ve geri dönüşümü de kapsayan; atıkların özelliklerinden yararlanılarak içindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal veya biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesidir [8-10]. Tekrar kullanım ve geri dönüşüm işlemlerinin yanı sıra enerji elde edilmesi amacıyla yapılan yakma operasyonunu da kapsayan tüm işlemlerdir [9]. AB 75/442/ECC Waste direktifine göre uygulamada karşılaşılan tüm geri kazanım işlemleri EK A.3’de verilmiştir [1].

Bertaraf (Disposal): Katı atıkların, konut, işyeri gibi üretildikleri yerlerde geçici olarak biriktirilmesi, bu yerlerden toplanması, taşınması, geri kazanılması gibi işlemlerden sonra, çevre ve insan sağlığı açısından zararsız hale getirilmesi ve ekonomiye katkı sağlanması amacıyla kompostlaştırma, enerji kazanmak üzere yakma ve/veya düzenli depolama işlemlerinin tümüdür [8,10]. AB 75/442/ECC Waste direktifine göre uygulamada karşılaşılan tüm bertaraf işlemleri EK A.4’de verilmiştir [1].

Atık İşleme (Waste Treatment): Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının tesise taşınmasından sonraki her türlü temizleme, demontaj, parçalama, geri kazanım veya bertaraf faaliyetleri ve elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının diğer her tür geri kazanım ve/veya bertaraf işlerinin yapılmasıdır [4].

Atık İşleme Tesisi (Waste Treatment Facility): Geri kazanma tesisi, kompost veya yakma tesisi gibi katı atıklardan tekrar kullanılabilir madde veya enerji elde etmek, katı atıkların hacmini küçültmek veya çevreye zararını azaltmak maksadı ile kurulan, inşa edilen tesis ve yapılarıdır [8].

İmalatçı (Producer): Faaliyetleri süresince atık oluşumuna sebep olan kişi veya kuruluşlardır [8]. Uzaktan haberleşme vasıtasıyla satış yapanlar dahil olmak üzere kullanılan satış tekniğine bağlı olmaksızın; kendi markası ile elektrikli elektronik ekipman imal eden ve satan, başka imalatçılar tarafından imal edilen ancak üzerinde imal edenin markası bulunmayan cihazları kendi markaları ile satan, profesyonel anlamda elektrikli elektronik ekipman ithalatı yada ihracatı yapan kişi yada kuruluşlardır [4-6].

Tersine Tedarik veya Kazanım (Acquisition): Geri kazanım sürecinin ilk adımı olan bu aşamada tersine imalat için mamul tipleri seçilir ve mamuller saptılır, toplanır ve tesislere taşınır [10].

Keşif (Assessment): Geri kazanım sürecinin ikinci adımı olan bu aşamada giren mamullerin değerleri tahmin edilir ve süreç (proses) çıktıları belirlenir [10].

Demontaj (Disassembly): Geri kazanım sürecinin üçüncü adımı olan bu aşamada mamullerin onarım, yenileme, ıslah edilme veya geri dönüşüm için fiziksel olarak parçalara ayrılmasıdır [10].

Hasarsız Demontaj (Disaggregation): Mamulün ve mamulün tüm bileşenlerinin tasarım değerlerini koruyacak şekilde mamulün hassas olarak demontaj edilmesidir [10].

Hasarlı Demontaj (Dismantling): Mamulün bazı bileşenlerinin tasarım değerlerinin korunarak ve geri kalan bileşenlerinin tahrip edilerek demontaj edilmesidir [10].

Tam Demontaj (Full Disassembly): Mamulün tüm bileşenlerinin demontaj yöntemleri kullanılarak %100 geri dönüşüm oranının sağlanmasıdır [9].

Kısmi Demontaj (Partial Disassembly): Mamulün birtakım bileşenlerinin demontaj yöntemleri kullanılarak %100'ün altında bir geri dönüşüm oranı sağlanacak şekilde yapılan demontaj işlemleridir [9].

Alt Demontaj (Sub Disassembly): Bir mamulün belli sayıda bileşenlerinin oluşturduğu ve kendi içinde demontaj gerektiren parça grubudur [9].

Parçalama (Demolition): Tüm tasarım değerlerinin tahrip edilerek mamulün demontaj edilmesidir [10].

Zararlı ve Tehlikeli Atık (Hazardous and Dangerous Waste): Patlayıcı, parlayıcı, kendiliğinden yanmaya müsait, suyla temas halinde parlayıcı gazlar çıkaran, oksitleyici, organik peroksit içerikli, zehirli koroziv, hava ve su ile temasında toksik gaz bırakan, toksik ve ekotoksik özellik taşıyan ve zararlı atık olduğu onaylanan atıklardır [8].

Atık Yönetimi (Waste Management): Atığın kaynağında azaltılması, özelliğine göre ayrılması, toplanması, geçici depolanması, ara depolanması, geri kazanılması, taşınması, bertaraf edilmesi ve bertaraf işlemleri sonrası kontrolü ve benzeri işlemleridir [2].

Gömme (Landfilling): En son tercih edilen ve geri kazanım operasyonlarının hiçbirinin uygulanamaması durumunda kullanılan atık yok etme işlemidir [9].

Tekrar Kullanım Oranı (Reusing Rate): Mamulden tekrar kullanılmak üzere demonte edilmiş olan bileşenlerin ürün ağırlığına oranıdır. Mamulün tamamının tekrar kullanılması bu hesaplamalara dâhil edilmez [9].

Geri Dönüşüm Oranı (Recycling Rate): Geri dönüşüm işlemleri sonucunda üründen ayrılan ve geri dönüştürülme olanağı olan malzemelerin ürün ağırlığına oranıdır. Tekrar kullanım oranının da geri dönüşüm oranına eklenmesi öngörülmektedir [9].

Geri Kazanım Oranı (Recovery Rate): Tekrar kullanım ve geri dönüşüm operasyonlarının yanı sıra yakarak enerji elde etme işlemi ile geri kazanılan malzemelerin ürün ağırlığına oranıdır [9].

Hasarlı Geri Dönüşüm (Destructive Recovery): Geri dönüşüm işlemlerinin ürünün bileşenlerine hasar vererek tekrar kullanım seçeneğine olanak tanımayacak biçimde yapılmasıdır [9].

Hasarsız Geri Dönüşüm (Nondestructive Recovery): Geri dönüşüm işlemlerinin ürünün bileşenlerine hasar vermeden tekrar kullanım seçeneğine olanak tanıyacak biçimde yapılmasıdır [9].

Otomatik Demontaj (Automated Disassembly): Manüel işlem olmadan tamamen otomatik gerçekleştirilen demontaj işlemleridir [9].

Takım Yardımıyla Demontaj (Mechanised Disassembly): Motorlu olmayan herhangi bir takım yardımıyla (tornavida, yan keski, pense vb.) ve manüel gerçekleştirilen demontajdır [9].

Mekanik Takım Yardımıyla Demontaj (Partial Mechanised Disassembly): Motorlu takımlar yardımıyla manüel olarak gerçekleştirilen demontaj işlemidir [9].

Takım Desteği Olmadan Yapılan Demontaj (Manual Disassembly): Herhangi bir takım kullanmadan tamamen elle yapılan demontaj işlemidir [9].

2.2 Tarihsel Süreç ve Yasal Düzenlemeler

Elektrikli ve elektronik ekipmanların imalatı tüm dünyada giderek artmaktadır. Bu konudaki teknolojik gelişim ve pazarın genişlemesi yeni ekipmanların yer edinmesini sürekli olarak hızlandırmış ve kayda değer oranda elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının artışına sebep olmuştur. Günümüzde elektrikli ve elektronik ekipmanların mamul ömür çevrimleri yalnızca birkaç yıldır. Elektrikli ve elektronik ekipmanların

mamul ömürlerine etki eden faktörlerin başında tüketicilerin teknolojik yenilik beklentileri gelmektedir. Burada da karşımıza mamul için fonksiyonel ömür kavramı dışında, memulun teknolojik yenilik seviyesini ifade eden teknolojik ömür kavramı çıkar. Bir çok elektrikli ve elektronik ekipman fonksiyonel ömürlerini tamamlamamalarına rağmen teknolojik ömürlerini tamamladıkları için atık olarak sınıflandırılmaktadırlar. Tablo 2.1’de beş farklı elektrikli ve elektronik ekipman için sürdürülen ve geri dönüşüm olanaklarının araştırıldığı bir çalışmaya ait veriler karşılaştırmalı olarak verilmiştir [11]. Ayrıca Tablo 2.2’de bazı elektrikli ve elektronik ekipmanlar için fonksiyonel ve teknolojik ömür karşılaştırması verilmektedir [12].

Tablo 2.1: Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlara İlişkin Farklı Ömürler

Değişkenler	HP Renkli Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı	XEROX Dijital Fotokopi Makinesi	TOSHIBA Çamaşır Makinesi	PHILIPS 21” Renkli TV	PANASONIC Elektrikli Süpürge
Yıpranma Süresi (yıl)	5	5	10	15	8
Tasarım Süresi (yıl)	1	2	2	3	1
Teknoloji Süresi (yıl)	1	2	5	6	5
Değişim Süresi (yıl)	2	4	10	14	7
Materyal Sayısı	Çok	Orta	Az	Çok	Az
Parça Sayısı	Orta	Çok	Az	Çok	Az
Modül Sayısı	5	7	4	5	4
Boyut	Orta	Büyük	Büyük	Orta	Orta

Tablo 2.2: Fonksiyonel ve Teknolojik Ömürlerinin Karşılaştırılması

Mamul	Fonksiyonel Ömür (Yıl)	Teknolojik Ömür (Yıl)
Masa Üstü Bilgisayar	10	2
LCD Monitör	5	2
CD Kaydedici	7	2,5
Ses Sistemi	9	3,5
Televizyon Seti	11	4
Kablosuz Telefon	10	5
Çamaşır Makinesi	10	6

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının miktarlarının artış oranları ile bu ekipmanların imalat ve kullanım miktarlarının artış oranları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu ekipmanların imalat miktarlarındaki artış oranları ele alınarak, atık miktarının büyüklüğü anlaşılabilir. Çeşitli kaynaklardan elde edilen istatistiksel veriler bu bölümde sunulmuştur. Sırasıyla Tablo 2.3’de bazı ülkelerin sahip oldukları mobil telefon adetleri [13], Tablo 2.4’de dünyada kullanımdaki bilgisayar adedi ve artış oranları [14,15] ve Tablo 2.5’de 2000 yılı itibariyle Batı Avrupa’daki elektrikli ve elektronik ekipman kullanımı miktarları [16] görülmektedir.

Tablo 2.3: Ülkelerin Sahip Olduğu Mobil Telefon Adetleri

Ülke veya Birlik	Mobil Telefon Adedi	Nüfus (2005 Tahmini)	Oran	Yıl
Avrupa Birliği	314.644.700	456.953.258	0,69	2002
Çin	269.000.000	1.306.313.812	0,21	2003
ABD	158.722.000	295.734.134	0,54	2003
Japonya	86.658.600	127.417.244	0,68	2003
Almanya	64.800.000	82.431.390	0,79	2003
İtalya	55.918.000	58.103.033	0,96	2003
İngiltere	49.677.000	60.441.457	0,82	2002
Brezilya	46.373.300	186.112.794	0,25	2003
Fransa	41.683.100	60.656.178	0,69	2003
İspanya	37.506.700	40.341.462	0,93	2003
Türkiye	27.887.500	69.660.559	0,40	2003
Tayland	26.500.000	64.185.502	0,41	2005
Hindistan	26.154.400	1.080.264.388	0,02	2003
Tayvan	25.089.600	22.894.384	1,10	2003
Rusya	17.608.800	143.420.309	0,12	2002
Polonya	17.401.000	38.557.984	0,45	2003
Güney Afrika	16.860.000	44.344.136	0,38	2003
Filipinler	15.201.000	87.857.473	0,17	2002

Tablo 2.4: Kullanımdaki Bilgisayar Adetleri ve Artış Oranları

Ülke	1991	1993	1996	1991–1996 Değişim (%)	1993–2000 Değişim (%)
Dünya Geneli	136,90	186,90	301,00	119,9	181
Çin	0,67	1,30	4,21	528,4	1052
Hindistan	0,43	0,83	2,12	393,0	604
Rusya	0,65	1,40	3,64	460,0	580
Brezilya	0,62	1,30	3,15	408,1	565
Endonezya	0,26	0,52	1,24	376,9	552
Ukrayna	0,14	0,30	0,71	407,1	525
Polonya	0,44	0,76	1,54	136,9	462
Güney Kore	1,00	1,90	4,57	357,0	415
Tayland	0,30	0,58	1,36	353,3	371
Malezya	0,23	0,46	1,07	365,2	368
Güney Afrika	0,33	0,56	1,12	239,4	366
Arjantin	0,29	0,55	1,09	275,9	330
Hong Kong	0,33	0,59	1,16	251,5	296
Japonya	9,20	12,60	22,11	140,3	284
Portekiz	0,33	0,51	0,90	172,7	258
İsrail	0,33	0,46	0,92	178,8	256
İtalya	3,70	5,00	7,86	112,4	247
İspanya	1,40	2,30	4,16	197,1	245
Avusturya	0,64	0,92	1,47	129,7	242
Venezüella	0,25	0,40	0,74	196,0	234
Finlandiya	0,60	0,90	1,49	148,3	221
Norveç	0,52	0,78	1,33	155,8	218
İsviçre	0,74	1,00	1,67	125,7	211
Hollanda	1,60	2,40	3,87	141,9	199
Türkiye	0,38	0,68	1,06	178,9	198
Avustralya	2,10	3,40	5,73	172,9	190
Almanya	7,30	10,40	16,20	120,9	189
Kanada	3,70	5,20	8,54	130,8	186
Fransa	5,70	7,50	11,74	106,0	183
İngiltere	7,20	9,60	14,51	101,5	169
ABD	62,00	76,50	107,20	72,9	96

Tablo 2.5: 2000 Yılı İtibariyle Batı Avrupa’da EEE Kullanımı

Elektrikli ve Elektronik Ekipman Sınıfı		Miktar
1	Büyük ev aletleri	2.826.000
2	Küçük ev aletleri	312.000
3	IT ve telekomünikasyon ekipmanları	2.279.000
4	Tüketici ekipmanları	916.000
5	Aydınlatma ekipmanları	93.000
6	Elektrik ve Elektronik aletler	97.000
7	Oyuncaklar, boş vakit ve spor ekipmanları	11.000
8	Tıbbi aygıtlar	125.000
9	İzleme ve kontrol aygıtları	5.000
10	Otomatik dağıtıcılar	49.000

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları kentsel atıklardan farklıdır. Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları kentsel atıklar içinde en hızlı büyüyen katı atık cinsidir ve artış oranları kentsel atıklardan 3 kat daha büyüktür [17]. 1998’de Batı Avrupa’da tespit edilen 6 milyon ton elektrikli ve elektronik atığın yıllık olarak en az %3 – %5 oranında artması beklenmektedir [3]. Dünyada her yıl 20 – 50 milyon ton elektrikli ve elektronik ekipman atığı olduğu tahmin edilmektedir [17]. ABD’de 1997 – 2007 yılları arasında 500 milyondan fazla kişisel bilgisayarın kullanılamaz hale geleceği ve 2010 yılında 610 milyon mobil telefonun bertaraf edileceği tahmin edilmektedir [17]. Elektrikli ve elektronik ekipmanların mamul ömrü sonunda geri dönüşümü ve yeniden kullanılması bir ana problem olarak gün geçtikçe daha iyi tanınır hale gelmesine rağmen, günümüzde halen elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının toplama, işleme ve yenileme oranları düşük ve bu atıkların işlenmesi de çoğunlukla güçlüklerle yapılmaktadır [18]. Yapılan çalışmalar ABD’de kullanılmış elektrikli ve elektronik ekipmanların %75’inin depolandığını, %15’inin gömüldüğünü, %7’sinin tekrar satıldığını ve yalnızca %3’ünün yeniden değerlendirildiğini ortaya koymuştur [19]. Tablo 2.6’da bazı ülkelere ait yıllık elektrikli ve elektronik ekipman atığı oluşum miktarları görülmektedir [14].

Türkiye’de elektrikli ve elektronik ekipman atığı oluşum miktarının tespit edilmesi oldukça güçtür. Bu konuda başta böyle bir tanımlamanın yapılmamış olması, mevcut politikalar ve atıklarla ilgili yapılan çalışmalarda bu konuda bir sınıflandırma yapılmamış olmaması, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının toplam atık oluşum miktarı içerisindeki payının belirlenmesine imkan tanımamaktadır. Türkiye’de elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının oluşum miktarı, bu ekipmanların imalat ve kullanım oranları ele alınarak anlaşılabilir. Bu amaçla çeşitli resmi ve özel kuruluşlar ile imalatçı birliklerinden elde edilen veriler bu bölümde sunulmuştur.

Tablo 2.6: Bazı Ülkelere Ait EEEA Oluşum Miktarları

Ülke	Toplam (ton.yıl ⁻¹)	E-atık Olarak Kabul Edilen Cihaz Sınıfları	Yıl
İsviçre	66.042	Büro ve iletişim cihazları, eğlence amaçlı cihazlar, büyük ve küçük ev aletleri, soğutucular	2003
Almanya	1.100.000	Büro ve iletişim cihazları, eğlence amaçlı cihazlar, büyük ve küçük ev aletleri, soğutucular	2005
İngiltere	915.000	Büro ve iletişim cihazları, eğlence amaçlı cihazlar, büyük ve küçük ev aletleri, soğutucular	1998
ABD	2.124.400	Görüntü ve ses sistemleri, bilgisayar ve iletişim cihazları	2000
Tayvan	14.036	Bilgisayarlar, elektrikli ev aletleri (TV setleri, çamaşır makineleri, klimalar, soğutucular)	2003
Tayland	60.000	Soğutucular, klimalar, TV setleri, çamaşır makineleri, bilgisayarlar	2003
Danimarka	118.000	Soğutucular dahil olmak üzere elektrikli ve elektronik cihazlar	1997
Kanada	67.000	Bilgisayar donanımları (bilgisayarlar, yazıcılar vb.) ve kahverengi eşyalar	2005

Elektrikli ve elektronik ekipman gruplarının hepsi için veri elde edilememiştir. Ana ekipman grupları olarak adlandırabileceğimiz büyük beyaz eşya, kahverengi eşya ve gri eşya gruplarına ait rakamlar Türkiye’de hızlı bir şekilde elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının oluştuğunu göstermektedir. Bu nedenle bu atıkların mamul ömür sonunda geri kazanımı, geri kazanımı mümkün olmayan zararlı ve tehlikeli atıkların ise kontrollü bir şekilde bertaraf edilmesi için projelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Dünya Bankası verilerine göre Türkiye’de her 1000 kişiye düşen sabit hat ve mobil telefon sayısı 2000 yılında 528,8 iken bu sayı 2003 yılı itibariyle 661,9 olarak kaydedilmiş ve Türkiye’de her 1000 kişiye düşen kişisel bilgisayar sayısı 2000 yılı itibariyle 38,3 olarak verilmiştir [20]. ABD Merkezi Haber Alma Teşkilatı (CIA - Central Intelligence Agency) 2003 yılı verilerine göre kullarındaki sabit telefon hatları sayısı 18.916.700 iken mobil telefon sayısı 27.887.500 olarak verilmiştir [13]. Tablo 2.7’de Türkiye’de 1982-2004 dönemine ait renkli televizyon imalatı adetleri [21,22], Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da ise sırasıyla Türkiye’de başlıca dayanıklı tüketim mallarının imalat ve satış miktarları [21,22] görülmektedir.

Tablo 2.7: Türkiye’de 1982–2004 Dönemi Renkli Televizyon İmalatı (×1000)

Yıllar	Adet	Endeks	Yıllar	Adet	Endeks	Yıllar	Adet	Endeks
1982	63,5	100	1990	2130,0	3354	1998	5794,7	9126
1983	368,7	581	1991	2722,5	4287	1999	6941,0	10931
1984	847,6	1335	1992	2562,0	4035	2000	8788,6	13840
1985	1128,1	1777	1993	1922,0	3027	2001	8025,1	12638
1986	879,7	1385	1994	1528,3	2407	2002	12535,4	19741
1987	680,0	1071	1995	1859,3	2928	2003	15278,7	24061
1988	762,9	1201	1996	2700,0	4252	2004	20459,3	32219
1989	1110,0	1748	1997	4657,0	7334			

Tablo 2.8: Türkiye’de Dayanıklı Tüketim Mallarının İmalat Miktarları

Mamul	Miktar			Yüzde Değişme		
	Yıllık			Yıllık		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004
Buzdolabı	3.164.922	4.123.501	4.863.762	33,4	30,3	18,0
Çamaşır Makinesi	1.684.687	2.412.235	3.341.171	64,8	43,2	38,5
Fırın (LPG)	906.254	1.553.830	1.872.203	37,1	71,5	20,5
Elektrik Süpürgesi	781.636	613.523	1.017.318	32,3	-21,5	65,8
Dikiş Makinesi	31.974	32.581	25.512	12,1	1,9	-21,7
Televizyon	12.462.924	15.035.590	20.345.757	55,3	20,6	35,3
Video	27.518	9.607	97.647	509,6	-65,1	916,4
Müzik Seti	54.256	70.499	178.604	169,8	29,9	153,3
Bulaşık Makinesi	351.850	399.057	660.753	57,4	13,4	65,6

Tablo 2.9: Türkiye’de Dayanıklı Tüketim Mallarının Satış Miktarları

Mamul	Miktar			Yüzde Değişme		
	Yıllık			Yıllık		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004
Buzdolabı	3.068.066	3.689.782	4.635.810	38,5	20,3	25,6
Çamaşır Makinesi	1.630.604	2.158.806	3.297.965	54,6	32,4	52,8
Fırın (LPG)	853.459	1.561.318	1.884.623	36,8	82,9	20,7
Elektrik Süpürgesi	822.774	780.684	1.123.329	31,8	-5,1	43,9
Dikiş Makinesi	26.859	31.716	22.518	23,9	18,1	-29,0
Televizyon	12.346.037	15.215.585	20.215.900	53,3	23,2	32,9
Video	28.870	9.642	96.268	628,5	-66,6	898,4
Müzik Seti	61.208	77.466	180.961	126,1	26,6	133,6
Bulaşık Makinesi	341.417	400.416	617.052	50,1	17,3	54,1

Türkiye’de beyaz eşya talebinin %90’ı yurt içinde faaliyet gösteren imalatçı firmalar tarafından karşılanmakla beraber, Eylül 2005 yılı verilerine göre beyaz eşya imalatının %64’den fazlası 90 ülkeye ihraç edilmekte ve bu ihracatın %80’ini ise Avrupa Birliği ülkelerine yapılmaktadır. Beyaz eşya sektörü buzdolabında 6 milyon, çamaşır makinesinde 5 milyon, fırında 2,5 milyon ve bulaşık makinesinde de 1 milyon adet olmak üzere yıllık yaklaşık 15 milyon adetlik kurulu kapasiteye sahiptir [23]. İtalya 30 milyon üzerinde, Almanya 13 milyon adet beyaz eşya imal ederken Türkiye 12 milyon adet imalatıyla Avrupa’da 3. en büyük imalatçı konumundadır ve %20’lik pazar payına ulaşmıştır [23]. Türkiye’de beyaz eşya sektöründe ana mamul imalatında faaliyet gösteren yerli firmalar ve markaları Arçelik (Arçelik, Beko, Altus), Vestel ve Türk Demirdöküm, yabancı sermayeli firmalar ve markalar ise BSH (Bosch, Siemens, Profilo) ve Indesit Company (Ariston, Indesit) firmaları ve markalarıdır. Bunlardan Arçelik buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın ve elektrikli süpürge; BSH buzdolabı, çamaşır makinesi ve fırın; Vestel ise buzdolabı ve çamaşır makinesi imalatçısıdır [23].

TÜRKBESD Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği üyesi firmaların (Arçelik, BSH, Indesit Company, Türk Demirdöküm, TEBA ve Vestel Beyaz Eşya) 1995 – 2005 (9 Aylık) yılları arasında gerçekleştirdikleri imalat rakamları Tablo 2.10’da, ihracat rakamları Tablo 2.11’de, ithalat rakamları Tablo 2.12’de ve iç satış rakamları ise Tablo 2.13’de verilmiştir [23,24]. Ayrıca Tablo 2.14’de ihracat ve ithalat rakamlarının karşılaştırılması verilmiştir [23,24].

Tablo 2.10: Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İmalat Rakamları (×1000)

Yıl	Buzdolabı	Çamaşır M.	Bulaşık M.	Fırın	Toplam	Değişim
1995	1.637	828	236	589	3.290	100
1996	1.638	993	255	735	3.621	110
1997	1.850	1.454	447	921	4.672	142
1998	1.875	1.375	318	907	4.475	136
1999	2.139	1.219	325	866	4.549	138
2000	2.446	1.343	351	1.048	5.188	158
2001	2.483	1.030	223	1.096	4.832	147
2002	3.318	1.654	346	1.341	6.659	202
2003	4.286	2.459	399	1.574	8.718	265
2004	5.308	3.963	657	1.715	11.643	354
2005	4.242	3.084	556	1.177	9.059	

Tablo 2.11: Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İhracat Rakamları (×1000)

Yıl	Buzdolabı	Çamaşır M.	Bulaşık M.	Fırın	Toplam	Değişim
1995	802	41	2	141	986	100
1996	693	53	7	217	970	98
1997	785	87	110	292	1.274	129
1998	818	121	91	355	1.385	140
1999	1.046	180	88	450	1.764	179
2000	1.089	273	83	557	2.002	203
2001	1.530	444	66	792	2.832	287
2002	2.247	989	149	997	4.382	444
2003	3.034	1.550	239	1.189	6.012	610
2004	3.361	2.236	288	1.326	7.211	731
2005	3.062	1.798	255	763	5.878	

Tablo 2.12: Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İthalat Rakamları (×1000)

	Buzdolabı	Çamaşır M.	Bulaşık M.	Fırın	Toplam	Değişim
1995	39	6	3	0	48	100
1996	77	114	61	8	260	542
1997	200	164	118	10	492	1025
1998	303	253	198	32	786	1638
1999	278	208	188	38	712	1483
2000	223	295	224	57	799	1665
2001	91	169	101	28	389	810
2002	51	159	98	29	337	702
2003	41	191	102	26	360	750
2004	44	187	177	32	440	917
2005	36	89	140	36	301	

Tablo 2.13: Türk Beyaz Eşya Sektörüne Ait İç Satış Rakamları (×1000)

	Buzdolabı	Çamaşır M.	Bulaşık M.	Fırın	Toplam	Değişim
1995	834	786	241	445	2.306	100
1996	969	1.067	319	519	2.874	125
1997	1.231	1.464	427	608	3.730	162
1998	1.407	1.494	478	587	3.966	172
1999	1.258	1.222	406	474	3.360	146
2000	1.468	1.417	503	536	3.924	170
2001	1.018	795	265	337	2.415	105
2002	1.088	824	282	339	2.533	110
2003	1.362	1.076	261	378	3.077	133
2004	2.004	1.917	526	599	5.046	219
2005	1.632	1.394	472	472	3.970	

Tablo 2.14: Türk Beyaz Eşya Sektörü İhracat ve İthalat Rakamları (×1000)

	İhracat	İthalat	İthalat/İhracat [%]
1995	986	48	5
1996	970	260	27
1997	1.274	492	39
1998	1.385	786	57
1999	1.764	712	40
2000	2.002	799	40
2001	2.832	389	14
2002	4.382	337	8
2003	6.012	360	6
2004	7.211	440	6
2005	5.878	301	

Büyük mamuller yani buzdolabı, çamaşır makinesi, fırın ve bulaşık makinesi gibi mamuller, ağırlık ve hacimlerinden dolayı nakliye bedellerinin yüksekliğine bağlı olarak mümkün olduğunca yerel imal edilmekte olup yakın çevrelere ihraç edilmektedir. Buna bağlı olarak firmalar da büyümelerini şirket, marka ve pazar satın alarak yapmaktadırlar [23]. Bu konuda faaliyet gösteren dünyada çapında büyük belli başlı firmalar İsveç kökenli Electrolux (Elektrolux, Frigidaire, White Westinghouse, Kelvinator, AEG, Zanussi, Rex, Vanker, Zoppas), Whirlpool (Whirlpool, Kitchenaid, Bauchnecht, Consul, Brastemp, Laden, İgnis, Rober, Supermatic), General Electric ve Alman orijinli BSH grubudur. Avrupa pazarında yerli şirketlerden Arçelik de Indesit Company, Candy gibi şirketlerle birlikte Avrupa’da ki en büyük beş şirket arasında yer almaktadır [23]. TESİD Türk Elektronik Sanayicileri Derneği verilerine göre 2004 yılı itibarıyla Türk elektronik sanayisinin toplam ithalat ve ihracatının ülkelere göre dağılımı Tablo 2.15’de ve Türk elektronik sanayisinin imalat, ithalat, ihracat rakamlarının alt sektörler dağılımları sırasıyla Tablo 2.16, Tablo 2.17 ve Tablo 2.18’de verilmiştir [25]. Ayrıca yine TESİD verilerine göre Türk elektronik sanayisinin alt sektörleri ve bu sektörlerine ait detaylı ithalat ve ihracat rakamları EK B’de verilmiştir [25].

Tablo 2.15: Türk Elektronik Sanayisinin İthalat ve İhracat Oranları (Bin \$)

Grup Adı	Oran (%)	İthalat	Oran (%)	İhracat
Kuzey Amerika	5.73	512.255	0.51	20.582
Avrupa Birliği	47.11	4.212.043	77.87	3.137.722
Diğer Avrupa	1.17	104.826	1.67	67.096
Kuzey Afrika Ortadoğu	2.38	212.848	8.82	355.390
Kafkaslar ve Orta Asya	0.01	574	1.83	73.598
Rusya ve Diğer	0.04	3.884	2.38	95.824
Güney Amerika	0.64	57.362	0.03	1.204
Uzak Doğu	41.29	3.691.003	0.86	34.452
Diğer	1.63	145.344	6.03	243.461

Tablo 2.16: Türk Elektronik Sanayisinin İmalat Rakamları

Alt Sektörler	İmalat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Bileşenler	105.000	125.000	225.000
Tüketim Cihazları	1.421.500	2.211.500	4.293.500
Telekomünikasyon Cihazları	452.210	412.000	975.000
Diğer Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar	230.000	280.500	460.000
Askeri Elektronik	240.000	278.950	433.400
Bilgisayar	215.000	236.280	427.740
Toplam	2.663.710	3.544.230	6.814.640

Tablo 2.17: Türk Elektronik Sanayisinin İthalat Rakamları

Alt Sektörler	İthalat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Bileşenler	1.416.640	1.735.048	2.309.962
Tüketim Cihazları	405.666	617.070	991.736
Telekomünikasyon Cihazları	901.134	1.096.849	1.911.027
Diğer Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar	881.544	1.260.567	2.182.932
Askeri Elektronik*	-	-	-
Bilgisayar	880.098	1.335.569	1.544.482
Toplam	4.485.082	6.045.103	8.940.139

Tablo 2.18: Türk Elektronik Sanayisinin İhracat Rakamları

Alt Sektörler	İhracat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Bileşenler	60.922	72.252	103.509
Tüketim Cihazları	1.570.902	1.937.886	2.913.488
Telekomünikasyon Cihazları	547.906	537.407	603.437
Diğer Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar	176.509	203.161	310.864
Askeri Elektronik	22.405	50.521	55.810
Bilgisayar	32.884	31.852	42.221
Toplam	2.411.528	2.833.079	4.029.329

* Askeri elektronik sanayi ithalat rakamları temin edilememiştir.

Bussiness Communications Company Inc.'in Haziran 2005 tarihli Elektronik Atık Kazanma İşi Raporuna göre dünya genelinde elektronik atık pazarı 2004 yılında 7,2 milyar \$ seviyesinden ortalama yıllık %8,8 büyüme hızı ile artarak 2009 yılında 11 milyar \$ seviyesine çıkacağı öngörülmektedir. 2004 – 2009 yılları arasında küresel elektrikli ve elektronik ekipman atığı pazarında geri dönüştürülen metal pazarı 2004 yılında 4,236 milyar \$ seviyesinden yıllık %8.1 artışla 2009 yılında 6,245 milyar \$ seviyesine çıkacağı, geri dönüştürülen plastik pazarı 2004 yılında 2,552 milyar \$ seviyesinden yıllık %10.2 artışla 2009 yılında 4,157 milyar \$ seviyesine çıkacağı, geri dönüştürülen cam/silika pazarı 2004 yılında 41 milyon \$ seviyesinden yıllık %7.5 artışla 2009 yılında 59 milyon \$ seviyesine çıkacağı tahmin edilmektedir [26].

BM tarafından yapılan bir çalışmayla bir bilgisayar ve ekranının imalatı için en az 240 kg fosil yakıt, 22 kg kimyasal madde ve 1,5 ton su gereksinimi olduğunu ortaya konmuştur [17].

Elektrikli ve elektronik atıkların geri dönüşümü sadece atıkların bertarafı açısından değil aynı zamanda değerli materyallerin geri kazanımı açısından da önemlidir. Birleşik Devletler Çevre Koruma Örgütü EPA saf materyaller yerine atık materyallerin kullanılmasında yedi ana kazanım tespit etmiştir. Saf metaller yerine geri dönüştürülmüş materyallerin kullanılması öncelikle kayda değer enerji tasarrufu sağlamaktadır. Tablo 2.19 ve Tablo 2.20’de elde edilen yararlar ve tasarruf görülmektedir [27].

Tablo 2.19: Atık Demir ve Çelik Kullanılmasının Yararları

Yararlar	Yüzdelere
Enerji Tasarrufu	74
Saf metal kullanımındaki tasarruf	90
Hava kirliliğindeki azalma	86
Kullanma suyundaki azalma	40
Su kirliliğindeki azalma	76
Maden israfındaki azalma	97
Tüketici atıkları oluşumundaki azalma	105

Tablo 2.20: Geri Dönüştürülmüş Materyal Kullanımı ve Enerji Tasarrufu

Materyaller	Enerji Tasarrufu (%)
Alüminyum	95
Bakır	85
Demir ve çelik	74
Kurşun	65
Çinko	60
Kâğıt	64
Plastikler	>80

Kullanılmayan elektrikli ve elektronik cihazlardan mekanik geri dönüşüm ile materyallerin tamamının geri kazanımı tüm dünyada uygulanır hale gelmektedir. Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının miktarının artmasına rağmen bu ekipmanların içerdikleri değerli materyallerin kaynak miktarları giderek azalmaktadır. Ek olarak elektronik atıkların tasnif edilmesi müteakip ayırma süreçleri için uygun bir besleme materyalinin sağlanabilmesi için de çok önemlidir [19].

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümü genel olarak üç ana evreye ayrılabilir [27]:

- Demontaj: Zaruri bir işlem olan seçici demontajda hedef belirli zararlı veya değerli bileşenleri açığa çıkarmaktır.
- Kalite Yükseltme: Arıtma işlemi için materyallerin hazırlanması gibi mekanik/fiziksel işlemler ve/veya metalürjik işlemler kullanılarak materyal kalitesinin arzu edilen seviyeye yükseltilmesidir.
- Arıtma: Bu son aşamada geri kazanılan materyaller mamul ömür çevrimlerine geri dönerler.

Kahverengi eşyalar olarak adlandırılan televizyon setleri, radyo setleri ve video kaydediciler gibi tüketici elektroniklerinin kullanımları çok yaygındır. Ancak, bu mamullerin manüel olarak sökülmesi kahverengi eşyaların düşük oranda değerli metaller ve bakır ihtiva etmelerinden dolayı yüksek maliyetlidir. Plastik içeren materyallerin tam olarak geri kazanımını sağlanarak elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşüm kalitesini yükseltecek bir mekanik işlem gereksinimi vardır. Bu mekanik geri dönüşüm işlemi ile düşük metal içerikli atıkların değerinin artacağı beklenmektedir [27].

Elektrikli ve elektronik atıklar içerdikleri tehlikeli materyaller nedeniyle eğer atık değerlendirilmesi safhasında doğru olarak işlenmez ise çevre sorunlarına sebep olabilirler. Birçok ülke bu gibi atıkların miktarının azaltılması ve yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve diğer yeniden değerlendirme şekillerinin kontrolü için kanun tasarısı düzenlemişlerdir [1,3-5,16,28,29].

Japonya’da elektrikli ve elektronik cihazların toplanmasına ve geri dönüşümüne elektrikli ev cihazlarının geri dönüşümü (EHAR – Electrical Household Appliance Recycling) yasası ile Nisan 2001 tarihinde başlanmıştır. Bu yasa ile Japonya’da ilk defa imalatçı kendi imal ettiği kullanılmış mamullerin geri dönüşümünden sorumlu

tutulmuştur. Dört mamul burada ana hedef olarak belirlenmiştir: katot ışıını tüpleri içeren televizyon setleri, buzdolapları, çamaşır makineleri ve klimalar. Bunlar büyük miktardaki imalatları ve satışları nedeni ile “dört ana mamul” olarak adlandırılmıştır. Yasanın amacı materyal geri dönüşümünü artırmak ve hurdalıklara atılan materyal miktarını azaltmaktır. Ağır metal içeren bileşenler detaylı şekilde analiz edilerek süreçlerdeki metal akışı belirlenmiştir. Sonuç olarak yeni geri dönüşüm sistemi sayesinde ağır metallerin sebep oldukları çevresel etkiler azaltılmış ve düşük seviyedeki materyal geri dönüşüm oranı arttırılmıştır [30].

Baskılı devre levhaları üç büyük endüstriyel sektör tarafında girdi olarak tüketilirler bunlar; bilgisayarlar, iletişim cihazları ve 1998’de toplam tüketimin %72,5’ini oluşturan tüketici elektronik ekipmanlarıdır. Ancak bu baskılı devre levhası imalatının mali değerini tahmin etmek zordur. Baskılı devre levhası montajında ilk 15 ülke toplam imalatın %92’sini gerçekleştirirken, Japonya ve ABD toplam imalatın %50’sinden fazlasını gerçekleştirmektedirler [31].

Yılda 100.000 tondan fazla baskılı devre levhası atığı Tayvan’da bertaraf edilmektedir. Baskılı devre levhalarının yüksek oranda brom içeriğinden dolayı bunların atıklarının etkili olarak işlenmesi çok zordur. Gömme, yakma ve düşük seviyede tekrar kullanma veya geri dönüşüm gibi birçok teknik baskılı devre atıklarının bertaraf edilmesi için kullanılmaktadır [32]. Tayvan’da tahminlere göre yaklaşık olarak her yıl 300.000 atık bilgisayar ortaya çıkmaktadır. Atık bilgisayarların geri dönüşümü sorumluluğunu imalatçısına devreden Tayvan atık bilgisayar geri dönüşümü programı sayesinde istenmeyen bilgisayar atıklarının para karşılığında belirli noktalarda toplanması sağlanmıştır. Bu program çerçevesinde yalnızca altı bilgisayar donanımı göz önüne alınmıştır. Bunlar diz üstü bilgisayarlar, monitörler, hard diskler, güç kaynakları, elektronik kartlar, anabilgisayar donanımlarıdır. Ayrıca bilgisayar atıklarından ayıklanan zararlı bileşenlerin düzenli olarak işlenmesi gerekmektedir. O zaman için piller, PCB kapasitörler, cıva içeren parçalar ve sıvı kristal ekranlar gibi zararlı bileşenleri işleyebilecek kapasitede bir tesisin Tayvan’da olmaması bu gibi bileşenlerin Tayvan dışındaki işleme tesislerine gönderilmesini gerektirmiştir [33]. Ayrıca Lee ve diğerleri Tayvan’da atık bilgisayar geri dönüşümü idaresinin gelişimini ortaya koymuşlardır [33]. Lee ve diğerleri Tayvan’da imalatçı sorumlu geri dönüşüm sisteminin adaptasyon ve gelişim sürecini ele alan diğer bir çalışmaya imza atmışlardır [34].

15 Ekim 1992 tarihinde elektronik atıkların değerlendirilmesi (ESO – Electronic Scrap Ordinance) Almanya’da kanunlaştırılmıştır ve elektronik atıkların toplanmasını imalatçının ve perakendecinin sorumluluğu olarak koşullandırılmıştır. Bu düzenlemeye binaen Almanya’da 1,2 – 1,5 milyon ton elektronik atığın toplandığı tahmin edilmektedir. İsveç’te yıllık 120.000 ton elektrikli ve elektronik ekipman atığının olduğu tahmin edilmektedir [19].

Tablo 2.21’de bazı ülkelerin elektrikli ve elektronik ekipman atığı geri dönüşüm oranları ve geri dönüşüm hedefleri verilmiştir [35].

Tablo 2.21: Ülkelerin EEEA Geri Dönüşüm Oranları ve Hedefleri

Ülkelerin	Geri Dönüşüm Oranı	Hedeflenen Oran
İsviçre	%52 – 1998	
Hollanda	%46 – 1998	%60 – 2000
Avusturya	%48 – 1996	
Almanya	%48 – 1996	
Norveç	%38 – 1999	
İsveç	%34 – 1997	
ABD	%31,5 – 1998	%35 – 2005
Finlandiya	%30 – 1997	
Kanada	%29 – 1997	
Danimarka	%31 – 1996	%40 - %50 – 2000
Fransa	%12 – 1993	
İspanya	%20 – 1997	
İngiltere ve Galler	%9 – 1998 – 1999	%30 – 2010
İskoçya	%5,7	

Elektrikli ve elektronik ekipmanların mamul ömür sonunda tüketicilerden geri toplanarak geri dönüşümü için geliştirilen projelerin başarıya ulaşması için tüketiciler tarafından desteklenmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu konudaki tüketici görüşlerini ortaya koymak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. 2004 yılında Almanya’da yapılan bir çalışmada, çalışmaya katılanlara ekolojik bir yaşam için tehlikesiz mamullere daha fazla ücret ödemeye gönüllü olup olmayacakları sorulmuştur. Çalışma sonucunda, çalışmaya katılanların %10’u mutlak gönüllü olduklarını, %53’ü tercihen gönüllü olduklarını, %26’sının gönüllü olmadıklarını ve %10’ünün ise kesinlikle gönüllü olmadığı tespit edilmiştir [18].

Mart 2005 tarihinde Penn, Schoen & Berland Associates tarafından HP için ABD genelinde 1.226 kişiyle görüşülerek yapılan tüketicilerin elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ve elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümü hakkındaki görüşlerini yansıtan diğer bir çalışmanın sonuçları Tablo 2.22’de özetlenmiştir [36].

Tablo 2.22: EEEA ve EEEA Geri Dönüşümü İle İlgili Tüketici Görüşleri

	Sorular ve Verilen Cevaplar	%
1	E-atık kavramının anlamını biliyor musunuz?	
	Hayır	95
	Evet – elektronik atık / ıskartaya çıkarılmış elektronikler	2
	Evet – diğer	2
	Evet – emin değil	1
2	Eski veya uzun zamandır kullanmadığınız bilgisayar, monitör, yazıcı veya yazıcı kartuşu gibi bir mamule sahip misiniz?	
	Evet	68
	Hayır	32
3	Son iki yıl içerisinde eski veya uzun zamandır kullanmadığınız bilgisayar, monitör, yazıcı veya yazıcı kartuşu gibi bir mamulü bertaraf ettiniz mi?	
	Evet	63
	Hayır	37
4	Önceki soruya verdiğiniz cevap evet ise; bu mamulleri nasıl bertaraf ettiniz?	
	Çöp kutusuna attım	37
	Birisine verdim veya sattım	27
	Okula veya yardım derneğine bağışladım	22
	Bir geri dönüşüm programına dâhil mağazadan almıştım, onlar geri aldı	13
	Normal geri dönüşümün parçası olarak attım	7
	Kendim bir bertaraf tesisine götürdüm	7
	Geri dönüşüm programına sahip bir firma yapmıştı, onlar geri aldı	7
	Yerel otoritelerle anlaşmam var, onlar topladı	1
	Özel atık nakliyecileriyle anlaşmam var, onlar topladı	1
	Diğer	2
5	Birçok devlet kentsel e-atık geri dönüşüm programlarına kaynak oluşturmak için tüketicilerin bedel ödemelerini sağlamak amacıyla kanuni düzenlemeler hazırlamaktadırlar. Bir kısım taslak düzenlemeler tüketici bedelini önceden, yeni bir teknolojik mamul alındığı zaman ödenmesini şart koşturmaktadır. Diğer bir takım taslak düzenlemeler ise tüketici bedelinin sonradan, eski teknolojik mamulün bertaraf edilmesi gerektiği zaman ödenmesini şart koşturmaktadırlar. Siz hangi tip bedel ödemeyi tercih edersiniz?	
	Önceden	24
	Sonradan	76
6	E-atık geri dönüşümünün yaygın hale gelmesi için aşağıdaki uygulamalardan hangisini tercih edersiniz?	
	20\$ ödeyerek eski mamulünüzün evinizden alınması	2
	10\$ ödemek ve perakendeciye götürülerek 10\$'lık hediye kartı alınması	38
	Yerel atık işleme tesisine götürerek hiçbir bedel ödememek	60
7	E-atıkların ormanların yok olmasına nazaran önemi nedir?	
	Çok önemli	11
	Aynı derecede önemli	55
	Önemsiz	34
8	E-atıkların hava kirliliğine nazaran önemi nedir?	
	Çok önemli	8
	Aynı derecede önemli	55
	Önemsiz	37

2.3 Uluslar Arası Yasal Düzenlemeler

2.3.1 Basel Sözleşmesi

Tehlikeli atıklar konusunda tek küresel bakış açısına sahip Basel Sözleşmesi elektronik atıkları da etkileyen uluslar arası geçerli bir anlaşmadır. Basel Sözleşmesinin hedefi “tehlikeli atıklar ve diğer atıkların yönetilmesini ve bunların insan sağlığının ve çevrenin korumasına uygun olarak sınır ötesi hareketlerinin ve her tür bertaraf tesisinde bertaraf edilmesinin düzenlenmesini sağlamak” olarak tarif edilmiştir. Basel Sözleşmesi tehlikeli atıkların sınır ötesi hareketlerinin yanında bu atıkların oluşumunu da azaltmayı amaçlamaktadır [37]. Çalışmalar, Birleşmiş Milletler ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP - United Nations Environment Programme) altında Basel Sözleşmesi Sekreterliği tarafından yürütülmektedir [38].

Basel Sözleşmesinin ana hedefi çevre dostu güvenilir yönetimlerle zararlı atık üretimini en aza indirerek insan sağlığının ve çevrenin korunmasıdır. Sözleşme imalattan depolama, taşıma, işleme, tekrar kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve bertaraf edilmesine kadarki tüm aşamalarda sıkı kontroller içeren bütünlüklü bir mamul ömür çevrimi yaklaşımının kullanılması göz önünde bulundurularak zararlı atıkların elde edilmesini talep etmektedir [10].

22 Mart 1989 tarihli Tehlikeli Atıkların Sınırlar Ötesi Taşınmasının ve Bertarafının Kontrolüne ilişkin Basel Sözleşmesi, bu sözleşmeyi imzalayan devletleri bağlayıcı bir uluslararası hukuk belgesidir. 1989 tarihli sözleşme, 5 Mayıs 1992 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Tehlikeli atıkların üretiminin azaltılması, taşınmasının sınırlandırılması, bertaraf edilmesinin üretildikleri kaynağa en kısa mesafede ve çevreye zarar vermeyecek şekilde yapılması, ithal edecek tarafın önceden yazılı izni alınmadan yapılan yasadışı trafiğin cezalandırılması amaçlanmıştır. Paketleme, etiketleme ve taşıma düzenlemeleri getirmiştir. Türkiye, 28.12.1993 tarih ve 3957 sayılı Yasa ile Sözleşmeye katılmayı uygun bulmuş ve Bakanlar Kurulu’na onaylanarak, 15.5.1994 tarih ve 21935 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanmıştır [39]. Türkiye, Basel Sözleşmesinin getirdiği, atıkların çevreyle uyumlu yönetimi koşullarını sağlamakla yükümlü olduğundan sözleşmede belirtilen atık türlerinin söz konusu olduğu tüm sanayi dallarının bu sözleşmeden etkilenmeleri beklenmektedir [39].

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı'nın Türkiye Cumhuriyeti AB Çevre Uyum Stratejisi raporunda [40] Basel Sözleşmesi ile ilgili olarak, Türkiye Basel Sözleşmesine taraf olduğundan bu sözleşme kapsamındaki konular söz konusu sözleşme çerçevesinde yürütülmekle birlikte ilgili mevzuatın tamamlanmasının 2006 yılı sonunda ve uygulamanın 2010 yılında olması öngörülmektedir.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı'nın 14.03.2005 tarihli Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği 2872 sayılı Çevre Kanununa ve Tehlikeli Atıkların Sınırlar Ötesi Taşınımının ve Bertarafının Kontrolüne İlişkin Basel Sözleşmesine dayanılarak hazırlanmıştır [2]. Yönetmelikte tehlikeli atık sınıfına giren elektrikli ve elektronik ekipman atıkları aşağıda sıralanmıştır.

- PCB içeren transformatörler ve kapasitörler
- Yukarıda bahsedilenlerin dışındaki PCB içeren yada üzerlerine PCB bulaşmış ıskartaya ayrılmış ekipmanlar
- Kloroflorokarbon, HCFC, HFC içeren ıskarta ekipmanlar
- Serbest asbest içeren ıskarta ekipmanlar
- Yukarıda bahsedilenlerin dışında tehlikeli bileşenler içeren ıskarta ekipmanlar (elektrikli ve elektronik ekipmanların arasındaki tehlikeli bileşenler içerisinde akümülatör ve piller ile tehlikeli olarak işaretlenmiş olan cıvalı anahtarlar, katot ışın tüpleri camları ve diğer aktifleştirilmiş camlar ve benzerleri bulunabilir)
- İskartaya çıkan parçalardan çıkartılmış tehlikeli maddeler içeren parçalar

ABD, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD – Organization for Economic Cooperation and Development) üyesi olmasına rağmen, hem orijinal Basel Sözleşmesini ve hem de 1995 yılında adapte edilen ve tüm AB ve OECD (Liechtenstein dâhil) üyesi ülkelerin taraf olduğu yasaklarla ilgili düzenlemeleri onaylamayan tek ülkedir. Fransız Guyana, Surinam, Gine, Liberya, Sudan, Somali, Orta Afrika Cumhuriyeti, Gabon, Kongo, Angola, Zimbabwe, Sırbistan Karadağ, Irak, Afganistan, Myanmar, Laos, Tayvan ve Kuzey Kore Basel Sözleşmesini onaylamayan diğer bazı ülkelerdir. Ayrıca Çin, Hindistan ve Pakistan Basel Sözleşmesini ihlal eden ülkelerdir [17].

Mobil telefonlar bütün dünya insanlar tarafından yaygın olarak kullanılan küresel bir teknoloji olduklarından, elektrikli ve elektronik ekipmanların geri kazanımı oldukça güncel bir konu olduğundan ve sınırlı sayıda mobil telefon imalatçısı bulunduğundan dolayı Basel Sözleşmesi tarafından mobil telefonlar ilk ortaklık girişimi programına dâhil edilmişlerdir. Bu program Basel Sözleşmesi Mobil Telefon Ortaklık Girişimi olarak bilinmektedir. Dünyanın başta gelen mobil telefon imalatçıları temsilcileri olan LG, Matsushita (Panasonic), Mitsubishi, Motorola, NEC, Nokia, Philips, Samsung, Siemens ve Sony Ericsson bu çağrıya derhal cevap vermişler ve Aralık 2002’de 6. Basel Sözleşmesi Tarafları Konferansında mobil telefonların mamul ömür sonunda çevresel olarak güvenilir yönetimi için sürdürülebilir ortaklık beyannamesini imzalamışlardır. Nisan 2003’de mobil telefon çalışma grubu dört proje konusunda çalışmaya karar vermişlerdir. Bunlar kullanılmış mobil telefonların geri dönüşümü, kullanılan mobil telefonların toplanması ve sınır ötesi taşınması, mamul ömür sonunda mobil telefonların geri kazanımı ve geri dönüşümü ve de tasarım unsurları ile ilgili bilginin artırılması ve eğitimidir [41].

2.3.2 WEEE ve RoHS Direktifleri

AB komisyonu 13.06.2000 tarihinde elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ve elektrikli ve elektronik ekipmanların ihtiva ettiği bazı zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması ile ilgili olarak bir taslak direktif yayınlamıştır [3]. Taslakta elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının hızlı artışı, içerdikleri zararlı maddeler ve bu atıkların çevresel etkilerine dikkat çekilmiş, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının mevcut idaresine, içerdikleri kaynak değerlerine, imalatçı sorumluluğu prensibine, ulusal ve uluslar arası görüşlere, yasal temellere, ekonomik değerlendirmelere ve elektrikli elektronik ekipman atıkları ve içerdikleri zararlı maddeler ile ilgili tanımlara yer verilmiştir.

Bu taslak direktif 27.01.2003 tarihinde elektrikli ve elektronik ekipman atıkları direktifi (WEEE – 2002/96/EC Waste Electrical and Electronic Equipment) [4] ve elektrikli ve elektronik ekipmanlarda bazı zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması direktifi (RoHS – 2002/95/EC The Restriction of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment) [5] olarak yayınlanmıştır. Her iki direktifte de yine AB komisyonunun 15.07.1975 tarihli atıklarla ilgili direktifine (75/442/EEC Waste) atıfta bulunmaktadır [1].

2002/96/EC WEEE Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları ve 2002/95/EC RoHS Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması direktifleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

2002/96/EC Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları (WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment) Direktifi:

Direktifin amacı; elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının oluşumunun önlenmesi ve bu tür atıkların azaltılması için yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve diğer geri kazanım şekillerinin geliştirilmesidir. Ekonomik işletmelerin (imalatçılar, dağıtıcılar ve tüketiciler) çevresel performanslarının geliştirilmesi, bu atıkların belirli bir işleme tabii tutulmasını gerektirmektedir.

Bu direktif büyük ve küçük ev aletlerini, bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon ekipmanlarını, tüketici ekipmanlarını, aydınlatma ekipmanlarını, elektrikli ve elektronik araçları (büyük ölçekli sabit endüstriyel araçlar hariç), oyuncak, eğlence ve spor ekipmanlarını, tıbbi aletleri (kontamine olanlar hariç), kontrol ve izleme aygıtlarını ve otomatik dağıtıcıları kapsamaktadır.

Üye ülkeler elektrikli ve elektronik aletlerin; atıklarının parçalanabilirlik olanaklarını, geri kazanımını, özellikle yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü göz önüne alarak tasarlanmasını ve imal edilmesini teşvik edeceklerdir.

Üye ülkeler elektrikli ve elektronik atıkların ayrılmamış olarak belediye çöplüklerine verilmesini en aza indirecek ve bu atıklar için ayrı toplama sistemi kuracaklardır. Üye ülkeler elektrikli ve elektronik atıklar için 13 Ağustos 2005 tarihine kadar, son tüketicilerin ve dağıtıcıların bu tür atıkları ücretsiz geri vermelerini, imalatçıların ayrı veya kolektif toplama sistemleri kurmalarını ve işletmelerini ve de insan sağlığı ve güvenliği açısından risk taşıyan kontamine atıkların alımının kabul edilmeyeceğini garanti altına alacaklardır.

Üye ülkeler elektrikli ve elektronik atıkları yetkilendirilmiş kuruluşlara iletilmesini garanti edeceklerdir.

Üye ülkeler en geç 31 Kasım 2006 tarihine kadar, elektrikli ve elektronik atıkların her yıl kişi başına en az ortalama 4 kg ayrı toplama oranının gerçekleşmesini garanti edeceklerdir. Avrupa Parlamentosu ve Konseyi 31 Aralık 2008 tarihine kadar yeni bir zorunlu hedef belirleyecektir.

Elektrikli ve elektronik ekipman imalatçıları en iyi işlem, geri kazanım ve geri dönüşüm işlemleri uygulamalıdır. İşlemlerden sorumlu olan kuruluşlar yetkili otoritelerden izin almalıdır. Bu kuruluşlar topluluğun çevre denetim ve yönetim programlarına katılmaya teşvik edilmelidir. Topluluğun dışındaki işlemler, eğer ithalatçı direktifin gerekliliklerine eşit koşullar altında işlemleri gerçekleştirebiliyorsa direktifin hedefleri yerine kabul edilir.

İmalatçılar ayrı olarak toplanmış elektrikli ve elektronik ekipmanın geri kazanımı için sistemler kurmalıdır.

31 Aralık 2006 tarihine kadar, her ekipman başına ortalama ağırlık olarak hedeflenen geri kazanım ve geri dönüşüm oranları Tablo 2.23’de verilmiştir.

Tablo 2.23: WEEE Direktifine Göre Hedefler

	Elektrikli ve Elektronik Ekipman Sınıfı	Geri Kazanım (%)	Geri Dönüşüm (%)
1	Büyük ev aletleri	80	75
2	Küçük ev aletleri	70	50
3	IT ve telekomünikasyon ekipmanları	75	65
4	Tüketici ekipmanları	75	65
5	Aydınlatma ekipmanları	70	50
	Gazlı Lambalar	80	80
6	Elektrik ve Elektronik aletler	70	50
7	Oyuncaklar, boş vakit ve spor ekipmanları	70	50
8	Tıbbi aygıtlar	-	-
9	İzleme ve kontrol aygıtları	70	50
10	Otomatik dağıtıcılar	80	75

13 Ağustos 2004 tarihine kadar komisyon yukarıda verilen oranlara uymaya ilişkin kuralları hazırlayacaktır. İmalatçılar işleme, geri kazanım ve geri dönüşüm tesislerine giriş ve çıkışlarda elektrikli ve elektronik atık ağırlığını belirlemelidir. 31 Aralık 2008 tarihine kadar Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tıbbi aygıtları da içeren geri kazanım, geri dönüşüm ve yeniden kullanıma ilişkin yeni hedefler koyacaktır.

13 Ağustos 2005 tarihine kadar, imalatçılar elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının toplanması, işlenmesi, geri kazanımı ve çevresel etkilerinin yok edilmesine ait finansmanı sağlamalıdır. 13 Ağustos 2005 tarihinden sonra markette yer alacak ürünler için, her imalatçı kendi ürünüyle ilgili finansmanın sağlanmasından sorumlu olacaktır. Bir imalatçı bir ürünle markette yer aldığı anda, atığının yönetiminin finansmanı ile ilgili garantiyi vermelidir. Bu tür bir garanti imalatçının finansman bütçelerine, geri dönüşüm sigortalarına veya banka teminatına katılımı şeklinde alınabilir. 13 Ağustos 2005 tarihinden önce markette yer alan (tarihi atık) ürünler için, finansman marketteki hisselerine orantılı olarak markette var olan

imalatçılar tarafından sağlanacaktır. Üye ülkeler direktif yürürlüğe girdikten sonra sekiz yıllık geçiş sürecini sağlamalıdır. Yeni bir ürünün satış sürecinde, toplama, işleme ve çevresel etkilerinin yok edilme maliyetlerinin satıcılara belirtilmesi için imalatçılara izin verilmelidir. Değınilen maliyetler gerçek maliyetleri aşmamalıdır.

Elektrikli ve elektronik ekipman kullanıcıları bunlara ait atıkların ayrılmadan belediye çöplüklerine verilmemesi, ayrı toplanmasının, geri alınmasının sağlanması, tüketicilerin bu atıkların geri kazanılmasındaki rolleri, bu atıkların çevreye ve sağlığa olan etkileri ve bu tür ekipmanların paketlerinde bulunan sembolün anlamı ile ilgili olarak gerekli bilgilere erişebilmelidir. İmalatçılar, 13 Ağustos 2005 tarihinden sonra markette yer alacak ürünlerini Şekil 2.1’de gösterilen elektrikli ve elektronik ekipmanın çöpe atılmamasını gösteren sembol ile işaretleyeceklerdir.



Şekil 2.1: Uyarı İşareti

İmalatçılar yeni tip elektrikli ve elektronik ekipmanların ürün markette yer aldıktan sonra bir yıl içinde yeniden kullanım ve işleme bilgilerini sağlamalıdır. Bu bilgiler ekipmanda yer alan bileşenler ve materyalleri ve tehlikeli maddelerin konumlarını tanımlamalıdır. Bu bilgiler yeniden kullanım merkezleri ve işleme ve geri kazanım tesislerine iletilmelidir.

Üye ülkeler kendi bölgelerindeki imalatçıların kayıtlarını hazırlayacaklar ve markette yer alan elektrikli ve elektronik ekipmanın toplanması, geri dönüşümü ve geri kazanımındaki miktar ve kategorilere ilişkin bilgileri tutacaklardır. Bu direktifin uygulanması ile ilgili raporlar üye ülkeler tarafından komisyona gönderilecektir. İlk rapor 2004 – 2006 dönemini içerecektir. Komisyon üye ülkelere bu raporları temin ettikten dokuz ay sonra konuyla ilgili bir rapor yayınlanacaktır.

Üye ülkeler direktifin uygulanmamasına ilişkin cezaları belirleyecektir.

2002/95/EC Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması (RoHS - The Restriction of The Use of Certain Hazardous in Electrical and Electronic Equipment) Direktifi:

Bu direktifin kapsamı elektrikli ve elektronik ekipman atıklarına ilişkin direktif ile aynıdır (tıbbi araçlar ile izleme ve kontrol ekipmanları hariç).

1 Temmuz 2006 tarihinden itibaren elektrikli ve elektronik ekipmanlarda bulunan kurşun, cıva, kadmiyum, heksavalent kromiyum, PBB (Polibromlu Bifenil) ile PBDE (Polibromlu Difenileter) maddeleri diğer maddelerle değiştirilmiş olmalıdır. Hariç olan maddeler direktifin eklerinde sınıflandırılmıştır. 13 Şubat 2005 tarihine kadar, komisyon yeni bilimsel gerçekleri göz önüne alarak, kapsamın geliştirilmesinin fizibilitesi ve listelerin adaptasyonu ile ilgili olarak direktif hükümlerini gözden geçirecektir.

WEEE direktifi için anahtar tarihler Tablo 2.24’de, RoHS direktifi için anahtar tarihler Tablo 2.25’de verilmiştir [42].

Tablo 2.24: WEEE Direktifi İçin Anahtar Tarihler

13 Şubat 2003	Direktifin yürürlüğe girmesi
13 Ağustos 2004	Üye ülkelerin uygulama yasalarını çıkarması
13 Ağustos 2005	İmalatçılar elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının son kullanıcılardan ücretsiz geri alınması için bir sistem kuracaklardır. Bu tarihten sonra markete verilen ürünler yeni olarak sınıflandırılacak ve etiketlenecektir.
31 Aralık 2006	Üye ülkeler bu tür atıklar için toplama, yeniden kullanma, geri dönüştürme ve geri kazanım hedeflerini gerçekleştireceklerdir.

Tablo 2.25: RoHS Direktifi İçin Anahtar Tarihler

13 Şubat 2003	Direktifin yürürlüğe girmesi
13 Ağustos 2004	Üye ülkelerin uygulama yasalarını çıkarması
13 Şubat 2005	Avrupa komisyonu yeni bilimsel gerçekleri göz önüne alarak direktifin uygulanmasını yeniden gözden geçirecek ve yasak madde listelerine yenilerinin eklenmesini önerecek.
1 Temmuz 2006	Üye ülkeler markette yer alan tüm elektrikli ve elektronik ekipmanların kurşun, cıva, kadmiyum, heksavalent kromiyum, PBBs ile PBDEs içermemesini sağlayacaktır.

Direktifin hedefleri arasında mevcut elektrikli ve elektronik ekipman atıkları yönetiminden kaynaklanan kirlilikten hava, su ve toprağın korunması, atık oluşumunun engellenmesi, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının zararlılığının azaltılması ve kıt kaynakların daha etkin kullanılması gibi bir takım amaçlar ile çıkarılan bu direktif ile başta enerji olmak üzere elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının içerisindeki değerli kaynakları korumak amaçlanmaktadır. Ayrıca direktif ile AB içerisindeki ulusal elektrikli ve elektronik ekipman atıkları yönetimlerinin

uyumu da sağlanmış olacaktır [9]. 13 Ağustos 2004 tarihine kadar sadece Yunanistan ve Hollanda elektrikli ve elektronik ekipman atıkları direktifini yasalaştırmayı gerçekleştirmişlerdir. WEEE direktifi ulusal güvenliği sağlamak ve amacıyla kullanılan elektrikli ve elektronik ekipmanlar ile bazı hastalık taşıma riski olan medikal ekipmanları kapsam dışı tutmuştur. Aralık 2006 itibariyle AB üyesi ülkelerin kişi başına yıllık 4 kg elektrikli ve elektronik ekipman atığı toplama hedefi bazı AB üyesi aday ülkeleri için iki yıl ertelenmiştir [9]. WEEE direktifinin öngördüğü toplama hedefi bazı AB üyesi ülkeler tarafından şimdiden aşılmıştır. Tablo 2.26’de bazı Avrupa ülkelerine ait kişi başına düşen toplama oranları verilmiştir [7].

Tablo 2.26: Bazı Avrupa Ülkelerine Ait EEEA Toplama Oranları

Ülke	Toplama Oranı (kg.kişi ⁻¹)	Referans Yıl	Toplama Kaynağı
Belçika	3,50	2002	Elektrikli ev aletleri
Hollanda	4,13	2000	Elektrikli ev aletleri
Norveç	7,90	2001 – 2002	Elektrikli ev aletleri
İsveç	7,00	2001	Elektrikli ev aletleri ve diğer
İsviçre	8,00	2002	Elektrikli ev aletleri ve diğer

RoHS direktifi kapsamına girmeyen ekipmanlar; tıbbi aygıtlar, gözetleme ve kontrol enstrümanları, büyük ölçekli sabit endüstriyel aygıtlar, 1 Temmuz 2006 tarihinden önce piyasaya sunulan elektrikli ve elektronik ekipmanlar ile tamir veya yeniden kullanım amacıyla kullanılan yedek parçalarıdır [23].

Tablo 2.27’de Avrupa Birliğinin WEEE ve RoHS direktifleri ile ilgili mevzuatına ilişkin bir karşılaştırma verilmiştir [43].

WEEE direktifleri Brezilya, Çin, Japonya ve ABD gibi dünyanın başka bölgelerinde de etkili olmuştur. Brezilya’da güncel bir kanun teklifi mevcut pillerin geri alınması mevzuatının iyileştirerek elektrikli ve elektronik ekipmanların da bu kapsamda geri alınmasını hedeflemektedir. Japonya’da belirli tip tüketici elektronik cihazlarının geri dönüşümü kanunu imalatçılar açısından beyaz eşyalar ve TV setleri için geri alma programının uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Gelecekte iletişim cihazlarının da bu kapsamda değerlendirilmesi beklenmektedir. Çin’de atık bertaraf kanunu yeniden düzenlenerek ithalatçıların ve imalatçıların belirli tip elektronik mamuller için geri dönüşüm bedeli ödeyerek toplama ve geri dönüşüm programını desteklemeleri zorunlu kılınmıştır. Şu an için düzenlemenin hedefi büyük ev gereçleri, televizyonlar ve bilgisayarlardır [16].

Tablo 2.27: WEEE ve RoHS Mevzuatı Özeti

WEEE	RoHS
Amaç	
▪ Elektrikli ve elektronik ekipmanların mamul ömür çevrimi kontrolünün iyileştirilmesi ▪ Genişletilmiş imalatçı sorumluluğunun yerine getirilmesi	▪ Elektrikli ve elektronik teçhizatlardaki kurşun, cıva, kadmiyum, altı değerli krom, PBB ve PBDE gibi tehlikeli maddelerin kullanımının sınırlandırılması
Kapsam / Ürün grupları	
▪ Büyük ve küçük ev gereçleri ▪ Bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon teçhizatları ▪ Tüketici teçhizatları ▪ Aydınlatma teçhizatları ▪ Büyük ölçekli sabit endüstriyel araçlar dışındaki elektrikli ve elektronik teçhizatlar ▪ Oyuncaklar, boş vakit ve spor teçhizatları ▪ Tıbbi cihazlar ▪ İzleme ve kontrol aletleri ▪ Otomatik dağıtıcılar	▪ Büyük ve küçük ev gereçleri ▪ Bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon teçhizatları ▪ Tüketici teçhizatları ▪ Aydınlatma teçhizatları ▪ Büyük ölçekli sabit endüstriyel araçlar dışındaki elektrikli ve elektronik teçhizatlar ▪ Oyuncaklar, boş vakit ve spor teçhizatı ▪ Otomatik dağıtıcılar
Konum ve Son Süreler	
▪ 27.01.2003 yönerge ▪ 13.02.2003 direktifin yürürlüğe girmesi ▪ 13.08.2004 üye ülkelerin uygulama yasalarını çıkarması ▪ 13.08.2005 geri alım lojistiklerinin kurulması ▪ 31.12.2006 itibariyle geri dönüşüm kotalarının karşılanması	▪ 27.01.2003 yönerge ▪ 13.02.2003 direktifin yürürlüğe girmesi ▪ 13.08.2004 üye ülkelerin uygulama yasalarını çıkarması ▪ 13.02.2005 uygulamanın yeniden gözden geçirilmesi ve yeni yasak listesinin belirlenmesi ▪ 1 Temmuz 2006 itibariyle sınırlamaların uygulamaya konulması ▪ İstisnaların gözden geçirilmesi Avrupa Komisyonu tarafından üstlenilmiştir
İhtiyaçlar	
▪ Dağıtıcılar ve imalatçılar, tedarikçilerle doğrudan ilintili olmayan gerekleri yerine getirmekle yükümlüdürler ▪ Kişi başına yıllık birim toplama ≥ 4 kg ▪ Mamul kategorisi başına özel yeniden kazanım, geri dönüşüm, yeniden kullanım kotaları ▪ İmalatçılar geri dönüşümü finanse eder ▪ İmalatçılar, müşterilerine uygun bir geri alım çözümü sunmak zorundadırlar ▪ İmalatçılar, geri dönüştürücülere uygun geri dönüşüm için gerekli tüm bilgileri yollamakla yükümlüdürler	▪ RoHS sınırlamaları kapsam alanındaki tüm ürünlerdeki maddelerin belli istisnalar hariç 30 Haziran 2006'dan itibaren pazara konması

ABD'de ulusal bir düzenleme olmamakla beraber Kaliforniya eyaleti 25 Eylül 2003 tarihinde California SB 20 ve 29 Eylül 2004 tarihinde California SB 50 olarak bilinen AB direktiflerine benzer bir mevzuatı kabul etmiştir. Bu mevzuat sadece Kaliforniya eyaletinde yapılan satın alımları kapsamasına rağmen şu an ABD eyaletlerinin yarısından fazlasında e-atık mevzuatı ya teklif edilmiş durumdadır ya da görüşülmeyi beklemektedir [28,44].

2.4 Türkiye’de Tarihsel Süreç ve Yasal Düzenlemeler

Türkiye’de atık yönetimi konusundaki mevzuat üç yönetmelik ve bir uluslararası sözleşmeden oluşmaktadır. Bunlar Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (14.3.1991 tarih ve 20814 sayılı Resmi Gazete), Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (20.5.1993 tarih ve 21586 sayılı Resmi Gazete), Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (27.8.1995 tarih ve 22387 sayılı Resmi Gazete) ve Tehlikeli Atıkların Sınır Ötesi Taşınım ve İmhasının Kontrolü Sözleşmesi – Basel (15.5.1994 tarih ve 21935 sayılı Resmi Gazete) olarak sıralanabilir. Sayılan bu mevzuata ek olarak, 1580 sayılı Belediye Kanunu (14.4.1930 tarih ve 1471 sayılı Resmi Gazete), 1593 sayılı Umumi Hıfzısıhha Kanunu (6.5.1930 tarih ve 1489 sayılı Resmi Gazete), 2872 sayılı Çevre Kanunu (11.8.1983 tarih ve 18132 sayılı Resmi Gazete), 3030 sayılı Büyükşehir Belediyeleri Kanunu (9.7.1984 tarih ve 18453 sayılı Resmi Gazete) ve 3194 sayılı İmar Kanunu (9.5.1985 tarih ve 18749 sayılı Resmi Gazete) genel kapsamı içerisinde atık yönetimi ile ilgili idari konuları içeren mevzuatıdır. AB üyeliği sürecindeki Türkiye’nin diğer tüm yürürlükteki mevzuatı gibi yukarıda sayılan yürürlükteki atıklarla ilgili mevzuatının da AB mevzuatına uyumu gerekmektedir. Ancak yürürlükteki Türk mevzuatı, uluslararası bir sözleşme olan Basel Sözleşmesi dışında AB mevzuatı ile doğrudan uyum göstermemektedir. Mevcut Türk atık yönetim yönetmelikleri, genel atık türlerine göre hazırlanmış olup, ilgili AB mevzuatı kapsamındaki düzenlemelerle uyum içine alınması gerekmektedir.

AB müktesebatına uyum çalışmalarının devam ettiği ve Türk sanayinin AB üyesi ülkelere ihracatının arttığı bu dönemde İstanbul Sanayi Odası (İSO) tarafından, AB’de geçerli olan elektrikli ve elektronik ekipman atıkları (WEEE) ve elektrikli ve elektronik ekipmanlarda bazı zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması (RoHS) ile ilgili mevzuatın takibinin Türk sanayisinin rekabet gücünü koruması açısından büyük önem taşıdığına dikkat çekilmiştir [45].

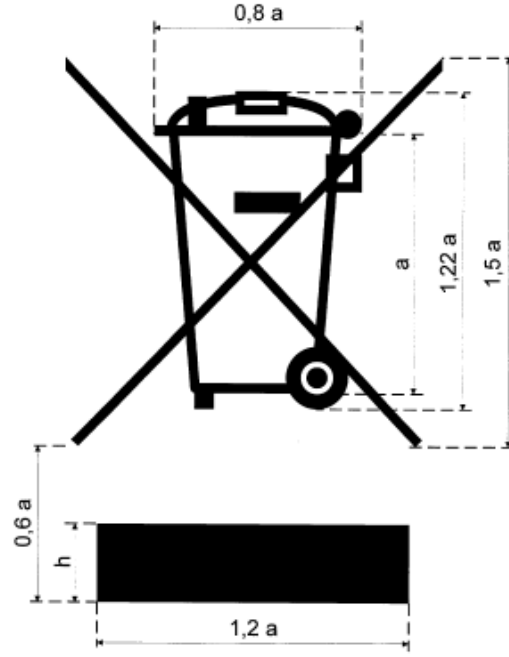
T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı’nın Türkiye Cumhuriyeti AB Çevre Uyum Stratejisi raporunda [40] AB uyum kapsamında Ulusal Programa göre tüm sektörler için ait yansıtma (mevzuat) ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Buna göre AB’nin elektrikli ve elektronik ekipman atıkları (WEEE) ve elektrikli ve elektronik ekipmanlarda bazı zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması (RoHS) direktifleri ile ilgili ilerlemenin izlenmesi ilk defa 2005 yılında ele alınmasından dolayı yansıtmasının düşük olduğu ve bu direktiflerle ilgili yaklaşımın Ulusal Programda 2003 – 2005

yılları için yer almadığı kaydedilmiştir. Ayrıca aynı raporda yönetmelik yaklaşımın yeni yönetmelik olacağı ve yansıtmadan Çevre ve Orman Bakanlığı'nın sorumlu olacağı belirtilmiştir. Ancak direktiflerin 2010 yılında uygulanacağı öngörülmekle beraber WEEE Direktifinin yansıtması tam olarak gerçekleştirilmediğinden uygulama tarihi konusunda tereddütlerin bulunduğuna yer verilmiştir.

WEEE direktifi Türk Standardları Enstitüsünün 29.04.2004 tarihinde yürürlüğe giren TS EN 50419 numaralı “2002/96/EC Direktifi (WEEE) Madde 11(2)’ye göre elektrikli ve elektronik cihazların işaretlenmesi” standardına yansıtılmıştır [6]. Buna göre cihazın 13 Ağustos 2005’ten sonra piyasaya sürüldüğünü ve cihaz üreticisini açıkça tanıtmak için ürüne aşağıdaki işaretlemeler uygulanmalıdır:

- Üreticiye özgü tanıtmak. Bu tanıtmak, marka adı, ticari marka, firma sicil numarası veya üreticiyi tanıtmak amacıyla diğer vasıtalar şeklinde olabilir. Seçeneklerden hangisi seçilirse seçilsin üretici, üye ülkenin üreticiler siciline 2002/96/EC Direktifine (WEEE) göre kayıt edilmelidir.
- Cihazın 13 Ağustos 2005’ten sonra piyasaya sürüldüğü aşağıdakilerden biri ile belirtilmelidir:
 - o İmalat ve/veya piyasaya sürme tarihi, EN 28601’e uygun kodlanmamış metinle veya işlem kolaylıkları için bulunması gerekli olan diğer kodlu metinle,
 - o 2002/96/EC Direktifi Ek IV’e göre, üzeri çarpı işaretli tekerlekli çöp kutusuna ilave bir işaretleme olarak kullanılan Şekil 2.2’de gösterilen işaretleme ile.

Bu kural, her iki seçeneğin aynı anda kullanılmasına engel değildir. İşaretleme erişilebilir, dayanıklı, okunabilir ve silinemez olmalıdır. Boyut veya ürün işlevselliği gibi diğer karakteristikler nedeniyle ürün üzerine işaretleme yapılamıyorsa, işaretleme sabit besleme kordonundaki (varsa) bayrak üzerinde ve beraberinde veriliyorsa ürünle birlikte verilen çalışma talimatlarında ve garanti belgelerinde olmalıdır. Yukarıdakilerden hiçbiri uygulanmıyorsa, işaretleme ambalaj üzerinde olmalıdır.



Şekil 2.2: TS EN 50419 Standardına Göre İşaretleme

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı tarafından 2004 yılında 2002/96/EC WEEE direktifi göz önünde bulundurularak Atık Elektrik Elektronik Eşyaların Kontrolü ve Yönetimi Taslak Yönetmeliği (AEEE Yönetmeliği) [46] hazırlanmıştır. Bu taslak yönetmeliğe göre imalatçıların Tablo 2.28’de belirtilen oranlarda elektrikli ve elektronik ekipman atıklarını ayrı olarak toplamalarının garanti edilmesi beklenmektedir. Aynı taslak yönetmeliğe göre imalatçıların Tablo 2.29 ve Tablo 2.30’de belirtilen oranlarda geri kazanım ve geri dönüşüm hedeflerini garanti etmeleri istenmektedir.

Ayrıca yine taslak metinde bakanlığın, teknik ve ekonomik veri ve tecrübelerle dayanarak ve imalatçıların önerilerini de dikkate alarak, 31 Aralık 2012 tarihine kadar hem tıbbi aygıt atık grubu için bağlayıcı hedefleri belirleyeceği, hem de diğer atık grupları için verilen hedefleri gözden geçirip yeniden belirleyeceği yer almaktadır. Bu hedeflerin belirlenmesi için ise önceki yıllarda evsel kullanıcılara satılan elektrikli ve elektronik ekipman miktarlarının esas alınacağı belirtilmiştir.

Tablo 2.28: EEEA Toplama Oranları

Yıl	Kişi Başına Yıllık Toplama Hedefi (kg)
2006 (seçmeli)	0,5
2007	1
2008	1,5
2010	2,5
2012	4

Tablo 2.29: EEEA Geri Kazanım Oranları

Atık Grupları		Yıl				
		2006	2008	2010	2011	2012
		EEEA Toplama Yüzdesi				
1	Büyük ev aletleri	60	65	70	75	80
2	Küçük ev aletleri	20	30	40	55	70
3	IT ve telekomünikasyon ekipmanları	20	30	45	60	75
4	Tüketici ekipmanları	20	30	45	60	75
5	Aydınlatma ekipmanları	10	20	30	50	70
	Gazlı lambalar	50	55	60	70	80
6	Elektrik ve Elektronik aletler	10	20	30	50	70
7	Oyuncaklar, boş vakit ve spor ekipmanları	10	20	30	50	70
8	Tıbbi aygıtlar	-	-	-	-	-
9	İzleme ve kontrol aygıtları	10	20	30	50	70
10	Otomatik dağıtıcılar	50	55	60	70	80

Tablo 2.30: EEEA Geri Dönüşüm Oranları

Atık Grupları		Yıl				
		2006	2008	2010	2011	2012
		EEEA Toplama Yüzdesi				
1	Büyük ev aletleri	50	55	60	65	75
2	Küçük ev aletleri	10	20	30	40	50
3	IT ve telekomünikasyon ekipmanları	15	25	35	50	65
4	Tüketici ekipmanları	15	25	35	50	65
5	Aydınlatma ekipmanları	10	20	30	40	50
	Gazlı lambalar	50	55	60	70	80
6	Elektrik ve Elektronik aletler	10	20	30	40	50
7	Oyuncaklar, boş vakit ve spor ekipmanları	10	20	30	40	50
8	Tıbbi aygıtlar	-	-	-	-	-
9	İzleme ve kontrol aygıtları	10	20	30	40	50
10	Otomatik dağıtıcılar	50	55	60	65	75

TÜSİAD'ın Dış Ticarete Çevre Koruma Kaynaklı Tarife Dışı Teknik Engeller ve Türk Sanayii için Eylem Planı raporunda atık geri kazanım ve bertaraf tesislerinin kurulması ile ilgili olarak kısa ve orta vadeli olarak eylem önerileri sunulmuştur [39]. Buna göre bölgesel tesislerin kurulması ve atık borsasının kurulup işletilmesi, gerekli görülen teknik düzenlemeler olarak kaydedilmiştir. Bölgesel atık yönetim idarelerinin kurulması ve denetim kurumlarının oluşturulması, gerekli görülen kurumsal düzenlemeler olarak kaydedilmiştir. Tesislerin kullanılmasını teşvik edici yasal düzenlemeler ve nakliyecilik teşviki için yasal düzenlemeler ise gerekli görülen yasal düzenlemeler olarak kaydedilmiştir. Çevre ve Orman Bakanlığı, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, DPT, Maliye Bakanlığı, Hazine Müsteşarlığı ve TOBB ise ilgili başlıca kurum ve kuruluşlar olarak tanımlanmışlardır.

Dokuzuncu Kalkınma Planı, Makine ve Metal Eşya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Beyaz Eşya Raporunda [23]; Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından çıkarılacak olan RoHS ve WEEE yönetmeliklerine çekince konulmuştur. Bu direktiflerin

uygulanmaya geçilmesi çerçevesinde konulmaya çalışılan hedeflerin tutturulmasının neredeyse mümkün olmayan hedefler haline getirildiği beyan edilmiştir. Bu konuda kişi başına kg olarak hedef gösterilen miktarların gerçekleşmesinin mümkün olmadığı ve ayrıca ülkemizde AB’de olduğu gibi halen çöplüklerde veya çevreye atılmış olarak herhangi bir beyaz eşya atığının da saptanmadığı vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra toplanan mamullerin tekrar kazanılması zorunluluğu konusunda finansal güçlükler ve ikinci el beyaz eşya ithalatıyla ilgili çekinceler dile getirilmiştir.

Ayrıca WEEE ve RoHS direktifleri kapsamında, elektrikli ve elektronik ekipman imalatçıları tarafından da bir takım çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin Beko tarafından WEEE direktifine yönelik olarak yapılan çalışmalar; etiketin ürünlerde kullanılmaya başlanması, mamullerin geri kazanım oranlarını belirleme çalışmalarının yürütülmesi ve Çevre ve Orman Bakanlığı’nın AEEE çalışma komitesinde yer alarak yönetmelik oluşturma çalışmalarına destek vermesi olarak sıralanabilir. Mamullerin geri kazanım oranları ise 14” TV’lerde %73, 20” TV’lerde %75 ve 25” TV’lerde de %69 olarak saptanmıştır [47]. Tablo 2.31’de Beko Elektronik tarafından imal edilen TV adetleri verilmiştir [47].

Tablo 2.31: Beko Elektronik Tarafından İmal Edilen TV Adetleri (×1000)

Mamul	2001	2002	2003	2004	2005
CRT	2.141	4.245	5.138	6.706	5.108
LCD			29	282	1.007
PDP				19	205

Beko tarafından sürdürülen malzeme onayları ve gerekli yatırımlarla ilgili RoHS uygulamaları; Mayıs 2004 itibariyle Malzeme Deklarasyon Talimatının tüm malzeme ve yarı mamul onaylarında kullanılmaya başlanması ve Malzeme Onay Akış Formu içerisine Malzeme Deklarasyon Talimatı onay kısmının eklenmesi, Tasarım El Kitabı içerisine malzeme kriterleri olarak RoHS’a uygunluk şartının eklenmesi ve RoHS’a uyumu sağlamak için kurşunsuz üretime uygun potalar ve ekipmanların alınmasıdır. Giriş kalite kontrol onayları ile ilgili RoHS uygulamaları ise; RoHS’da belirtilen yasaklı madde analizlerini gerçekleştirmek için 2003 yılında bir adet spektrofotometre cihazının ve iki adet portatif cihazın alınması, RoHS direktifinde yer alan R’li kodla gelen tüm malzemelerin analizlerinin yapılması ve giriş kalite test sonuçları ile dış laboratuvar sonuçları arasında kıyaslama yapılmasıdır [47].

3. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLARIN ÖZELLİKLERİ

3.1 Materyal Bileşimleri

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları homojen olmamakla beraber aynı zamanda materyaller ve bileşenler bakımından da karmaşıktırlar. Uygun maliyetli ve çevre dostu bir geri dönüşüm sistemi geliştirmek için bu atıkların içerdiği değerli materyallerin ve zararlı maddelerin tanımlanması, saptaması ve dahası bu atıkların fiziksel özelliklerinin anlaşılması önemlidir.

Elektronik atıkların geri dönüştürülmesinde itici ekonomik etken değerli metallerin geri kazanımıdır. Ancak elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının içerdikleri değerli metaller giderek azalmaktadır [48].

BM verilerine göre elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının %10'u televizyon, %10'u monitör, %15'i tüketici elektronik cihazları, %15'i bilgi ve iletişim ekipmanları, %20'si soğutucular ve %30'u diğer elektrikli ve elektronik ev gereçleri atıklarından kaynaklanmakla beraber elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının %30,2'sini plastikler, %30,2'sini refraktör oksitler, %20,1'ini bakır, %8,1'ini demir, %4'ünü kalay, %2'sini kurşun, %2'sini alüminyum ve %1,4'ünü diğer materyaller oluşturmaktadır [17].

Avrupa Plastik İmalatçıları Birliği (APME - The Association of Plastics Manufactures in Europe), Uluslar Arası Bakır Çalışmaları Grubu (ICSG – International Copper Study Group) verilerine ve Almanya'da gerçekleştirilen materyal içeriği analizlerine göre Batı Avrupa'da ve Almanya'da elektrikli ve elektronik ekipmanlardaki yer alan materyaller Tablo 3.1'de verilmiştir. [16,27,49,50]. Genel olarak baskılı devre levhalarındaki bu oran %40 metaller, %30 plastikler ve %30 seramikler şeklindedir [48,51,52].

Ayrıca Tablo 3.2'de Elektronik Ekipman Geri Dönüşüm Sanayicileri Birliği (ICER – Industry Council For Electronic Equipment Recycling) verilerine göre elektrikli ve elektronik ekipman türlerine göre materyal içeriği verilmiştir [7].

Tablo 3.1: EEE Materyal İçerikleri

Materyal	APME (%)	ICSG (%)	Almanya (%)
Demir	38,00	48,00	47,00
Demir Dışı	28,00	15,00	9,50
Plastikler	19,00	20,00	20,00
Cam	4,00	5,00	8,50
Ağaç	1,00	3,00	-
Diğer	10,00	9,00	14,00

Tablo 3.2: EEE Kategorilerine Göre Materyal İçerikleri

Ekipman Kategorisi	Materyal Yüzdesi (%)				
	Demir	Demir Dışı	Cam	Plastik	Diğer
Büyük ev aletleri	61	7	3	9	21
Küçük ev aletleri	19	1	0	48	32
Bilişim Teknolojisi Cihazları	43	0	4	30	20
İletişim Cihazları	13	7	0	74	6
Kahverengi Eşya (TV, Radyo, vb.)	11	2	35	31	22
Gaz akışkanlı lambalar	2	2	89	3	3

Verilen oranlar arasındaki farklılıklar elektrikli ve elektronik ekipman tanımlarının kaynaklara göre ve ele alınan mamullerin materyal içeriklerinin zamana ve birbirine göre farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Elektrikli ve elektronik ekipmanlar bileşen, materyal ve element içeriklerine göre analiz edilebilirler. Bileşen analizinde mamul kasa, şasi, baskılı devre levhaları ve katot ışıını tüpleri gibi ana bileşenlerine göre sınıflandırılırlar. Bazı bileşenler homojen olmalarına rağmen bileşenlerin birçoğu karmaşıktır ve birçok materyal içerirler. Materyal analizinde mamul cam, demir içeren metaller gibi fazla detaya inilmeden ana materyallerine göre sınıflandırılırlar. Element analizlerinde ise mamul element içeriğine göre sınıflandırılır. Eğer eser miktardaki elementlerin belirlenmesi gerekli ise bu analiz özellikle önemlidir. Bu tip analizler genellikle spektrum analizleri vasıtasıyla gerçekleştirilir. Ancak pratikte yapılan analizler melez karakteristiğe sahiptirler.

Tablo 3.3’de çamaşır makineleri, buzdolapları ve dondurucular gibi büyük ev aletlerinin yanı sıra elektrik süpürgeleri, kahve makineleri ve tost makineleri gibi küçük ev aletlerinin de yer aldığı beyaz eşyalar için materyal içerik analizleri verilmiştir [50]. Genel olarak kahverengi eşyaların içerikleri ilgili veriler yaygın şekilde erişilebilir değildir. Tablo 3.4’de kahverengi eşyaların içerikleri ile ilgili bazı veriler gösterilmektedir [50]. Gri eşyaların materyal içerikleri Tablo 3.5’de verilmiştir [50]. Tablo 3.6’da ise karmaşık bileşenlerin materyal içerikleri verilmiştir [50].

Tablo 3.3: Büyük ve Küçük Beyaz Eşyaların Materyal İçerikleri

Materyal	İçerik (%)					
	Fırın	Aspiratör	Bulaşık Makinesi (AEG)	Çamaşır Makinesi 1	Çamaşır Makinesi 2	Kahve Makinesi
Demir	73,0	48,0	56,0	53,9	61,0	14,0
Paslanmaz Çelik		16,0				
Demir Dışı Metaller		3,0	3,0	2,7	5,0	18,0
Bakır						
Alüminyum						
Hafif Materyaller						
Plastikler	2,0	22,0	12,0	5,5	8,0	68,0
Köpük						
Reçine						
Conta						
Kauçuk				3,4		
Cam	7,0			1,5		
Ahşap		8,0				
Toz	5,0					
Beton				21,6		
Akışkanlar						
CFC						
Yağ						
Elektrikli Aksam				11,4		
Kompresör						
Diğer	12,0	3,0	29,0		25,0	
Mamul Ağırlığı (kg)	70,0	43,0		80,0		1,73

Tablo 3.3: Büyük ve Küçük Beyaz Eşyaların Materyal İçerikleri (Devam)

Materyal	İçerik (%)					
	Buzdolabı 1	Buzdolabı 2	Dondurucu	Elektrik Süpürgesi 1	Elektrik Süpürgesi 2	Tost Makinesi
Demir	63,0	36,1	35,3	50,7	25,0	56,0
Paslanmaz Çelik						
Demir Dışı Metaller				7,4	8,0	
Bakır	3,0	1,0	1,0			5,0
Alüminyum	5,0	7,5	11,7			2,0
Hafif Materyaller	26,0					
Plastikler		12,6	8,6	35,2	60,0	36,0
Köpük		9,9	11,9			
Reçine		3,7	3,4			
Conta		0,2	0,1			
Kauçuk				4,9		
Cam						
Ahşap						
Toz				1,5		
Beton						
Akışkanlar	3,0	1,1	1,8			
CFC		1,1	1,0			
Yağ		1,4	1,2			
Elektrikli Aksam		25,3	24,1	0,3		
Kompresör						
Diğer					7,0	
Mamul Ağırlığı (kg)	35,0	33,0	36,7	6,0	9,0	1,1

Tablo 3.4: Kahverengi Eşyaların Materyal İçerikleri

Materyal	İçerik (%)							
	Plak Çalar	Video Kayıt Cihazı	Kaset Çalar	TV Seti 1	TV Seti 2	TV Seti 3	TV Seti 4	TV Seti 5 (14")
Demir	11,0	54,0	43,0	5,0	19,0	2,7	7,8	16,0
Demir Dışı Metaller								
Bakır	7,0	7,0	5,0	3,0	6,0		4,9	1,3
Alüminyum	1,0	1,0	1,0		1,0	0,7	2,0	0,8
Hafif Parçalar								
Plastikler	67,0	20,0	38,0	5,0	20,0	8,9	34,2	24,0
Cam				68,0	31,0		46,5	55,0
Ahşap				11,0	16,0	17,0		
Baskılı Devre	11,0	16,0	11,0	6,0		7,1	4,5	2,9
CRT						56,6		
Diğer	3,0	2,0	2,0	1,0	7,0	5,9		
Mamul Ağırlığı (kg)	2,10	3,80	2,25	22,00			24,50	10,00

Tablo 3.5: Gri Eşyaların Materyal İçerikleri

Materyal	İçerik (%)							
	Monitör 1	Monitör 2 (17")	Matris Yazıcı	PC1*	PC 2†	PC 3‡	Telefon Seti	Mobil Telefon
Demir	25,0	15,4	39,0	42,0	23,0§	19,0	31,0**	3,0
Demir Dışı Metaller								
Bakır	4,0	8,5	13,0	1,0		1,0		15,0
Alüminyum		5,1		11,0		4,0		7,0††
Hafif Parçalar								
Plastikler	46,0	17,6	36,0	17,0	23,0	41,0	40,0	49,0
Cam	21,0	42,5		13,0				
Baskılı Devre	23,0	10,6		16,0	10,0	25,0		
CRT					29,0			
Kablo					5,0			
Diğer	4,0		10,0			10,0	29,0	25,0‡‡
Mamul Ağırlığı (kg)	8,000	21,400	7,000			3,670	0,615	0,154

Tablo 3.6: Karmaşık Bileşenlerin Materyal İçerikleri

Materyal	İçerik (%)				
	Baskılı Devre Levhaları	Elektrik Motorları	Kablolar 1	Kablolar 2	Transformatörler
Demir	-	75	-	-	65
Bakır	12	15	40	36	25
Alüminyum	-	10	-	18	5
Plastikler	70	-	60	45	-
Diğer	18	-	-	-	5

* Sistem, monitör ve klavye

† Sistem, monitör ve klavye

‡ Sistem

§ Al ve Cu dahil

** Bütün metaller dahil

†† Ni, Zn ve Ag dahil

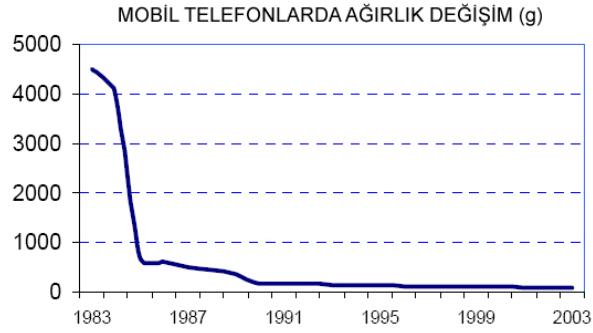
‡‡ %9 epoksi, %16 seramik

Ortalama olarak bir bilgisayar %23 plastik, %32 demir ihtiva eden metaller, %18 demir içermeyen metaller (kurşun, kadmiyum, antimon, berilyum, krom ve cıva), %12 elektronik kartlar (altın, paladyum, gümüş ve platin) ve %15 cam ihtiva eder. Bilgisayarın yaklaşık olarak yalnızca %50'sinin geri dönüşümü sağlanabilir ve kalan kısmı atılır. Atığın zehirliliği büyük oranda kurşun, cıva ve kadmiyumdan kaynaklanır. Geri dönüştürülemeyen tek bir bilgisayar 2 kg'a yakın kurşun ihtiva edebilir. Kullanılan plastiklerin birçoğu yangın geciktiriciler içerirler ve bunların geri dönüştürülmesi zordur [17]. Kişisel bilgisayarlar için element analizi Tablo 3.7'de verilmiştir [50].

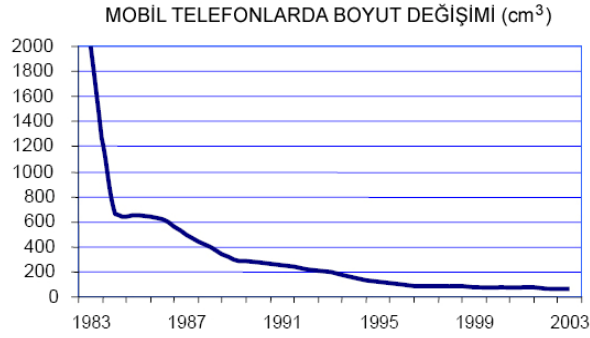
Tablo 3.7: Kişisel Bilgisayarlar İçin Element Analizi

Materyal	Kişisel Bilgisayar İçerisindeki Konumu	Geri Dönüşüm Oranı (%)	İçerik (%)
Silis (Si)	Katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	-	24,88
Plastikler	Kasa, mekanik parçalar	20	22,99
Demir (Fe)	Kasa, katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	80	20,47
Alüminyum (Al)	Şasi, kablo, baskılı devre levhası	80	14,17
Bakır (Cu)	Kablo, bobin	90	6,93
Kurşun (Pb)	Katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	5	6,30
Çinko (Zn)	Katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	60	2,20
Kalay (Sn)	Katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	70	1,001
Nikel (Ni)	Kasa, katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	80	0,850
Baryum (Ba)	Katot ışıını tüpü	-	0,0315
Mangan (Mn)	Kasa, katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	-	0,0315
Gümüş (Ag)	Baskılı devre levhası, konektörler	98	0,0189
Tantal (Ta)	Baskılı devre levhası, kesintisiz güç kaynağı	-	0,0157
Berilyum (Be)	Baskılı devre levhası, konektörler	-	0,0157
Titanyum (Ti)	Kasa	-	0,0157
Kobalt (Co)	Kasa, katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	85	0,0157
Antimon (Sb)	Baskılı devre levhası	-	0,0094
Kadmiyum (Cd)	Kasa, katot ışıını tüpü, baskılı devre levhası	-	0,0094
Bizmut (Bi)	Baskılı devre levhası	-	0,0063
Krom (Cr)	Kasa	-	0,0063
Cıva (Hg)	Baskılı devre levhası	-	0,0022
Germanyum (Ge)	Baskılı devre levhası	-	0,0016
İndiyum (In)	Baskılı devre levhası	60	0,0016
Altın (Au)	Baskılı devre levhası, konektörler	99	0,0016
Rutenyum (Ru)	Baskılı devre levhası	80	0,0016
Selenyum (Se)	Baskılı devre levhası	70	0,0016
Galyum (Ga)	Baskılı devre levhası	-	0,0013
Arsenik (As)	Baskılı devre levhası	-	0,0013
Paladyum (Pd)	Baskılı devre levhası, konektörler	95	0,0003
Vanadyum (V)	Katot ışıını tüpü	-	0,0002
Eroppyum (Eu)	Katot ışıını tüpü	-	0,0002
Niobyum (Nb)	Kasa	-	0,0002
İtriyum (Y)	Katot ışıını tüpü	-	0,0002
Terbiyum (Tb)	Katot ışıını tüpü	-	0,0001
Rodyum (Rh)	Baskılı devre levhası	50	0,0001
Platin (Pt)	Baskılı devre levhası	95	0,0001

İlk mobil telefonlar çok büyük ve ağır olduklarından genellikle sadece motorlu araçlara diğer elektrikli sistemlere kablo bağlantısıyla yerleştirilmişlerdir. Birinci nesil gerçek manada ilk mobil telefonlar bile büyük ve ağırdılar ve kurşun ait pilleri içermektedirler. 4 kg'dan daha ağır olduklarından omuza asılan bir çantayla taşınmaktaydılar. Ancak sürekli olarak geliştirilen bu cihazlar 1980'lerde küçük ve hafif modellere erişmişlerdir. Günümüz mobil telefonları genellikle 100 g'dan daha hafiftirler ve küçük bir pil tarafından çalıştırılırlar [41]. Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de mobil telefonların ağırlık ve boyut değişimleri görülmektedir.



Şekil 3.1: Mobil Telefonlarda Ağırlık Değişimi



Şekil 3.2: Mobil Telefonlarda Boyut Değişimi



Şekil 3.3: Mobil Telefonlarda Ağırlık ve Boyut Değişimi

Mobil telefonlar imalatçıdan imalatçıya ve modelden modele değişmektedir. Bu nedenle mobil telefonlarda mevcut materyallerde farklıdır. Bununla beraber mobil telefonlar genel olarak %15 cam ve seramik, %37 demir dışı metaller, %3 demir içeren metaller, %40 plastik ve %5 diğer materyaller içerirler [41]. Pil ve çevre birimleri dahil olmak üzere mobil telefonlar için element analizi Tablo 3.8’de [41] ve farklı kaynaklara göre baskılı devre levhaları için element analizi ise Tablo 3.9’da verilmiştir [50].

Tablo 3.8: Mobil Telefonlar İçin Element Analizi

Materyal	Mobil Telefondaki Konumu	İçerik (%)
Birincil bileşenler:		
Plastikler	Kasa, baskılı devre levhası	~ %40
Cam, seramikler	LCD ekran, yonga	~ %15
Bakır (Cu) ve bileşikleri	Baskılı devre levhası, konektörler, kablo, pil	~ %15
Nikel (Ni) ve bileşenleri*	NiCd / NMH (Nikel Metal Hidrid) pil	~ 10%
Potassium Hydroxide (KOH)*	NiCd / NMH (Nikel Metal Hidrid) pil	~ %5
Kobalt (Co)*	Lityum-İyon pil	~ %4
Lityum (Li)*	Lityum-İyon pil	~ %4
Carbon (C)	Pil	~ %4
Alüminyum (Al)†	Kasa, şasi, pil	~ %3
Çelik, demir içeren metaller (Fe)	Kasa, şasi, şarjör, pil	~ %3
Kalay (Sn)	Baskılı devre levhası	~ %1
İkincil bileşenler: tipik olarak %1’den az %0,1’den fazladır		
Brom (Br)	Baskılı devre levhası	
Kadmiyum (Cd)	NiCd pil	
Krom (Cr)	Kasa, şasi	
Kurşun (Pb)	Baskılı devre levhası	
Sıvı kristal polimer	LCD ekran	
Manganez (Mn)	Baskılı devre levhası	
Gümüş (Ag)	Baskılı devre levhası, tuş takımı	
Tantal (Ta)	Baskılı devre levhası	
Titanyum (Ti)	Kasa, şasi	
Tungsten (W)	Baskılı devre levhası	
Çinko (Zn)	Baskılı devre levhası	
Mikro yada eser miktardaki bileşenler: tipik olarak %0,1’den az		
Antimon (Sb)	Kasa	
Arsenik (As)	Galyum Arsenür LED	
Baryum (Ba)	Baskılı devre levhası	
Berilyum (Be)	Konektörler	
Bismut (Bi)	Baskılı devre levhası	
Kalsiyum (Ca)	Baskılı devre levhası	
Flor (F)	Lityum-İyon pil	
Galyum (Ga)	Galyum Arsenür LED	
Altın (Au)	Bağlantı parçaları, baskılı devre levhası	
Magnezyum (Mg)‡	Kasa	
Paladyum (Pd)	Baskılı devre levhası	
Rutenyum (Ru)	Baskılı devre levhası	
Stronsiyum (Sr)	Baskılı devre levhası	
Sülfür – Kükürt (S)	Baskılı devre levhası	
İtriyum (Y)	Baskılı devre levhası	
Zirkonyum (Zr)	Baskılı devre levhası	

* Sadece bu tip pillerde kullanılırlarsa, aksi takdirde ikincil veya küçük bileşendirler

† Eğer alüminyum kasada kullanılırsa miktar ~ %20’den daha fazla olacaktır

‡ Eğer magnezyum kasada kullanılırsa miktar ~ %20’den daha fazla olacaktır

Tablo 3.9: Baskılı Devre Levhaları İçin Element Analizi

Materyal	İçerik (%)			
Silis (Si)	30,2	49,0	-	-
Plastikler	30,2	19,0	-	-
Brom (Br)	-	4,0	2,7	-
Demir (Fe)	8,1	6,0	10,8	5 – 10
Bakır (Cu)	20,1	7,0	3,7	10 – 20
Alüminyum (Al)	2,0	-	4,8	1
Kalay (Sn)	4,0	1,0	3,1	2
Nikel (Ni)	2,0	3,0	0,32	1 – 3
Kurşun (Pb)	2,0	-	-	1 – 5
Çinko (Zn)	1,0	2,0	1,45	0,3
Gümüş (Ag)	0,2	-	0,08	0,05 – 0,3
Altın (Au)	0,1	-	0,01	0,0003 – 0,001
Mangan (Mn)	-	-	2,15	-
Antimon (Sb)	-	-	0,45	-
Baryum (Ba)	-	-	0,36	-
Klor (Cl)	-	-	0,19	-
Sodyum (Na)	-	-	0,18	-
Krom (Cr)	-	-	0,16	-
Kadmiyum (Cd)	-	-	0,04	-
Tantal (Ta)	-	-	0,02	-
Paladyum (Pd)	0,005	-	-	0,004 – 0,003
Diğer	-	9,0	-	-

Materyal fiyatları; yerel şartlara ve değişken pazar koşullarına bağlı olarak dalgalı bir seyir izlemektedir. Ayrıca materyalin saflığı ve homojenliği, materyalin mevcut olup olamaması, materyal tedarik sistemi ve talepler materyal fiyatlarını etkileyen diğer unsurlardır. Tablo 3.10’de farklı kaynaklara ait aynı atık materyaller için belirlenen farklı materyal fiyatları verilmiştir [50]. Tabloda yer alan negatif değerler söz konusu materyallerin nakliyesi için alıcıya ödenmesi gereken ücreti göstermektedir.

3.2 Zararlı Maddeler ve Bileşenler

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ayrıştırma işlemleriyle uzaklaştırılması gerekli olan farklı büyüklük ve şekilde çok miktarda zararlı bileşen içerirler. Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarında yer alan ve özellikle ele alınması gerekli olan başlıca zararlı materyaller Tablo 3.11’de [50] ve zararlı bileşenler ise Tablo 3.12’de [3,27] verilmiştir. Bu zararlı bileşenlerin çevre ve insan sağlığı açısından taşıdıkları riskler aşağıda sıralanmıştır [7,26].

Kadmiyum (Cd): Kadmiyum insan vücudunda böbrekte birikir, insanı zehirler ve kansere sebep olur. İskelet sistemi üzerinde de olumsuz etkilere sahip olup kırılğan kemiklere neden olur. Biyolojik olarak birikir ve aktarılır. Yüzeye bindirilmiş aletler, yonga dirençleri, kızılötesi detektörleri, yarı iletkenler ve eski tip katot ışıını tüpleri kadmiyum içerir. Ayrıca plastiklerde stabilizatör olarak kullanılır.

Tablo 3.10: Çeşitli Kaynaklara Göre Atık Materyal Fiyatları (\$.kg⁻¹)

Materyal	1	2	3	4	5
Demir	0,02	0,04	0,05	0,085	0,11
Paslanmaz Çelik	0,22*	0,23	0,33	0,6	0,78
Demir Dışı	0,62	0,88			
Al	0,42 [†]	0,49	0,60	1,06	1,89
Cu	0,18	0,31	0,45 [‡]	1,25	2,25
Pirinç	0,96 [§]	1,15			
Ni	2,78	4,92			
Pb	0,42	0,46	2,26		
Zn	0,37	1,06	2,20		
Sb	1,34	5,18			
Değerli Materyal	174,00				
Au	8.566,00	10.200,00			
Ag	75,80	143			
Pd	11.065,00	10.200,00			
Pt	19.000,00				
Plastikler	0,02 ^{**}	0,045	0,05	0,11	0,22
ABS	0,33				
PC	0,57				
PE	0,30				
PS	0,04	0,36			
PVC	0,24				
Karışık Materyal	— 0,05	— 0,24			
Cam	0,15				
CRT Camı	— 0,19	— 0,25	— 1,00 ^{††}		
Baskılı Devreler	0,00	0,08	0,50	1,67	2,20
Kablolar	0,11	0,18	0,40		
Piller	— 0,50	— 1,65			
Atık	— 0,11				
PC ^{‡‡}	— 0,02				

Bromlu Alev Geciktiriciler (BFR – Brominated Flame Retardants): İnsan sağlığı açısından kanserojen ve nörotoksik olup üreme üzerinde negatif etkiye sahiptirler. Normal gelişme için hormonal fonksiyonları önemli derecede etkiler. Gömme alanlarından çözünerek sızarlar ve buharlaşarak belirli mesafelere yayılırlar. Biyolojik olarak birikir ve aktarılırlar. Yakılmaları halinde dioksin ve furan oluşumuna sebebiyet verirler. BFR işyeri ve ofislerdeki bilgisayarlar üzerindeki tozlarda bulunmaktadır ve ABD ve İsveç'te anne sütünde çok fazla miktarda rastlanmıştır.

Altı Değerli Krom (Cr+6): Deriyle temas halinde alerjik reaksiyona sebep olur. Genotoksik olduğundan DNA hasarı ve astimik bronşite sebep olabilir. Hücre içerisine kolaylıkla emilir ve zehirleyici etkiye sahiptir. Korozyon koruması ve işlenmemiş galvaniz çelik levhalar ve serleştirilmiş çelik için kullanılır.

* Karışık

† Karışık

‡ Karışık

§ Alaşım

** Bilgisayar kasası

†† CRT atığı. 1 birim CRT = 9kg

‡‡ Komple kişisel bilgisayar atığı

Tablo 3.11: EEE Atıklarında Yer Alan Önemli Zararlı Materyaller

Materyaller	Uygulama
Ağır Metaller	
Cd, Ni, Zn, Pb, Hg	Piller, flüoresan tüpleri
Sn, Pb, Cd	Lehim
Ba, Sr, Pb	Katot ışıını tüpü camları
Cd, Y, Eu, Se, Zn	Flüoresan tozları
Hg	Röleler
Yarı İletkenler	
B, Ga, In, As	Bileşik devreler
Ga, As	LED, fotovoltatik hücreler
Se, Ge	Diyotlar
Se	Fotokopi tamburları
Organik Bileşenler	
PCB	Kondansatörler
PBDE	Alev geciktiriciler
Mineral Yağlar	Yağlayıcılar
Plastik Katkıları	
Cl	PVC
Cd, Pb, Ni, Ti, Sb	Pigmentler
Pb, Ba, Cd, Sn	Stabilizatörler

Tablo 3.12: EEE Atıklarında Yer Alan Önemli Zararlı Bileşenler

Bileşenler	Açıklama
Piller	Pillerde kurşun, cıva, kadmiyum gibi ağır metaller mevcuttur
CRT	Konik cam içerisinde kurşun mevcuttur ve panel camının iç taraf astarı flüoresan kaplıdır
Anahtarlar gibi cıva içeren bileşenler	Cıva termostatlarda (ısı ayarlayıcıları), algılayıcılarda, rölelerde ve anahtarlarda kullanılır (baskılı devre levhaları, ölçüm elemanları ve gaz akışlı lambalarda olduğu gibi); ve ayrıca tıbbi ekipmanlarda, veri iletiminde, haberleşmede ve taşınabilir telefonlarda da kullanılır
Asbest atıkları	Asbest atıkları da özel olarak ele alınmalıdır
Toner kartuşları ve sıvı, macun ve renkli tonerler	Toner ve toner kartuşları elektrikli ve elektronik ekipman atıklarından sökülerek ayrı olarak toplanmak zorundadır
Baskılı devre levhaları	Baskılı devre levhalarında SMD yonga dirençleri, kızıl ötesi algılayıcıları ve semi kondüktörler gibi kadmiyum içeren birçok parça mevcuttur
PCB içeren kondansatörler	PCB içeren kondansatörler güvenli ayrıştırma için sökülme zorundadır
LCD	Alın 100cm ² den büyük olan sıvı kristalli görüntüleyiciler elektrikli ve elektronik ekipman atıklarından sökülme zorundadır
Plastik ihtiva eden halojenli yanma geciktiriciler	Plastik halojenli yanma geciktiricilerin yanması ve/veya tutuşması sırasında zehirli bileşenler oluşabilir
CFC, HCFC veya HFC ihtiva eden ekipmanlar	Soğutma çevriminde ve köpükte bulunan CFC uygun şekilde çekilmeli ve imha edilmelidir; soğutma çevriminde ve köpükte yer alan HCFC veya CFC uygun şekilde çekilmeli ve imha edilmeli yada geri dönüştürülmelidir
Gaz akışkanlı lambalar	Cıva taşınmak zorundadır

Kurşun (Pb): Kurşunun sağlık üzerine olumsuz etkileri iyi bilinmektedir. Sinir sistemi, endokrin ve dolaşım sistemi hasarına neden olur. Çocuklarda beyin hasarı ve üreme bozuklukları nedeniyle kurşun içeren birçok ürün yasaklanmıştır. Doğada birikir ve bitki, hayvan ve mikroorganizmalar üzerinde yüksek derecede zehirleyici etkiye sahiptir. Katot ışıını tüpleri, eski lehimler ve entegre devreler kurşun içerir.

Baryum (Ba): Katot ışını tüplerinde radyasyonu azaltmak için kullanılır. Kısa süre baryuma maruz kalma beyin şişmesine, kas zayıflığına, kalp ve karaciğer hastalığına neden olabilmektedir.

Cıva (Hg): Düşük dozlarda bile zehirlidir ve beyin ve böbreklere zarar verir. Vücutta birikir ve anne sütüyle geçebilir. Bir çay kaşığının 70'te biri bile 80.000 m² alana sahip bir göldeki suyu kirleterek yaşayan organizmalar tarafından biriktirilmesine sebep olur.

Fosfor (P): Katot ışını tüplerinin iç yüzünü kaplamak için kullanılır. Kırılan tüplerden oluşan tozların teneffüsü çok risklidir. Fosforun zararı pek fazla bilinmemektedir.

Berilyum (Be): Ana kart ve bağlantılarda bulunur. Son zamanlarda berilyum kanserojen olarak sınıflanmaktadır.

Nikel (Ni): Endokrin, bağışıklık sistemini, deri ve gözler üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.

Plastikler: Bir bilgisayarda ortalama 7 kg civarında PVC içeren plastik bulunur. Belli sıcaklıkta yandığında dioksin oluşur. Plastik birleşimleri baskılı devrelerde kullanılır. PVC en tehlikeli plastiktir.

3.3 Elektrikli ve Elektronik Atıkların Fiziksel Özellikleri

Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları bakır, alüminyum, altın gibi metaller ve plastikler gibi farklı materyallerin bir karışımıdır. Bu materyallerin efektif bir şekilde ayrıştırılması için geliştirilecek olan bir mekanik geri dönüşüm sistemi bu materyallerin fiziksel karakteristiklerini temel alır. Bu nedenle bu çok özel materyal akışlarının karakteristiklerini derinlemesine bilmek zorunludur.

3.3.1 Manyetik, Yoğunluk ve Elektrik İletkenliği Özellikleri

Elektrikli ve elektronik ekipmanlarda kullanılan bazı materyaller için manyetik çekim, yoğunluk ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler Tablo 3.13, Tablo 3.14 ve Tablo 3.15'de verilmiştir [27,53-55]. Ayrıca Şekil 3.4'de plastiklerin suya göre özgül ağırlık değeri aralıkları görülmektedir [52]. Genel olarak bir elektrik alanı tarafından kutuplanan bilen bir ortama veya maddeye dielektrik adı verilir. Kıyaslama olması açısından boşluğun dielektrik sabiti 1, kuru havanın dielektrik sabiti 1,00059 ve de suyun dielektrik sabiti ise 80'dir.

Tablo 3.13: Bakır Alaşımlarının Manyetik Duyarlılık Değerleri*

Materyaller	Fe oranı (%)	Kütleli Duyarlılık ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
Alüminyum-bronz bileşimi	2 – 4	$6,5 - 11,5 \times 10^{-7}$
Manganez-bronz bileşimi	1,5 – 3	$0,7 - 2,4 \times 10^{-7}$
Özel pirinç	0,7 – 1,2	$1,3 - 5,8 \times 10^{-7}$
Pirinç (Fe ihtiva etmeyen)	< 0,2	$< 0,1 \times 10^{-7}$
Kalay ve kurşun bronz	< 0,2	$< 0,1 \times 10^{-7}$

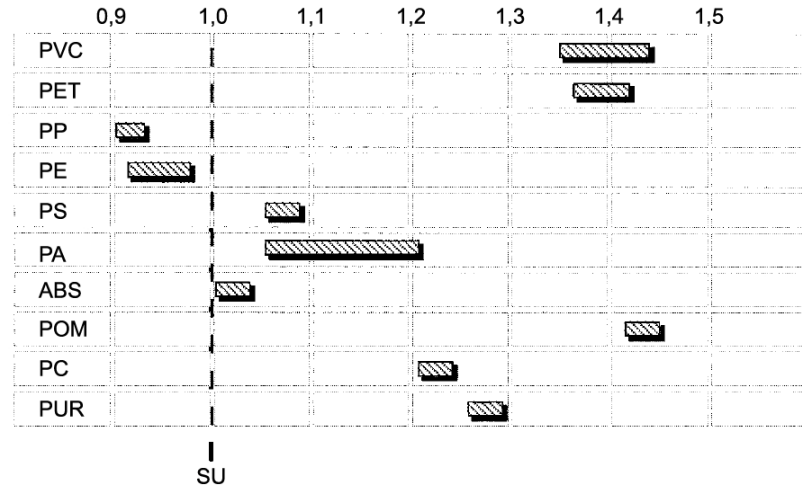
Tablo 3.14: Metallerin Bazı Fiziksel Karakteristikleri

Materyaller	Yoğunluk ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Elektriksel İletkenlik ($\text{m}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$)	Elektriksel İletkenliğin Yoğunluğa Oranı ($\text{m}^2 \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Cu	$8,96 \times 10^3$	$59,60 \times 10^6$	$6,65 \times 10^3$
Cu–Zn Alaşımı (Ms 58)	$8,40 \times 10^3$	$1,90 \times 10^6$	$0,23 \times 10^3$
Cu–Zn (Fe İhtiva Etmeyen)	$8,40 \times 10^3$	$15,00 - 26,00 \times 10^6$	$1,79 - 3,10 \times 10^3$
Ni	$8,90 \times 10^3$	$14,30 \times 10^6$	$1,61 \times 10^3$
Co	$8,90 \times 10^3$	$17,20 \times 10^6$	$1,93 \times 10^3$
Li	$0,53 \times 10^3$	$21,00 \times 10^6$	$39,62 \times 10^3$
Al	$2,70 \times 10^3$	$37,70 \times 10^6$	$13,96 \times 10^3$
Fe	$7,86 \times 10^3$	$9,33 \times 10^6$	$1,19 \times 10^3$
Alaşımlı Çelik	$7,70 \times 10^3$	$0,70 \times 10^6$	$0,09 \times 10^3$
Sn	$7,30 \times 10^3$	$9,17 \times 10^6$	$1,26 \times 10^3$
Cd	$8,65 \times 10^3$	$13,80 \times 10^6$	$1,60 \times 10^3$
Cr	$7,19 \times 10^3$	$7,74 \times 10^6$	$1,08 \times 10^3$
Pb	$11,40 \times 10^3$	$4,81 \times 10^6$	$0,42 \times 10^3$
Mn	$7,43 \times 10^3$	$0,70 \times 10^6$	$0,09 \times 10^3$
Ag	$10,50 \times 10^3$	$63,00 \times 10^6$	$6,00 \times 10^3$
Ta	$16,60 \times 10^3$	$7,61 \times 10^6$	$0,46 \times 10^3$
Ti	$4,51 \times 10^3$	$2,34 \times 10^6$	$0,52 \times 10^3$
W	$19,30 \times 10^3$	$18,90 \times 10^6$	$0,98 \times 10^{-3}$
Zn	$7,14 \times 10^3$	$16,60 \times 10^6$	$2,32 \times 10^{-3}$
Mg	$1,74 \times 10^3$	$22,60 \times 10^6$	$12,99 \times 10^{-3}$
Au	$19,30 \times 10^3$	$45,20 \times 10^6$	$2,34 \times 10^{-3}$

Tablo 3.15: Plastiklerin Bazı Fiziksel Karakteristikleri

Plastikler	Dielektrik Sabiti 60 Hz'de	Dielektrik Direnci $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	Hacim Özdirenci $\Omega \cdot \text{m}$	Ortalama Özgül Ağırlık $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
PVC	6,00	400	10^9	$1,16 \times 10^3$
PE	2,30	480	10^{17}	$0,91 - 0,96 \times 10^3$
ABS	2,60	425	10^{14}	$1,04 \times 10^3$
PS	2,45	425	10^{14}	$1,04 \times 10^3$
PP	2,20	650	10^{15}	$0,90 \times 10^3$
PA	3,43	560	10^{14}	$1,43 \times 10^3$
PET	3,80	650	10^{13}	$1,39 \times 10^3$
PBT	3,30	420	$1,40 \times 10^{13}$	$1,31 \times 10^3$
PC	3,17	425	$8,20 \times 10^{14}$	$1,20 \times 10^3$
Naylon	4,00	385	10^{12}	$1,14 \times 10^3$
Doğal Kauçuk	2,30	600	10^{13}	$0,93 \times 10^3$
Neopren	9,00	150	10^9	$1,25 \times 10^3$
SBR	2,90	600	10^{13}	$0,94 \times 10^3$
Silikon	3,00	500	10^{15}	$1,20 \times 10^3$

* $325 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ şiddetindeki manyetik alan verilerine dayanmaktadır



Şekil 3.4: Plastiklerin Özgül Ağırlık Aralıkları (gr.cm⁻¹)

3.3.2 Tane Boyutu, Şekil ve Serbestleşme Derecesi Özellikleri

Tane boyutu, şekli ve serbestleşme derecesi mekanik geri dönüşüm prosesinde önemli rol oynar. İki veya daha fazla materyal içeren bağlı tanelerin boyut küçültme işlemleri sonucu birbirlerinden ayrılarak serbest hale gelmelerine tane serbestleşmesi adı verilir [56].

Elektronik atıklar doğal maden cevherlerine göre daha zayıf ara yüzey bağlarına sahiptirler [19]. Ayrıştırma derecesinin belirlenmesi için kullanılan kanıtlanmış ve basit bir yöntem, tane sayma yöntemi olarak bilinir ve denklem 3.1 ile tanımlanır.

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{N_{fi}}{N_{fi} + N_{li}}}{n} \quad (3.1)$$

SD : serbestleşme derecesi

n : sayılan örnek sayısı

N_{fi} : i numaralı örnekteki istenen materyallerin serbest taneleri

N_{li} : i numaralı örnekteki aynı materyallerin bağlı taneleri

Tane sayımı materyalin boyutuna bağlı olarak çıplak gözle, optik mikroskoplarla ve x-ışınları mikro analiz yöntemleri ile yapılabilmektedir. Tane serbestleşmesinin saptanmasında en kolay uygulanabilen sayım yöntemi olup boyutu küçültülmüş materyalin elek analizi yapıldıktan sonra elek serisindeki her eleğin üstünde kalan malzemenin mikroskopa incelenmesi esasına dayanır. Diğer bir yöntem olan x-

ışınları mikro analiz yöntem en çok kullanılan ve insan katkısı en az olan otomatik bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan aygıtların ortak özelliği elektron mikroskobu ve x-ışınları spektrumu yöntemlerinin bazı özelliklerini bünyelerinde birleştirmişlerdir [57].

Elektronik atıklarda yer alan bileşenlerin serbestleşmesi elektronik ekipmanlarda kullanılan materyallerin zayıf ara yüzey bağlarına sahip olmalarından dolayı kolaylıkla sağlanır. Temel olarak materyaller bağlama, kaynak, yapıştırma, kaplama gibi çeşitli yöntemlerle birleştirilir. Bu nedenle seramikler, camlar ve belirli mekanik özelliklere sahip metaller gibi birleşik materyalleri çözmek için yoğun enerjiye gereksinim yoktur [48]. Zhang ve Fossberg [19] çalışmalarında hem kişisel bilgisayar ve hem de baskılı devre levhalarının serbestleşme derecelerini 10 mm ızgara açıklığına sahip laboratuvar ölçekli çekiçli değirmen vasıtasıyla yapılan ikinci boyut küçültme işleminden sonra analiz etmiş ve hesaplamıştır. Çalışmalarında her biri yaklaşık 1,5 kg olan iki örnek analiz edilmiş ve serbestleşme dereceleri bu formülle hesaplanmıştır. Her bir dağılımdaki temsil edilen henüz serbest halde olmayan bileşikler mikroskop analizleri için kullanılan Link analitik programı ile birleştirilmiş CamScan tarama elektron mikroskobu ile incelenerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 3.16 ve Tablo 3.17’de sunulmuştur [19].

Hemen hemen tüm mekanik geri dönüşüm prosesleri efektif bir boyut oranına sahiptir. Kişisel bilgisayarlar ve baskılı devre levhaları atıkları laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde ikinci bir kırma işleminden sonra %99 gibi mükemmel bir serbestleşme derecesi göstererek 5 mm boyutundan daha küçük parçalara ayrılma karakteristiği sergilemişlerdir [48]. Ek olarak endüstriyel ölçekli çalışmalarda da ikinci kırma işleminin sonunda bu boyuta %96,5 – %99,5 oranında erişilmiştir.

Tablo 3.16: Kişisel Bilgisayar Atıklarındaki Ana Metaller (Alaşımlar) İçin SD

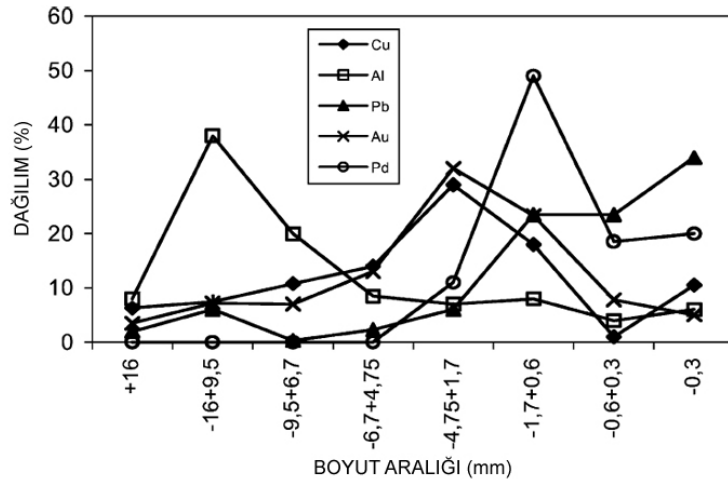
Boyut aralığı (mm)	Ağırlık (%)	Serbestleşme Derecesi (%)		
		Demir	Al	Cu
+16	10,48	62,5	100,0	0,0
-16+9,5	25,07	94,6	100,0	50,0
-9,5+6,7	13,98	94,4	100,0	85,3
-6,7+4,75	9,44	87,0	saptanmamış	93,2
-4,75+1,7	9,13	98,5	saptanmamış	98,6
-1,7+0,6	10,85	100,00	saptanmamış	99,0
-0,6+0,3	8,37	100,00	saptanmamış	100,0
-0,3	12,68	100,00	saptanmamış	100,0
Toplam	100,00	92,6		74,1

Tablo 3.17: Baskılı Devre Levhası Atıklarındaki Ana Metaller (Alaşımaların) İçin SD

Boyut aralığı (mm)	Ağırlık (%)	Serbestleşme Derecesi (%)		
		Demir	Al	Cu
+16	19,85	8,7		2,8
-16+9,5	16,91	80,0	100,0	15,4
-9,5+6,7	15,00	95,0	100,0	48,6
-6,7+4,75	12,71	95,4	saptanmamış	62,5
-4,75+1,7	16,32	99,2	saptanmamış	99,0
-1,7+0,6	10,46	100,0	saptanmamış	99,0
-0,6+0,3	3,54	100,0	saptanmamış	100,0
-0,3	5,21	100,0	saptanmamış	100,0
Toplam	100,00	77,0		53,7

Şekil 3.5 kişisel bilgisayarlar için boyut aralığının bir fonksiyonu olarak metal dağılımını göstermektedir [48]. Bu grafikte alüminyum çoğunlukla dağılımının büyük parçalı olduğu (+ 6,7 mm) ancak diğer metallerin çoğunlukla dağılımının küçük parçalı (- 5 mm) olduğu görülebilir. Bilindiği gibi boyut özellikleri efektif bir ayırma tekniğinin seçilebilmesi için önemlidir. Ayrıca bir eleme işlemi tarafından metallerin içerik kalitesinin yükseltilmesi yaygındır.

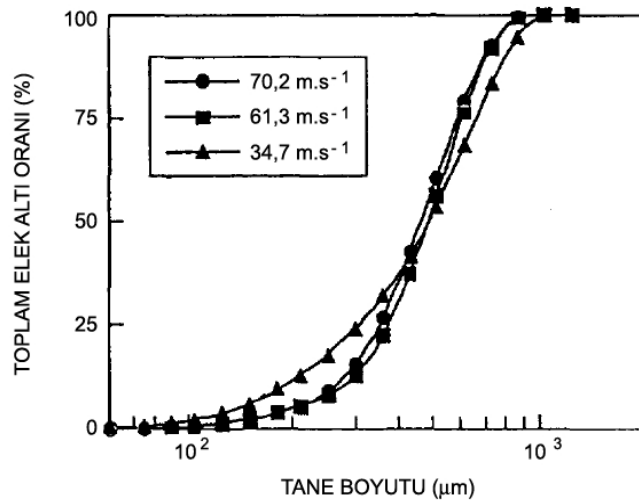
Materyal işlenmesinde hem kırma hem de ayırıştırma işlemleri sırasında parça şekli çeşitliliğinin kayda değer oranda etkili olduğu iyi bilinmektedir. Diğer bir değişle şekil temelli ayırma tekniklerinde parçaların şekil farklılıklarından yararlanılır.



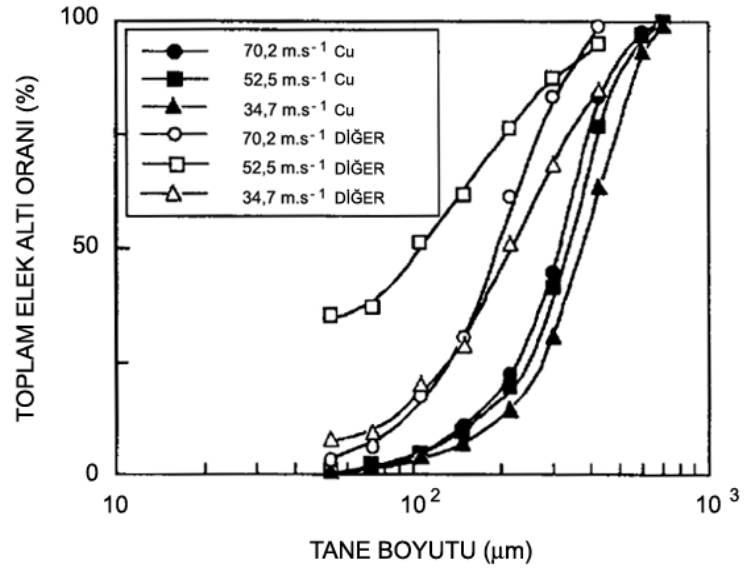
Şekil 3.5: Kişisel Bilgisayarlarda Boyut Aralığına Bağlı Metal Dağılımı

Koyanaka ve diğerleri bir eksen etrafında dönen çekiçli tip darbeli bir değirmende bakır bileşenlerinin geri dönüşümü için boyut farkına göre bir ayırma tekniği geliştirmek amacıyla öğütülen bakır tanelerinin parça boyutu özelliklerini araştırmışlardır [58]. Çalışmada bakır plaka ve baskılı devre levhası atıkları örnek olarak kullanılmıştır. Çekiç çevresel hızı (v_c) ve elek delik boyutu (çap, d_s) gibi

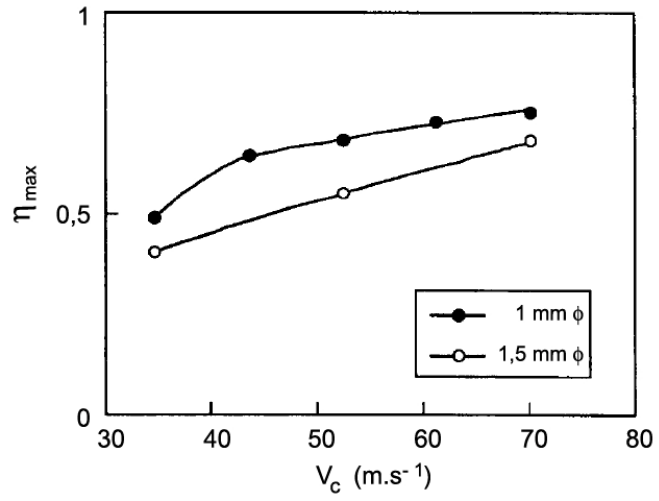
öğütücü çalışma şartlarının öğütücü ürünlerinin şekil ve boyut dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 3.6'de öğütülmüş bakır plakaları için tane boyutu dağılımı ve Şekil 3.7'de ise öğütülmüş baskılı devre levhaları için bakır ve diğer materyallere ait tane boyutu dağılımı görülmektedir. Aynı zamanda bir eğimli titreşimli tabla (IVP – Inclined Vibrated Plate) kullanılarak baskılı devre levhası atıklarının bakır ve bakır olmayan bileşenleri arasında öğütücü şartlarının ayırma verimi üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Şekil 3.8'de ise açılal hızın ve elek açıklığının ayırma verimi üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den açık olarak görülmektedir ki tokmak çevresel hızı ve elek açıklığı öğütülmüş bakır tanelerinin şekli ve ayırma verimi üzerinde etkilidir. Ayrıca öğütülmüş bakır tanelerinin tane boyut dağılımı için kayda değer bir farklılık gözlenememekle beraber öğütülmüş baskılı devre levhalarının tanelerinin tane boyutu dağılımı için bakır olmayan bileşenlerin bakırdan daha küçük olarak öğütüldüğü görülmektedir. Aynı şekilde çekiç çevresel hızı için bakır taneleri üzerinde kayda değer bir fark görülmezken diğer materyaller üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Çalışmada öğütülmüş bakır parçacıklarının küreselliği ve homojenliği büyük oranda öğütücünün çalışma koşullarına bağlı olduğu gözlenmiştir. Çalışmanın sonuçları değirmenin en etkili çalışma koşullarının küresel bakır taneleri elde etmek için çekiç çevresel hızının 50 m.s^{-1} ve elek delik çapının 1 mm ve homojen bakır parçaları elde etmek için ise çekiç çevresel hızının 70 m.s^{-1} ve elek delik çapının 1 mm olması gerektiğini göstermiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi baskılı devre levhası atıklarından bakırın elde edilmesi için en etkili çalışma koşullarının çekiç çevresel hızının 70 m.s^{-1} ve elek delik çapının 1 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.6: Öğütülmüş Bakır Plakaları İçin Tane Boyutu Dağılımı



Şekil 3.7: Öğütülmüş Baskılı Devre Levhaları İçin Tane Boyutu Dağılımı



Şekil 3.8: Açısal Hızın ve Elek Açıklığının Ayırma Verimine Etkisi

4. ELEKTRİKLİ VE ELEKTRONİK EKİPMANLARIN DEMONTAJI

Demontaj göz önüne alınan mamul için bir bileşenin veya parçanın ya da bir parça grubunun veya tali montaj elemanlarının mamulden ayrılmasını (kısmi demontaj) veya mamulün tüm parçalarına ayrılmasını (tamamen demontaj) sağlayacak sistematik bir yaklaşımdır [59].

Araştırmacılar tarafından demontaj konusunda yürütülen çalışmalar demontaj yöntem planlaması (DPP – Disassembly Procces Planning) ve demontaj araçlarının geliştirilmesine yoğunlaşmıştır.

4.1 Demontaj Yöntem Planlaması

Demontaj yöntem planlamasının amacı demontaj stratejilerini şekillendirmek ve demontaj sistemlerini düzenlemek için metot ve yazılım araçları geliştirmektir. Bir demontaj yöntem planı geliştirmek için takip eden safhalar önerilmektedir [59-64]:

- Giriş ve çıkış mamulleri analizi: Bu safhada tekrar kullanılabilir, değerlendirilebilir ve tehlikeli bileşenler ve materyaller belirlenir. Akabinde ön maliyet analizi ve uygun demontaj tanımlanır.
- Birleştirme analizi: İkinci safhada, bağlama elemanları, bileşen hiyerarşisi ve öncelikli birleştirme sıralaması analiz edilir.
- Belirsiz konuların analizi: Demontajın belirsizliği kusurlu parçalardan veya eldeki mamulün bağlamalarından, tüketici kullanımı sırasında mamulün kalitesinin yükseltilmesi veya düşürülmesinden ve demontaj hasarlarından dolayı oluşur.
- Sökme stratejisinin tayin edilmesi: Son safhada, hasarlı veya hasarsız demontaj yönteminin kullanılacağına karar verilir.

Demontaj yöntem planlaması konusundaki çalışmalar son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Bu konuda yüzlerce makale yazılmıştır. Demontaj konusunda detaylı bir çalışma Güngör ve Gupta tarafından sunulmuştur [60].

Alfred J.D. Lambert elektronik ekipmanlar için demontaj sırasının oluşturulması üzerine bir çalışma yapmıştır. Optimum sıralama hassas bir demontaj sağlamak için verilen bir mamul konstrüksiyonunda, demontaj maliyetlerini, materyal kazançlarını ve dış etkenleri temsil eden en iyi yoldur. Özellikle elektronik mamuller için hiyerarşik yapı mamulün yeniden imalatı için önemli bir konudur. Mekanik konstrüksiyonların demontaj metotları bu özel probleme adapte edilmiştir [65].

Alfred J.D. Lambert çalışmasında, öncelikle konstrüksiyonlar için en uygun demontaj sırasını otomatik olarak oluşturmak amacıyla bir modelleme metodu tanımlanmıştır. Bu metodun bir sıralamanın otomatik olarak oluşturulabilmesi için uygun olduğunu kanıtlamak amacıyla, ilişki diyagramları özetlenmiş ve öncelik ilişkileri belirlenmiştir. Öncelik ilişkilerinin uygun olarak kullanılması için sınırlı sayıda alt montajların ve faaliyetlerin bir VE/VEYA grafiği olarak temsil edilebileceği bir model boyutuna indirgenmiştir. Demontaj maliyetlerini ve kazançlarını içeren optimum demontaj sıralaması standart lineer programlama yazılımları ile bulunabilir. Konstrüksiyondaki parçaların sayısının yalnızca lineer olarak artırılmasıyla problemin boyutu gerçek manada oldukça indirgenmiştir. Bu neredeyse anlık optimum demontaj sırası oluşturabilen bir modelle ispat edilmiştir. Ayrıca bu model birçok kıstas göz önüne alındığında optimuma yakın bir sıralama oluşturabileceğinden yararlıdır [65].

Demontaj sıralaması konusunda birçok yayın mevcuttur. Bu konudaki ilk çalışmalar onarım, bakım ve yedek parçaların çıkarılmasına odaklanmıştır. Sonraki çalışmalar otomatik montaj hatlarının tasarımını desteklemeye taşınmıştır. Daha sonraki çalışmalar ise toplanan atık karmaşık tüketici eşyaları için demontaj hatlarının tasarımına ve işletilmesine yönelmiştir. Bu çalışmaların bir bölümü mekanik konstrüksiyonlar için yapılmıştır. Burada mamul konstrüksiyonun biçimsel ifadesinin çıkarılması için öncelikli kaynak olara montaj çizimleri veya sanal prototipler kullanılmıştır. Birkaç yıldan beri elektronik ekipmanların demontajına yönelik çalışmalar görünür şekilde artmıştır [65].

Demontaj analizi ile ilgili ilk çalışma demontaj VE/VEYA grafiği olarak da adlandırılan demontaj aşağı-yukarı grafiği kavramını tanıtan Homem de Mello ve Sanderson [66,67] tarafından yapılmıştır. Homem de Mello ve Sanderson tüm olası demontaj sıralamalarını oluşturmak için bir algoritma geliştirmişlerdir.

Daha sonra bu çalışma Baldwin, Abell, Lui, De Fazio ve Whitney [68], De Fazio ve Whitney [69] ve Gu ve Yan [70] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmalar öncelikli olarak bir sıralama oluşturmakla ilgiliydi, en uygun sıralamanın bulunması problemine işaret etmiyordu.

Akabinde, en uygun demontaj sıralamasının oluşturulması bir dizi makalede incelenmiştir. Bunlardan bir çoğu bir montaj resmi tarafından tanımlanabilen mekanik konstrüksiyon üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlardan ilki olan Navin-Chandra [71] gezici satış elemanı problemini bir uyarlanmasını seçilen en uygun demontaj sıralaması için kullanmıştır. Burada optimizasyon kriteri çevresel şartların etkisi altında maliyetin minimize edilmesi başka bir değişle de kazancın maksimize edilmesiydi. Çevresel şartlar örneğin belirli parçaların tasfiyesini zorunlu kılmaktaydı. Lambert [72] benzer şartlara bağlı olarak bir grafik metot sunmuştur. Her iki metot da sırasıyla bir araba farı ve bir tükenmez kalem olmak üzere mekanik montajlar üzerine uygulanmıştır. Veerakamolmal ve Gupta [73,74] elektronik ekipmanlar ilgili olarak lojistik ve parçaların tasfiyesini temel alan karşılaştırılabilir bir problemi ele almışlardır. Metotları mamullerin farklı tiplerinde, farklı miktarlar için uygun olacak şekilde, istenen tanımlanmış parçaların verilen miktarları için talebi karşılayacak demontaj sıralamasının seçilmesini amaçlamaktaydı. Burada amaç talep edilen en düşük muhtemel maliyetlerin karşılanmasıydı.

Otomatik demontaj sıralaması oluşturulması konusunda lineer programlama (LP – Linear Programming) veya karma tam sayılı programlama (MIP – Mixed Integer Programming) vasıtasıyla en uygun demontaj sıralamasının tespit edilmesi ile ilgili literatürde farklı metotlar sunulmuştur. İlk olarak bu metot Kanehara, Suzuki, Inaba, ve Okuma [75] tarafından sunulmuştur. Lambert [76] tarafından bir dizi probleme uygulanmış ve çözülmüştür.

Mamullerin yeniden imalatı, parçaların tekrar kullanılması ve materyal geri dönüşümü konusunda şimdiye kadar birçok makale yayınlanmıştır. Bu makaleler demontaja yönelik tasarım bakış açısıyla demontaj problemini kapsamakta ve parçaların ve materyallerin geri kazanım optimizasyonunu amaçlamaktadır. Ayrıca tam geri dönüşüm çevrimi ve farklı demontak işlemlerinin maliyetinin tahmini konusu da ele alınmıştır.

Elektrikli ev gereçlerinin demontaj planlamasıyla ilgili çalışmalardan bazıları elektrik süpürgesi [77], bulaşık makinesi [78] ve elektrikli matkap [79] için yapılmıştır. Elektronik ekipmanlarla ilgili olarak demontaj çalışmalarından bazıları ise radyo setleri [80], telefon setleri [81], kişisel bilgisayarlar [73,74,82-84], TV setleri [85,86] ve monitörler [87] için gerçekleştirilmiştir. Modüllerle ve parçalarla ilgili olarak da emniyet şalterleri [88] ve baskılı devre levhaları [89] için yapılmıştır.

Güngör ve Gupta [59] demontaj sırası planlamasında belirsizlikten kaynaklanan zorluklara dikkat çekmişlerdir. Buna karşı olarak demontaj sırası planlaması uygulamasında belirsizliğe sahip olan bir sistem için bir yöntem geliştirmişler ve bir basit örnekle bu yöntemi sınımışlardır. Bu yöntem aşğıdaki adımlardan oluşur;

- Parçalar arasındaki geometrik temelli öncelik ilişkilerini temsil eden ve matris formatıyla gösterilen yapıyı oluşturmak
- Bir optimum demontaj sırası planlaması oluşturmak
- Demontaj işleminin yapılması ve belirsizliklerin giderilmesi

4.2 Demontaj Araçlarının Gelişimi ve Demontaj Uygulamaları

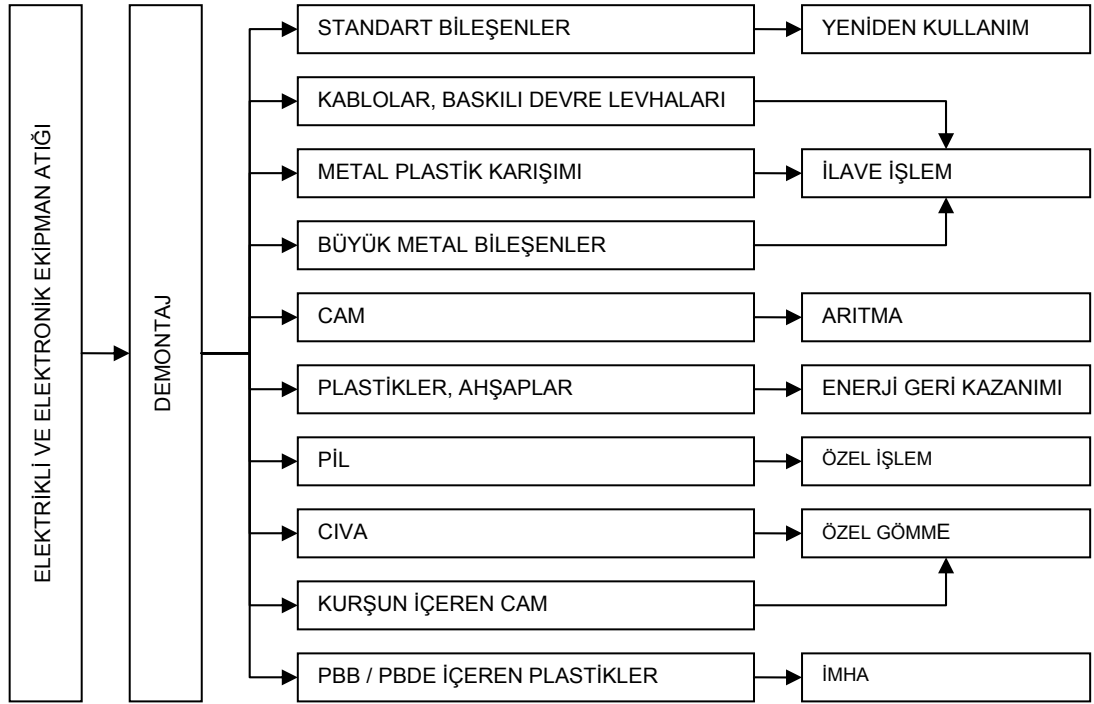
İyi bir demontaj yöntem planlaması oluşturabilmek için demontajın gerektirdiğı yüksek verimli ve esnek araçlara ihtiyaç vardır. Feldmann ve diğeri çalışmalarında bir takım patentli demontaj araçlarına değinmişlerdir [90]. Demontaj işleminde robotların kullanımı çok cazip araştırma alanlarından biridir. Elektronik ekipmanların otomatik olarak montaj edilmesi konusunda oldukça ilerleme kaydedilmiştir. Ancak elektronik ekipmanların geri dönüşümü için tam veya kısmi otomatik demontaj konusundaki çalışmalar için aynı başarı elde edilememiştir. Günümüzde klavyeler, monitörler, elektronik kartlar için ancak birkaç tam otomatik pilot demontaj projesi gerçekleştirilebilmekle beraber kişisel bilgisayarların kendileri için yarı veya tam otomatik her hangi bir proje bulunmamaktadır [91,92].

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşüm uygulamalarında seçici demontaj zorunlu olup kaçınılmaz bir prosestir çünkü; bileşenlerin tekrar kullanılması birinci önceliklidir, zararlı bileşenlerin ayıklanması zaruridir ve ayrıca değeri bileşenlerin ve baskılı devre levhaları, kablolar ve mühendislik plastikleri gibi yüksek sınıflı bileşenlerin sökölüp ayıklanması materyallerin basitleştirilerek sonradan yeniden değerlendirilmesi yerine tercih edilir ve yaygın olarak uygulanır.

Seçici demontaj genellikle hem mamulün bakımı ve onarımı ve hem de mamul ömür çevrimi sonunda demontaj aşamasında uygulanır. Bakım ve onarım amacıyla uygulandığında bazı bileşenler ve parçalar sökülerek arta kalan parçaların ve bileşenlerin onarım, test ve bakım için uygunluğu sağlanmış olur. Bu seçici demontaj uygulamasında genellikle hasarsız demontajı yeniden montaj uygulaması takip eder. Seçici demontaj mamul ömür çevrimi sonunda uygulandığında hem hasarsız (tam) hem de kısmi demontaj metotları kullanılabilir. Seçici demontaj işleminde üç tip çıktı alınır [50]:

- Homojen Bileşenler: Homojen bileşenler için ilave fiziksel ayırma işlemine gerek yoktur. Elektronik mamullerin kapakları, muhafazaları, çerçeveleri ve şasiden sökülen parçaları homojen bileşenlerin tipik örnekleridir.
- Karmaşık Bileşenler: Karmaşık bileşenler farklı homojen alt bileşenler içerirler ancak genellikle bağlama yöntemleri ile birbirlerine bağlandıklarından ve ayırmak için hasarlı demontaj gerekli olduğundan genellikle ilave demontaja gerek yoktur. Karmaşık bileşenlere örnek olarak katot ışıını tüpleri, baskılı devre levhaları, anahtarlar, rotorlar, statorlar ve transformatörler gösterilebilir.
- Modüller (Öbekler): Modüller genellikle ilave demontaj gerektirirler ancak işlevsellikleri ve tekrar kullanılabileceklerinden dolayı bazen işlenmezler. Modüllere örnek olarak, elektrik motorları, baskılı devre levhaları, optik birimler, kablolar, motorlar ve piller gösterilebilir.

Geri dönüşüm tesislerinin birçoğu el yordamı ile sökmeyi yararlanırlar. Şekil 4.1’de tipik elektronik ekipmanların geri dönüşümü ile uğraşan İsveç Ragn-Sells Elektronikaterwinning AB firmasının tercih ettiği güncel demontaj prosesi görülmektedir [27,93]. Zararlı bileşenleri ayırmak ve tekrar kullanılabilir veya değerli materyalleri ve bileşenleri yeniden değerlendirmek için sökme işleminde bir takım araçlar yer almaktadır.



Şekil 4.1: Demontaj ve Geri Dönüşüm İşlemlerinin Sınıflandırılması

Casper Boks ve Erik Tempelman makalelerinde elektronik ve otomotiv endüstrisi için gelecekteki potansiyel demontaj ve geri dönüşüm teknolojileri konusunda yaptıkları Delphi çalışmasının sonuçlarını kaleme almışlardır [94]. Sonuçlar yazarlar tarafından öncelikli seçilmiş olan yaklaşık yetmiş uzmanın oluşturduğu bir tartışma grubunun görüşlerini yansıtmaktadır. Elektronik ekipmanların tam otomatik (%90 – 100) olarak ayrılmasının teknik yapılabilirliği ile ilgili olarak; panel üyelerinin %65'i 2010 yılında otomatik demontajda büyük bir devrim beklemektedirler ve yine panel üyelerinin %57'si bunun Almanya'da olacağını beklemelerine rağmen Alman üyelerin ancak %35'i aynı görüştedir.

Ayrıca panelistlerin %32'si hem kahverengi eşyaların (televizyonlar, ses ve video ekipmanları gibi) ve hem de beyaz eşyaların (dondurucular, bulaşık makineleri gibi) tam otomatik olarak demontajının 2020 yılına kadar ekonomik olarak cazip edici olmayacağını düşünmektedirler. Görüşlerine göre; çok fazla tipte mamulün bulunması, aynı tip mamullerin miktarının az olması, genel olarak demontaja yönelik mamul tasarımının yapılmaması, iade nakliyesindeki genel problemler, iade edilmiş olan demontaj edilecek mamullerin miktarındaki değişim, ticari olarak başarılı bir demontaj faaliyetine engeldir.

Ancak demontaj için mamul tasarımı alanındaki araştırmalar geçen on yılda büyük aşama kaydetmiştir. Akıllı materyallerin kullanıldığı aktif demontaj olarak adlandırılan (ADSM - Active Disassembly using Smart Materials) kendiliğinden demontaj iyi bir fikirdir. Chiodo [95] modern mobil telefonların aktif demontajı için şekil hafızalı polimer (SMP – Shape Memory Polymer) teknolojisinin uygulamalarını ele almaştır. Deneysel olarak poliüretan (PU) bileşiminin akıllı materyal şekil hafızalı polimeri kullanılmıştır. Bu metot eğer söz konusu materyal yüzey montaj bileşenlerinden oluşturulmuş ise bütün bileşenlerin sökülmesi için bir muhtemel demontaj senaryosu sağlar. Araştırma telefonlar, cep telefonları, baskılı devre levhası bileşen montajları, kameralar, pil şarj cihazları, fotokopi kartuşları, katot ışın tüpleri, bilgisayar kasaları, mauslar, klavyeler, oyun makineleri ve ses cihazları gibi diğer küçük cihazlar ve el cihazlarında akıllı materyallerin kullanıldığı aktif demontaj uygulamalarını da kapsamaktadır [95].

5. MEKANİK ve FİZİKSEL GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ

Bir mamulü oluşturan çeşitli materyallerin kimyasal yapılarını bozmadan endüstrinin ihtiyacı olan en uygun hammadde haline getirmek ve ekonomik değer taşıyan materyalleri ekonomik olmayan materyallerden ayırmak için farklı birçok mekanik ve fiziksel geri dönüşüm işlemleri uygulanır [27,56,96-107]. Materyallerin endüstride kullanılabilmeleri için kullanım alanlarının farklılığına göre değişik şartlar aranır. Materyal tanelerinin belirli bir büyüklükte olması, materyal kompozisyonunun içerdiği kıymetli element yüzdesinin belirli bir yüzdenin üstünde olması ve materyal kompozisyonunun içerdiği zararlı element yüzdesinin belirli bir yüzdenin altında olması gibi bu şartlar geri dönüşüm yöntemleriyle sağlanır.

Mekanik ve fiziksel geri dönüşüm metotları dışında flotasyon, pirometalurji, hidrometalurji ve elektrometalurji metotları da mevcuttur. Flotasyon çok ince boyutlu materyallerin ayrılmasında uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde ayırma bazı materyallerin hava kabarcıklarına ilişerek yüzmesi ile sağlanır. Bu materyaller yüzey özelliklerine veya çeşitli reaktiflerle yüzey özelliklerinin değiştirilmesine bağılı olarak hava kabarcığına ilişirler. Bu özellikleri göstermeyen diğler materyaller ise su içinde ıslanarak batarlar. Flotasyon genelde farklı yüzey özelliğine sahip materyallerin ayrılması için uygulanan bir yöntemdir.

Priometalurji ergitme, kavurma ve redüksiyon (elektron kazanma) gibi yüksek sıcaklık işlemlerini, hidrometalurji sulu ortamlarda yapılan ayırma işlemlerini ve elektrometalurji de redüksiyon ve rafinasyon elektrolizleri gibi elektrik enerjisinden yararlanılan işlemleri içerirler.

Mekanik ve fiziksel ayırma yöntemleri diğler sayılan yöntemlere göre birim başına sabit yatırım ve enerji sarfiyatı daha düşük olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca mekanik ve fiziksel geri dönüşüm yöntemlerinde ayırma işlemleri için pahalı kimyasallar ve teknikler gerekmemekte çevre kirlenmesi yönünden daha uygun bir atık oluşmaktadır.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanım işlemi, atığın oluşmasıyla başlar ve atığın geri dönüşüm tesisine nakliyle devam eder. Atık içerisindeki materyallerin serbest hale getirilmesi ve ardından da boyut küçülme ve boyut farkına göre ayırma işlemlerinin yapılması gereklidir. Geri dönüşüm işleminde, değerli materyaller ile değersiz materyallerin birbirinden ayrılması amaçlandığı gibi değerli olan materyallerin ayrı saflıkta birbirinden ayrılması da öngörülmektedir. Bu nedenle, materyallerin özelliklerine bağlı olarak, bir veya birkaç yöntem birlikte uygulanabilmektedir.

Atığı oluşturan materyallerin iri boyutta serbest kalanları, aralarındaki özgül ağırlık veya renk farkına göre elle ayıklama ve gravite yöntemi ile ayrılırken, daha ince boyutta gravite ve flotasyon yöntemleri uygulanabilmektedir. Ayrıca, manyetik duyarlılık farkından da yararlanarak manyetik ayırma yöntemleri kullanılarak herhangi bir atık içinden manyetik duyarlılığı yüksek olanlar alınabilmektedir.

Bir ayırma işlemi sonunda genellikle biri konsantre diğeri artık olmak üzere iki ürün alınmaktadır. Bazen, bu ürünlerin dışında bir de ara ürün alınabilmektedir. Ayırma işlemi tek veya çok kademeli olabilmekte, her kademedede farklı boyut ve ayırma yöntemi uygulanmaktadır. Ayırma işlemlerinin denetimi, bu işlemler sırasında elde edilen ürünlerin miktarlarının tespit edilmesi ve kimyasal analizlerinin yapılarak değerli metal yüzdelerinin bulunması sonucu yapılabilmektedir. Sonuçların değerlendirilmesi metalürjik denge çizelgesi veya ayırma formülleri ile yapılmaktadır.

Materyallerin geri dönüşüm işlemlerinde yararlanılan materyal özellikleriyle, bu özelliklere dayanılarak uygulanan fiziksel ayırma yöntemleri Tablo 5.1’de ve ayırma işlemlerinde kullanılan aygıtlar ile bunların etkin ayırma gerçekleştirebilmeleri için beslenecek materyallerin tane boyutu limitleri (uygulama boyutu) Tablo 5.2’de verilmiştir [104].

Tablo 5.1: Materyal Özellikleri ve Fiziksel Ayırma Yöntemleri

Materyal Özellikleri	Ayırma Yöntemi
Sertlik, gevreklik, yapı ve kırılış şekli	Boyut küçültme, boyuta göre ayırma
Renk ve parlaklık, Flüoresan	Elle ve otomatik ayıklama
Özgül ağırlık	Özgül ağırlık (gravite) farkına göre ayırma
Manyetik duyarlılık	Manyetik ayırma
Elektrik iletkenliği	Elektrik iletkenliği farkına göre ayırma

Tablo 5.2: Ayırma İşlemleri ve Uygulama Boyutları

Ayırma Yöntemi	Kullanılan Aygıt veya Sistem		Uygulama Boyutu (mm)
Ayıklama	Elle Ayıklama Bandı		-300 +30
	Otomatik Ayıklama		-200 +5
Boyut Küçültme	Kırıcılar		-1500 +5
	Değirmenler		-25 +0,001
Boyuta Göre	Döner Elekler (Tromel)		-100
	Izgara ve Elekler		-100 +0,1
	Mekanik Sınıflandırıcılar		-1,5 +0,03
	Siklonlar		-0,5 +0,001
Gravite Farkına Göre	Ağır Ortam Tambur ve Koniler		-75 +2
	Jig		-25 +1
	Sarsıntılı Masa		-2 +0,003
	Humprey Spirali		-2 +0,1
Manyetik (Kuru)	Düşük Alan Şiddetli	Tamburlu Manyetik Ayırıcı	-10 +0,1
		Bantlı Manyetik Ayırıcı	-15 +5
	Yüksek Alan Şiddetli	Tamburlu Manyetik Ayırıcı	-100 +0,07
		Bantlı Manyetik Ayırıcı	-10 +0,1
		Döner Diskli Manyetik Ayırıcı	-3 +0,1
Manyetik (Yaş)	Düşük Alan Şiddetli	Tamburlu Manyetik Ayırıcı	-15 +0,075
		Bantlı Manyetik Ayırıcı	-3 +0,050
	Yüksek Alan Şiddetli	Tamburlu Manyetik Ayırıcı	-3
		Bantlı Manyetik Ayırıcı	-3
Elektrostatik	Elektrostatik Ayırıcılar		-1,5 +0,1

Zhang ve Fossberg'e göre [108] elektronik atıkların geri dönüşüm değerlerinin olduğu materyal kompozisyonları temel alınarak ispatlanabilir. Genellikle elektronik atıklar Au, Ag, Pd gibi değerli metaller, Cu, Al, Fe gibi temel metaller ve plastik, cam ve seramik gibi metal olamayan materyaller içerirler. Ayrıca bilgisayar yongaları gibi tekrar kullanılabilir parçalar yüksek değerlidir. Elektronik atıkların değerlendirilmesine yönelik mevcut yöntemler öncelikli olarak direk enerji ve metallerin (Cu ve Au, Ag gibi değerli metaller) yeniden değerlendirilmesine yöneliktir. Hidrometalürjik metotlar elektronik atıklarda mevcut materyaller kayda değer oranda heterojenliğe ve karmaşıklığa sahip olduklarından genellikle yalnızca elektronik atıklarda mevcut olan değerli materyallerin kısmen çıkarılması için kullanılır. Bu nedenle elektronik atıkların fiziksel olarak ayrılması zorunludur. Bu noktada etkin ve verimli bir ayırma çok önemli bir adımdır.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının mekanik geri dönüşümü ile ilgili detaylı bir çalışma Cui ve Forssberg [27] tarafından sunulmuştur. Çalışmada elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının fiziksel özellikleri yanı sıra, elektrikli ve elektronik ekipmanların demontajı ve elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının mekanik geri dönüşüm yöntemlerine yer verilmiştir.

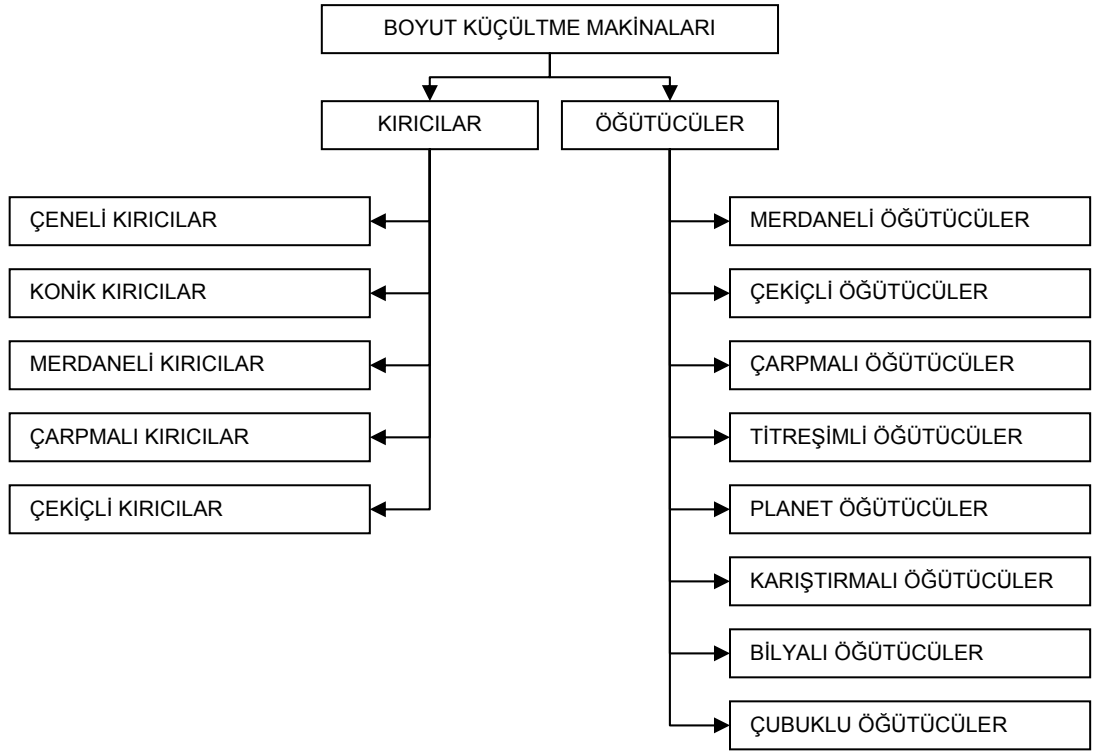
Zhang ve Forssberg [48] mekanik ayırma yöntemlerinin uygunluğunu değerlendirmek için elektronik atıkların mekanik ayrılmasına yönelik karakteristikleri ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında bileşiklerin sahip oldukları zayıf ara yüz bağlarından dolayı elektronik atıklarda bulunan metallerin kolaylıkla ayrılabilmesini ve genel olarak 2,0 mm'den küçük metal tanelerin neredeyse tamamının kazanılabileceğini göstermişlerdir. Ek olarak metaller ile plastiklerin, alüminyum ile ağır metallerin ve cam elyafıyla güçlendirmiş plastikler ile diğer plastiklerin ayrılmasında uygulanabilecek yoğunluk temelli ayırma teknikleri olan batırma-yüzdürme analizlerine yer verilmiştir. Çalışmada yoğunluk temelli ayırma ve düşük şiddetli manyetik ayırma yöntemlerinin birleştirilmesi ile yüksek kalitede bakır yoğunluğu elde edilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir.

Zhang ve Fossberg [19] diğer bir çalışmalarında elektronik atıkların sahip oldukları zayıf ara yüzey bağlarından dolayı kolay bir şekilde ayrıştırılabileceğini göstermişlerdir. Çalışmalarının odak noktası girdap akımı ayırma işlemi için uygun biçimde ve büyüklükte seçilmiş tanelerin sağlanabilmesi amacıyla akıllıca bir ayrıştırma tekniğinin nasıl geliştirilebileceğidir.

5.1 Boyut Küçültme

Bir cismin kendinden daha küçük parçalar haline getirilmesi işlemine boyut küçültme denir. Boyut küçültmede amaç; tane serbestleşmesi sağlamak, belirli bir geri dönüşüm işlemi için uygun tane boyutlu malzeme hazırlamak, belirli bir proses için gerekli tane boyutuna malzemeyi indirmek, nakliyyede kolaylık sağlamak ve malzemenin yüzey alanını büyütmektir [56].

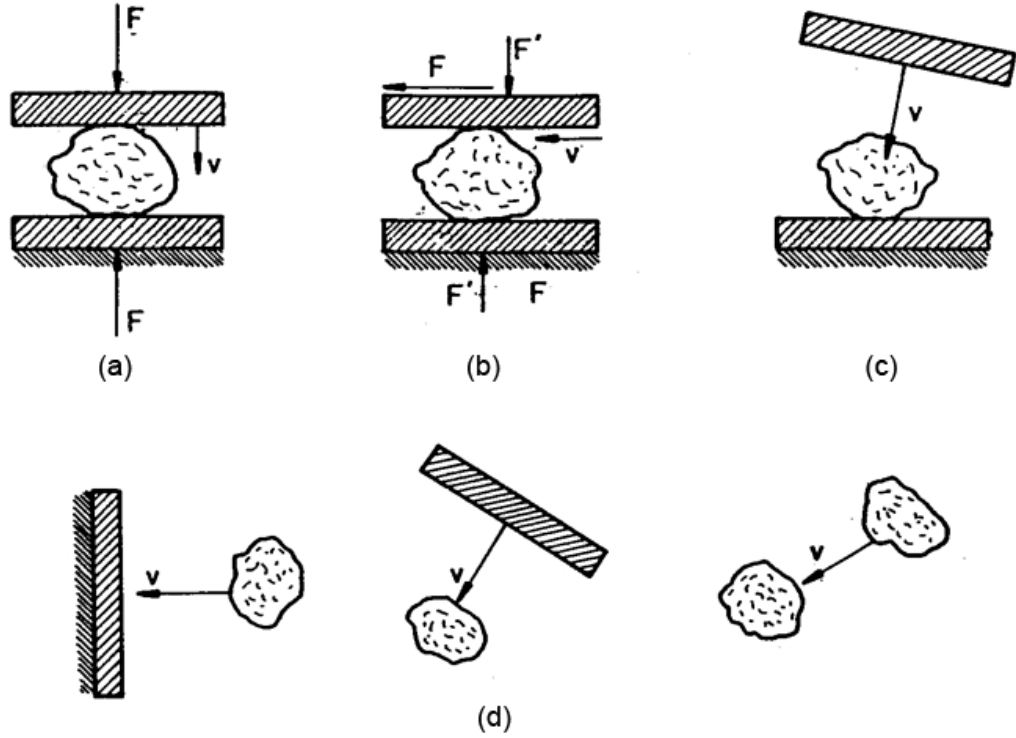
Boyut küçültme kırma ve öğütme işlemleriyle yapılabilir. Boyut küçültme işlemleri için kabul edilmiş olan belirli bir sınıflandırma yoktur ancak boyutları 200 – 10 cm arasındaki tanelere uygulanan kırma işlemleri iri kırma, 10 – 0,5 cm arasındaki tanelere uygulanan kırma işlemleri ise ince kırma olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde boyutları 2,5 – 0,1 cm arasındaki tanelere uygulanan öğütme işlemleri iri öğütme 0,1 cm – 1 µm arasındaki tanelere uygulana öğütme işlemleri ise ince öğütme olarak tanımlanabilir. Kırma işlemlerinde kullanılan araçlara kırıcı, öğütme işlemlerinde kullanılan araçlara ise öğütücü veya değirmen adı verilir. [56,107]. Şekil 5.1'de uygulamada karşılaşılan boyut küçültme makineleri için bir sınıflandırma verilmiştir.



Şekil 5.1: Boyut Küçültme Makinelerinin Sınıflandırılması

Boyut küçültme işlemlerinde oldukça büyük enerji kullanılır ve kırma makinelerine verilen enerjinin ancak küçük bir miktarı faydalı işe harcanır. Faydalı iş deyiminden anlaşılması gereken harcanan iş miktarının yeni yüzeylerin meydana çıkması için kullanılan kısmıdır. Boyut küçültme makinelerinde verilen enerji faydalı işin yanı sıra; parçalanmış tanelerin elastik şekil değişimi, parçalanmayan tanelerin elastik şekil değişimi, plastik özellikleri olan kısımların plastik şekil değişimi, yüzeysel amorflaştırma gibi diğer bağlantı şekillerine geçiş, kırma makinelerinin parçalarının elastik ve plastik şekil değişimi, kırma makinelerinin çalışan yüzeylerinin aşınması ile taneler arası ve tanelerle makinenin çalışan yüzeyleri arasındaki sürtünmelere harcanmaktadır [107].

Kırma işleminde harcanan enerji genellikle bir motorla hareket ettirilen makine parçası vasıtasıyla tane üzerine geçer. Taneyi kırmaya zorlayan kuvvet bazen baskı zorlaması, bazen kesme zorlaması, bazen çarpma veya vurma halindeki darbe zorlaması şeklinde etki edebilir. Çoğu zaman birkaç cins zorlamanın bir arada iş görmesi mümkündür ve kırma makinelerinde görülen zorlama cinslerinin birbirlerine karşı sınırlarını ayırt etmek bazen oldukça güçtür. Şekil 5.2’de kırma makinelerindeki karşılaşılan zorlama tipleri görülmektedir [107].



Şekil 5.2: Kırma Makinelerinde Karşılaşılan Zorlama Tipleri (a) Baskı Yoluyla Zorlama, (b) Kesme Yoluyla Zorlama, (c) Darbe Yoluyla Zorlama, (d) Çarpma Yoluyla Zorlama

Katı bir cismin iç bağlantı kuvvetlerini yenecek derecede bir dış kuvvetin uygulanması sonucu bu cismin daha küçük parçalara bölünmekte ve böylece kırma veya öğütme olayları gerçekleşmektedir. Dış kuvvetin uygulanmasına harcanacak güç ile bu güce karşı elde edilen sonuçlar arası bağlantılar üzerine günümüze kadar üç teori ortaya atılmıştır. Tarih sırasına göre bunlar Rittinger (1867), Kick (1885) ve Bond (1951) teorileridir [96]. Bu teoriler boyut küçültmek için gerekli enerjiyi boyut küçültme aracına giren ve çıkan malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı boyutlarıyla orantılı olarak tarif etmişlerdir. Bu teorilere göre bu orantılar sırasıyla denklem 5.1, 5.2 ve 5.3'de verilmiştir.

- Rittinger : $\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1}$ (5.1)

- Kick : $\frac{d_1}{d_2}$ (5.2)

- Bond : $\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}}$ (5.3)

Bu gün boyut küçültme işlemlerinde harcanan enerji en çok denklem 5.4’de verilen Bond formülü ile hesaplanmaktadır.

$$W = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right) \quad (5.4)$$

W : boyut küçültmede ton başına harcanan enerji (kw.h.ton⁻¹)

W_i : iş endeksi (kw.h.ton⁻¹)

d_1 : giren malzemenin %80’inin geçtiği elek açıklığı (μm)

d_2 : çıkan malzemenin %80’inin geçtiği elek açıklığı (μm)

W_i iş endeksi sonsuz büyüklükte parçalardan meydana gelmiş bir malzemenin birim ağırlığının (örneğin 1 tonunun) %80’i 100 μm altına geçecek şekilde ufalatılması için gerekli enerji olarak tarif edilir. Homojen cisimlerin boyut küçültme işlemlerinde W_i sabit bir değer taşırken, heterojen cisimler için bu değer her hal için sabit kalacağı söylenemez. Bazı materyallerin iş endeksleri Tablo 5.3’de verilmiştir [103].

Metallerde ise iş endeksi bulunmamaktadır. Metallerin boyut küçültülmesinde, kesici veya darbeli boyut küçültücüler kullanılmaktadır. Bu makineler çok özel olup, nitelikleri ancak kataloglarda bulunabilir [109].

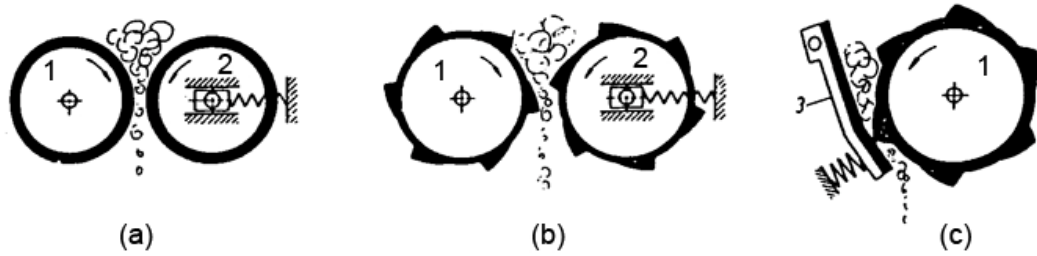
Tablo 5.3: Bazı Materyallerin Özgül Ağırlıkları ve İş Endeksleri

Materyal	Ortalama İş Endeksi (kw.h.ton ⁻¹)
Altın Cevheri	14,83
Bakır Cevheri	13,13
Cam	3,08
Demir Cevheri	15,44
Gümüş Cevheri	17,30
Kalay Cevheri	10,81
Krom Cevheri	9,60
Kurşun Cevheri	11,40
Manganez Cevheri	12,46
Titanyum Cevheri	11,88
Nikel Cevheri	11,88
Karma Materyal (Ortalama)	13,81

Boyut küçültme atık değerlendirme işlemleriyle doğrudan ilişkilidir. Geri dönüşüm işlemlerinde kullanılan birçok ayırma metodu için küçük ve düzgün tane boyutları gereklidir. Parçalanmış atıklar manyetik ayırma ve havalı sınıflandırma gibi ayırma metotlarıyla kolaylıkla ayrılabilirler. Ayrıca yüzey alanı hacim oranının büyük olması taşıma ve depolamada kolaylık sağlar [98].

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının boyut küçültme ve tane serbestleşmesi işlemlerinde yaygın olarak kullanılan makineler çekiçli kırıcılar ve kesici yada kesmeli kırıcılardır.

Merdaneli kırıcılarda malzeme basınç ve kesme kuvvetlerinin etkisi altında kalır. Çok hızlı dönen merdanelerde çarpma kuvveti de söz konusudur. Birçok çeşitleri geliştirilmiş olup, merdaneler bazılarında düz, bazılarında dişli, dikenli veya farklı kırıcı organlarla donatılmış olabilirler. Merdaneli ince kırıcılar veya merdaneli öğütücülerin yüzeyleri düz ise sert materyaller için çıkıntılı ise orta sertlikte veya gevrek malzemeler için kullanılır. Şekil 5.3’de merdaneli kırıcıların şematik gösterimi verilmiştir [107].



Şekil 5.3: Merdaneli Kırıcıların Şematik Görünüşü (a) İnce Kırıcı (b) Kaba Kırıcı (c) Tek Merdaneli Kırıcı (1) Sabit Merdane (2) Ötelenebilir Merdane (3) Ötelenebilir Çene

Merdaneli kırma makinelerinin çalışma şekli için önemli olan mümkün olduğu kadar, kayma olmaksızın materyalin merdane aralığına girmesini sağlamaktır. Bu koşul ince kırma merdanelerinde güçlükle sağlanır. Materyalin merdane arasına girmesi için denklem 5.5 sağlanmalıdır.

$$\mu > \tan \frac{\beta}{2} \quad (5.5)$$

μ : sürtünme katsayısı

β : kavrama açısı

Düz merdaneler için ortalama değer sürtünme katsayısı değeri 0,3 için kavrama açısı değeri 30° olur. Kavrama aşınınsın en büyük değeri 36° olabilir.

Eşit çaplı çift merdaneli kırıcılarda materyalin merdane arasına çekilebilmesi için denklem 5.6 sağlanmalıdır.

$$R = \frac{r - b}{1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (5.6)$$

R : merdane çapı

r : merdanelerin içeri çektiği (kavradığı) en büyük tane yarıçapı

b : merdane aralığının yarısı

β : kavrama açısı

Merdaneli kaba kırıcılarda merdanelerin yüzeyleri dişlerle, dikenlerle veya benzeri organlarla donatılmıştır. Bir veya birden fazla merdaneli olarak yapılabilirler. Birden fazla merdane bulunması durumunda merdanelerin bir kısmının ekseni sabit tutulurken diğerleri kuvvetli yaylarla esnek olarak bağlanırlar. Bazı durumlarda tüm merdaneler yaylı olarak imal edilebilirler. Yaylar normal kırma şartları esnasında herhangi bir esnemeye uğramayacak şekilde seçilirler. Merdaneler arası mesafe yani aralık açıklığı ayarlanabilmektedir. Merdanelerin her ikisi de aynı hızda veya bazı hallerde değişik hızlarda dönebilirler. Çift merdaneli kırıcılar orta sertlikte gevrek materyallerin kırılması için kullanılırlar. İri merdaneli kırıcılarda teorik kapasite denklem 5.7 ile hesaplanır.

$$Q = 3600 \frac{v.k.b.s.f.\delta_m}{10^6} \quad (5.7)$$

Q : teorik kapasite (t.sa⁻¹)

v : merdane çevresel hızı (m.s⁻¹)

k : merdane katsayısı (0,5 – 0,6)

b : merdane genişliği (mm)

s : aralık açıklığı (mm)

δ_m : materyalin özgül ağırlığı (t.m⁻³)

f : gevşeklik faktörü (0,1 – 0,3)

Merdaneli ince kırıcılarda merdane dişleri, dikenleri, vb. bulunmadığından merdane yüzeylerinde bir azalma olmayacağından merdane katsayısı 1 olarak alınır. Pratikte bu kapasitenin ancak 1/3'üne erişilir.

Boyut küçültme aracına beslenen malzeme boyutunun boyut küçültme aracından çıkan malzeme boyutuna olan oranına boyut küçültme oranı adı verilir [56]. Merdaneli iri kırıcılarda boyut küçültme oranı 2 – 8 arasında değişirken, ince kırıcılarda 3 – 4 arasında değişir [107].

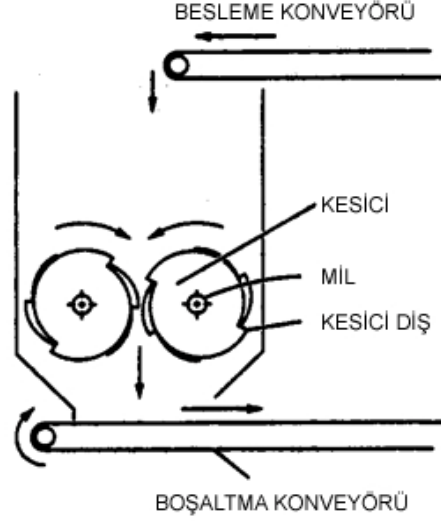
Merdaneli kırıcılarda çevresel hızlar 2 – 12 m.s⁻¹ arasında değişir. Merdane aralığının üstünde ek bir çarpma etkisi istendiği takdirde yüksek hızlar seçilebilir. Kırıcılarda iri besleme materyali için 2 – 3 m.s⁻¹ arasında küçük çevresel hızlarla çalıştırılırlar, çok ince ve az sertlikte malzeme için ise çevresel hız 6 – 8 m.s⁻¹ kadar çıkartılabilir. Merdaneler arasına materyalin en iyi şekilde çekilişi, materyalin merdaneler arasına düşme hızının merdanelerin çevresel hızına uygun olması halinde mümkün olur. Merdane çapı büyüdükçe merdanelerin d.d⁻¹ cinsinden dönüş hızı azalır, ancak çevresel hız artar. Çevresel hız arttıkça küçük çaplı merdanelerde 1 m.s⁻¹ ve büyük çaplılarda 15 m.s⁻¹ civarındadır.

Çift merdaneli kırıcılarda merdane çapı arttıkça boyut küçültme oranına bağlı olarak merdanelerin kavrayabileceği en büyük tane iriliği değişmektedir. Tablo 5.4’de merdane çapına ve boyut küçültme oranına bağlı olarak çift merdaneli ince kırıcılarda kavranabilecek en büyük tane irilikleri mm olarak verilmiştir [107].

Tablo 5.4: Çift Merdaneli İnce Kırıcılarda Kavranabilecek Tane Boyutu

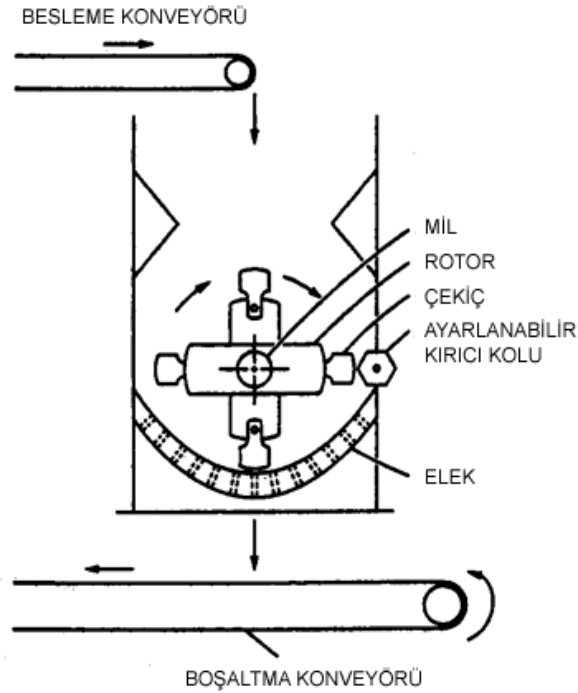
Merdane Çapı (mm)	Boyut Küçültme Oranı				
	2	32	42	52	62
200	6,22 mm	4,62 mm	4,12 mm	3,82 mm	3,72 mm
400	12,42 mm	9,22 mm	8,22 mm	7,62 mm	7,32 mm
600	18,62 mm	13,82 mm	12,22 mm	11,52 mm	11,02 mm
800	24,82 mm	18,42 mm	16,32 mm	15,32 mm	14,72 mm
1000	30,92 mm	23,02 mm	20,42 mm	19,12 mm	18,32 mm
1200	37,12 mm	27,62 mm	24,52 mm	22,92 mm	22,02 mm
1400	43,32 mm	32,22 mm	28,62 mm	26,82 mm	25,72 mm

Kesicilerde veya kesmeli kırıcılarda kesme işlemini yerine getiren bir dizi disk karşılıklı dönen iki paralel mile dikey olarak monte edilmiştir. Şekil 5.4’de bir kesici kesiti görülmektedir [100]. Boyutu küçültülecek olan materyaller direkt olarak karşılıklı dönen bu millerin ortasına atılır. Kesici diskler tarafından kesme ve yırtma işlemleri ile materyal boyutu düşürülür [100].

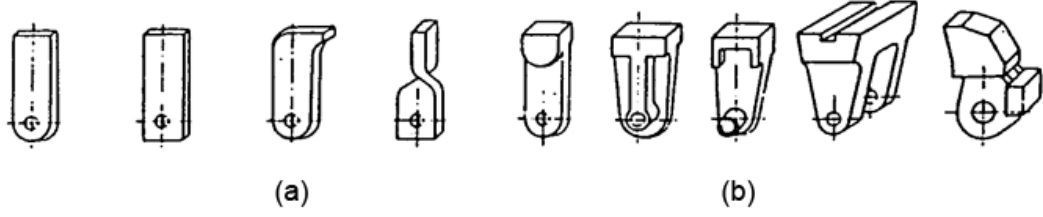


Şekil 5.4: Kesmeli Kırıcı Kesiti

Şekil 5.5’de kesiti görülen çekiçli kırıcılar hızla dönen ve çekiç adı verilen metal parçaların materyal tanelerine çarpması suretiyle kırma işlemi yapan kırıcılardır [100]. Çekiçler göbek adı verilen kalın bir mil üzerine oynak veya sabit olarak yerleştirilmişlerdir. Çekiçler dökme demir, manganezli çelik veya sert alaşımlardan imal edilirler. Çekiçlerin şekillerinin kırılmaya etkileri oldukça büyüktür. Keskin kenarlı çekiçlerin tercih edilmesi gerekir. Ayrıca çekiçlerin çok kolay değiştirilebilir olmaları da gerekmektedir. Şekil 5.6’de değişik çekiç kesitleri görülmektedir [107].



Şekil 5.5: Çekiçli Kırıcı Kesiti



Şekil 5.6: Çekiç Şekilleri (a) Orta Sert - Gevrek Materyal İçin (b) Sert – Orta Sert Materyaller İçin

Çekiçli değirmenin üst kısmında bulunan besleme ağzından materyal beslemesi yapılır. Kırıcı üst bölmesinin iç yüzeyleri çarpma plakaları ile kaplanmıştır. Bunlar genellikle girintili çıkıntılıdır. Kendilerine çekiçler tarafından fırlatılan materyal tanelerinin daha da fazla kırılmasını sağlarlar. Kırıcının alt bölümünde delikli bir ızgara veya elek bulunur. Elek altına geçen materyal konveyör bantlarla sevk edilir. Elek üstünde kalan materyal ise çekiçler tarafından uygun boyuta düşürülene kadar parçalanır, parçalanamayan materyaller ise tahliye ağzından tahliye edilir. Çekiçli kırıcılar çekiçlerin bağlı oldukları milin konumuna göre düşey veya yatay kırıcılar olarak sınıflandırılırlar [56,98]. Sert ve iri materyaller için imal edilenlerine çekiçli kırıcı, hafiflerine çekiçli değirmen denir. Çekiçli kırıcılar çekiçli değirmenlere nazaran biraz daha yavaş dönerler. Çift milli çekiçli kırıcılarda geliştirilmiştir. Motorun kutupları değiştirilerek dönme yönü değiştirilebilir [107].

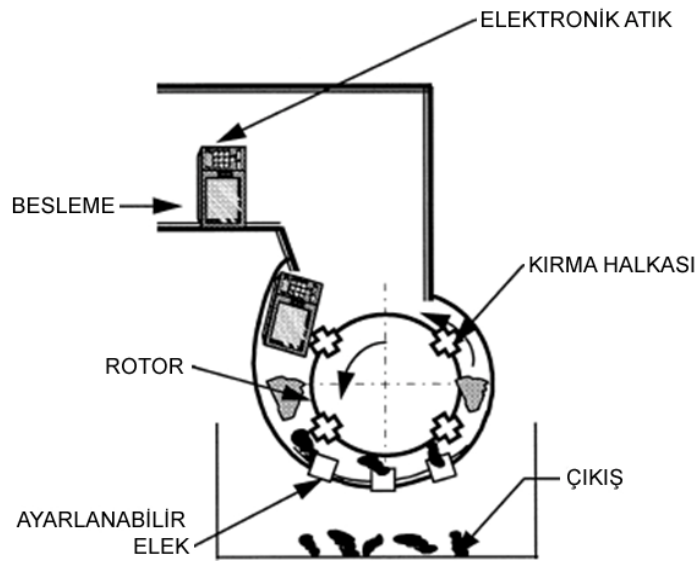
Çekiçli kırıcıların hızları dakikada 600 – 3000 devir arasında değişir. Maksimum 150 – 0,3 cm arasındaki materyallerin kırılması için kullanılabilmelerine rağmen uygulamada 20 – 1 cm arasındaki materyallerin kırılması için kullanılırlar. Boyut küçültme oranları 5 – 45 arasında değişir ve kapasiteleri saatte 1 – 500 ton arasındadır. Çekiçli kırıcıların kapasiteleri çekiç adedine, çekiç şekline, ızgara yapısına, materyalin tane boyutuna, materyalin özgül ağırlığına, materyalin sertliğine ve nem oranına bağlıdır.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının öğütülmesinde kullanılan öğütücüler düşey çekiçli kırıcılara benzerler ancak burada çekiçlerin yerine rotora bağlı yıldız şeklinde dişli çark benzeri bir çark mevcuttur. Materyallerin boyut küçültme işlemi yıldız çark ve kırıcı gövdesinin iç yüzeyi arasında gerçekleşir. Çalışma şekilleri çekiçli kırıcılara benzer şekildedir. Kırıcının üst tarafından beslenen materyal kırıcı içerisinde boyutu küçültülür ve tahliye için uygun boyuta indirgenen materyal kırıcının alt tarafından tahliye edilir [98].

Çekiçli değirmen öğütücüler vurma şiddeti kullanarak ayrılmış metal tanelerini özellikle alüminyum tomar haline getirebilirler. Bu nedenle çekiçli değirmenler elektronik atıkların ayrıştırılması işleminde ilk kademede tercih edilmezler. Bunun yerine biçme tip veya kesme tip yada bu iki öğütücünün kombinasyonu bu amaçla kullanılır.

Şekil 5.7’de bir rotora bağlı ve çevresinde dönebilen bir dizi ezme halkası görülmektedir [19]. Ezme haznesine öğütülmek için gönderilen elektronik atık öğütücü duvarına yaslanılarak ezme halkaları tarafından biçilir veya kesilebilir. Bu ezme halkalarının şekline ve konfigürasyonuna bağlıdır. Rotor ve duvar arasında asimetrik bir mesafe mevcuttur. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi sol taraftaki mesafe sağ taraftaki mesafeden daha büyüktür. Sol tarafta ezilemeyen parçalar sağ tarafta ezilebilirler. Ayarlanabilir elek vasıtasıyla çember öğütücünden arzu edilen mamuller elde edilir. Belli başlı avantajlarından birisi ayrıştırılan alüminyum levhalarının tomar haline getirilmesinin minimuma indirgenerek girdap akımı ayırıcısı vasıtasıyla alüminyum geri kazanımının maksimize edilmesidir.

Çekiçli bir değirmende hızlı çalışan çekiçler metalik taneleri kolaylıkla bükerek, kıvrır ve çatlatırlar. Bu büyük oranda düzensiz şekilli tanelerin oluşmasına neden olur. Bu müteakip ayırma işlemi için uygun materyal tanelerinin sağlanmasıyla doğrudan ilgili olduğundan akıllıca bir ayrıştırma işleminin geliştirilmesi için hayati derecede önemlidir.



Şekil 5.7: Bir Çember Tip Öğütücünün Kesiti

5.2 Boyut Farkına Göre Ayırma

Çeşitli tanelerin karışımından oluşan bir materyalde taneleri büyüklüklerine göre birbirinden ayırmaya boyuta göre ayırma denir. Boyuta göre ayırma eleme ve sınıflandırma olarak iki şekilde yapılır [56]. 5 – 10 cm boyutundan 0,1 mm boyutuna kadar olan taneler için eleme ve 2 – 3 mm boyutundan 0,02 – 0,03 mm boyutuna kadar olan taneler için ise sınıflandırma yöntemi kullanılabilir [97].

5.2.1 Eleme

Eleme, tanelerin belirli büyüklükteki delik veya açıklıklardan geçebilme veya geçememe özelliğine dayanarak yapılan bir boyuta göre ayırma işlemidir. Örnek olarak 10 cm ve 2 cm boyutunda tanelerin karışımından meydana gelen bir materyal kompozisyonu, üzerinde 5 cm çaplı delikler bulunan düz bir plaka üzerine dökülmüştür. Bu plakaya belirli bir titreşim ve sallanma gibi bir hareket verirse bu malzemeyi meydana getiren taneler sürekli hareket ederek, 2 cm çaplı olanlar deliklerden geçerek plakanın altında, 10 cm çaplı olanlar ise deliklerden geçemeyip plaka üstünde toplanırlar. Bu şekilde 10 cm ve 2 cm boyutlu taneler birbirlerinden ayrılırlar. Yapılan bu işleme eleme işlemi ve eleme için kullanılan araçlara da elek adı verilir [56]. Eleme işlemi tane boyutuna göre sınıflandırmak şeklinde tarif edilebilir. Belirli boydan büyük ve küçük olan taneleri ayrı ürünler halinde elde etmek demek olan işlemin tarif yönünden basitliği yanında uygulamada karşılaşılan problemleri oldukça önemlidir.

Eleme yalnızca söz konusu mekanik prosesin eş boyutlu olarak beslenmesini sağlamak için değil ayrıca metal içeriği kalitesinin yükseltilmesi için de kullanılır. Metallerin şekil özellikleri ve parça boyutları plastiklerin ve seramiklerin şekil özellikleri ve parça boyutlarından farklı olduğundan eleme gereklidir.

Metallerin geri dönüşümünde kullanılan öncelikli eleme yöntemi döner bir elek (tromel) veya ızgara ünitesinin kullanılması olup bu üniteler hem otomobil atıklarının ve hem de kentsel katı atıklarının işlenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Bu üniteler yüksek perdeleme dirençlerine sahip olup atıklarda karşılaşılan muhtelif tertipteki parça şekilleri ve boyutları için önemlidir. Titreşim özelliği olan eleme işlemi de özellikle demir içermeyen atıkların geri dönüşümünde tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir eleğin delikler (açıklıklar) bulunan kısmına elek yüzeyi ve de elek yüzeyinin üzerindeki deliklere (açıklıklara) elek açıklığı denir. Elek açıklıkları daire, kare veya dikdörtgen şeklinde olabilirler. Elek açıklığının büyüklüğü elek açıklığının şekline bağlı olarak; daire şeklindeki açıklıklarda dairenin çapı, kare şeklindeki açıklıklarda karenin bir kenarının uzunluğu ve dikdörtgen şeklindeki açıklıklarda da dikdörtgenin kısa kenarının uzunluğu ile tanımlanır.

Amerikan ve İngiliz standartlarında 1 inch (25,4 mm) uzunluğa düşen delik adedi meş (mesh) olarak tanımlanır.

Her eleme işlemi bir yüzey üzerinde yapılır. Yüzeyde bulunan deliklerle temasa gelen malzeme eğer delik boyutundan küçük ise oradan geçerek elek altına geçer, büyük ise yüzey üstünde kalır. Bu işlemin başarılabilmesi için; tanelerin birbirlerinden serbest halde olmaları, sarsıntı, sallantı veya dönme gibi hareketlerle birleşip topaklanmamaları, her bir tanenin deliklerle temasa geçmesi ve burada bir bakıma bir kontrole tabi olarak alta geçmesi veya üstte kalması, alta geçenlerin bir ürün, üste kalanların ayrı bir ürün olarak alınabilmeleri gerekir [96].

Tanelerin birbirinden serbest halde olmaları: Elenecek materyalin şartlarına bağlıdır. Rutubeti fazla bir kompozisyonda ince tanelerin iriler üzerine yapıştıkları görülür. Böyle bir materyalde, bilhassa ince boyuttaki elemelerde güçlükler doğar. Eleme öncesi kurutma veya tamamen aksi bol su vererek eleme uygun olur. Orijinal şartları ile elemeye uygun düşmeyen bazı malzemeler, şartlar değiştirilmek ve tanelerin birbirinden serbestliği temin edilmekle elenebilmektedir.

Sarsıntı, sallantı veya dönme gibi hareketlerle birleşip topaklanma: Sabit elekler hariç her eleme işleminde elek yüzeyinin hareketi söz konusudur. Bu bir sarsıntı, sallantı veya dönme hareketidir. Aslında ayrı ayrı taneler, bazı şartlar altında, birleşip toplanarak tek başlarına sahip olduklarından daha büyük bir kütle meydana getirirler ve böylece elek deliklerinden geçemeyebilirler. Elenecek malzemenin bu özelliği iyice incelendikten sonra elemelerde kullanılacak araç seçilmez ise, sonuçlar istenilen gibi olmayabilir.

Tanelerin deliklerle teması: Elek yüzeyinde delik adedini arttırmak, başka bir deyimle, yüzeyin toplam alanına oranla delikler tarafından kaplanan toplam alanı (elek açıklık oranı) arttırmak tanelerin deliklerle temas şansını arttırır. Statik bir yüzey üzerine dökülen bir malzemeden ancak deliklere karşı gelenler onlarla temas halinde olur. O halde ya yüzeyi veya üstüne dökülen malzemeyi hareket ettirmek şarttır. Aksi halde sadece kısıtlı bir miktar istenen teması sağlamış olur. Sabit eleklerde, yüzey sabit malzeme hareketlidir. Hareketli eleklerde hem yüzey hem de malzeme hareketli olur.

Yüzey hareketinin karakteristiği ayrıca önem taşır. Bu hareket o şekilde olmalıdır ki, elek üstüne gelen malzeme kısa sürede iri üstte ve ince altta olmak üzere bir tabakalaşma yapılabilsin. Böylece elek yüzeyi ile teması ve oradaki deliklerden geçmesi arzu edilen ince aksam bu teması kısa sürede sağlamış olur. İnce parçalara deliklerden geçebilecekleri zamanın da verilmesi gerekir. Aksi halde temas olsa da elek altına geçme güçleşir. Elek üstünde kalan ve delik boyutundan iri malzeme süratle elek yüzeyinden uzaklaştırılmalıdır. Aksi halde, orada yığılmalar yaparak malzeme kalınlığını arttırır ve ince parçaların deliklerle temasına engel teşkil eder. Elek altı ve elek üstü ürünlerini ayrı ayrı elde etmek uygun şekillerde tertiplenmiş oluklarla yapılır. Ancak, bu olukların malzeme vasfına göre ve elemanın kuru veya yaş yapılmasına bağlı olarak seçimi gerekir. Eğimlerin uygun olmaması halinde akış hızı azalacağı veya tamamen duracağı için tıkamalar yapar. Netice olarak eleme aksar veya tamamen durur.

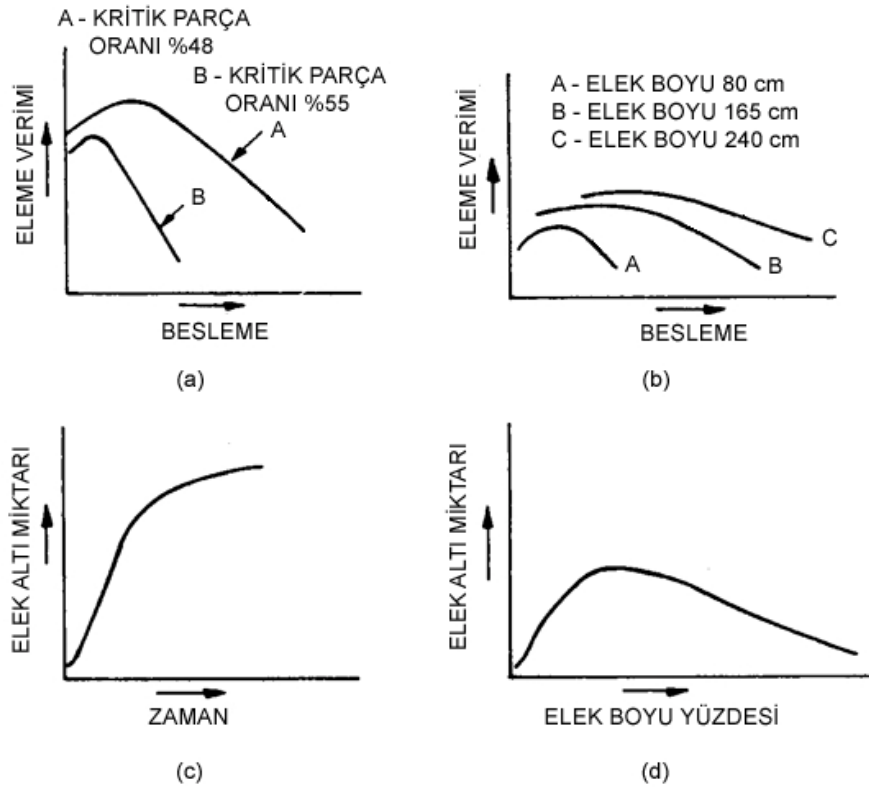
Elemede randımanı etkileyen hususlar, elenecek malzemenin şartlarına, seçilen eleğe ve alınan tesis tertibine bağlı olmakla beraber, endüstriyel elemede belirli bir elek boyutu ve elek yüzeyinden alınan kapasitede önemlidir. Çoğu kere, randıman ve kapasiteyi birlikte dikkate alarak en uygun değerlerin seçimi yoluna gidilir.

Eleme işlemlerinde, elek yüzeyi iri parçalar için bir nakledici görevi yerine getirir. Elek boyutundan çok küçük parçalar, serbest halde iseler, kolayca akarak elek altına geçerler. Önemli olan, elek boyutuna yakın boyuttaki parçaların durumudur. Kritik boyuttaki parçalar diye bilinen bu parçaların elenecek malzemedeki oranları elemanın güçlük veya kolaylığını tayin eder. Eğer kritik boyut çok ise güç az ise kolay bir eleme söz konusudur. Elek boyutunun 1,5 katı ile 0,75 katı arasında boyuta sahip taneler kritik boyut olarak tarif edilir.

Parçalar genellikle en büyük boyutu elek yüzeyine paralel şekilde hareket eder. Bu hareket sırasında hız ve deliğe yaklaşma yönü önem kazanır. Delik kenarlarına çarparak sıçrama elekten geçmeyi engeller. Çok hızlı hareket ise iri üstte ve ince altta tabaklaşmayı bozabileceğinden sakıncalı olup elemeyi azaltır.

Eleğe beslenen miktarı arttırmak yüzey üzerindeki malzeme kalınlığını da artırır ve dolayısıyla parçaların elek yüzeyine inmelerini güçleştirir. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça basıncı da artacağından tıkanmalar çoğalır. Tıkanmada elek yüzeyi yapısı ve parça şekli önemli rol oynar.

Elek yüzeyinin boyutları (en × boy) kapasiteyi ve randımanı etkiler. Buna ait örnekler Şekil 5.8'da verilmiştir [96]. Genel bir prensip olarak elek yüzeyi artışının kapasiteyi doğru orantıda etkilediği söylenebilir.



Şekil 5.8: Eleklerde Verim, Kapasite, Elek Boyu ve Elek Altı Miktarı İlişkileri

Endüstriyel uygulamada elemekten beklenen sonuçları alabilmek için dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan bazıları aşağıya verilmiştir [96].

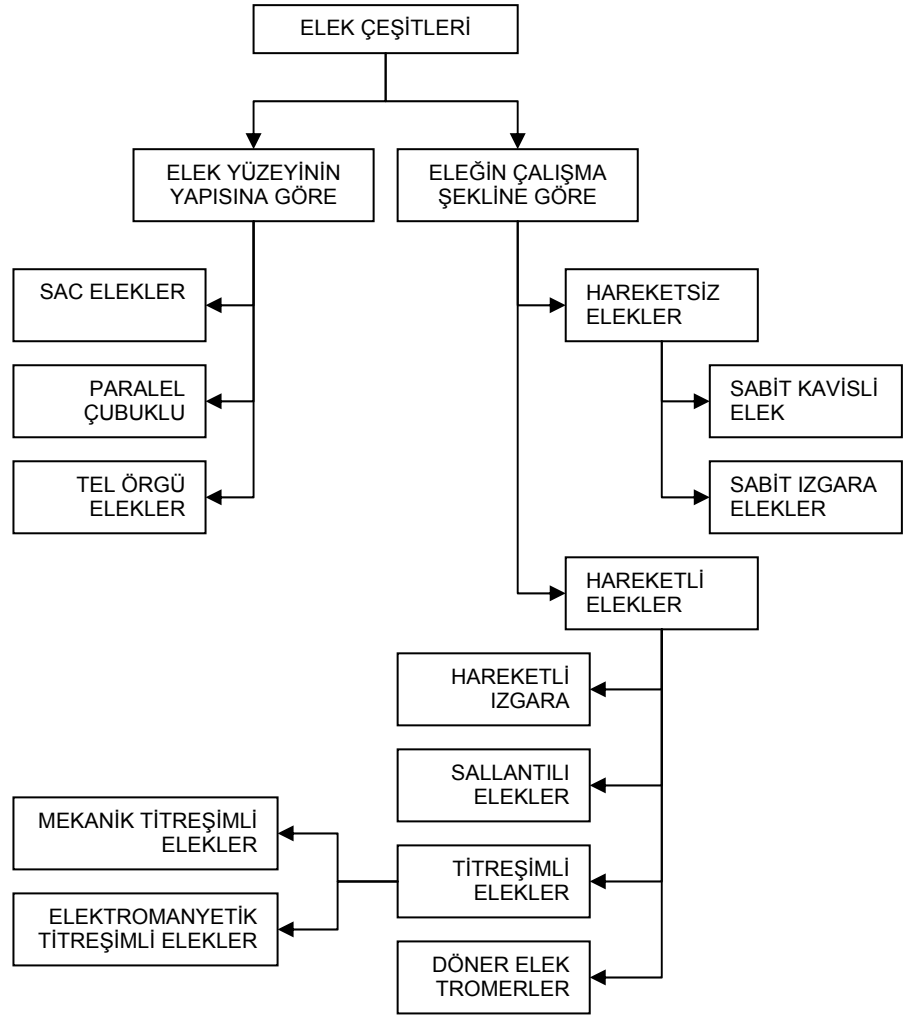
- Elenecek malzeme özellikleri iyice gözden geçirilmeli ve gerektiğinde eleme öncesi, kurutma vs. gibi tedbirler alınmalıdır.

- Elemede kullanılacak hareket şekli malzemenin özelliklerine göre seçilmelidir. Örneğin fazla miktarda tıkama yapan bir malzeme için elek yüzeyini darbeye maruz bırakmak önleyici bir tedbir olabilir. Topaklanan malzemede sallantı hareketi uygun düşmeyebilir.
- Elek boyutlarını tespit ederken imkânlar oranında toleranslı davranmalı ve asgari şartlar için uygun hesaplardan kaçınılmalıdır. Malzeme şartlarında değişiklikler kapasite düşüklüklerine yol açabilir.
- Güç eleme şartlarında katlı eleklerden imkân nispetinde kaçınılmalı, tek katlı elekler tercih edilmelidir. Böylelikle her bir eleğin kendine uyan şartlarda çalıştırılması temin edilebilir.
- Genellikle elekler iyi bakım ve onarım istediklerinden yerleştirme buna göre olmalıdır. Beslemede malzemenin elek yüzeyine muntazam dağılmış şekilde verilmesi ve eleme yüzeyinin tamamından efektif olarak istifade şartlarının yaratılması yerinde olur.
- Eleme sonucu elek altı ve elek üstü ürünlerin, yığılma ve tıkanmalarına meydan vermeyecek tedbirler alınmalıdır.

Elemede hedeflenen amaçlar ise aşağıda sıralanmıştır.

- Belirli bir işleme tabi tutmak ve atmak için bir malzemenin irisini veya incesini ayırmak.
- Kırıcı kapasitesinden daha fazla yararlanmak için kırma boyutlarından daha küçük olan taneleri kırıcı öncesi ayırmak.
- Çeşitli boyuttaki tanelerden oluşan bir malzemeyi kullanım amacına göre çeşitli boyut gruplarına ayırmak.
- Bir ayırma işleminin gerektirdiği boyutta malzeme hazırlamak.
- Bir malzemede tane boyutu dağılımını tespit etmek.

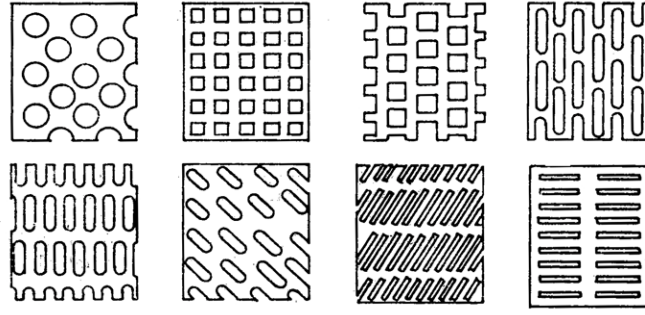
Uygulamada elekler yapıları ve çalışma şekilleri bakımından çok çeşitlidirler. Şekil 5.9’de elek çeşitlerinin yapı ve çalışma şekline göre sınıflandırılması şematik olarak verilmiştir [56].



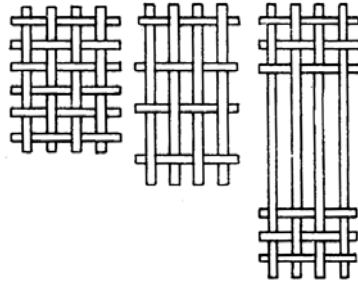
Şekil 5.9: Elek Çeşitlerinin Sınıflandırılması

Sac elekler düz çelik sac üzerine delikler delmek suretiyle yapılırlar. Deliklerin büyüklüğü, şekli ve dizilişleri çok çeşitlidir [56]. İri elemeler için dairesel delikli ve ince elemeler içinde dikdörtgen şeklinde delik yüzeyler kullanılır. Bunun nedeni dikdörtgen şeklindeki deliklerin dairesel deliklerden daha az tıkanmalarındır [96]. Sac elek yüzey şekillerine ait bazı örnekler Şekil 5.10'de görülmektedir [96].

Tel örgü elekler çeşitli özellikteki çelik tellerin kare veya dikdörtgen açıklıklar meydana gelecek şekilde örülmesi ile yapılır. Dikdörtgen delikli yüzeylerde deliklerin bütün elek alanına oranı daha fazladır. Kare delikli yüzeyler daha sağlam olur. Bu nedenle iri elemelerde kare delikli elekler, orta ve ince elemelerde de dikdörtgen delikli elekler tercih edilir. Tel kalınlığı elek açıklığına bağlı olarak yeterli mukavemet sağlayacak şekilde seçilir. Elek açıklığı büyüdükçe daha kalın küçüldükçe daha ince tel kullanılır. Genel olarak en ince eleme için kullanılırlar. Kare ve dikdörtgen delikli tel örgü elek örnekleri Şekil 5.11'de görülmektedir [96].



Şekil 5.10: Sac Elek Yüzey Şekillerine Ait Bazı Örnekler



Şekil 5.11: Kare ve Dikdörtgen Delikli Tel Örgü Elekler

Paralel çubuklu elekler belirli aralıklarla birbirlerine paralel olarak yerleştirilen çubuklardan veya profil demirlerden meydana gelir. Genel olarak en kaba eleme için kullanılırlar. Şekil 5.12’de paralel çubuklu elek görülmektedir [97].



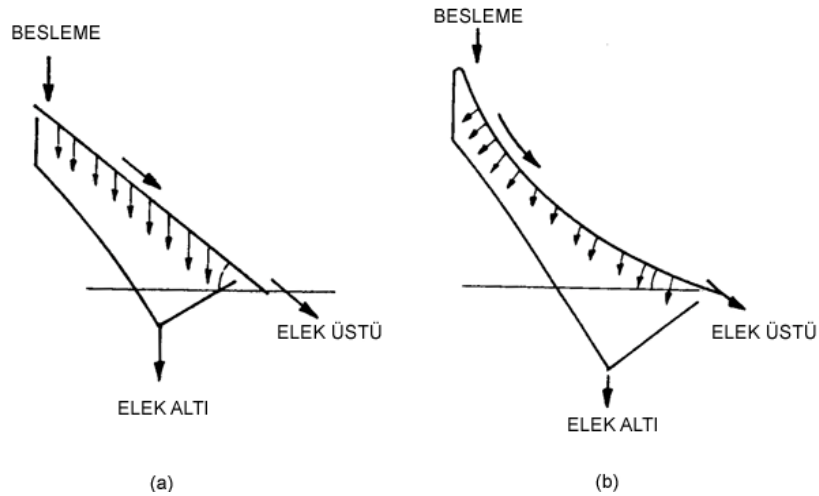
Şekil 5.12: Paralel Çubuklu Elek

Düz veya eğimli sabit bir elek yüzeyi üzerine beslenen malzeme eğim uygun ise bu yüzey üzerinde eğim yönünde yer çekimi etkisiyle kayarak inerken ince aksamın elek altına geçmesi ile elek üstündeki iriden ayrılması temin olunur. Şekil 5.13’de düz yüzeyli sabit elek ile kavisli elek şematik olarak gösterilmiştir.

Sabit ızgara elekler bir çeşit paralel çubuklu elektir. 25° - 50° meyille yerleştirilirler. Sabit ızgaralar kuru ve iri malzemeler için uygundurlar. 35 – 40 mm boyutundan daha küçük eleme boyutlarında kullanılmazlar. En çok kullanıldığı yer iri kırma öncesi elemedir.

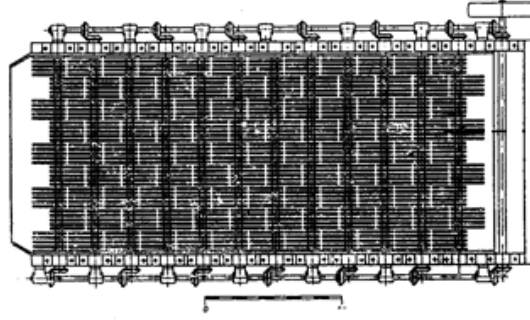
Sabit kavisli elekler sık aralıklarla enine yerleştirilmiş çubuk veya tellerden oluşan, yüzeyi kavisli, hareketsiz eleklerdir. Esasında sabit bir elek tipi olmakla beraber elek yüzeyinin kavisli yapısı nedeniyle aşırı eğimden doğan bazı sakıncaları ortadan kaldırmakta ve aynı zamanda merkez kaç kuvveti etkisinden istifade etmektedir. Genellikle küçük boyutlarda yaş elemelerde kullanılırlar.

Düz elekte elek eğimi, üstten alta doğru sabit kalmakta iken, kavisli elekte üstte eğim en büyük değerde iken alta doğru gittikçe azalmaktadır. Oldukça basit bir prensibe dayanan kavisli eleğin çalışma şartları gereği gibi yerine getirildikte tatminkar sonuçlar alınmaktadır. Önemli bir husus elek boyutu ile elek altına geçen malzeme boyutu arasında fark bulunuşudur. Genellikle, elek boyutunun yarısı elek altı boyutu olarak kabul edilmektedir. Eğer bu elekte örneğin 2 mm altının ayrılması isteniyor ise elek boyutu olarak 4 mm açıklık seçilmelidir. Eleğe beslemenin üst kenar boyunca muntazam dağılmış şekilde yapılması gerekir. Üstte eğimin büyük oluşu ve hızlı akış geçen kapasitenin de yüksek olması sonucunu doğurur. Prensibindeki özellik daha ziyade ince elemelerde kullanılışını mümkün kılmaktadır.



Şekil 5.13: Sabit Elekler (a) Düz Yüzeyli Sabit Elek, (b) Kavisli Sabit Elek

Sabit ızgaralarda belirtilen sakıncalı durumları (tıkanma, irtifa kaybı vs. gibi) ortadan kaldırmak amacıyla ızgaralara çeşitli hareketler vermek suretiyle elemanın daha tatminkâr bir şekilde yapılması temin edilmektedir. Bu hareketler yapıya göre değişik olmaktadır. Hareketli ızgara eleklerin yapısı sabit ızgara gibidir. Izgarayı oluşturan çubuklar bir mekanizma ile aşağı ve yukarı hareket ettirilirlir. Bu sayede hem eleme kolaylaşır ve tıkanmalar önlenir ve hem de elek üstü malzeme ileri doğru hareket eder. Sabit ızgaraya göre daha düşük eğimlerde kullanılabilirler. Şekil 5.14’da hareketli ızgara elek görülmektedir [56].



Şekil 5.14: Hareketli Izgara Elek

Hareketli dönen eleklerde (tromel) elek yüzeyleri silindirik, kesik koni, piramit veya prizma şeklinde olabilirler. İlk defa 1920’de İngiltere’de geliştirilmiştir [100]. Prizma ve piramit biçimli dönen elekler silindirik ve koni biçimlere göre materyalleri daha iyi karıştırırlar ve bakımlarının daha kolay olduğu kabul edilir. Buna rağmen silindirik dönen elekler diğerlerinden daha fazla kullanılırlar. Elek kendi eksenini etrafında döner ve 1/8 eğimle çalışır. Eğim en fazla 1/4 olabilir. Dönen eleklerin uygulamada çapları 60 – 150 cm ve boyları da 120 – 480 cm arasında değişir. Dönüş hızları kritik hızın %35 - %40’ı kadardır. Kritik hız denklem 5.8 ile hesaplanır.

$$N_k = \frac{420}{\sqrt{D}} \quad (5.8)$$

N_k : kritik hız ($d \cdot d^{-1}$)

D : elek çapı (cm)

Elek çapı ile eleme kapasitesi arasında ilişki ise denklem 5.9 ile tanımlanır.

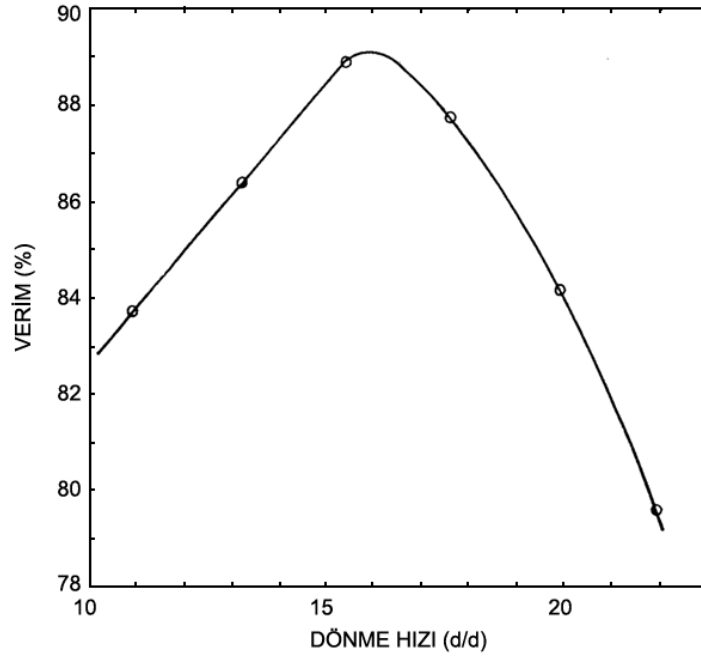
$$D = 19 \cdot \sqrt{\frac{W}{\delta_m}} \quad (5.9)$$

D : elek çapı (cm)

W : elek kapasitesi ($\text{ton} \cdot \text{saat}^{-1}$)

δ_m : materyalin özgül ağırlığı ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

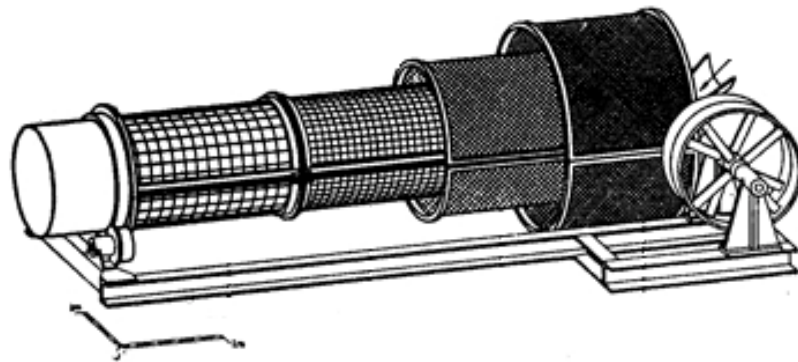
Döner eleklerde eleme verimi döner eleğin dönme hızıyla orantılıdır. Şekil 5.15’de döner eleklerde eleme veriminin dönme hızına göre değişimi verilmektedir [107].



Şekil 5.15: Dönme Hızına Göre Verim Değişim Eğrisi

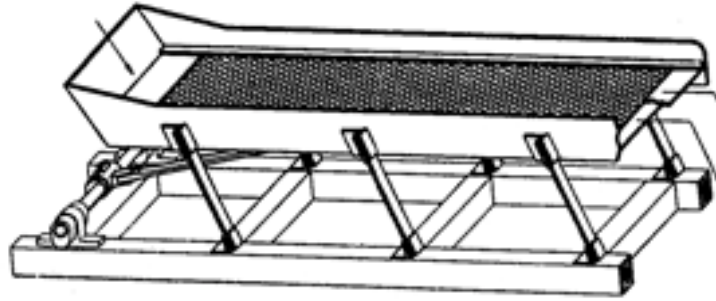
Döner elekler en iriden en inceye doğru peş peşe, en inceden en iriye doğru iç içe ve tek bir dönen elekte en inceden en iriye doğru yerleştirilebilirler. Döner elekler çalışırken iri taneler döner eleğin alçak ucundan çıkar, ince kısım da deliklerden geçtikten sonra bir oluğa düşerek sevk edilir.

Geçmişte geniş ölçüde kullanılan döner eleklerin yerini, günümüzde çok gelişmekte olan titreşimli elekler almaktadır. Döner eleklerin tercih nedenleri ise; yapılarının basit ve ucuz olması, sarsıntı yapmamaları, tesis içi az irtifa kaybına sebep olmaları, elerken parçaları aktarmaları sıralanabilir ancak toplam elek alanına kıyasla düşük kapasiteye sahip olmaları dezavantajlarıdır. Şekil 5.16'da bir hareketli döner elek (tromel) görülmektedir [56].



Şekil 5.16: Hareketli Döner Elek (Tromel)

Hareketli sallantılı elekler elek kasası adı verilen dikdörtgenler prizması şeklinde bir yapı ile buna yerleştirilen bir elek yüzeyinden meydana gelirler. Belirli bir mekanizma ile eleğe sallantı hareketi verilir. Sarsıntı ve eğim elek üstündeki malzemeyi eğim yönünde hareket ettirir. Elek eğimi $10^{\circ} - 15^{\circ}$ arasındır. Bazı tiplerde bir bloğa çarpmakla elek üstü malzeme hareketi oluşturulur. Elek kasaları dört tarafından tavana veya esnek dört ayak üzerine monte edilmişlerdir. Bu tertiple malzeme zıplatılarak ileri doğru hareket ettirilir. Tekerlek ve yatak ilavesi hareketin bu karakterini daha da arttırabilir. Farklı ivmeli mekanizma kullanılması halinde elek yüzeyinin yatay konumlu olarak çalışması mümkün olur. Sallantılı eleklerde sallantı genliği 2 cm'den 25 cm'ye kadar değişebilmektedir. Elek hızı küçük genliklerde fazla örneğin 2 cm genlik için eksantrik mil dönme hızı 800 d.d^{-1} ve büyük genliklerde ise azdır örneğin 22,5 cm genlik için eksantrik mil dönme hızı $60 - 70 \text{ d.d}^{-1}$. Kapasiteleri $1 - 4 \text{ ton.m}^{-2}.\text{saat}^{-1}$ 'tir Bu eleklerin boyutları enlerinden uzundur. Genellikle boyları enlerinden 2 – 4 katı veya daha fazla yapılırlar. Şekil 5.17'de bir hareketli sallantılı elek görülmektedir [56,107].



Şekil 5.17: Hareketli Sallantı Elek

Titreşimli elekler aynen sallantılı elekler gibidirler. Titreşimli elekler birçok yönleri ile günümüzde, dönen ve sarsıntılı eleklerle tercih edilmekte ve onların yerini almaktadır. Kapasitelerinin fazla, eleme verimlerinin yüksek ve masraflarının az oluşları tercih nedenlerinin başta gelenleridir. Uygulamada 250 mm elek boyutundan 0,150 mm boyutuna kadar, kuru ve yaş elemeye elverişlidir. Sabit eleklerden daha randımanlıdır. Titreşim hareketi kenardan kenara, düşey veya elek boyunca olabilir. Yük değişimlerinde daha efektiftir, özel yapılarla şokların ve sarsıntının temellere iletilmesini önlemek mümkündür. Çeşitli imalatçılar tarafından çok değişik tiplerde yapılmaktadır. Bu nedenle, hepsi için geçerli bir örnek vermek güçtür. Bu elekler

verilen titreşim hareketinin cinsine göre mekanik titreşimli elekler veya elektromanyetik titreşimli elekler olarak adlandırılırlar. Mekanik titreşimli eleklerde titreşim hareketi elek yüzeyine mekanik bir hareket mekanizması ile verilir. Elektromanyetik titreşimli eleklerde titreşim hareketi ise alternatif akım, elektromıknatıslar ve yaylarla sağlanır. Titreşimli elekler sallantılı eleklerle göre daha hızlı çalışırlar ve kapasiteleri yüksektir. Daha küçük tane boyutunda eleme yapabilirler. Bu gün endüstride en çok kullanılan elek çeşidi titreşimli eleklerdir. Titreşimli eleklerde kapasite denklem 5.10 ile hesaplanır.

$$T = A.C.M.K.Q \quad (5.10)$$

T : saatte eleğe beslenen materyal miktarı (ton.sa⁻¹)

A : efektif elek yüzey alanı (m²)

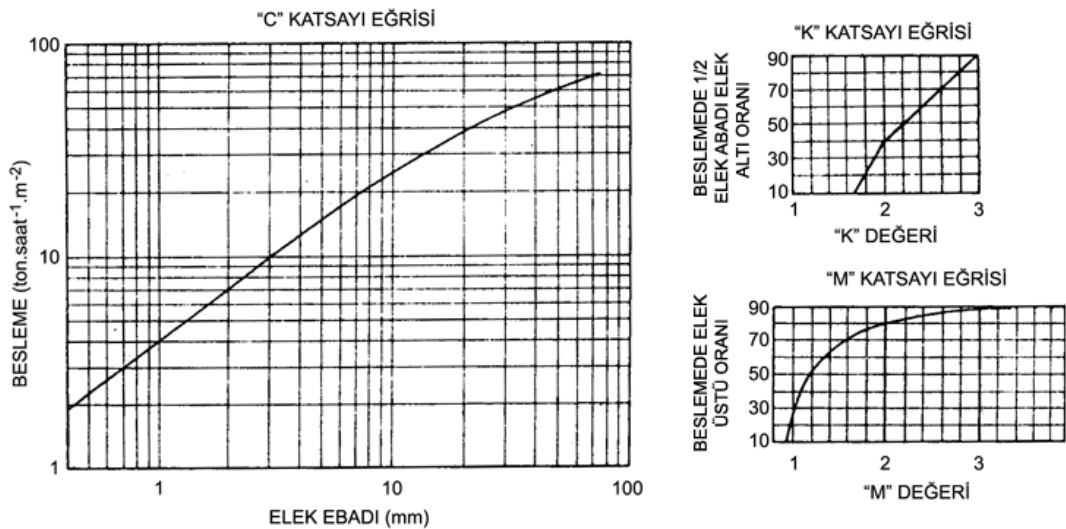
C : efektif elek alanının her bir m²'si başına materyal miktarı (ton.sa⁻¹)

M : elenecek materyalin elek üstü oranına bağlı bir katsayı

K : elenecek materyalde elek boyutunun yarısından daha küçük boyuttaki materyalin oranına bağlı bir katsayı

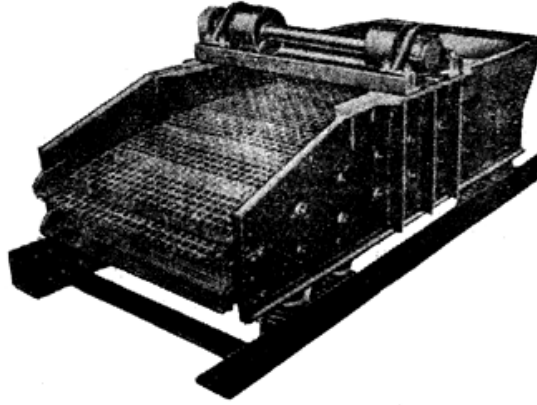
Q : özgül ağırlık, yüzey rutubeti, elek yüzeyi ve eğim gibi unsurlara bağlı bir katsayı

Bu denklemde uygulanacak C, M, K katsayılarının değerleri Şekil 5.18'de yer alan eğrilerden bulunabilir.

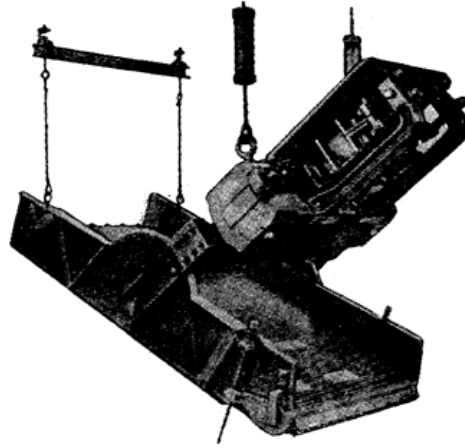


Şekil 5.18: Titreşimli Eleklerde Kapasite Hesapları İçin C, M, K Katsayıları

Şekil 5.19’de çift yüzeyli titreşimli elek ve Şekil 5.20’de titreşimli konveyör eleği görülmektedir [97].



Şekil 5.19: Çift Yüzeyli Titreşimli Elek



Şekil 5.20: Titreşimli Konveyör Eleği

Elek kapasitesine etki eden faktörler; elek açıklığı (mm), elek yüzey alanı (m^2) ve materyalin özgül ağırlığıdır ($gr.cm^{-3}$). Elek verimine etki eden faktörler ise; elek açıklık oranı, elek çalışma hızı, elek eğimi, elenen malzemedeki nem oranı, elenen malzemenin tane şekli ve elenen malzemedeki elek altı oranıdır.

Elek verimi elek altına geçen malzeme miktarının elenen malzemedeki toplam elek altı miktarına oranıdır. Elek açıklık oranı ise toplam delik alanının elek yüzeyinin toplam alanına oranıdır. Bir malzemenin tamamının geçtiği en küçük elek açıklığına geçen elek açıklığı ve bir malzemenin tamamının üzerinde kaldığı en büyük elek açıklığına da tutan elek açıklığı denir. Buna göre geçen elek açıklığının tutan elek açıklığına oranı elek oranını verir. Eleme boyutunun 1,25 – 0,75 katı arasında kalan tane boyutu kritik tane boyutu olarak adlandırılır.

5.2.2 Sınıflandırma

Aralarında boyut, özgül ağırlık veya şekil farkı olan tanelerin, durgun veya hareketli su veya hava gibi bir ortamda farklı hızlarla çökmelerinden (terminal hız) yararlanılarak birbirinden ayrılması işlemine sınıflandırma denir. Sınıflandırma 800 µm ile 3 µm arasında tane boyutlarına uygulanır [56,107]. Terminal hız, tanenin boyuna, özgül ağırlığına, şekline ve akışkan ortamın özelliklerine bağlıdır. Akışkan bir ortam içinde taneye etki eden kuvvetler şunlardır:

- Taneyi harekete geçiren kuvvet (yerçekimi veya merkezkaç),
- Akışkanın kaldırma kuvveti,
- Tanenin hareket yönünde zıt ve tanenin hareket yönündeki yüzeyine dik, ortam ile sürtünmesinden kaynaklanan bir direnç kuvvetidir.

Bu üç kuvvetin dengeye ulaşması anında ki bu çok kısa sürede oluşur, tane terminal hız denilen sabit bir hızla çökmeye devam eder. Tanenin hareketine karşı akışkanın gösterdiği direnç tane hızı arttıkça artar. Dolayısıyla farklı boyda ve yoğunlukta olan tanelerin terminal hızları da farklı olacağından, tane boyu guruplarına göre ayırım bu hız farkından faydalanılarak gerçekleştirilir. Küçük çökme hızları ortamda bir karışmaya yol açmaz ve ortamın bu koşullarda tane hareketine karşı gösterdiği direnç, akışkanın viskozitesi ile doğru orantılıdır. Fakat büyük tane hızlarında, tanenin arkasında bir karışma (türbülans) oluşur. Bu durumda akışkan ortama kinetik enerji transferi olmuştur ve viskoziteden kaynaklanan dirençten çok daha büyük olan türbülans direnci ortaya çıkar. Akışkan içinde hareket eden tanenin hızının neden olduğu türbülansın şiddeti, boyutsuz bir sayı olan Reynold sayısı (R_e) ile belirlenir.

$$R_e = \frac{d_m v_t \delta}{\eta} \quad (5.11)$$

R_e : Reynold sayısı

d_m : Materyal tanesinin çapı

v_t : terminal hızı

δ : akışkanın özgül ağırlığı

η : akışkan viskozitesi

Tablo 5.5’de Reynold sayısına bağı olarak tane ve akışkan ortam etkileşimi verilmiştir [107].

Tablo 5.5: Tane - Akışkan Ortam Etkileşimi

Akışkan Rejimi	Laminer	Geçiş	Türbülans
Reynold Sayısı	$R_e < 0,2$	$0,2 < R_e < 1.000$	$1.000 < R_e < 250.000$
Direnç Kuvveti	Viskoz	Viskozite ve tane gerisindeki düşük basınç	Tane gerisindeki basınç düşmesi
Tane Boyu Sınırı	0 – 60 μm	60 – 3000 μm	+ 3000 μm
Tane Şekli ve Yüzey Etkisi	Küreden farklı her şekil ve kaba yüzey direncin artmasına neden olur	Küresellikten uzaklaşan her şekil direnci artırır	
Tanenin Yoğunluğu	Her koşulda yoğunluğun artışı terminal hızın artışına neden olur.		

İki ürünlü bir sınıflandırıcı için (spiral, hidrosiklon, vb.) için sınıflandırma verimi denklem 5.12 ile hesaplanır.

$$R = 100 \frac{c}{f} \frac{f - t}{c - t} \quad (5.12)$$

f : beslemedeki belirli bir tane boyutunun toplam elek altı yüzdesi

c : üst akımdaki belirli bir tane boyutunun toplam elek altı yüzdesi

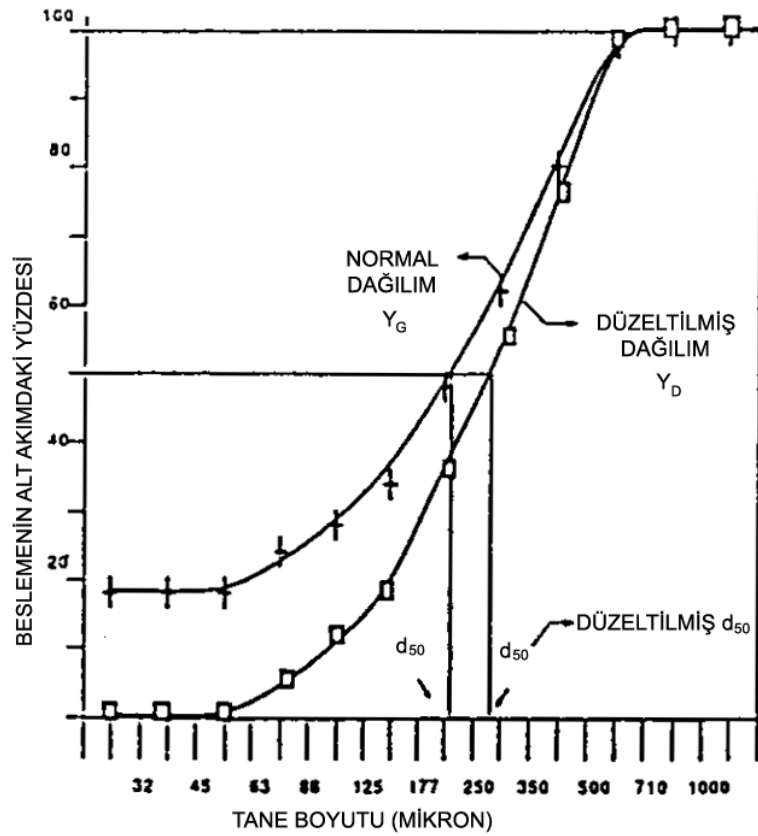
t : alt akımdaki belirli bir tane boyutunun toplam elek altı yüzdesi

Bu denklem sınıflandırma aygıtında kusursuz karışma varsayımı ile kullanılabilir. Ancak uygulamada kusursuz karışma koşulları oluşmaz. Beslemenin bir bölümü alt ve üst akıma kısa devre yaparak karışmaktadır. Kısa devrelerden kaynaklanan verim düşüklüğünü de içeren (5.13) denkleminin kullanılması önerilmiştir.

$$R = \frac{10.000(c - f)(f - t)}{f(100 - f)(c - t)} \quad (5.13)$$

Belirli bir tane boyu için sınıflandırma verimini denklem 5.13 ile hesaplamak, sınıflandırıcının performansı ve farklı sınıflandırma aygıtlarının birbirleri ile karşılaştırılması olanağını vermez. Önemli olan alt ve üst akımın tane boyu dağılımıdır ve bu dağılım grafikleri sınıflandırıcı performanslarını daha iyi açıklar. Zira sınıflandırıcı tipi ne olursa olsun ayırım elemeye olduğu gibi sadece tane boyuna göre değil fakat aynı zamanda tane yoğunluğu ve şekline de bağılı olduğundan, kusursuz bir sınıflandırma mevcut sınıflandırma aygıtlarının hiçbirisi ile olanaklı değildir.

Kusursuz bir sınıflandırmayı engelleyen bir diğer önemli olgu da beslemedeki küçük tanelerin bir bölümünün, su ile birlikte alt akıma geçmeleridir. Aynı şekilde beslemeden üst akıma da benzeri bir kısa devre düşünülebilir. Ancak uygulamada bu %1 – %3 gibi önemsiz bir orandır. Öyleyse gerçek anlamda sınıflandırıcı performansı, kısa devre nedeniyle beslemenin alt akımdaki sınıflandırılmamış bölümünün de hesaba katılmasıyla belirlenebilecektir. Bu sınıflandırılmamış bölümünün de hesaba katılmasıyla elde edilen tane boyu dağılım eğrisine düzeltilmiş performans eğrisi (Y_D) denir. Şekil 5.21’de bir düzeltilmiş performans eğrisi örneği görülmektedir [107]. Düzeltilmiş performans eğrisinin en önemli parametresi ise d_{50} olarak tanımlanan tane boyudur. Bu tane boyu, sınıflandırma işlemi sırasında üst ve alt akıma eşit miktarlarda geçen tane boyudur.



Şekil 5.21: Düzeltilmiş Performans Eğrisi Örneği

Tanelerin çökmesi için kullanılan ortamın cinsine göre iki çeşit sınıflandırma vardır.

- Yaş sınıflandırma, ortam olarak su kullanılır
- Kuru sınıflandırma, ortam olarak hava ve gaz kullanılır

Sınıflandırmanın amaçları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İri parçaları incelerden ayırmak. Bunda özgül ağırlığı farkını gözetmeksizin, elemeye olduğu gibi bir ayırma söz konusudur.
- Çeşitli özgül ağırlıkta parçaları ihtiva eden ve geniş boyut aralıklarına dağılmış bir malzemeyi gruplara ayırarak her bir gurupta özgül ağırlığı yüksek parçaların düşüklerden daha küçük boyutta bulunmalarını mümkün kılmak.
- İnce parçalar ihtiva eden ve geniş boyut aralıklarına dağılmış bir malzemeyi daha dar boyut guruplarına ayırmak.

Sınıflandırmada boyut ile birlikte, özgül ağırlık, tane şekli gibi etkenlerin rol oynaması bu işlemi elemeye ayıran özellikleridir.

Çökme ortamı su, hava veya gaz içinde tanelerin çöküş hızını etkileyen faktörler, tanenin ve çökme ortamının fiziksel özelliklerine bağlıdır. Buna göre çöküş hızını etkileyen faktörler, tanenin boyutuna, şekline ve özgül ağırlığına çökme ortamının ise viskozitesine ve yoğunluğuna bağlıdır. Genel olarak iri, ağır ve yuvarlak taneler, ince, hafif ve köşeli tanelerden daha çabuk çökerler [97]. Sınıflandırmada söz konusu olan katı cisim tanelerinin bir akışkan ortamda hareketi ile ilgili olan genel kanunlar aşağıda sıralanmıştır [56,96,97].

- Özgül ağırlığı ve şekli aynı olan tanelerin çözme hızı tanelerin büyüklüğüne bağlıdır. Özgül ağırlığı ve şekli aynı olan iki taneden boyutu büyük olan daha hızlı çöker.
- Boyutu ve şekli aynı olan tanelerin çökme hızı tanelerin özgül ağırlığına bağlıdır. Boyutu ve şekli aynı olan iki taneden özgül ağırlığı büyük olan daha hızlı çöker.
- Boyutu ve özgül ağırlığı aynı olan iki taneden yuvarlak olanı yassı olanından daha hızlı çöker.
- Bir tane, yoğunluğu düşük olan bir sıvıda, yoğunluğu yüksek olan bir sıvıdakinden daha hızlı çöker.
- Bir tane, viskozitesi düşük olan bir sıvıda, viskozitesi yüksek olan bir sıvıdakinden daha hızlı çöker.

- Belirli bir akışkan ortamda, çökmeye karşı direnç parça çöküş hızına bağlıdır ve düşük hızlarda hızın karesi, yüksek hızlarda hızla orantılı, ikisi arasında ise hızın 1. ve 2. kuvvetleri arasında bir kuvveti ile orantılı olarak değişir.
- Belirli bir akışkan ortamda, çökme hızı, diğer bütün şartlar aynı ise, küçük parçalar için parça çapının karesi, büyük parçalar için parça çapının $\frac{1}{2}$ inci kuvveti ile arada ise çapın 2 ila $\frac{1}{2}$ kuvveti arasında bir kuvveti ile orantılı olarak değişir.
- Çökmeye karşı direnç ortamın yoğunluğu ile orantılıdır.
- Çökmeye karşı direnç ortamın viskozitesi ile orantılıdır. Parça küçüldükçe direnç artışı fazlalaşır.

Sınıflandırma daha çok tane boyutuna göre ayırma yapmak ve kapalı değirmen devrelerinde, öğütme boyutundan iri taneleri tekrar değirmene vermek, geri dönüşüm işlemleri için gerekli tane boyutlarında malzeme hazırlamak ve de herhangi bir amaçla, bir malzemenin irisini incesinden ayırmak amacıyla kullanılır.

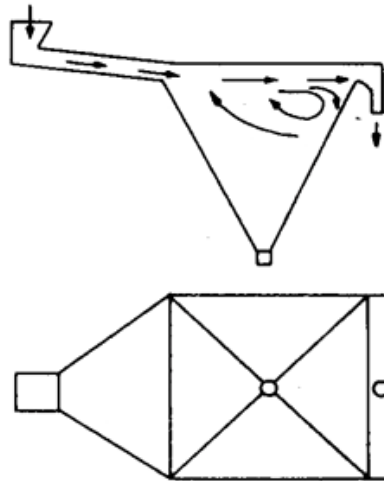
Sınıflandırma yapmak için kullanılan araçlara sınıflandırıcı denmektedir. Yapı yönünden çok çeşitli olan sınıflandırıcıları yatay akımlı ve düşey akımlı diye iki esas gruba ayırmak mümkündür. Birincide daha ziyade boyuta, ikincide ise, boyut, şekil ve özgül ağırlığa göre ayırma söz konusudur. Her bir grup kendi içinde de bölümlere ayrılabilir. Çöken parçaların mekanik bir vasıta ile alındığı tiplere mekanik sınıflandırıcılar denilmektedir ve bu tipler genellikle yatay akımlıdır. Çöktürme havuzları, koniler ve benzerleri diğer yatay akımlı sınıflandırıcılar olarak söylenebilir. Bunlarda çöken malzeme dipten boşaltma ile alınır. Hidrolik sınıflandırıcılar diye adlandırılanlarda ise dıştan verilen ilave su ile sınıflandırma hacminde bir düşey kaldırma ve bu hacimde genellikle engelli çökme şartları yaratılır. Serbest çökme nadiren ve kaba ayırmalar için kullanılır. Yerçekimi etkisine ilaveten merkezkaç kuvvetinden yararlanan tip sınıflandırıcılar da vardır. Hareket halindeki hava veya su yavaş çöken taneleri ayırıp götürürken, çabuk çöken taneler bir tabaka halinde sınıflandırıcının alt tarafında toplanır ve buradan dışarı tahliye edilir. Sınıflandırıcılar yapıları ve çalışma şekilleri bakımından çok çeşitlidirler. Başlıca sınıflandırıcı çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

- Çöktürme havuzları
- Çöktürme konileri

- Hidrolik sınıflandırıcılar
- Spiral sınıflandırıcılar
- Siklonlar
- Havalı sınıflandırıcılar

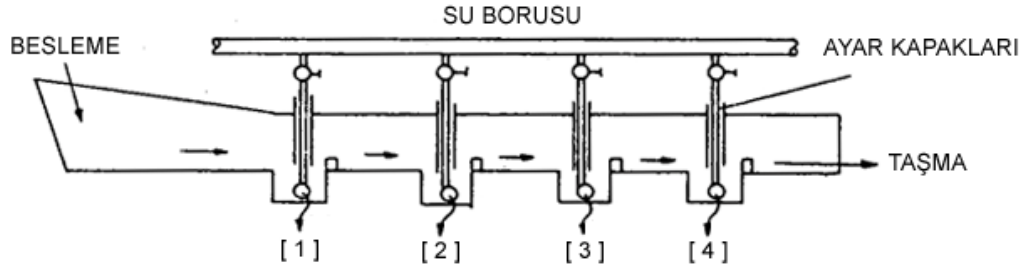
Çöktürme havuzları dikdörtgenler prizması şeklindeki beton, sac veya ahşap malzemeden yapılmış ve yer seviyesinin üstünde veya altındaki havuzlardır. Burada, havuz içindeki bir katı tanesine başlıca üç kuvvet etki eder. Bunlar yerçekimi kuvveti, suyun kaldırma kuvveti ve suyun sürüklemeye kuvvetidir. Havuz içerisindeki katı tanesi bu üç kuvvetin bileşkesi yönünde hareket eder.

Çöktürme konileri tepesi aşağıda tabanı yukarıda olan ters koni şeklindedirler. Beton, çelik, sac veya ahşaptan yapılabilirler. Şekil 5.22’de bir çöktürme konisi kesiti görülmektedir [96].

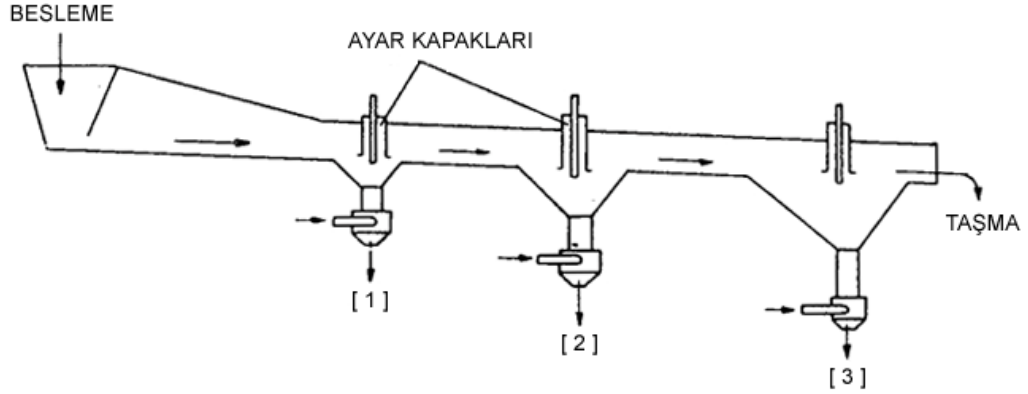


Şekil 5.22: Çöktürme Konisi Kesiti

Hidrolik sınıflandırıcılarda bir katı tanesine, yerçekimi kuvveti, suyun kaldırma kuvveti, suyun sürüklemeye kuvvetine ilaveten çökme yönüne ters istikamette etki eden düşey su akımı kaldırma kuvveti ile birlikte dört kuvvet etki eder. Bu sınıflandırıcılarda düşey su akımının hızını değiştirmek suretiyle kuvveti değiştirilebilir. Bu şekilde belli özellikteki tanelerin çökmesi veya taşması sağlanabilir. Bu tip sınıflandırıcıların en önemlileri Şekil 5.23’de görülen Evans hidrolik sınıflandırıcısı ve Şekil 5.24’de görülen Richards hidrolik sınıflandırıcısıdır [96].

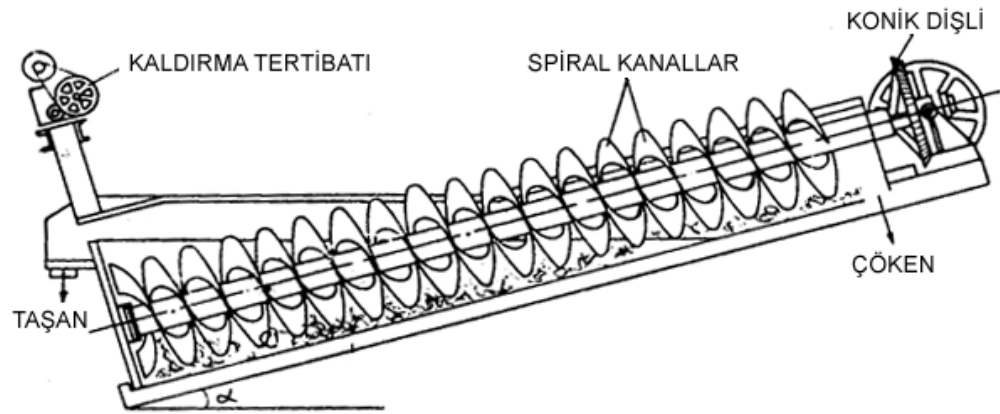


Şekil 5.23: Evans Sınıflandırıcısı



Şekil 5.24: Richards Sınıflandırıcısı

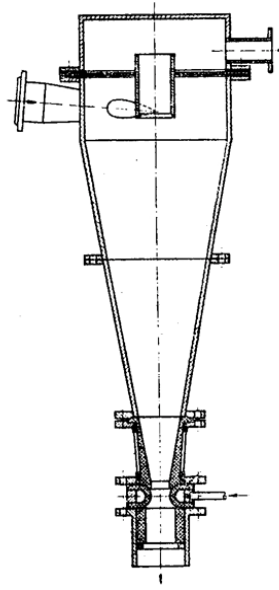
Spiral sınıflandırıcılar da yatay su akımlı mekanik bir sınıflandırıcıdır. Ancak, çöken iri malzeme tarak yerine spiral adı verilen bir helezon (burgu) şeklindeki bir mekanizma ile taşınır. Şekil 5.25’de bir spiral sınıflandırıcı görülmektedir [96].



Şekil 5.25: Spiral Sınıflandırıcı

Siklon üst kısmı silindirik, alt kısmı konik, materyal girişi teğetsel olan içi boş bir gövdeden ibarettir. Taneleri hem boyut farkına ve hem de yoğunluk farkına göre ayırır. Siklonlar, su, ağır sıvı, ağır ortam veya hava ile çalışabilirler. Katı malzeme ile birlikte siklona giren su veya havanın büyük kısmı siklon üstünden, daha az kısmı da

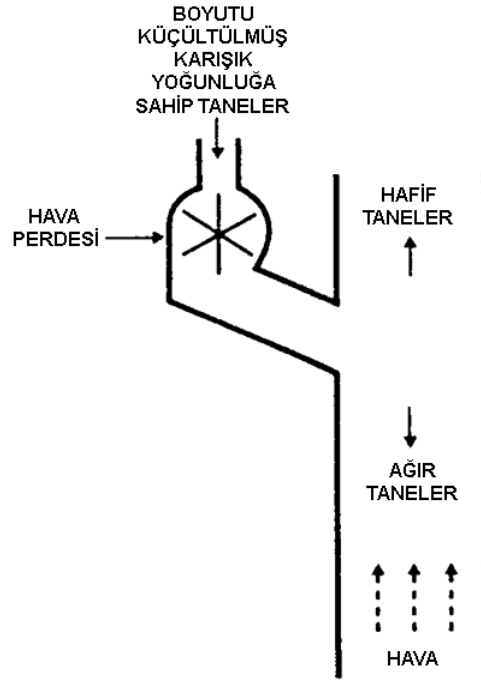
siklon altından çıkar. İri boyutlu ve yüksek yoğunluklu ağır taneler siklon altından elde edilirler. Küçük boyutlu ve düşük yoğunluklu hafif taneler de siklon üstünden çıkarlar. Siklonlar genellikle 0,5 mm den daha iri boyutlu taneleri yoğunluklarına göre, 0,5 mm den daha küçük boyutlu taneleri ise büyüklüklerine göre ayırmada kullanılır. Siklonlar boyut sınıflandırıcısı olarak tane boyutu farkına göre ayırmada, yoğunluk sınıflandırıcısı olarak yoğunluk farkına göre ayırmada, katı su karışımından suyun atılarak susuzlaştırmada ve tozlu havada toz tutucu veya toz ayırıcı olarak kullanılırlar. Şekil 5.26’da bir siklon kesiti görülmektedir [56].



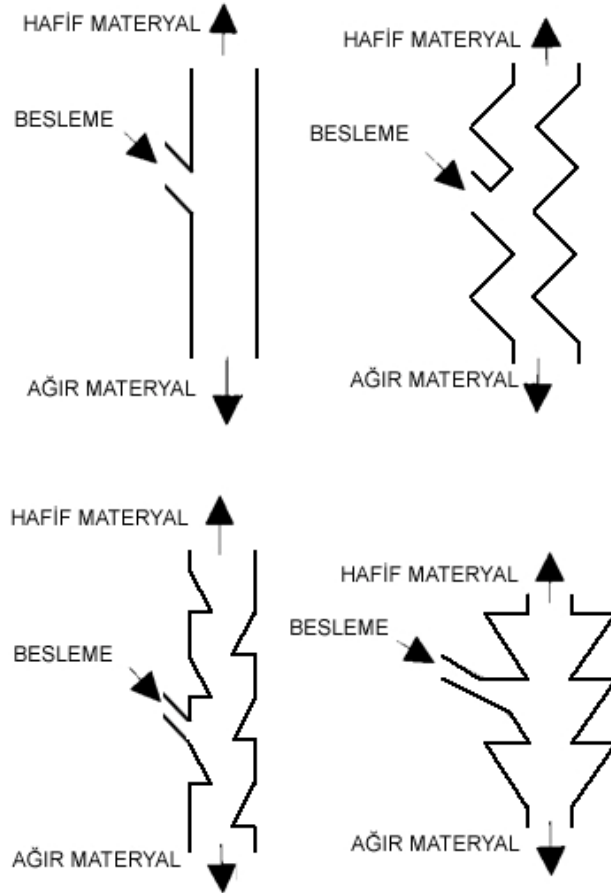
Şekil 5.26: Siklon Kesiti

Havalı sınıflandırıcılar geri dönüşüm sistemlerinde hafif tane olarak adlandırılan düşük yoğunluğa ve yüksek hava direncine sahip parçaların (kağıt, hafif plastik vb.), ağır tane olarak adlandırılan yüksek yoğunluklu ve düşük hava direncine sahip tanelerden (metal, cam, ağır plastik vb.) ayrılması için kullanılırlar [98]. Havalı sınıflandırma sistemlerinin temel çalışma prensipleri düşük yoğunluklu materyallerin hava akımıyla taşınmaya yatkın olmalarına karşın ağır materyallerin buna yatkın olmamaları veya çok az etkilenmeleridir.

Düşey havalı sınıflandırıcılarda Şekil 5.27’de görüldüğü gibi parçalanmış materyaller bir düşey kanal boyunca yukarı doğru şartlandırılmış olan hava akımı içerisine bırakılır. Hava hafif materyalleri yukarı doğru taşıırken ağır materyaller kanal içerisinde dibe çöker ve buradan toplanır. Şekil 5.28’de görüldüğü gibi bazı düşey havalı sınıflandırıcılar yılankavi (zikzak) veya bölmeli olarak tasarlanmışlardır.

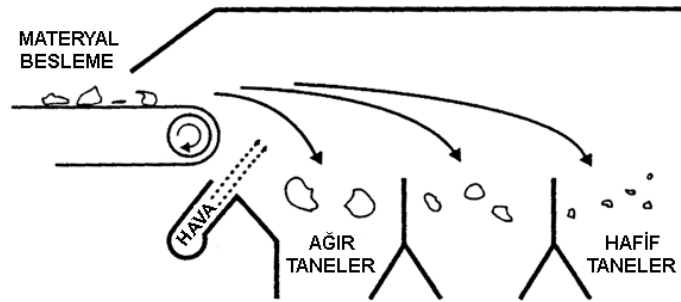


Şekil 5.27: Düşey Havalı Sınıflandırıcı

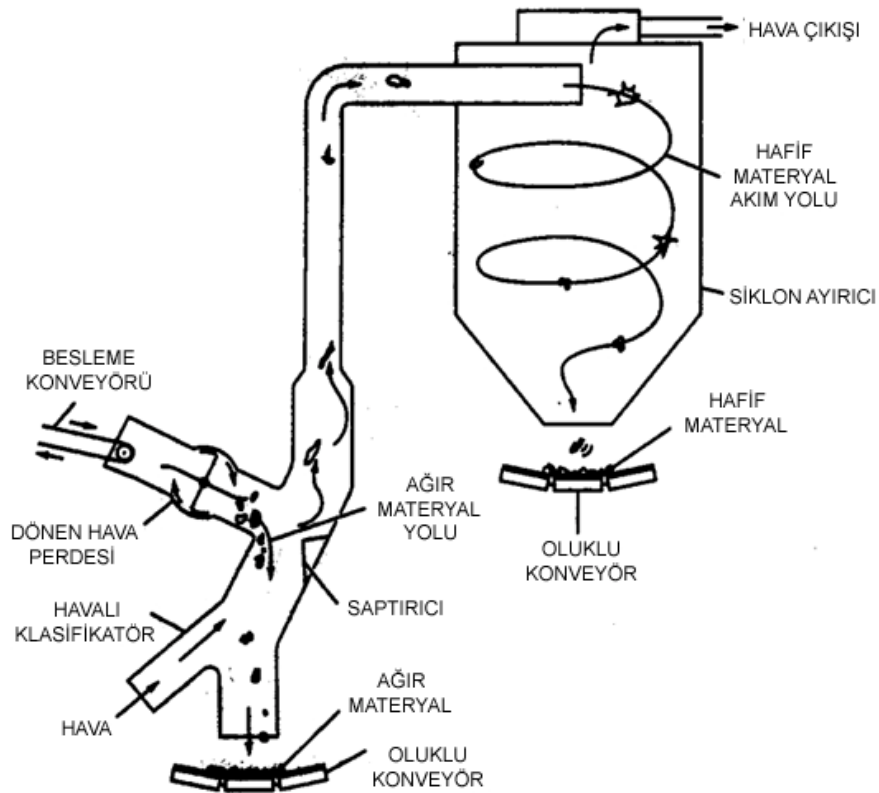


Şekil 5.28: Düşey Havalı Sınıflandırıcı Kanalı Örnekleri

Havalı sınıflandırma sistemlerinin çoğunluğu yatay havalı sınıflandırma sistemidir. Yatay havalı sınıflandırma sistemlerinde karışık haldeki boyutu küçültülmüş hafif ve ağır materyaller hava akımının etkisiyle aynı yönde taşınır. Materyaller ve hava kanalın bir ucundan diğer ucuna doğru hareket eder ve hafif materyaller ağır materyallerden daha uzağa taşınır. Ayırma materyalin kanalın dibinde bulunan deliğe ulaştığı zaman gerçekleşir. Geri dönüşüm işlemlerinde cam ve alüminyum, cam ve plastik gibi ağır ve hafif materyal karışımlarının ayrılmasında havalı ayırma yöntemi pahalı olmayan bir teknik olduğundan kullanılabilir. Şekil 5.29'de bir yatay havalı sınıflandırıcı ve Şekil 5.30'de tipik bir havalı sınıflandırma sistemi görülmektedir.



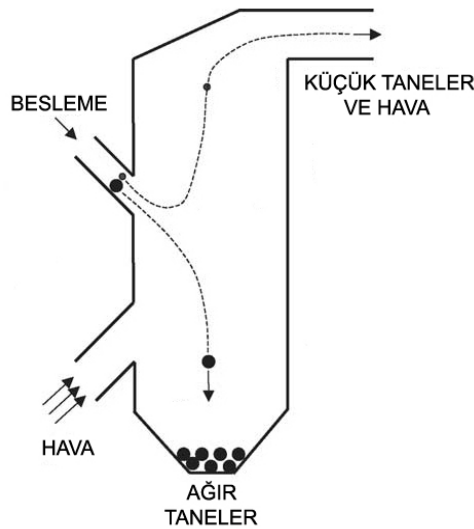
Şekil 5.29: Yatay Havalı Sınıflandırıcı



Şekil 5.30: Tipik Bir Havalı Sınıflandırma Sistemi

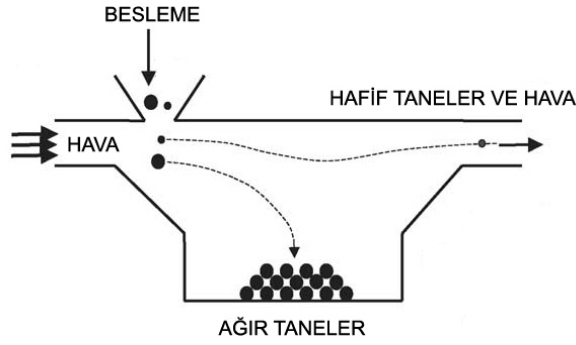
Havalı sınıflandırma ile ilgili olarak, havalı sınıflandırıcıların çalışma prensiplerini, özelliklerini, parametrelerini ve geri kazanım oranlarını içeren detaylı bir çalışma Shapiro ve Galperin [110] tarafından sunulmuştur. Aktif darbeli hava akımlı laboratuvar ölçekli küçük bir havalı sınıflandırıcı ile ilgili diğer bir çalışma Pierce [111] tarafından sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda en iyi ayırma işleminin genellikle hava hızının yavaş bir şekilde artırılıp ardından hızlı bir şekilde düşürüldüğü uzun dalga formunda ve hava kanalının düz olduğu durumda gerçekleştiği tespit edilmiştir. En iyi çalışma durumunun darbe frekansının yaklaşık 1 Hz’de gerçekleştiği saptanmıştır.

Gravitasyonel havalı sınıflandırıcılar; düşey hava akımlı karşı akışlı havalı sınıflandırıcılar ve yatay hava akımlı çapraz akışlı havalı sınıflandırıcılar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Düşey hava akımlı karşı akışlı havalı sınıflandırıcıların yapıları basit, bakımları kolay ve ucuzdurlar. Tek kademede yapılan ayırma işlemi için ayırma verimleri düşük. Yalnızca iki ayrı tip farklı boyuttaki materyalin ayrılması için elverişlidir. Düşey hava akımlı karşı akışlı bir havalı sınıflandırıcının şematik gösterimi Şekil 5.31’de verilmiştir [110].



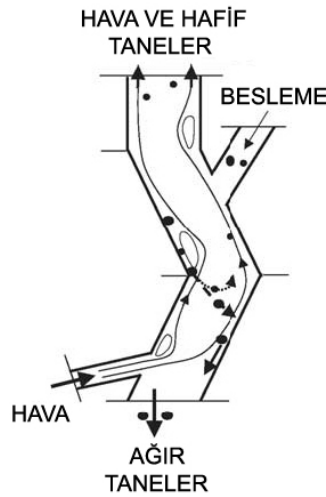
Şekil 5.31: Düşey Hava Akımlı Karşı Akışlı Havalı Sınıflandırıcı

Yatay hava akımlı çapraz akışlı havalı sınıflandırıcıların ayırma verimleri tahmin edilemez çalışma koşullarından çok fazla etkilenir. Ayırma verimleri düşüktür. Katı materyallerin boyut farından ziyade yoğunluk farklarına göre ayrılmasında kullanılırlar. Yatay hava akımlı çapraz akışlı havalı sınıflandırıcılar diğer ayırma teknikleriyle birlikte kullanılabilirler. Yatay hava akımlı çapraz akışlı bir havalı sınıflandırıcının şematik gösterimi Şekil 5.32’de verilmiştir [110].



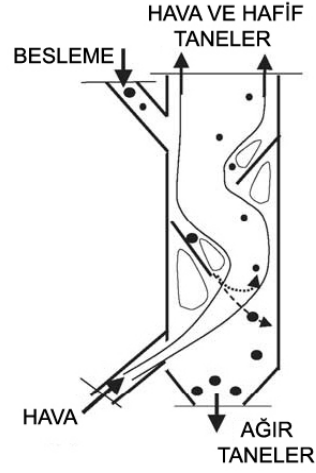
Şekil 5.32: Yatay Hava Akımlı Çapraz Akışlı Havalı Sınıflandırıcı

Kademeli havalı sınıflandırıcıların en yaygını yılankavi havalı sınıflandırıcılarıdır. Ayırma işlemi burada da karşı akım prensibine göre gerçekleşir. Ardışık kanallar birden fazla ayıklama gerçekleştirerek ayırma verimini artırır. 1 – 10 mm arasındaki tanelerin ayrılmasında kullanılırlar. 1 – 16 adet paralel döngü oluşturularak 1 – 16 t.sa⁻¹ materyal ayrılabilir. Kademeli havalı sınıflandırıcılarında ayırmayı artırsa da ağır taneler her kademede hafif tanelerle karışır. Buda ayırma verimini düşürür. Diğer bir dezavantaj ise yüksek aerodinamik dirençten dolayı kademe geçişlerinde oluşan girdap akımlarıdır. Burada 2,5 – 3,5 kPa arasında bir basınç düşüşü söz konusudur. Şekil 5.33’de Yılankavi kademeli havalı sınıflandırıcı gösterilmektedir [110].



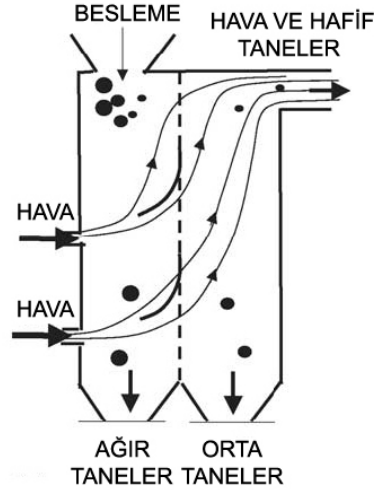
Şekil 5.33: Yılankavi Tip Kademeli Havalı Sınıflandırıcı

Diğer bir kademeli havalı sınıflandırıcı kanal içerisine ayırıcı plakaların monte edildiği plakalı havalı ayırıcılardır. Bu ayırıcılarda da 4 kPa – 5 kPa civarında basınç düşmesi nedeniyle plaka altlarında güçlü girdap akımları meydana gelir ve ayrıca enerji tüketimleri fazladır. Şekil 5.34’de Plakalı kademeli havalı sınıflandırıcı gösterilmektedir [110].



Şekil 5.34: Plakalı Tip Kademeli Havalı Sınıflandırıcı

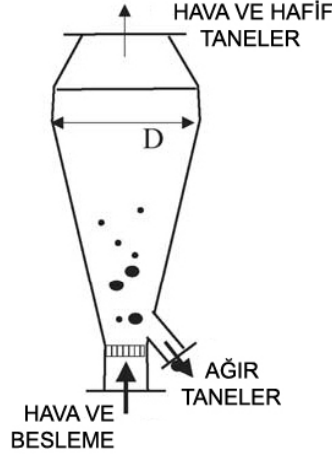
Kademeli tasarım prensibi ayrıca kanal içerisine düşey olarak yerleştirilmiş içbükey plakalı geçirgen eleklerin bulunduğu çapraz geçişli yatay akımla ayırma prensibiyle birlikte kullanılabilir. Bu tasarımda girdap akımları oluşmadığından düşük hava direnci mevcuttur ve enerji tüketimi düşüktür. 800 – 900 Pa basınç düşümünün olduğu bu ayırıcılarda hafif materyalleri için %96 – %98 saflıkta ve ağır materyaller için %78 – %85 saflıkta 25 t.sa⁻¹ kapasite mamul elde edilebilir. Şekil 5.35’de yatay hava akımlı kademeli havalı sınıflandırıcı görülmektedir [110].



Şekil 5.35: Yatay Hava Akımlı Kademeli Havalı Sınıflandırıcı

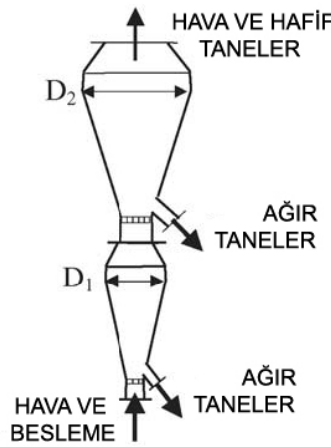
Akışkan yataklı havalı ayırıcılarda ayırma işlemi akışkan yatak üzerindeki hacim üzerinde meydana gelir ve hafif parçalar hava akımıyla taşınır. Ağır taneler yatak üzerinden yatay olarak hareket ederek ayrılırlar. Gravitasyonel karşı akışlı ayırma prensibinden yararlanılır. Akışkan yataklı sınıflandırıcılar düz veya genişleyen formda olabilirler. Akışkan yataklı sınıflandırıcılar konik bir oda, materyallerin beslenmesi için alt tarafta geçirgen bir elek, giriş ve çıkış boruları ve ağır tanelerin

uzaklaştırıldığı bir koldan oluşurlar. Deliklerdeki yüksek hava hızı nedeniyle bütün taneler koninin içerisine yukarı doğru hareket eder ve akım genişlediğinde taneler yavaşlar. Ağır taneler eleğe geri döner ve hafif taneler taşınır. Koninin üst çapı hava hızının ağır tanelerin taşınma hızını geçmeyecek şekilde seçilir. Şekil 5.36'de akışkan yataklı havalı sınıflandırıcı görülmektedir [110].



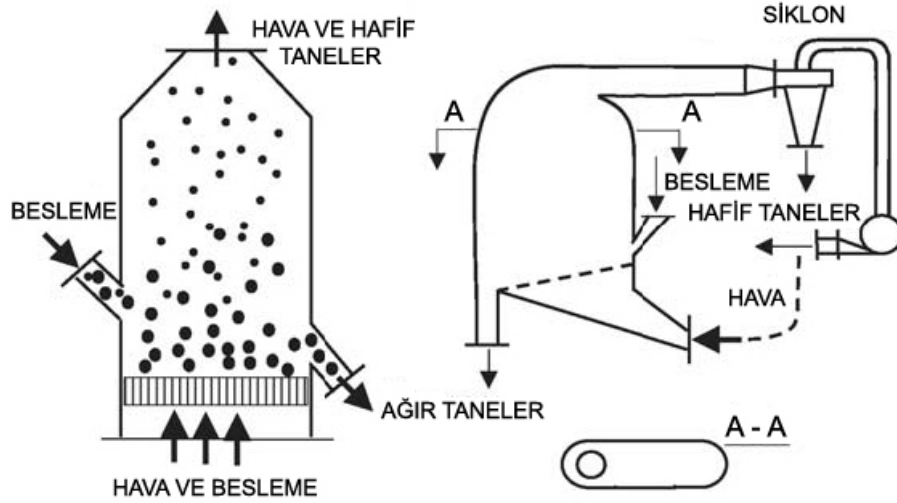
Şekil 5.36: Akışkan Yataklı Havalı Sınıflandırıcı

Direkt geçişli elekler bir koninin diğer bir koninin üzerine yerleştirilmesiyle kademeli sınıflandırıcı tasarımına olanak tanır. Her kademede hacim çapına bağlı olarak farklı büyüklükte tane ayrılabilir. Direkt geçişli sınıflandırıcılar büyük boyutlu olduklarından uygulamada çok fazla kullanılmazlar. Üç kademeli 600 kg.saat^{-1} kapasiteli bir havalı sınıflandırıcı yaklaşık olarak 4,5 m yüksekliğindedir. Ek olarak tanelerin eleklerle çarpması mamul kalitesini etkiler. Şekil 5.37'de akışkan yataklı direkt geçişli havalı sınıflandırıcı görülmektedir [110].



Şekil 5.37: Akışkan Yataklı Direkt Geçişli Havalı Sınıflandırıcı

Akışkan yataklı sınıflandırıcıların bir sonraki gelişimi beslemenin elek üzerine döküldüğü tasarımlarıdır. 50 – 1,5 mm boyutunda tanelerin ayrıldığı 350 – 1700 mm çaplı ve 0,5 – 10 t.sa⁻¹ kapasiteli silindirik ve konik biçimli bir takım prototip akışkan yataklı tasarımlar mevcuttur. Ağır tanelerin geri kazanım oranı %75 – %92 arasındadır. Şekil 5.38’de elek üstünden beslemeli akışkan yataklı sınıflandırıcı görülmektedir.



Şekil 5.38: Elek Üstünden Beslemeli Akışkan Yataklı Sınıflandırıcı

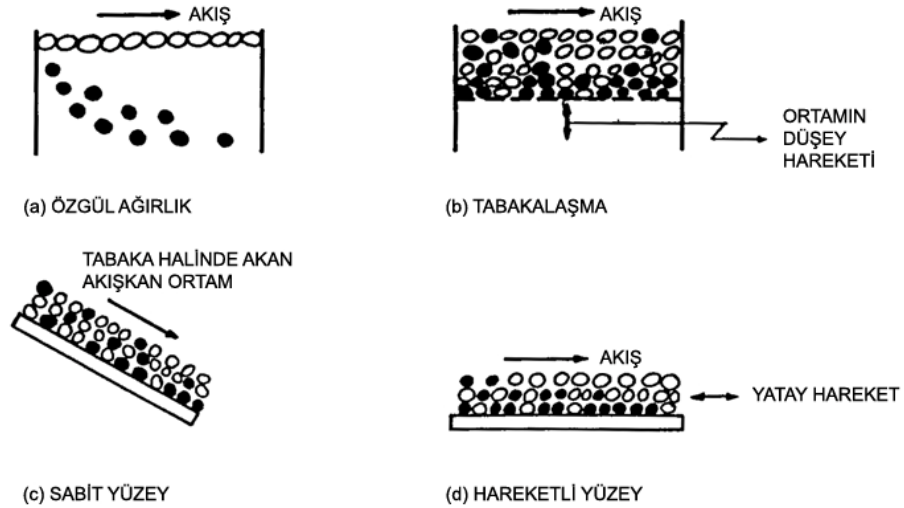
Biçimsel ayırma teknikleri öncelikli olarak toz metalürji endüstrisinde tanelerin kontrolü için geliştirilmiştir. Ayırma teknikleri dört grupta sınıflandırılmıştır [27]. Bu proseste kullanılan temel prensipler fark gösterir: (1) eğimli katı bir duvar üzerindeki tane hızı, (2) tanelerin bir menfez deliğinden geçiş süresi, (3) bir katı yüzeydeki tanelerin bağ kuvveti, ve (4) bir sıvı içindeki tane çökme hızı.

Eğimli tabak ve elekler vasıtası ile yapılan biçimsel ayırma geri dönüşüm endüstrisinde kullanılan en temel yöntemdir [59]. Elektrikli kablo atıklarından, baskılı devre levhası atıklarından, ve atık televizyon ve kişisel bilgisayarlardan bakırın geri kazanımı için tane biçimsel ayırıcısı olarak eğimli konveyör veya bir eğimli titreşimli tabak kullanılmaktadır.

5.3 Özgül Ağırlık (Gravite) Farkına Göre Ayırma

Materyal tanelerinin akışkan bir ortam içinde özgül ağırlık farkından dolayı değişik şekilde hareket ederek birbirlerinden ayrılması ile gerçekleştirilen ayırma işlemine özgül ağırlık (gravite) farkına göre ayırma adı verilir [56].

Özgöl ağırlık farkına göre ayırma mekanizmaları şematik olarak Şekil 5.39'de gösterilmiştir. Şekil 5.39a'da görülen mekanizma ağır ortam ayırması ile zenginleştirmeyi temsil etmektedir. Bu yöntemde özgül ağırlığı akışkanın özgül ağırlığından büyük olan ağır materyaller çöker ve özgül ağırlığı akışkanınkinden daha küçük olan materyaller yüzer. Şekil 5.39b, jiglerde meydana gelen mekanizmayı göstermektedir. Akışkan ortama verilen basma ve emme hareketlerinin etkisiyle elek üstünde, ağır materyaller altta ve hafif materyaller üstte olmak üzere sonuçlanan tabakalaşma meydana gelmektedir. Şekil 5.39c'de yüzey sabit olup, ince bir tabaka halinde akan akışkan ortam içinde özgül ağırlık farkına dayanarak ayrışma sağlanır. Şekil 5.39d'de üzerinde tabaka halinde su akışı olan yüzeye bir mekanizma ile sarsıntılı veya orbital hareket verilerek ayrışma gerçekleştirilir [107].



Şekil 5.39: Özgöl Ağırlık Farkına Göre Ayırma Mekanizmaları

Özgöl ağırlık farkına göre ayırma diğer yöntemlere göre daha geniş bir boyut aralığında uygulanabilmektedir. Uygulanabilecek en büyük boyut, ayırma aygıtının kapasitesine ve tane serbestleşmesine bağlı olarak 50 cm olarak kabul edilir. İnce materyallerin özgül ağırlık farkına göre ayırmasında 6 μ m en küçük boyut olarak alınmaktadır. 50 cm – 6 μ m boyut aralığında özgül ağırlık farkına göre ayırma tek bir aygıtta yapılması mümkün değildir.

Özgöl ağırlık farkına göre ayırma işleminde, materyal tanelerinin akışkan ortam içindeki hareket hızları ve özgül ağırlığın yanı sıra, tanelerin şekli, büyüklüğü, akışkan ortamın viskozite ve özgül ağırlığı da önemli rol oynamaktadır. Özgöl ağırlık farkı ile ayırmada üç türlü akışkan ortam kullanılmaktadır.

- Durgun ortam (ağır ortam)
- Düşey hareketli ortam (jig)
- Tabaka halinde eğimli akan ortam (sarsıntılı masa, spiral, oluk)

Ağır materyalleri hafif materyallerden ayırmak için birçok farklı metot kullanılır. Bileşenlerin yoğunluk farkları bu ayırmanın temelini teşkil eder. Tablo 5.6 metal olmayan/metal ayırımında yaygın olarak uygulanan yoğunluk temelli ayırma işlemlerini göstermektedir [27].

Tablo 5.6: Metal – Ametal Ayırımında Kullanılan Yoğunluk Bazlı Ayırma İşlemleri

Yoğunluk Ayırma İşlemi	Çalışılabilir Parça Büyüklüğü (mm)	Uygulanan Atık Türlerinin					
		Plastik	Alüminyum	Kurşun pil	Kablo	Elektronik	Hafif Çelik
Batırma Yüzdürme Ayırma							
Sıvı Ortamda		+		+	+		+
Yoğun Ortamda							
Gravite Ayırıcı	5 – 150		+	+		+	+
Hidrosiklon	< 50						+
Hava Ortamında							
Hava Kanallarında	0,7 – 3				+		
Akışkan Yataklı Ayırıcılarda	0,7 – 5				+		
Jig ile Ayırma							
Hidrolik Jig	2 – 20						+
Pnömatik Jig	< 3				+		
Kanallar ve Tablalar ile Ayırma							
Hava Kanalları	0,6 – 2				+		
Hava Tablaları	< 4				+		
Akıntı ile Ayırma							
Hidrolik Ayırma	5 – 150	+		+			+
Pnömatik Ayırma	< 300				+		

Gravite farkına göre ayırmada materyaller, yerçekimi kuvveti ve bir veya birden fazla kuvvete karşı gösterdikleri bağlı hareketler vasıtasıyla özgül ağırlıkları arasındaki farka göre ayrılır. Daha sonraları bu harekete direnç olarak su veya hava gibi bir akışkanın kullanılması önerilmiştir [112]. Akışkan içerisindeki bir tanenin hareketi yalnızca tanenin yoğunluğuna bağlı olmayıp aynı zamanda tanenin boyutuna ve şekline de bağlıdır. Büyük taneler küçük olanlara nazaran daha fazla etkilenirler. Pratikte ayırma işleminde besleme materyallerinin hassas boyut kontrolü için boyut etkisinin ve tane özgül ağırlığının meydana getirdiği rölatif hareketin azaltılması gereklidir.

5.3.1 Durgun Ortamda Ayırma

İri boyutlu materyal tanelerinin aralarındaki özgül ağırlık farklılığına dayanılarak, ağır bir akışkan ortam içinde, yüzmeye ve batma yoluyla birbirinden ayrılması ile yapılan ayırma işlemine ağır ortam veya ağır sıvı veya yüzdürme – batırma ile ayırma adı verilmektedir. Ayırma kriteri denklem 5.14 ile bulunur.

$$k = \frac{\delta_1 - \delta}{\delta_2 - \delta} \quad (5.14)$$

k : ayırma kriteri

δ_1 : ağır materyalin özgül ağırlığı

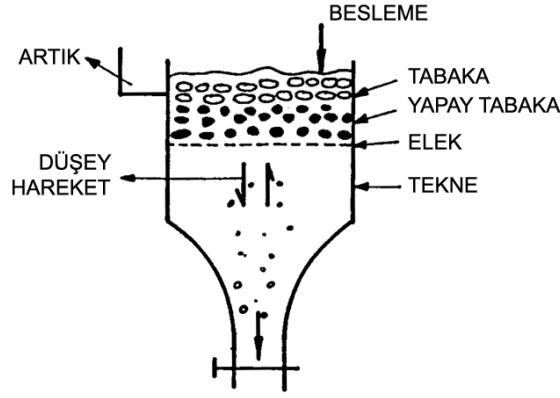
δ_2 : hafif materyalin özgül ağırlığı

δ : ortamın özgül ağırlığı

Ayırma kriteri için 1,45 değeri limit bir değerdir. Ayırma kriteri k 2,5’den büyükse ayırma kolaylıkla yapılır. 2,5 – 1,50 arasında ayırma işlemleri güçleşir. 1,5 – 1,25 arasında ayırma oldukça zorlaşır. 1,25 ve bu değerlerin altında kalan değerler için iki materyalin ayrılması çok zordur ve ekonomik bir ayırma mümkün değildir. Bu durumda ortamın özgül ağırlığı ile oynanarak ayırma kriteri bu değerlerin üzerine çıkması sağlanır [107].

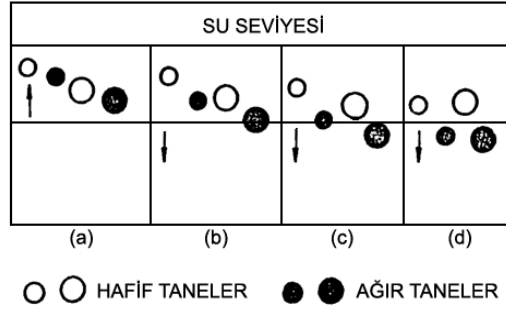
5.3.2 Düşey Hareketli Akışkan Ortamda Ayırma

Özgül ağırlığı farklı materyal tanelerinin aşağı – yukarı yani düşey hareketli akışkan bir ortam içinde, tabakalar halinde ayrılması ile yapılan ayırma işlemine düşey hareketli ortamda ayırma veya jig ile ayırma adı verilir [56]. Bu şekilde yapılan ayırma işlemlerinde kullanılan cihazlara jig adı verilmektedir. Jiglerin endüstride en çok kullanılan şekli pistonlu ve diyaframlı jiglerdir. Genellikle 2 mm’den iri tanelere uygulanırlar. Basit bir aygıt olan jig Şekil 5.40’da görüldüğü gibi üstte jig kutusu denilen tank ile alt kısmında elek ve eleğin altındaki tekneden oluşmaktadır. Ayrıca jig içinde bulunan akışkana düşey hareketi vermek için bir hareket mekanizması da bulunur. Akışkan ortama verilen aşağıdan yukarı (basma) ve yukarıda aşağı (emme) hareketlerinin etkisiyle farklı tabakalar oluşur. Ağır mineraller alt tabakada, hafif mineraller üst tabakada yer alır. Farklı tabakaların ayrı ayrı jigden dışarı alınması sonucunda zenginleştirme işlemi tamamlanmış olur [107].



Şekil 5.40: Şematik Jig Görünüşü

Jig devresi basitleştirilmiş olarak Şekil 5.41’de gösterilmektedir [107]. Farklı yoğunluk ve boyutta dört adet mineral tanesi temsili olarak alınmıştır.



Şekil 5.41: Jig Devresinin Basitleştirilmiş Temsili Şeması (a) Basma, (b) İvme Farklılığı, (c) İvme Farklılığı ve Engelli Çöküş Sınıflandırılması, (d) İvme Farklılığı, Engelli Çöküş Sınıflandırılması ve Ara Boşluklardan Sızma

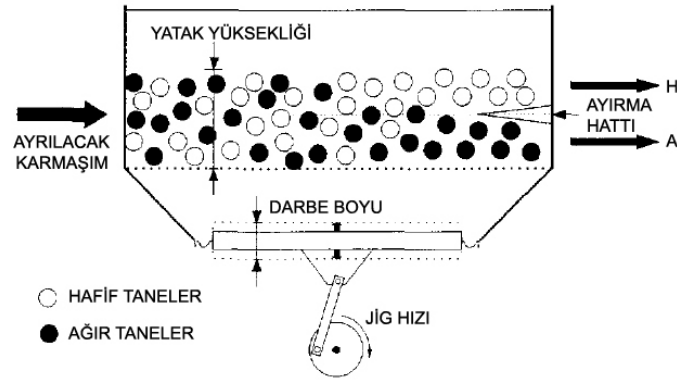
Suyun yukarı doğru hareketi ile basma sırasında bütün ağır taneler daha az, hafif taneler daha çok yukarı doğru hareket ederek tabakalar açılmış olur. Çökme hareketinin başladığı sırada ağır taneler hafif tanelere göre daha büyük bir ivme ile hareket ederler. Suyun, aşağı doğru hareketi emme sırasında meydana gelen engelli çöküş sınıflandırılması sırasında ağır taneler çok fazla çökerek alt tabakalarda toplanırlar. Bu arada küçük boyutlu ağır taneler iri taneler arasından boşluklardan sızarak çökmeye devam ederler. Aralarında yeterli özgül ağırlık farkı bulunan iki tane, yukarıda açıklanan üç olayın birlikte etkisi sonucu jig içinde tabakalaşarak birbirinden ayrılır. Jigde en üst tabakada toplanan hafif taneler taşıma yolu ile jigden dışarıya atılır. Ağır taneler ise, iki şekilde boşaltılır. Birincisinde elek açıklığı ağır tanelerin tane boyutundan daha küçük olup, ağır taneler elek üstünden bir kapak sistemiyle alınır, ikincisinde ise, elek açıklığı ağır tanelerin tane boyutundan büyük olup, ağır taneler tekne de toplanır ve sonra da tekne altındaki vana açılarak boşaltılır.

Jig kutusunun altında yer alan elek, ayırma yönünden önem taşımaktadır. Elek açıklığı genellikle 2 – 5 mm arasındadır. Temiz ağır tane ürünü alınması için materyal boyutundan daha küçük delikli elek, temiz hafif tane ürünü için materyal boyutundan büyük delikli elek seçilir. Jiglerde 60 – 300 d.d⁻¹ hareket hızı genellikle özgül ağırlık ve tane büyüklüğü arttıkça arttırılmalı; besleme arttığında ve tabaka kalınlaştıkça azaltılmalıdır. Yapay tabaka ayırma tabakasını kalınlaştırmak veya tekreden ürünü almak amacıyla kullanılır. Yoğunluğu materyaldeki ağır tanelere eşit veya biraz fazla olan bir malzemedan seçilir. Ağır tane içeriği az olan materyallerde kalın, tane içeriği çok olan materyallerde ise ince bir yapay tabaka oluşturulmalıdır.

Jig ile ayırma yaygın olarak mineral işleme endüstrisinde rölatif olarak işlenmemiş minerallerin toplanmasında kullanılan en eski özgül ağırlık farkına göre ayırma metotlarından birisidir. Eğer besleme tamamen düzgün boyutlu (örneğin 3 – 10 mm) ise beslenen minerallerin sınırlı özgül ağırlık aralığından dolayı iyi bir ayırma elde etmek zor değildir [112].

Bu nedenle jig ile ayırma metallerin küçük parçalarını sınıflandırmak için iyi bir çözüm sağlar. Sağlamlık, birim yüzey başına yüksek kapasite, düşük işletme maliyeti ve büyük miktardaki küçük tanelerin işlenmesi için uygunluk ıslak jig yönteminin avantajlarıdır. Otomobil atıklarının işlenmesinde 4 – 16 mm demir dışı parçalar ıslak jig vasıtaıyla ayrılabilir [113]. Hafif mamuller genellikle alüminyum, cam ve taş içerirler, ağır mamuller bakır, kurşun, pirinç ve paslanmaz çelik gibi metaller içerirler. Jig beslemesi için orta büyüklükteki yeniden değerlendirilebilir parçaların sürekli olarak eklendiği sürekli jig tanıtılmıştır. Bu çalışmada öncelikli olarak jig ve orta büyüklükteki katman prensipleri ele alınmıştır. Akabinde jig yatağındaki orta büyüklükteki katman ve metal dağılımının optimum özellikleri açıklanmıştır. Şekil 5.42’de sürekli ıslak jig düzeneği görülmektedir [113].

Geri dönüşüm endüstrisinde jiglerin en önemli uygulamalarından birisi parçalanmış bileşen atıklarının geri dönüşümünde hafif ve ağır mamullerin ayrılmasıdır. Islak jig yüksek dereceli bir ağır mamul elde edilmesini sağlar. Hollanda Heilo’daki Groot B.V.’de tesis ölçekli bir takım testler yapılmıştır [27]. Geri dönüşüm dalgasının hafif mamul içeriğini en az ağırlığın azami %0,1’ine düşürmek için bir test tasarlanmıştır. Bu çalışmada bir titreşim aygıtlı jig kullanılmıştır. Sonuçlar titreşim aygıtlı bir jig ile parçalanmış bileşen atıklarının ıslak olarak işlenmesi ile hava ayırıcılı bir sistemde elde edilmesi mümkün olmayan bir mamul kalitesinin sağlanacağı gösterilmiştir.



Şekil 5.42: Sürekli Islak Jig

Ayrıca bu işlem 1990'lardan önce hafif metal atıklarının işlenmesiyle (hidrolik jig) ve kablo atıklarından (pnömatik jig) toplanan demir dışı metallerin tasnif edilmesi için kullanılmıştır. Son olarak Schmelzer 4 – 10 mm ve 0,5 – 4 mm parçacık boyut dağılımına sahip demir dışı metal karışımlarının sürekli olmayan bir U boru jig kullanılarak ayrılmasını incelemiştir [27]. Tablo 5.7 ayırma sonuçlarını göstermektedir [27].

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının homojen olmamaları ve yüksek orandaki karmaşıklığı jig işleminin uygulanmasını kayda değer oranda zorlaştırır. Karmaşık atık parçaları özellikle tele benzer materyaller ayırma işlemine oldukça mani olur ve katmanlar halinde ayırmayı da engelleyebilir.

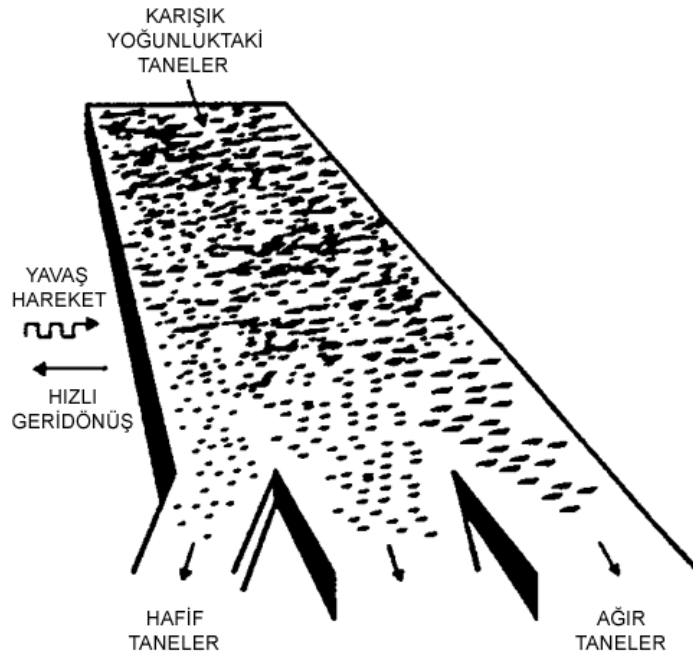
Tablo 5.7: Demir Dışı Metal Karışımlarının İşlenmesinde Kullanılan Jig İşlemindeki Hafif ve Ağır Mamul Dağılımına Göre Kütle Geri Dönüşüm ve Yoğunluk Kompozisyonu

Boyut Aralığı (mm)	Mamul	Geri Dönüşüm (%)	Mamullerin Yoğunluk Dağılımları (gr.cm ⁻³)				
			< 2,4	2,4–2,7	2,7–3,0	3,0–3,3	> 3,3
10 – 4	Hafif	75,3	48,4	51,6	-	-	-
	Ağır	24,7	-	-	0,2	0,9	98,9
4 – 0,5	Hafif	76,7	42,1	56,1	1,8	-	-
	Ağır	13,3	-	-	1,0	1,1	97,9

5.3.3 Tabaka Halinde Akan Akışkan Ortamda Ayırma

Küçük boyutlu materyal tanelerinin yataya yakın eğimdeki bir yüzey üzerinde, ince bir tabaka halinde akan, akışkan ortam içinde, özgül ağırlık farklarına göre ayrılmaları yoluyla yapılan zenginleştirmeye tabaka halinde akan akışkan ortamda ayırma denir [56]. Bu şekilde ayırma yapan cihazlar, ayırma yüzeyinin sabit veya hareketli olmasına göre ikiye ayrılırlar.

Ayırma yüzeyi hareketli olan cihazlara en iyi örnek sarsıntılı masalardır. Jiglere göre daha yeni ve modern bir teknik olan sarsıntı tablaları 2 mm'den küçük taneciklerin ayrılması için kullanılmaktadır. Dikdörtgen şeklindeki bu masaların üzeri birbirine paralel eşiklerle kaplanmıştır. Masanın eğimi boyunca yukarıdan aşağı doğru hareket eden su ile gravite kuvveti aynı doğrultudadır. Bu sebeple taneler masanın alt kenarına doğru hareket edeceklerdir. Hafif tanecikler eşikleri aşarak akıntı ile ayrılırlar. Ayrıca, masa yatay doğrultuda farklı ivme ile bir gidip – gelme hareketi yapmaktadır. Sonuç olarak birbirlerine dik olan bu iki hareket yönünün bileşkesi doğrultusunda taneler hareket ederler ve bir yelpaze gibi masa yüzeyine yayılırlar. Titreşimin doğasından dolayı tanecikler yoğunluklarına göre ayrılırlar. Hafif taneler hızlı hareket doğrultusunda bir tarafta toplanırken ağır taneler yavaş hareket doğrultusunda diğer tarafta toplanırlar. Orta yoğunluktaki taneler tablanın ortasında yoğunlaşırlar. Tanecikler tablanın alt ucunda yer alan ayırıcılar vasıtasıyla birbirlerinden ayrılarak toplanırlar [56,98,99]. Şekil 5.43'de bir sarsıntılı tabla görülmektedir.

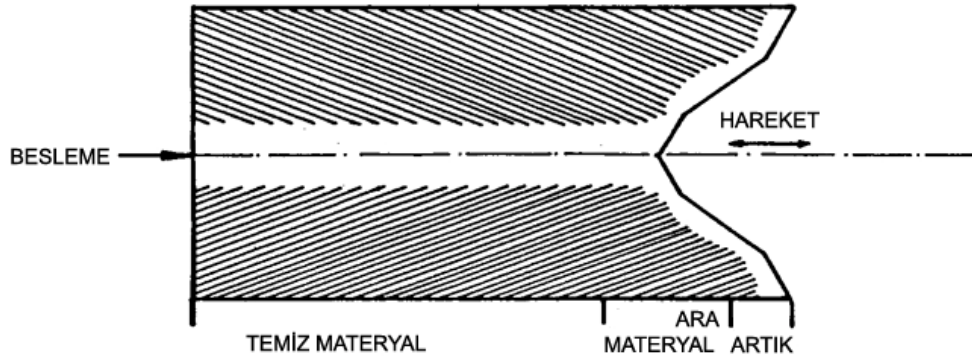


Şekil 5.43: Sarsıntılı Tabla

Sarsıntılı tablaların performansını etkileyen parametreler beslenen materyal boyutu, hızı ve genliği, su sarfiyatı ve eğimdir. İri-hafif ve ince-ağır materyal taneleri tabla yüzeyinde birlikte hareket ettikleri için tablaya beslenmeden önce boyuta göre sınıflandırma yapılması gerekmektedir.

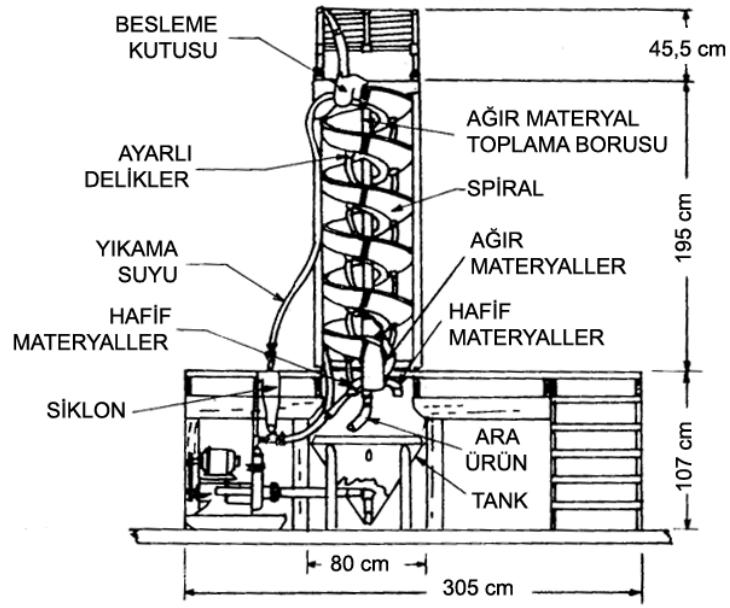
İri materyaller için sarsıntılı masa 240 – 270 d.d⁻¹ hız ve 18 – 25 mm genlikle çalıştırılır. İnce materyallerde ise, kısa genlik, yüksek hız kullanılır. Kaba ayırmada uzun genlik, düşük hız ve temizlemede ise kısa genlik, yüksek hız uygulanır. Tablaya verilen su yıkama ve besleme sularının toplamından ibarettir. Su sarfiyatı ton başına 1,2 – 1,4 ton civarındadır. İnce materyaller için 1/48 – 1/24, iri materyaller için 3/48 – 1/12 arasındaki eğimler kullanılır.

Gözenekli bir malzemeden yapılmış V şeklindeki yüzeye sahip havalı masada yüzeyin altından verilen basınçlı hava, yüzeyde akışkan tabakayı oluşturmaktadır. Masa yüzeyi, besleme ve ürün alma bölgeleri ile eşik tertibatı Şekil 5.44'de görülmektedir.

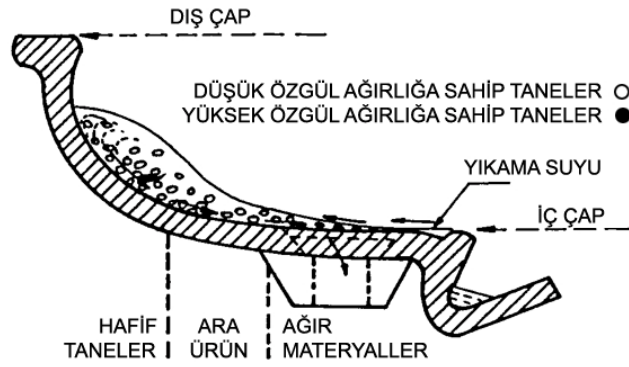


Şekil 5.44: Havalı Masa

Ayırma yüzeyi sabit olan cihazlara en iyi örnek spiral bir oluktan ibaret olan Humphrey spiralidir. Bu spirallerin en büyük avantajı enerji sarfiyatına ihtiyaç göstermeksizin ayırma yapılabilmesidir. Ancak tablalarda elde edilen konsantreler daha temizdir. Bazı tesislerde kaba konsantrasyon spirallerle yapılarak elde edilen konsantreler tablalarda temizlenmektedir. Spiral, düşey olarak, yukardan aşağıya doğru inerken 5 – 6 defa kıvrılmış olan helezon şeklinde bir oluktur. Materyal taneleri bu oluktan akarken, ağır taneler dibe çökerler ve hafif taneler ise oluğun dış kenarına doğru ayrılarak suyun akışına kapılırlar. Oluğun muhtelif yerlerindeki deliklere bağlı borularla ağır taneler alınır ve hafif materyaller oluğun sonundan dışarı akar. Boyut aralığı – 3 mm + 50 µm'dir. Ortalama 60 cm çapındaki bir spiral saatte 1,5 ton materyal ayırabilir. Spiral oluğun kapasitesi 1 – 4 ton arasında değişmektedir. Şekil 5.45'de standart Humphrey spirali ve Şekil 5.46'de spiral kesiti görülmektedir [57,99,107].



Şekil 5.45: Standart Humphrey Spirali



Şekil 5.46: Humphrey Spiral Kesiti

5.4 Manyetik Ayırma

Farklı manyetik duyarlılıktaki bireysel materyal tanelerinin, uygun bir manyetik alan içinde, başlıca manyetik kuvvet olmak üzere, çeşitli kuvvetlerin (yerçekimi, sürtünme v.s.) bileşik etkileri nedeniyle birbirinden ayrılması yoluyla gerçekleştirilen ayırma işlemine manyetik ayırma adı verilir [56]. Manyetik ayırıcılar, boyca ve ağırlıkça oldukça iri parçaları ayırmada kullanılabildiği gibi, çok ince parçaların ayrılmasında da kullanılırlar. Ayrılması istenen materyalin manyetik özelliğine bağlı olarak uygulanan alan şiddetine göre düşük veya yüksek alan şiddetli olarak sınıflandırılan manyetik ayırıcılar, ayırma tane boyuna göre yaş veya kuru olarak çalışırlar [107]. Manyetik ayırma ile ilgili detaylı bir çalışma Oberteuffer [114] tarafından sunulmuştur.

Manyetik ayırma açısından materyalleri manyetik ayırıcılarla ayrılabilen paramanyetik ve ayrılamayan diamanyetik materyaller olarak ikiye ayırmak mümkündür. Çok kuvvetli manyetik özellik gösteren paramanyetik mineraller ferromanyetik olarak adlandırılırlar. Ferromanyetik materyal olarak demir, nikel ve kobalt, paramanyetik materyal olarak platin, hava, uranyum, manganez, alüminyum, sodyum ve oksijen, diamanyetik materyal olarak da bizmut, kalay, sofr tuzu, altın, kurşun, gümüş, su, germanyum, elmas, çinko, bakır, silikon, karbon, cam, seramikler, plastikler ve cıva örnek verilebilir.

Manyetik duyarlılığı olan her hangi bir madde parçası bir manyetik alan içinde bulunuyorsa bu alandaki kuvvet hatları boyunca çekilir. Böylece manyetik alandaki kuvvet hatlarının tesiri altında kalan cisim de bir mıknatıs haline gelir ve bu cisminde bir kuzey ve bir de güney kutbu meydana gelir. Bu cismin manyetik alanı meydana getiren kutuplardan birine doğru çekilmesi de iki mıknatısın, birbiri üzerinde yaptığı tesirden ibarettir. İki mıknatıs arasında zıt kutuplar birbirini çeker, aynı kutuplar birbirini iter. Manyetik bir alan içerisinde bulunan katı maddelere manyetik alan tarafından uygulanan kuvvet Coulomb bağıntısı ile hesaplanmaktadır:

$$F_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (5.15)$$

F_m : manyetik kuvvet, iki kutup arasında oluşan kuvvet

m_1 : kutup şiddeti

m_2 : kutup şiddeti

d : iki kutup arasındaki mesafe

μ : kutupların bulunduğu ortamın cinsine göre değişen bir katsayı olup ortamın manyetik geçirgenliğini tanımlar

Bir doğal mıknatıs veya elektromıknatısın manyetik alanına konulan manyetik malzeme etki ile mıknatıslanır. Etki ile mıknatıslanma, uygulanan manyetik alanın şiddeti ile alana konulan malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Etki ile mıknatıslanma sonucu oluşan yeni manyetik alana indüksiyon alanı (B) denilmektedir. Bu alan, uygulanan alan (H) ile malzemenin mıknatıslanmasından doğan alanın (M) toplamına eşittir. Bir cisim manyetik bir alan içerisine konulduğu zaman, cismin manyetik indüklenmesi denklem 5.16 ile hesaplanır.

$$B = H + M \quad (5.16)$$

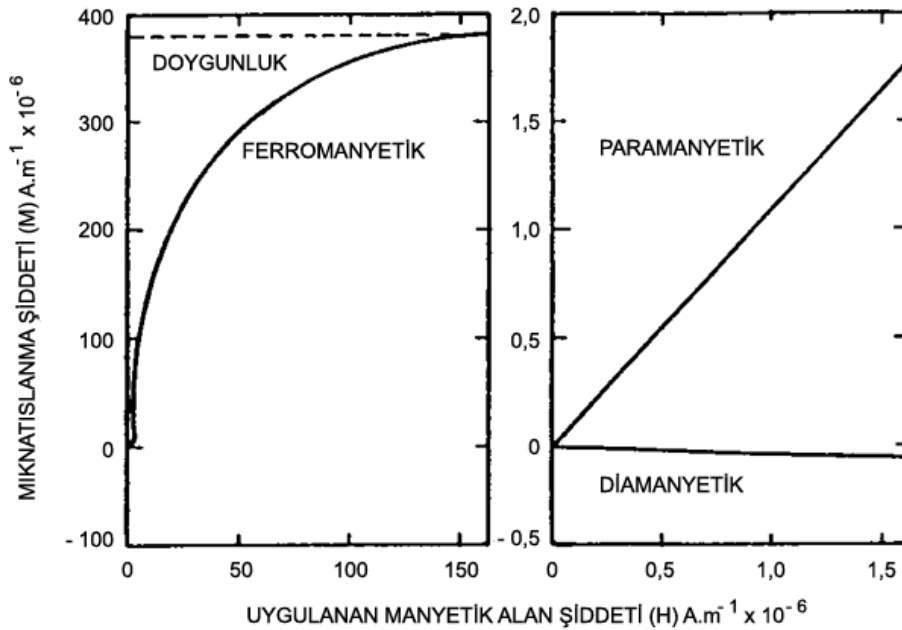
B : manyetik alan

H : dışardan uygulanan manyetik alan şiddeti

M : cismin iç mıknatıslanma şiddeti

B, H ve M aynı birimle ifade edilmesi gerekir. Manyetik alan şiddeti genellikle Tesla (T) olarak belirtilir. Gauss (10^{-4} T) diğer yaygın olarak kullanılan manyetik alan şiddeti birimidir. Laboratuarlarda elde edilebilen en büyük manyetik alan değeri 2,5 Tesla'dır. Bununla birlikte 25 Tesla büyüklüğüne ulaşan manyetik alan üretebilen süper iletken mıknatıslar yapılmıştır. Yerkürenin yüzeyine yakın bölgelerdeki manyetik alan değeri yaklaşık olarak 0,50 Gauss veya $0,5 \cdot 10^{-4}$ Tesla'dır.

Mıknatıslanma şiddeti M ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki tipik diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik materyaller için Şekil 5.47'de verilmiştir [107]. Diamanyetik ve paramanyetik materyaller için H ve M arasında doğrusal bir ilişki vardır. Ancak ferromanyetik materyaller için bu ilişki oldukça farklıdır. Ferromanyetik materyallerde mıknatıslanma şiddeti M çok düşük manyetik alan şiddetinde doyum noktasına ulaşır. Daha yüksek manyetik alan şiddeti değerlerinde ise mıknatıslanma şiddetinde önem arz eden bir değişim olmaz.



Şekil 5.47: Ferromanyetik, Paramanyetik ve Diamanyetik Materyallerin Mıknatıslanma Eğrileri

Şekil 5.47'de verilen eğrilerin eğimi, manyetik duyarlılık (K) olarak tanımlanır. Manyetik duyarlılık etki ile sağlanan mıknatıslığın, kendisini oluşturan manyetik alan şiddetine oranı olarak tarif edilir. Manyetik duyarlılığın matematiksel ifadesi denklem 5.17'de verilmiştir.

$$K = \frac{M}{H} \quad (5.17)$$

K : manyetik duyarlılık

M : cismin iç mıknatıslanma şiddeti

H : dışardan uygulanan manyetik alan şiddeti

Manyetik duyarlılık, paramanyetik ve diamanyetik cisimler için küçük değerler taşırlar. Paramanyetik cisimler için bu değer pozitif, diamanyetik cisimler için negatiftir. Ferromanyetik cisimlerin manyetik duyarlılığı ise uygulanan manyetik alan şiddetine göre değişen bir değer taşır. Manyetik geçirgenlik (μ) indüksiyon alanının manyetik alanı oranı olarak tarif edilir. Manyetik geçirgenliğin matematiksel ifadesi denklem 5.18'de verilmiştir.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (5.18)$$

μ : manyetik geçirgenlik

B : manyetik alan

H : dışardan uygulanan manyetik alan şiddeti

Bir manyetik alan tarafından bir cisim üzerinde oluşturulan manyetik kuvvetin x-ekseni için vektörel eşitliği denklem 5.19 ile ifade edilebilir.

$$F_{m,x} = V(K_s - K_m)(H_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial B_y}{\partial y} + H_z \frac{\partial B_z}{\partial z}) \quad (5.19)$$

V : hacim

K_s : cismin manyetik duyarlılığı

K_m : cismin içinde bulunduğu ortamın manyetik duyarlılığı

Eşitlikten de görüleceği gibi, bir cismin üzerine gelen manyetik kuvvetler hem uygulanan alan şiddetine hem de oluşan manyetik alanın değişim oranına (alan gradyanı, $\partial B/\partial x$) bağlıdır. Yani, güçlü bir manyetik çekim kuvveti oluşturmak isteniyorsa, uygulanan manyetik alan şiddeti ve manyetik alan şiddetinin değişim oranı yüksek olmalıdır. Zayıf manyetik özellik gösteren materyallerin ayrılması için geliştirilen yüksek alan şiddeti manyetik ayırıcılar bu ilkeler göz önüne alınarak tasarlanmış aygıtlardır.

Manyetik ayırıcılarda etkili olan manyetik alan ve manyetik alan değişim oranı farklı yollardan ve farklı geometrilerde üretilebilirler. Bazı durumlarda manyetik alan sabit mıknatıslarla doğrudan üretilirken bazen de elektromıknatısların etkilendiği ferromanyetik cisimler çevresinde oluşan manyetik alanlardan yararlanır. Farklı durumlarda üretilen manyetik alanın mineral parçaları üzerine uygulayacağı manyetik kuvvetler de farklıdır.

Tamburlu manyetik ayırıcılarda tambur yüzeyinde materyal taneleri üzerinde etkili olan manyetik kuvvet denklem 5.20 ile hesaplanır.

$$F_m = \frac{3\pi v V B_d^2}{\mu Q_d R} \quad (5.20)$$

F_m : manyetik kuvvet (N)

v : materyal içindeki ferromanyetik parçaların oranı

V : hacim (m^3)

B_d : tambur yüzeyindeki manyetik alan şiddeti (T)

μ : manyetik geçirgenlik ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$)

Q_d : mıknatıs kutupları arasındaki açı (radyan)

R : tambur yarı çapı (m)

Yüksek alan şiddeti manyetik ayırıcılarda olduğu gibi, eğer ferromanyetik ortam kullanılıyorsa oluşan manyetik kuvvetlerin ifadesi de değişir. Ferromanyetik ortam bir küre ise manyetik kuvvet denklem 5.21 ile hesaplanır.

$$F_m = \frac{8\pi^2}{3} d_m^3 (K_s - K_m) \frac{M}{d_o} \left(H + \frac{8\pi}{3} M \right) \quad (5.21)$$

F_m : manyetik kuvvet (N)

d_m : materyal tanesinin (küre) çapı (m)

d_o : ferromanyetik ortamın çapı (m)

K_s : materyal parçasının manyetik duyarlılığı

K_m : materyal parçasının içinde bulunduğu ortamın manyetik duyarlılığı

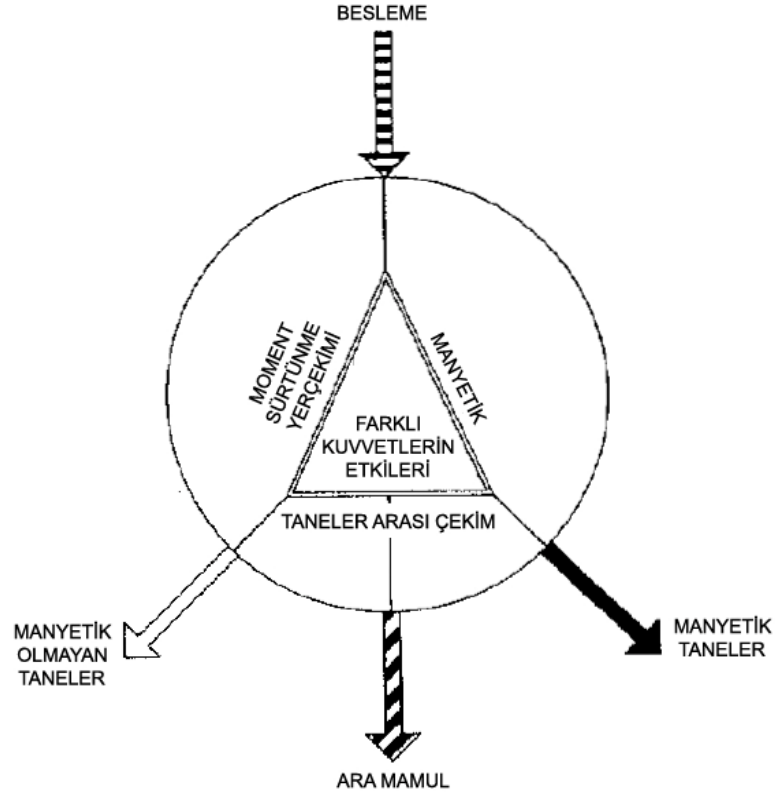
Ferromanyetik ortam dairesel kesitli bir tel ise, oluşan manyetik kuvvet, telin çapı materyal parçacığının çapının üç katı olduğu zaman maksimum bir değere erişir. Bu durumda manyetik kuvvet materyal parçasının çapının (d_m) karesi ile doğru orantılı olarak değişir ve denklem 5.22 ile hesaplanır.

$$F_m = 0,46(K_s - K_m)H^2 d_m^2 \quad (5.22)$$

Manyetik ayırıcılarda manyetik alanın oluşturduğu çekim kuvvetinin dışında, ona karşı koyan kuvvetler de mevcuttur. Bunlardan yerçekimi, hidrodinamik sürüklenme ve merkezkaç kuvvetlerinin manyetik ayırmada önemli bir yeri vardır.

Materyallerin manyetik özelliklerine göre yapılan ayırmada, materyal taneleri manyetik alandan kuru veya sulu bir akıntı halinde geçtiklerinden, manyetik alanın bireysel bir taneye etkisi çok kısa bir zaman aralığında genellikle bir saniyeden az bir sürede gerçekleşir. Bu durumda manyetik alan içinde hareket etmekte olan bir materyal tanesi manyetik çekim kuvvetinden başka, moment, yerçekimi, sürtünme, hidrolik ve taneler arası itici veya çekici kuvvetlerin etkisi altındadır. Materyal tanelerinin birbirinden ayrılması bütün kuvvetlerin bileşke etkisiyle gerçekleşir. Manyetik çekim, moment, yerçekimi, sürtünme ve hidrolik kuvvetler tanelerin ayrılmasını artırıcı, taneler arası kuvvetler ise azaltıcı etki gösterirler.

Kullanılan manyetik ayırıcının cinsine ve manyetik ayırmanın şekline bağlı çeşitli kuvvetlerin etkinlikleri farklılık gösterir. Örneğin hidrolik kuvvetler yalnızca yaş manyetik ayırmada söz konusudur. Şekil 5.48’de Tanelerin manyetik olarak ayrılmasında etkili olan kuvvetler bir arada gösterilmiştir [107,114].



Şekil 5.48: Tanelerin Manyetik Olarak Ayrılmasında Etkili Olan Kuvvetler

Manyetik ayırıcılarda yapılan ayırmada, manyetik çekim kuvveti ile birlikte, yerçekimi, hidrolik, sürtünme ve moment kuvvetleri de materyal taneleri üzerinde etkili olmaktadır. Yüksek alan şiddetli manyetik ayırmada, yerçekimi ve hidrolik kuvvetlerin, düşük alan şiddetli ayırmada ise moment ve sürtünme kuvvetlerinin etkisi görülmektedir. Küresel bir tane için sırasıyla yer çekimi ve laminar akış için hidrodinamik sürüklenme kuvveti Stoke kanununa göre sırasıyla denklem 5.23 ve 5.24’de verilmiştir.

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_m^3 (\delta_m - \delta) g \quad (5.23)$$

F_g : yerçekimi kuvveti (N)

d_m : materyal tanesinin çapı (m)

δ_m : materyalin özgül ağırlığı (kg.m^{-3})

δ : ortamın özgül ağırlığı (kg.m^{-3})

g : yerçekimi ivmesi (m.s^{-2})

$$F_d = 3\pi\eta V d_m \quad (5.24)$$

F_d : hidrodinamik direnç (sürüklenme) kuvveti (N)

η : akışkan ortamının viskozitesi ($\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$)

V : materyal tanesinin sıvı ortama göre (çökelme) hızı (m.s^{-1})

d_m : materyal tanesinin çapı (m)

Yerçekimi kuvveti tane çapının küpü ile orantılı olduğu için, özellikle iri taneler üzerinde etkilidir. Buna karşılık hidrodinamik sürüklenme (direnç) kuvvetleri parça çapıyla orantılıdır ve küçük taneler için daha etkilidir. Bu durumda, iri tanelerin ayırımının yapıldığı kuru manyetik ayırıcılarda manyetik kuvvetler yerçekimi kuvvetini yenmelidir. Daha çok küçük tanelerin ayırımının yapıldığı yaş manyetik ayırıcılarda ise manyetik kuvvetlerin karşı koyması gereken kuvvet hidrodinamik sürüklenme kuvvetidir.

Kuru olarak çalışan tamburlu ayırıcılarda materyal taneleri üzerine yerçekimi kuvvetinin dışında açısal hızına bağlı olan merkezkaç kuvveti de etkili olmaktadır.

$$F_c = \delta_m V_m \omega^2 R \quad (5.25)$$

F_c : merkezkaç kuvveti (N)

δ_m : materyalin özgül ağırlığı (kg.m^{-3})

V_m : materyal tanesinin hacmi (m^3)

ω : açısal hız (radyan.s^{-1})

R : tambur yarı çapı (m)

Tamburlu ayırıcılarda manyetik kuvvetin merkezkaç kuvvetini yenmesi için açısal hızın kritik bir değerin altında olması gerekir.

$$\omega_k = 126 \frac{H}{D} \sqrt{\frac{V}{\delta_m \phi_d}} \quad (5.26)$$

ω_k : kritik hız (radyan.s^{-1})

H : manyetik alan şiddeti (gauss)

D : tambur çapı (cm)

δ_m : materyalin özgül ağırlığı (kg.m^{-3})

ϕ_d : mıknatıs kutupları arasındaki açı (derece)

Kritik dönme hızı tambur çapı, materyal tanelerinin yoğunluğu ve mıknatıs kutupları arasındaki açı arttıkça azalmakta, tambur yüzeyindeki manyetik alan şiddeti ve materyal tanesinin manyetik içeriği fazlaştıkça artmaktadır.

Manyetik ayırmada en büyük ayırıcı etki manyetik alan şiddeti ile orantılı olan manyetik kuvvetlerden ileri gelmektedir. İndüksiyon alan şiddeti 10.000 Gauss'a kadar düşük alan şiddetli, 10.000 Gauss üstünde ise yüksek alan şiddetli manyetik ayırma koşulları ortaya çıkmaktadır. Tablo 5.8'da bazı materyallerin demir esas alınarak hesaplanan çekim kuvvetleri ve ayrılmaları için gereken indüksiyon alan şiddetleri görülmektedir. Tablodaki materyaller çekim kuvvetlerine göre 10 – 100 ferromanyetik veya kuvvetli manyetik, 5 – 10 orta derecede manyetik, 1 – 5 zayıf manyetik, 0 – 1 çok zayıf manyetik olarak sınıflandırılmışlardır. Çekilebilirlik değerleri – 0 olan materyaller diamanyetik olarak sınıflandırılırlar.

Tablo 5.8: Materyallerin Demire Göre Çekim Kuvvetleri

Sınıfı	İndüksiyon Alan Şiddeti (Gauss)	Materyal	Çekim Kuvveti
Kuvvetli Manyetik	500	Demir	100,00
	5000	Pirotin	15,42
Orta Derece Manyetik	5000	Biotit	8,90
	10.000	Wolframit	5,68
Zayıf Manyetik	10.000	Hematit	4,64
	18.000	Manganit	1,36
Çok Zayıf Manyetik	18.000	Rutil	0,93
	23.000	Şelit	0,15

Manyetik ayırmada etkili olan kuvvetlerin farklı özelliklerdeki materyal taneleri üzerindeki etkilerini incelersek; diamanyetik (çok zayıf manyetik) olan kuvarsı göz önüne aldığımızda, çok yüksek alan şiddeti (20.000 Gauss) uygulansa bile manyetik çekim kuvveti yerçekimi kuvvetinin yanında çok küçük kalmaktadır. Paramanyetik (zayıf manyetik) olan hematitde 10.000 Gauss'a kadar olan şiddetlerinde manyetik çekim kuvveti yerçekimi kuvvetinden çok küçük olmakta ve hematit ayrılmamaktadır. 18.000 Gauss civarındaki alan şiddetlerinde bu kez manyetik çekim yerçekiminden daha büyük olmaktadır. Ferromanyetik (kuvvetli manyetik) olan manyetit de ise düşük alan şiddetlerinde bile manyetik çekim kuvveti yerçekiminden büyük olabilmektedir.

Manyetik ayırmada materyal tanelerine tesir eden ve böylece bu tanelerin ayrılmasını sağlayan kuvvetleri ifade eden formüller bu kadar basit olmamakla beraber, yine bu formül esas alınarak ve bütün unsurlar hesaba katılarak çıkarılan formüllerdir. Genel olarak şu olaylar her zaman geçerlidir:

- Manyetik bir alan içindeki cisme tesir eden kuvvet, bu alanı meydana getiren mıknatısın kutup kuvvetiyle artar
- Manyetik bir alan içindeki cisme tesir eden kuvvet, bu cismin bir mıknatıs haline gelmesiyle meydana gelen kutup kuvvetiyle artar ki bu kutup kuvveti de cismin geçirgenlik ve manyetik alanın şiddetiyle artar.
- Manyetik bir alan içindeki cisme tesir eden kuvvet, cismin manyetik alanı meydana getiren kutba olan mesafesi azaldıkça artar.

İşte materyallerin manyetik ayırma işlemi bu esaslara dayanılarak yapılır. Bu işlemlerin yapıldığı makineler manyetik ayırıcı adı verilir. Bu makinelerde materyal tanelerine tesir eden çekici kuvvet istenildiği gibi ayarlanabilir. Bu ve bunun gibi daha başka ayarlamalar sayesinde manyetik duyarlılık farklı olan materyaller muhtelif saflıklar halinde ayrılabilir [97]. Demirin bu konuda önemli bir yeri olmasına rağmen diğer birkaç materyalin de kayda değer derecede paramanyetik oldukları unutulmamalıdır. Bunlar, nikel, kobalt, manganez, krom, seryum, titanyum, oksijen ve platindir. Bu materyallerin alaşımlarının birçoğu da önemli derecede paramanyetiktir.

Bir manyetik alan içinde bulunan bir materyal tanesi manyetik kuvvet hatlarını kendinde toplar. Bu kuvvet hatları tanenin diğer ucundan çıkararak diğer bir tane üzerinde toplanır. Böylece, birinci tane mıknatıs vazifesini görür ve ikinci taneyi kendine çeker. Bu şekilde birçok taneler birbirlerini çekerek salkım halinde bir araya toplanır. Bu olaya manyetik salkımlaşma denir. Özellikle taneler küçük, duyarlılık yüksek ve manyetik alan şiddetli olduğu zaman bu durumla karşılaşılır. Şu halde manyetik materyallerin manyetik olmayan materyallerden ayrılmasında ya serbest taneler birbirinden ya da manyetik tanelerden meydana gelen salkımlar manyetik olmayan serbest tanelerden ayrılır. Manyetik salkımlaşma uygulamada önemli sakıncalara neden olabilir. Ayrıca materyallerin özelliklerine bağlı olarak elektrostatik kuvvetler de taneler arası çekme ve itmelere neden olduklarından ayırma duyarlılığını azaltıcı yönde etkili olurlar.

Bir manyetik ayırma makinesinin devamlı olarak iş görebilmesi için, ayrılma işleminin, akıntı halindeki tanelerin manyetik alandan geçtiği esnada yapılması gerekir. Böylece, herhangi bir parça üzerinde manyetik alanın tesiri kısa bir zaman sürer, bu müddet genellikle bir saniyeden daha azdır. Bu müddet zarfında da manyetik alanın şiddeti değişir. Bu durumda manyetik alan içinde hareket etmekte olan bir tane yalnız manyetik çekme kuvvetinin değil aynı zamanda sahayı kat ederkenki momentumunun da tesiri altındadır. Bu momentum tanenin yoğunluğuna, hızına ve hacmine göre değişir. Çekme kuvveti de hacim ile orantılı olduğu için, manyetik ayırmaya tesir eden unsurlar; manyetik duyarlılık, hız ve yoğunluktur. Örneğin, tanelerin akıntı hızını azaltarak, manyetik duyarlılığı daha düşük olan taneleri de ayırmak mümkün olur [97].

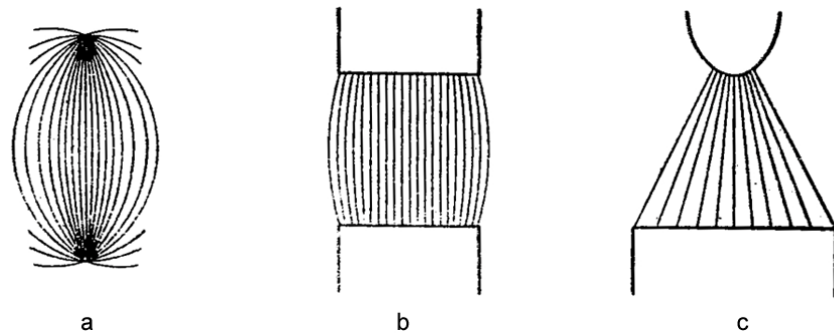
Katıların manyetik özellikleri dış yörüngelerindeki elektronlarının dönüş hareketleri ile atom ve elektronlardaki devamlı manyetik momentlerden kaynaklanmaktadır. Katılarda yapay ve doğal olmak üzere iki tür mıknatıslık bulunur. Yapay mıknatıslık manyetik bir alanın etkisiyle geçici olarak kazanılır. Diamanyetiklik (zayıf mıknatıslık, negatif değerli) ve paramanyetiklik (kuvvetli manyetiklik, pozitif değerli) bu yapay mıknatıslığa ait örneklerdir. Doğal mıknatıslık ise kendiliğinden oluşur ve kalıcıdır. Ferromanyetiklik (çok kuvvetli mıknatıslık, pozitif değerli) doğal mıknatıslığa ait örnektir.

Farklı manyetik duyarlılıkta olan materyallerin endüstriyel düzeyde birbirinden ayrılmasını sağlamak üzere geliştirilen makinelere manyetik ayırıcı adı verilir [56]. Kullanılış yeri ve amacına göre çok farklı şekillerde imal edilen manyetik ayırıcılarda aşağıda sıralanan ortak özellikler aranmaktadır.

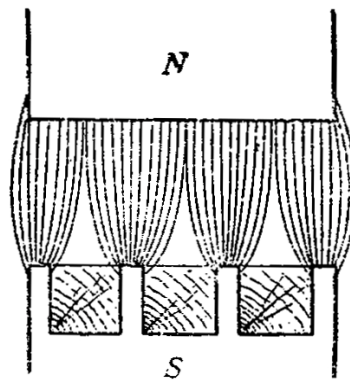
- Bir nokta veya yüzeyde toplanabilen uygun şiddette bir manyetik alanın meydana getirilebilmesi
- Manyetik alan şiddetinin kolayca ayarlanabilmesi
- Materyal tanelerinin düzgün bir akışla beslenebilmesi
- Materyalin manyetik alandan geçiş hızının kolayca ayarlanabilmesi
- Manyetik olmayan tanelerin manyetik salkımlar arasında kalmasının önlenmesi
- Ayrılan materyallerin birbirlerinden ayrı olarak alınabilmesi

- Ara mamul alınabilmesi
- Makinenin mekanik kısımlarının aşınmaya karşı dayanıklı olması

Bilindiği gibi, kutupları iki noktadan ibaret olan bir mıknatısın (Şekil 5.49a) manyetik alanı bu noktalara doğru toplanır ve burada en yoğundur ve iki kutup arasındaki mesafenin ortasında tekdüzedir. Manyetik ayırma makinelerinde bu tip mıknatıs kullanılacak olursa, en uygun kısım yalnız her iki kutup noktasının civarındır. Kutupları iki düz satıhtan ibaret olan bir mıknatıs (Şekil 5.49b) tekdüze bir alan ve manyetik ayırma makineleri için uygun değildir. Kutuplarının biri düz, diğeri sivri uçlu olan bir mıknatıs (Şekil 5.49c) bir noktaya doğru toplanan bir manyetik alan verdiği için uygundur. Kutuplardan biri dilimli, diğeri düz satıhlı olursa (Şekil 5.50) dilimli kutbun civarındaki manyetik alan bir noktaya doğru toplanır. Bu tip mıknatıslar manyetik ayırma makinelerinde çok kullanılır.



Şekil 5.49: Üç Farklı Manyetik Alan



Şekil 5.50: Düz Bir Kutupla Dilimli Bir Kutup Arasındaki Alan

Manyetik alanın şiddetinin ayarlanabilmesi için elektromıknatıs kullanılması gereklidir. Bunun dışında kutuplar arasındaki mesafeyi değiştirmek suretiyle de manyetik sahanın şiddeti ayarlanabilir.

Kuru ayırıcılarda materyalin düzgün olarak makineyi beslenmesi için, materyalin tamamen kuru olması ve ayırıcıya bağlı bir besleme mekanizmasının bulunması gereklidir.

Materyal tanelerinin manyetik alandan geçiş hızı kontrol edilebilmelidir. Bu sebepten dolayı ayırıcılarda materyali serbest düşüş halinde manyetik alandan geçirmek amaca uygun olmaz. Materyal ya konveyör bantlar üzerinde yahut silindirler üzerinde manyetik alandan geçirilir.

Kuru ayırıcılarda ince öğütülmüş materyallerde manyetik olmayan tanelerin manyetik salkımların içine takılıp kalması büyük bir engel oluşturur. Bunun önüne geçmek için materyal bir veya iki tane kalınlığında bir tabaka halinde beslemek gerekir. Ancak ince öğütülmüş materyal ile bunun yapılması imkânsızdır. Bununla birlikte materyalin manyetik özelliklerine göre daha başka tedbirler alınarak bu mahzur nispeten bertaraf edilir. İri taneli ve iyi elenmiş materyallerde bu engel yoktur, zira materyal tabakası bir iki tane kalınlığındadır. İri taneler manyetik salkımlardaki açıklıkları tesirli bir şekilde tıkayamaz ve oluşacak edecek salkımlarda ağır olur.

Yaş manyetik ayırıcılarda materyal tanelerinin hareketine karşı olan suyun mukavemeti dolayısıyla manyetik taneler kutuplara doğru hücum etmez ve neticede manyetik olmayan tanelerin salkımlara takılıp kalması mahzuru yoktur.

Materyalin manyetik olmayan kısmının ayrı bir yere sevki basit bir işlemdir. Ya serbest düşüşle bir konveyör bandına verilir veya makinenin besleme konveyörü ile sevk edilir. Materyalin manyetik kısmı ise mıknatısın tesirinden koparılmak zorundadır. Bundan dolayı manyetik ayırıcılar manyetik tanelerin mıknatısın kendisine değil bir makaraya veya banda yapışacak şekilde tasarlanırlar. Bu bant veya makara da kendi hareketi ile manyetik taneleri mıknatısın tesirinden uzaklaştırır ve bırakır. Konsantre ayrıldıktan sonra, materyalin geri kalan kısmı daha şiddetli bir manyetik sahadan geçirilir ve ara ürünler elde edilir. Az masrafla maksada uygun bir manyetik alan meydana getirmek için aşağıda sıralanan noktalara dikkat edilmelidir;

- Hava boşlukları en aza indirgenmelidir.
- Manyetik devredeki madeni kısımları, duyarlılıkları yüksek olan demir veya halitalardan yapmalı ve bu kısımların kesitleri büyük ve boyları kısa olmalıdır.

- Gereken amper devir sayısını sağlamak için sargıdaki devir sayısını mümkün olduğu kadar fazla ve elektrik akımını da mümkün olduğu kadar düşük yapmalıdır. Telin mukavemeti ve ısınması bakımından bunun da bir sınır değeri vardır.

Manyetik ayırıcılar; içinde ayırma yapılan ortamın cinsine, materyalin besleniş şekline, ayırıcıdan çıkan muhtelif mamullerin sevk edilme tarzına ve mıknatısların sabit veya hareketli oluşuna göre çeşitli sınıflara ayrılır.

Manyetik ayırıcılar, çalışma (ayırma) ortamının cinsine göre iki ana gruba ayrılırlar:

- Kuru manyetik ayırıcılar
- Yaş manyetik ayırıcılar

Kuru manyetik ayırıcılarda materyalin besleniş tarzı, yer çekimiyle, meyilli yatay üzerinde kayarak, dönen bir silindir üzerinde, yatay bir konveyör bant üzerinde veya bir sallantılı oluk üzerinde sevk edilmek suretiyle olabilir. Yaş manyetik ayırıcılarda materyal muhtelif yönlerde oluk veya başka vasıtalarla akıtılarak makineye verilir.

Manyetik ayırıcılar kullanılış amacına göre de üçe ayrılırlar:

- Zenginleştirici manyetik ayırıcılar
- Koruyucu manyetik ayırıcılar
- Ağır ortamın tekrar kazanılmasında kullanılan manyetik ayırıcılar.

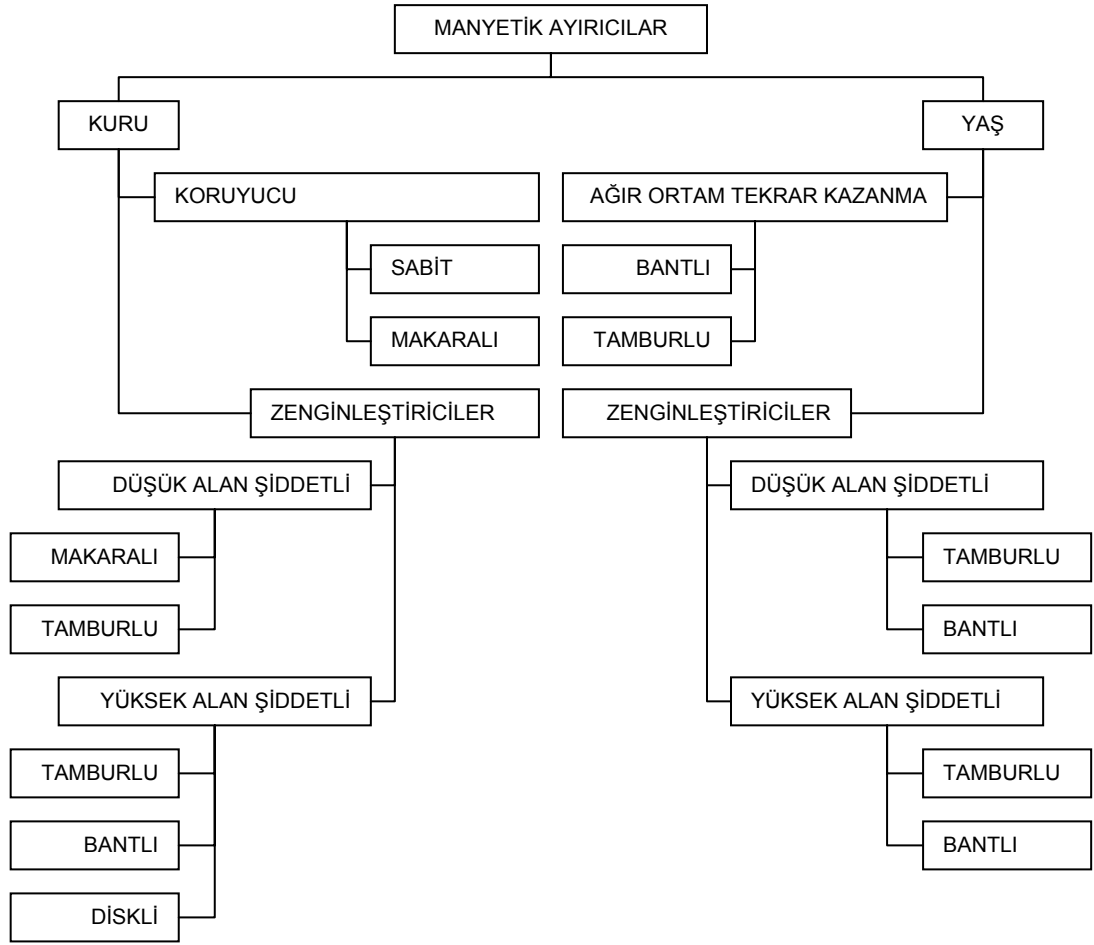
Manyetik ayırıcılar manyetik alanın şiddetine göre de ikiye ayrılırlar:

- Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılar
- Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar

Manyetik ayırıcılar yapısal özelliklerine göre de dörde ayrılırlar:

- Makaralı manyetik ayırıcılar
- Tamburlu manyetik ayırıcılar
- Bantlı manyetik ayırıcılar
- Diskli manyetik ayırıcılar

Bu sınıflandırma genel bir şema olarak Şekil 5.51’de verilmiştir.



Şekil 5.51: Manyetik Ayırıcıların Sınıflandırılması

Manyetik ayırıcılar özellikle düşük şiddetli silindirik ayırıcılar demir dışı metallerden ve diğer manyetik olmayan atıklardan demir manyetik metallerin geri kazanımı için yaygın olarak kullanılır. Geçen on yılı aşkın sürede, özellikle çok yüksek alan kuvvetleri ve değişimlerine sahip sürekli mıknatıslık sağlayabilen az bulunan yerküre alaşımlarının keşfedilmesinin sonucu olarak yüksek şiddetli manyetik ayırıcıların tasarımında ve kullanılmasında birçok gelişme elde edilmiştir.

Koruyucu tip bantlı manyetik ayırıcılarda konveyör bandın döküş ucundaki makaraya yerleştirilen mıknatıslar materyal akımı içindeki manyetik malzemeleri uzaklaştırırlar, makara içerisine yerleştirilen mıknatıslar sabit veya elektromıknatıs olabilir. Sabit mıknatıslar, az bir malzeme ($10 - 700 \text{ m}^3$) içerisinde küçük manyetik cisimleri ayırmak için küçük çaplı ($20 - 60 \text{ cm}$) makaralarla kullanılırlar. Elektromıknatısların kullanıldığı tamburların çapları daha büyüktür ($75 - 110 \text{ cm}$) ve oldukça fazla, ($400 \text{ m}^3 - 1000 \text{ m}^3$) malzeme içerisinde irice parçaları ayırabilirler.

Koruyucu tip tamburlu ayırıcılar sabit veya elektromıknatıslı olabilirler. Ayrılacak manyetik malzemenin iriliği 10 cm'yi ve miktarı da $250 \text{ m}^3 \cdot \text{saat}^{-1}$ 'i aştığı durumlarda elektromıknatıs kullanılmalıdır.

Düşük alan şiddetli, tamburlu ayırıcılar, ferromanyetik materyallerin ayrılmasında en çok kullanılan makinelerdir. Tambur içindeki mıknatısları sabit veya döner olarak imal edilebilirler. Düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırıcıları, tamburları standart hızlı ve yüksek hızlı tamburlar olarak ikiye ayırmak mümkündür. Standart tamburlardaki hız $20 - 45 \text{ d.d}^{-1}$ olurken yüksek hızlı tamburlarda bu hız 200 d.d^{-1} 'ya kadar çıkabilmektedir.

Ayırıcılarda sayıları 44'e varan sabit mıknatıslar tambur içerisine kutuplan K–G–K–G olarak yerleştirilmişlerdir. Kutupların bu tür dizilişi ayrılması istenen materyalin ayrılma sırasında karışmasına ve daha temiz bir konsantre elde edilmesine yarar.

Daha çok kaba ayırmada kullanılan standart hızlı manyetik tamburlar, ferromanyetik materyallerin ön ayrılmasında kullanılırlar. Çok değişik ölçü ve geometrilere üretilmektedir. Mümkün olduğu kadar fazla miktarda manyetik malzeme toplamak için tambur yüzeyinin genişçe bir bölümüne mıknatıs yerleştirilmiştir. Mıknatıslar sabit veya elektromıknatıs türünden olabilirler.

Düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılar 10 mm veya daha ince malzemenin zenginleştirilmesinde kullanılır. Bu ayırıcılarda sabit veya elektromıknatıslar kullanılabilir. Günümüze kadar değişik türlerde imal edilen bu ayırıcıların en önemlisi tamburlardır. Standart manyetik alan şiddetine sahiptir. Yaş olarak çalışan manyetik tamburlar genellikle birkaç standart çapta ve mıknatıs dizilişi ile üretilir. Bir ayırma biriminde ardışık olarak konmuş birden fazla tambur bulunabilir. Bu durumda, ilk tambur kaba ayırma yaparken, ikinci tambur temizleme görevini yerine getirir.

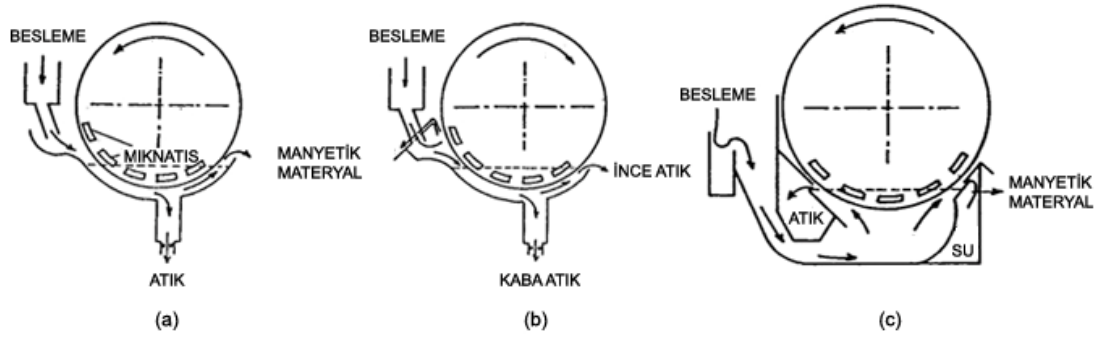
Yaş manyetik tamburlu ayırıcılar, karışım (materyal ve akışkan) tankının tasarımı ve tamburun dönüş yönüne göre üç sınıfa ayrılırlar:

- Eş akışlı (concurrent)
- Ters akışlı (countercurrent)
- Yarı ters akışlı (semi-countercurrent)

Eş akışlı tamburlarda karışımın tank içerisindeki akış yönü ile tamburun dönüş yönü aynıdır. Manyetik olmayan malzeme tankın dibine çöker ve oradan tahliye edilir. Manyetik malzeme, tambur içerisine yerleştirilmiş mıknatısların etkisiyle tambur yüzeyine yapışarak karışımdan ayrılır ve daha sonra sıyırıcılar yardımıyla tambur yüzeyinden temizlenirler.

Ters akışlı tamburlarda ise karışım akış yönü ile tamburun dönüş yönü birbirine terstir. Burada da manyetik özellik göstermeyen malzeme tankın altından alınır. Manyetik malzeme ayırıcının besleme ayırıcının besleme yapılan tarafındaki oluklara boşaltılır.

Yarı ters akışlı tamburlarda ise karışım tankın altından ortadan beslenir. Manyetik olmayan malzeme tamburun dönüşüne ters akarak tahliye olur, manyetik malzeme de tambur yüzeyine yapışarak diğer uçtan alınır. Eş akışlı, ters akışlı ve yarı ters akışlı yaş manyetik tamburlu ayırıcılar Şekil 5.52’de görülmektedir [107].



Şekil 5.52: Yaş Manyetik Tamburlu Ayırıcılar (a) Eş Akışlı (b) Ters Akışlı (c) Yarı Ters Akışlı

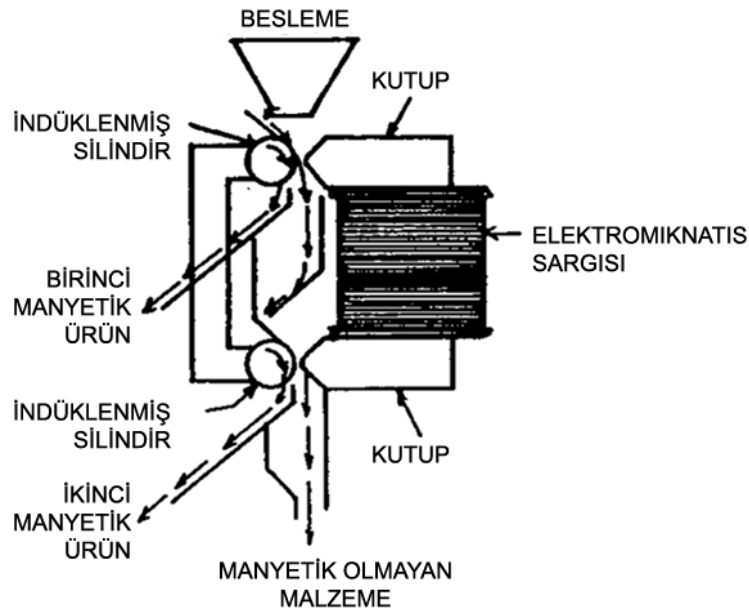
Düşük alan şiddetli bantlı yaş manyetik ayırıcılar su içine dalıp çıkan, taşıyıcı bir lastik veya kauçuk bant, bu bandın üzerinde alternatif dizili, kavisli sabit mıknatıslardan oluşmuştur. Besleme 10° - 15° eğimli bir oluktan su yardımı ile yapılmaktadır.

Yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırıcıların en önemlileri indüklenmemiş silindirli manyetik ayırıcılar, çapraz bantlı manyetik ayırıcılar ve döner diskli manyetik ayırıcılardır.

İndüklenmiş silindirli manyetik ayırıcılar, yüksek alan şiddeti oluşturan elektromıknatıs kutuplarının arasına konmuş ve yumuşak çelikten imal edilmiş silindirlerin indüklenmesi ve zayıf manyetik özellik gösteren materyallerden

ayrılması ilkesi ile çalışırlar. Şekil 5.53’de iki silindirli bir ayırıcının çalışma şekli verilmiştir [107]. Silindir sayısı ihtiyaca göre değişik olabilir, bir silindirli ayırıcılar olduğu gibi yedi silindirli ayırıcılarda üretilmektedir.

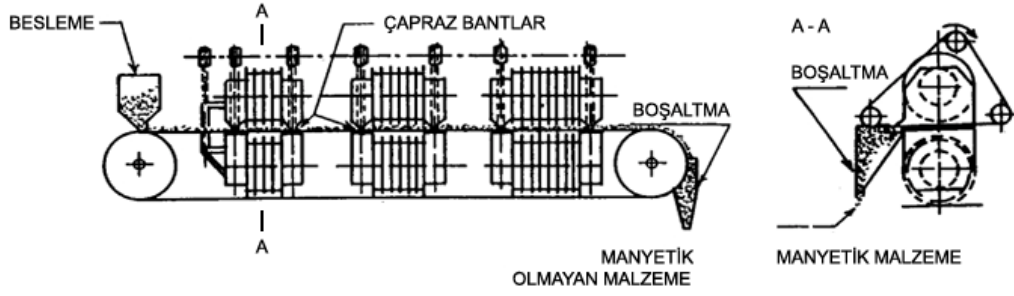
Bu ayırıcılarda alan şiddeti genellikle 18.500 Gauss olup, 10 meşten daha ince malzeme ile çalışırlar. Silindir çapları 65 – 130 mm arasındadır. Silindir eni 2 m’ye kadar olabilmekte ve enin her santimetresi için malzemenin türüne göre, saatte 20 – 40 kg malzeme zenginleştirmeye tabi tutulabilmektedir.



Şekil 5.53: İndüklenmiş Silindirli Manyetik Ayırıcı

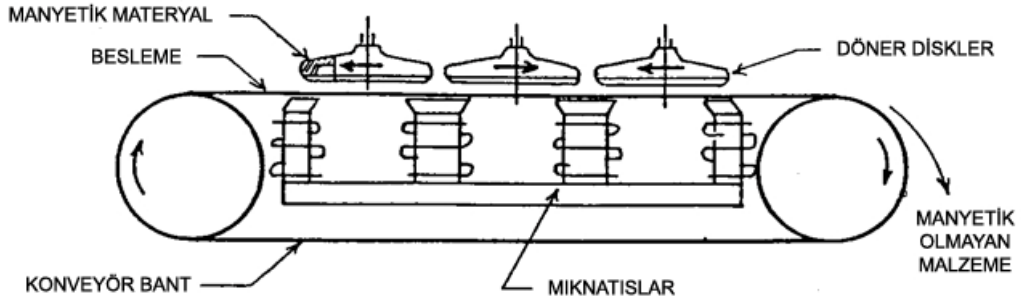
Çapraz bantlı manyetik ayırıcılarda ayrılacak malzeme çok ince bir tabaka halinde besleme bandının üzerine serilir. Bant elektromıknatısların kutupları arasından döküş ucuna doğru hareket eder. Elektromıknatısların bandın üstünde bulunan kutupları daha sivri olup, daha yüksek manyetik alan şiddetine sahiptirler. Zayıf manyetik özellik gösteren materyaller bu kutuplara doğru çekilir. Kutuplar üzerine yerleştirilmiş ve besleme bandına çapraz olarak çalışan bantlar manyetik malzemeyi manyetik olmayan malzemeden ayırır.

Çapraz bantlı manyetik ayırıcıların besleme bandının ve çapraz bantların hız ve genişlikleri değiştirilerek farklı kapasiteler elde etmek mümkündür. Besleme bandının her santimetresi için saatlik kapasiteleri 10 – 30 kg arasındadır. Şekil 5.54’de çapraz bantlı manyetik ayırıcı görülmektedir [107].



Şekil 5.54: Çapraz Bantlı Manyetik Ayırıcı

Yüksek alan şiddetli, döner diskli kuru manyetik ayırıcılar; orta derecede ve zayıf manyetik özellik gösteren materyallerin ayrılmasında kullanılırlar. Bu manyetik ayırıcıda bir besleme bandı bulunmakta, bu bant üzerinde dönen değişik sayıda diskler yer almaktadır. Diskler, karşısında bulundukları elektromıknatıslarla etki yolu ile mıknatıslanmaktadır. Döner diskli manyetik ayırıcılar yapı itibarı ile çapraz bantlı manyetik ayırıcılara benzer. Ancak, bu ayırıcılarda çapraz bantların yerini döner diskler almıştır. Disklerin besleme bandına çok daha fazla yaklaştırılabilmesi çapraz bantlı ayırıcılara göre en önemli üstünlüğüdür. Şekil 5.55’de döner diskli manyetik ayırıcı görülmektedir [107].



Şekil 5.55: Döner Diskli Manyetik Ayırıcı

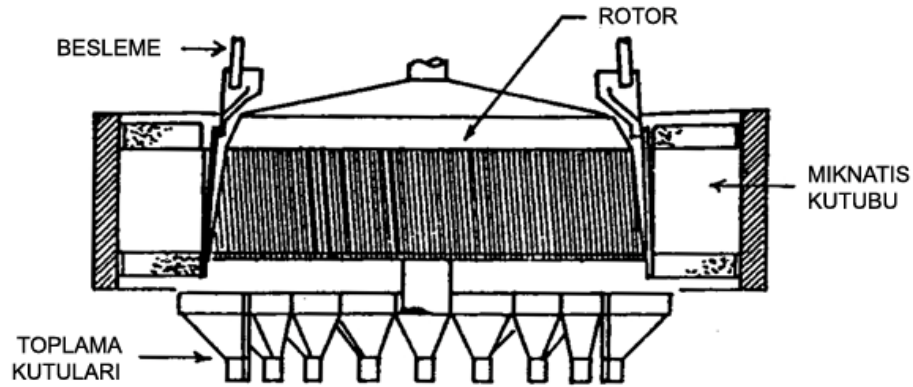
Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılarda yüksek alan şiddetinin yanında alan şiddetinin değişim oranının da yüksek olması gerekir. Son zamanlarda üzerinde çalışılmakta olan süper iletken ayırıcıların dışında, elde edilebilen en yüksek alan şiddeti yaklaşık olarak 20.000 Gauss’tur (yumuşak demirin doyum noktası). Manyetik alan şiddeti değişim oranının arttırmanın evrensel yolu manyetik alan içerisine demirden yapılmış ferromanyetik maddeler yerleştirmektir. Bu maddeler, paramanyetik materyallerin toplanacağı ortamı oluştururlar.

Manyetik alan içerisinde yerleştirilen ferromanyetik ortama çok değişik geometrik şekiller vermek mümkündür. En yaygın olarak kullanılan türleri bilyeler, çubuklar, oluklu plakalar ve elyaf şeklinde olanlarıdır.

Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıların iki tip temel tasarımı mevcuttur: Karosel tipi ve hazne tipi. Karosel tipi manyetik ayırıcılar, dikey eksen etrafında dönen ve kesiksiz ayırma yapabilen dairesel kesitli aygıtlardır. Bu sınıfa giren ayırıcıların en önemlileri şunlardır: Gill ayırıcısı, Jones ayırıcısı, Carpco ayırıcısıdır.

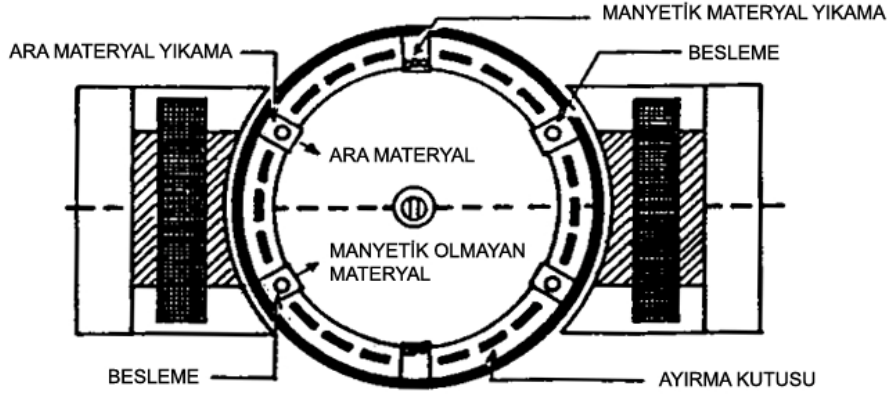
Gill ayırıcısı üzerine oluklu hale getirilmiş bir rotorlu elektromıknatıs kutupları arasında dönmesi esası ile çalışır. Rotor kutupların bulunduğu bölgede besleme yapılır. Beslenen malzeme içindeki zayıf manyetik materyaller olukların yüzeyinde tutulurlar. Manyetik olmayan materyaller akarak alta toplanırlar. Olukların üzerinde tutulan manyetik materyaller, olukların manyetik alan dışına çıkmasıyla yıkanarak manyetik fraksiyon olarak elde edilirler.

Gill ayırıcılarında uygulanan manyetik alan şiddeti genellikle 14.000 Gauss'tur. Her manyetik kutup için yaklaşık 800 kg.saat^{-1} kapasiteye sahiptirler. Şekil 5.56'de Gill manyetik ayırıcısının yandan görünüşü verilmiştir [107].



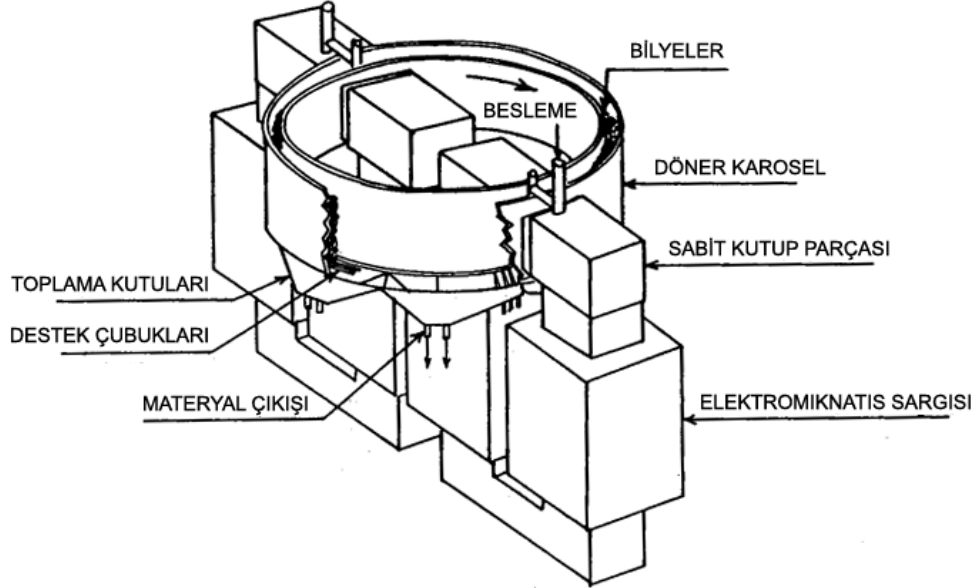
Şekil 5.56: Gill Manyetik Ayırıcısının Yandan Görünüşü

Jones ayırıcısında, Gill ayırıcısındaki rotor yerine oluklu plakalar kullanılarak kapasite önemli ölçülerde arttırılmıştır. Böylece saatlik kapasite 120 tona varan ayırıcılar imal edilebilmiştir. Bu ayırıcılar daha çok zayıf manyetik materyallerin ayrılmasında kullanılmaktadır. Jones manyetik ayırıcısı Şekil 5.57'de görülmektedir [107].



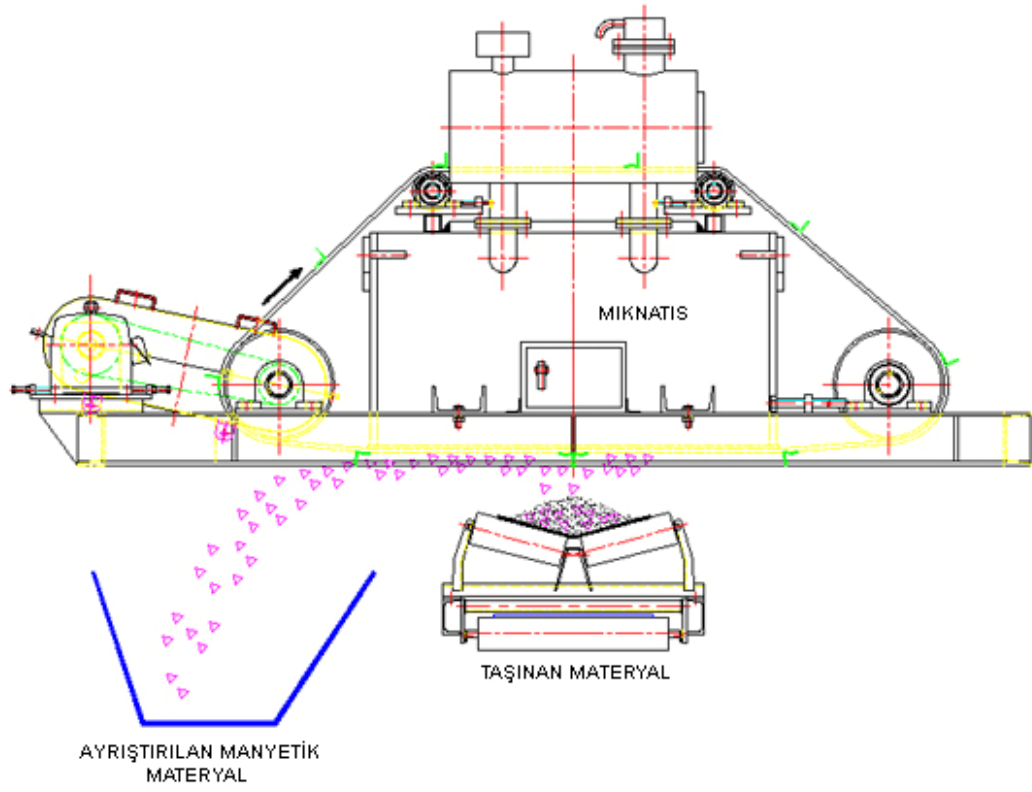
Şekil 5.57: Jones Manyetik Ayırıcısı

Carpco ayırıcısında ferromanyetik ortam olarak yumuşak demirden imal edilmiş bilyelerden yararlanılmıştır. Ayırıcının kapasitesini rotor üzerine yerleştirilmiş olan elektromıknatıs kutup sayısı belirler. Kutupların kapasitesi alan şiddeti azaldıkça artar. Eğer alan şiddeti 20.000 Gauss ise her kutup için saatlik kapasite 1 tondur. 12.000 Gauss'ta bu 2 tona, 2.000 Gauss'ta 5 tona yükselir. Şekil 5.58'de Carpco manyetik ayırıcısı görülmektedir [107].

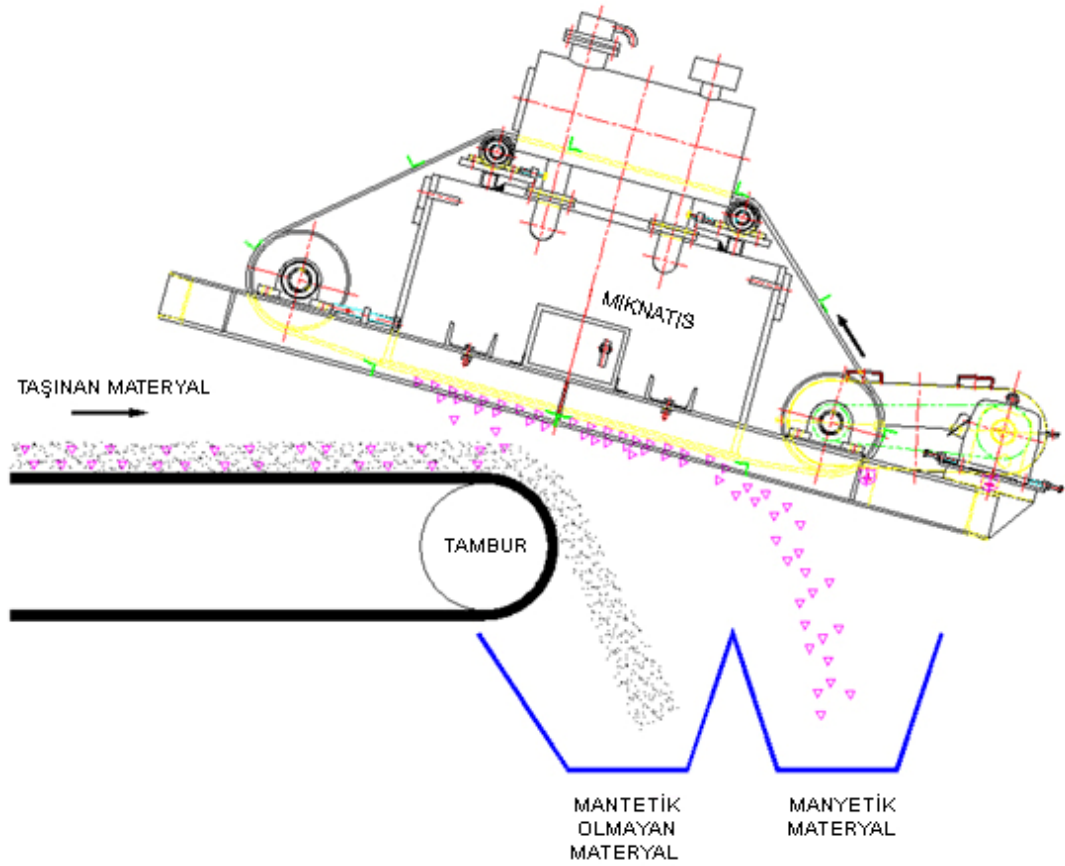


Şekil 5.58: Carpco Manyetik Ayırıcısı

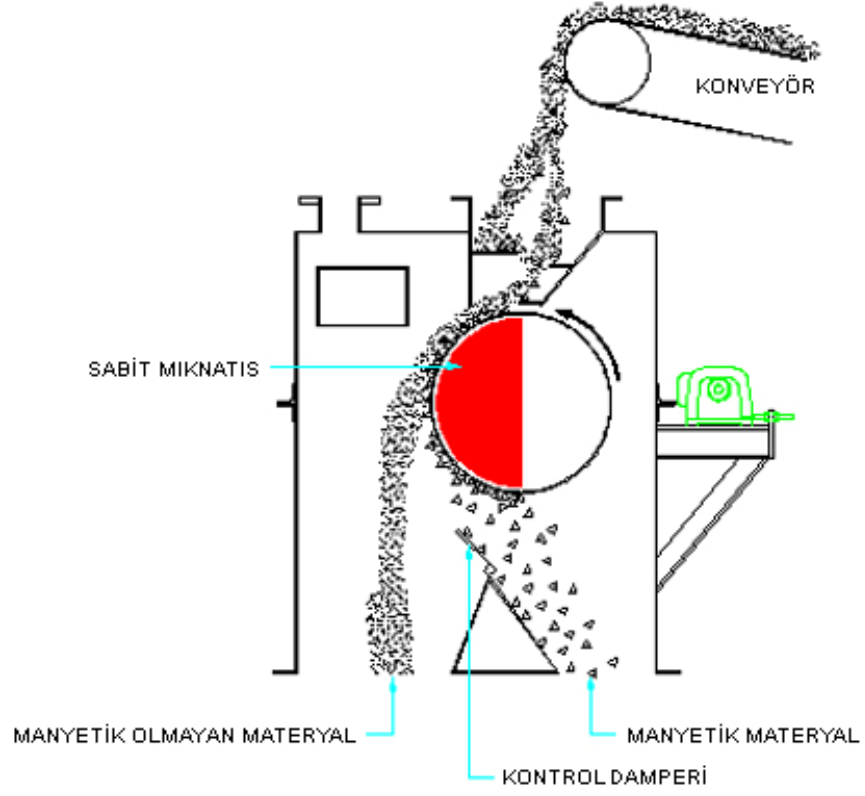
Sırasıyla Şekil 5.59'de konveyör banda dik tip (çapraz bantlı) elektromanyetik ayırıcı, Şekil 5.60'da konveyör banda paralel tip elektromanyetik ayırıcı, Şekil 5.61'da tambur tip kuru manyetik ayırıcı ve Şekil 5.62'de makaralı tip manyetik ayırıcılarda materyal ayrılma mekanizmaları görülmektedir [115].



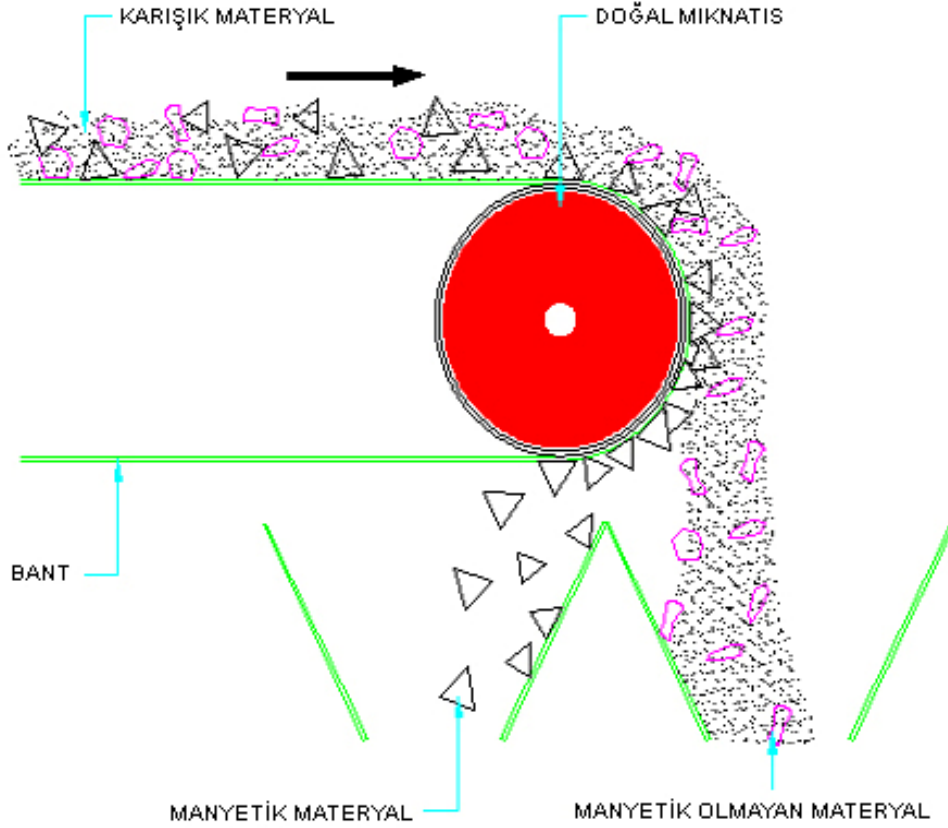
Şekil 5.59: Konveyör Banda Dik Tip Elektromanyetik Ayırıcı



Şekil 5.60: Konveyör Banda Paralel Tip Elektromanyetik Ayırıcı



Şekil 5.61: Tambur Tip Kuru Manyetik Ayırıcı



Şekil 5.62: Makaralı Tip Manyetik Ayırıcı

Tablo 3.13’de atık matrisinden bakır alaşımlarının ayırmasında kullanılan yüksek şiddetli ayırıcılar için bir ölçüt olan, bakır alaşımlarının manyetik duyarlılık değerleri verilmiştir. Bir yüksek şiddet alanlı manyetik ayırma ile asgari aşağıdaki üç alaşım grubu elde edebilir [54]:

- Göreceli olarak yüksek kütle hassasiyetli bakır (Cu) alaşımları; alüminyum (Al) çoklu bileşik bronz
- Orta kütle hassasiyetli bakır (Cu) alaşımları; mangan (Mn) çoklu bileşik bronz, özel pirinç
- Düşük kütle hassasiyetli ve/veya diamanyetik materyal davranışlı bakır (Cu) alaşımları; kalay (Sn) ve kalay çoklu bileşik bronz, kurşun (Pb) ve kurşun çoklu bileşik bronz, düşük demir (Fe) içerikli pirinç

5.5 Elektrik İletkenliği Farkına Göre Ayırma

Elektrik iletkenliği temelli ayırma yöntemlerinde materyaller elektrik iletkenliği (veya direnci) farklılığına göre ayrılır. Tablo 3.14 ve Tablo 3.15’de materyallerin elektriksel karakteristikleri verilmiştir. Tablo 5.9’de görüldüğü gibi üç tipik elektrik iletkenliği temelli ayırma tekniği mevcuttur; elektrostatik ayırma (electrostatic separation), girdap akımı ayırma (eddy current separation) ve triboelektrik ayırma (triboelectric separation) [27].

Tablo 5.9: Elektrik İletkenliği Farkına Göre Ayırma İşlemleri

İşlem	Girdap Akımı	Elektrostatik	Triboelektrik
Ayırma Kriteri	Elektrik iletkenliği ve yoğunluk	Elektrik iletkenliği	Dielektrik sabiti
Ayırma Prensipleri	Alternatif manyetik alan ve manyetik alan tarafından indüklenen girdap akımları arasındaki karşılıklı etkileşimden dolayı elektrikle yüklenen iletken taneler için kullanılan itici kuvvet (Lorentz Kuvveti)	Şarj ve ayırıcı deşarj ile taneleri farklı olarak yükleyerek taneleri yönlendiren farklı kuvvetlerin etkisi	Farklı yüklü tribo şarj (+ veya -) ile bileşenlerin farklı olarak yüklenmesi farklı kuvvet yönlerine neden olur
Tasnif Görevi	Demir dışı metaller ile metal olmayan ayırımı	Metal ile metal olmayan ayırımı	İletken olmayan farklı plastiklerin ayrılması
Çalışılabilir Tane Boyutu Aralığı	> 5 mm	0,1 – 5 mm, yaprak şeklindeki taneler için 10 mm	< 5 mm, yaprak şeklindeki taneler için 10 mm

5.5.1 Elektrostatik Ayırma

Materyallerin iletkenlik farkına dayanarak yüksek gerilim altında yapılan ve materyal tanelerinin kuru olarak ayrılması işlemine elektrostatik ayırma veya yüksek gerilim ayırması adı verilir [56]. Esas olarak elektrostatik kuvvetlere dayanan elektrostatik ayırmada, materyallerin yüksek gerilim altında statik bir elektrik yükü kazanıp bu yükü bir süre depo etme özelliğinden yararlanılmaktadır. Uygun şekilde etki altında bulundurulmuş materyallerin, elektron kazanarak veya kaybederek (–) veya (+) elektrik yükü yüklediklerinden topraklanmış veya elektrik yüklü başka maddeler tarafından itilirler, çekilirler veya yüksüz (nötr) hale getirilebilirler.

Materyal tanelerine kazandırılan statik elektrik yükü; tane büyüklüğü, dielektrik sabiti, kutuplaşma ve sıcaklık gibi etkenlere bağlı olarak değişmekte ve materyallerin birbirinden ayrılmasında etkili olmaktadır. Ayrıca sürtünme ve yerçekimi kuvvetleri de ayırma üzerinde etkilidir.

Genel olarak elektrostatik ayırma yöntemi, materyal tanelerine elektrik yükü kazandırmaya ve farklı yüklenen tanelerin birbirinden ayrılmasına dayanmaktadır. Materyal tanelerini elektrik yükü ile yükleme değişik şekillerde yapılabilir.

- İletim (kondüksiyon) ile yükleme: Bir elektrik alanına giren materyal taneleri iletkende yalıtıkta olsalar önce kutuplaşırlar. Yalıtık taneler elektrik alanı ile elektron alış veriş yapmadıklarından yüksüz (nötr) olarak kalırlar. Buna karşılık iletken taneler tersinirlik özelliklerine göre elektron alarak veya kaybederek (–) veya (+) bir yük kazanırlar. Bu olaya iletim ile yükleme denilmektedir.
- İyon (gaz iyonu) bombardımanı ile yükleme: İyonize edilmiş bir gaz içinde serbestçe hareket eden taneler ters işaretli gaz iyonlarının yüzeylerine ilişmesiyle iletken yalıtıkta olsalar belirli bir elektrik yükü kazanmış olurlar.
- Sürtünme ile yükleme: Farklı iki cisim birbirine sürtündüğü zaman elektronların birbirinden diğerine geçmesi ile elektrik yükü kazanılır.
- Piro – elektrik yükleme: Bazı kristallerdeki ısı gerilmeleri kristal içinde ters yüklü bölgeler oluşturabilirler. Böylece elektrik yükü kazanılır.

- Piyezo – elektrik yükleme: Bazı kristallerde basınç altında ters yüklü bölgesel alanlar oluşmakta ve elektrik yükü kazanılmaktadır.
- Işık veya Radyasyon İletkenliği: Işık veya x ışınları bazı maddelerde elektron yayınımına neden olduklarından bu maddeler (+) elektrik yükü kazanılır.

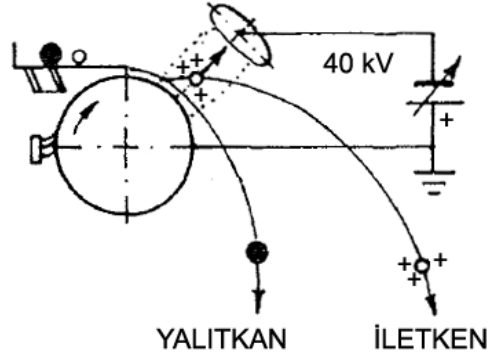
Elektrostatik ayırmada, iletim ile yükleme ve buna bağlı olan kutuplaşma (polarizasyon) ve tersinirlik özellikleri çok önemli rol oynamaktadırlar. Maddeler atomlardan, atomlar da içinde (+) yüklü proton ve yüksüz nötron bulunan çekirdek ile çekirdek etrafında ve proton sayısına eşit sayıdaki (–) yüklü elektronlardan oluşmaktadır. Bir elektrik alanına giren atomun elektronları alanın (+) kutbuna çekirdek de alanın (–) kutbuna doğru çekilir. Bu olaya kutuplaşma veya polarizasyon adı verilmektedir. Birçok atomun bir araya gelmesiyle oluşan bir mineral tanesi elektrik alanına girdiğinde tane içindeki elektronlar alanın (+) yüklü kutbuna yakın kenara doğru hareket edecekler buna karşılık elektrondan çok daha ağır olan atom çekirdekleri oldukları yerde kalacaklardır. Böylece tane içinde farklı kutuplu iki bölge oluşacaktır.

Tersinirlik veya reversibilite genel olarak materyal tanelerinin elektron alma veya kaybetme eğilimlerindeki farklılık olarak tarif edilmektedir. Belirli gerilimler altında, genellikle 18.000Volt’dan düşük değerlerde elektron kaybederek (+) yük kazanan materyallere tersinir pozitif, elektron alarak (–) yük kazanan materyallere tersinir negatif ve 18.000 volt gerilime kadar hiçbir yük kazanmayan materyallere de tersinmez denilmektedir. Genel olarak zayıf iletken materyaller tersinirlik özelliği göstermektedir.

Elektrostatik ayırıcılarda, elektrik alanını oluşturan elektrotlardan biri topraklanmış ve belirli yönde dönen bir silindir (tambur) ve diğeri de ya belirli bir elektrik yükü olan elektrot (gaz tüpü) veya yüksek gerilim altında 18.000 Volt’tan büyük fiske şeklinde iyon boşalması sağlayan iğne uçlu elektrottur. Gaz tüpü ve iğne uçlu elektrotlar birlikte kullanılabilirler.

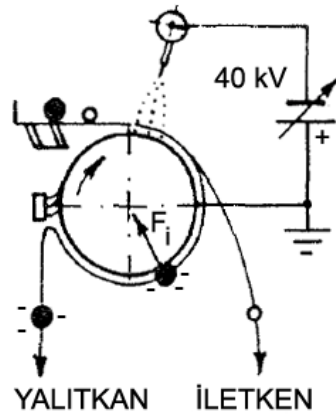
Yalnızca tüp elektrotun kullanıldığı elektrostatik ayırıcılarda; Şekil 5.63’de [116] görüldüğü gibi elektrostatik ayırıcının okla gösterilen yönde dönen tamburu üzerine beslenen materyal tanelerinden tersinir pozitif olanlar tambura elektron vererek pozitif yük kazanırlar ve tamburdan uzaklaşıp ters işaretli elektroda yaklaşarak hareket ederler. Bu olaya kaldırma denir.

Yalıtkan taneler ise herhangi bir elektron alış verişinde bulunmadıklarından yüksüz halde merkezkaç, yerçekimi, ve sürtünme kuvvetlerinin bileşkesi olan kuvvetin etkisiyle yaklaşık olarak parabolik bir yörünge ile düşerek iletken parçalardan ayrılırlar.



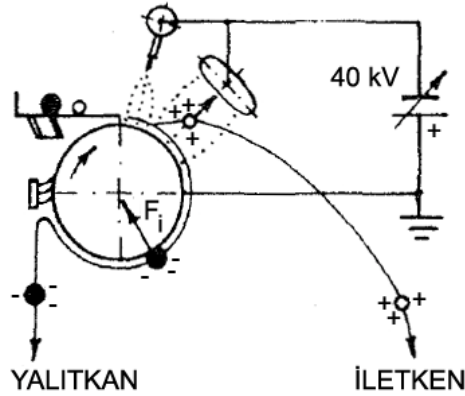
Şekil 5.63: Tüp Elektrotlu Elektrostatik Ayırıcılarda Tane Ayrılması

Yalnızca iğne uçlu elektrotun kullanıldığı elektrostatik ayırıcılarda; Şekil 5.64’de [116] görüldüğü gibi iğne uçlu elektrotta yüksek gerilim (50.000 Volt’a kadar) uygulanarak elde edilen gaz iyonlarının bombardımanına uğrayan materyal tanelerinden iletken olanlar aldıkları iyonları kolaylıkla tambura (toprağa) iletir yüksüz olarak parabolik yörünge ile düşerler. Yalıtkan taneler almış oldukları iyonları tambura iletemediklerinden negatif yük kazanmış olurlar ve ters yüklü tambura yapışarak hareket ederler. Bu olaya yapıştırma denir. Yalıtkan taneler aldıkları iyonları elektrik alanından çıktıktan sonra da kaybedemediklerinden bir fırça ile tambur yüzeyinden uzaklaştırılırlar. Yarı iletken taneler ise elektrik alanından çıktıktan sonra aldıkları iyonları tambura iletir yüksüz halde geçtiklerinden tamburdan ayrılırlar.



Şekil 5.64: Taç (İğne Uçlu) Elektrotlu Elektrostatik Ayırıcılarda Tane Ayrılması

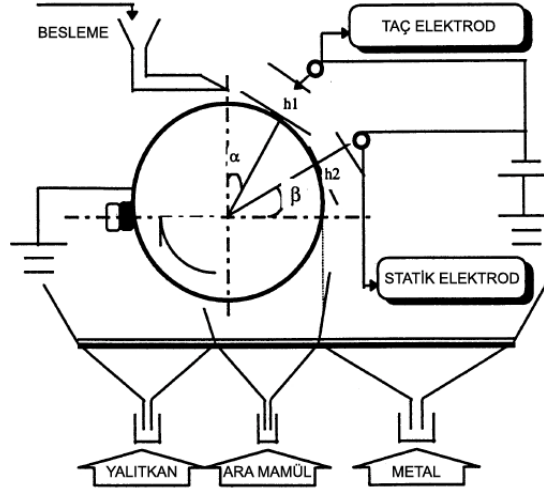
Tüp ve iğne uçlu elektrotların bir arada kullanıldığı elektrostatik ayırıcılarda; Şekil 5.65’de [116] görüldüğü gibi hem kaldırma ve hem de yapıştırma durumu söz konusudur. İletken taneler kaldırılarak yalıtkanlar da yapıştırılarak ayrıldıklarından daha seçimli bir ayırma olmaktadır. İki elektrotun birbirlerine göre konumuna bağlı olarak az kaldırma çok yapıştırma veya az yapıştırma çok kaldırma durumları oluşturulabilir.



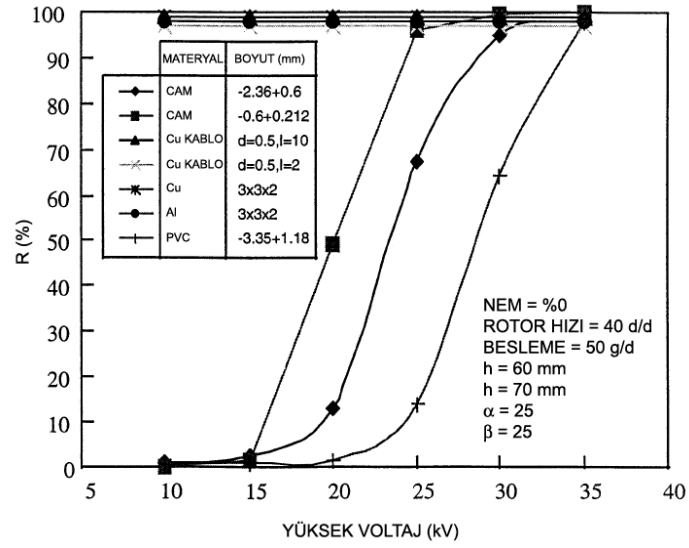
Şekil 5.65: Tüp ve Taç (İğne Uçlu) Elektrotların Bir Arada Kullanıldığı Elektrostatik Ayırıcılarda Tane Ayrılması

Taç şarjın kullanıldığı rotor tip elektrostatik ayırıcılar iletken ve iletken olmayan hammaddeleri birbirlerinden ayırmak için kullanılırlar. Metaller ve metal olmayan materyallerin elektrik iletkenlikleri veya özgül elektrik dirençleri arasındaki aşırı farklılıklar atıkların geri dönüşümünde taç elektrostatik ayırmanın başarılı uygulanabilmesi için mükemmel bir koşul oluşturur. Bugüne kadar elektrostatik ayırma başlıca kıyılmış elektrik tellerinden ve kablolarından bakırın veya alüminyumun geri kazanımında [117-119], daha özel olarak da baskılı devre levhası atıklarından bakırın ve değerli metallerin geri kazanımında kullanılmıştır [120].

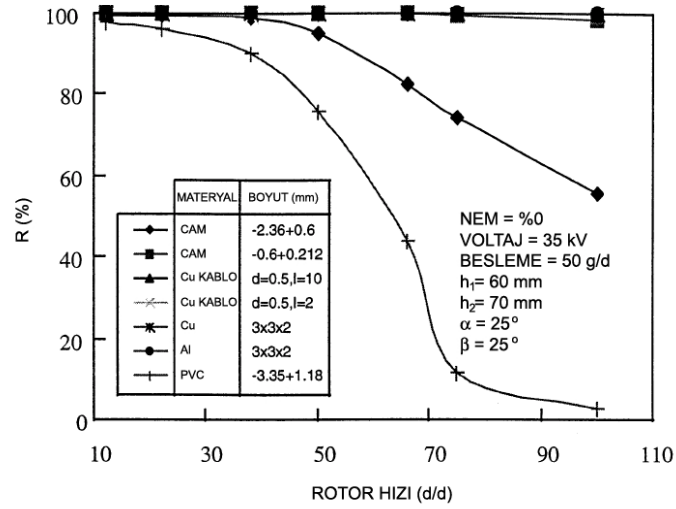
Zhang ve Forssberg [120] çalışmalarında elektronik ekipman atıklarından taç elektrostatik ayırma yöntemiyle metallerin geri kazanımını incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneye ait şematik gösterim Şekil 5.66’de verilmiştir. Deney neticesinde elde ettikleri sonuçlar, yüksek voltaj ve tane boyutunun bir fonksiyonu olarak materyal kazanımı Şekil 5.67 ve rotor hızı ve tane boyutunun bir fonksiyonu olarak materyal kazanımı ise Şekil 5.68’de verilmiştir. Yapılan çalışmalar elektrikli ve elektronik ekipman atıklarından metallerin kazanımı için en uygun şartların 30 – 35 kV yüksek voltaj ve $0,5 - 0,8 \text{ m.s}^{-1}$ ($30 - 45 \text{ d.d}^{-1}$) rotor hızı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.66: Laboratuar Ölçekli Taç Elektrostatik Ayırıcı

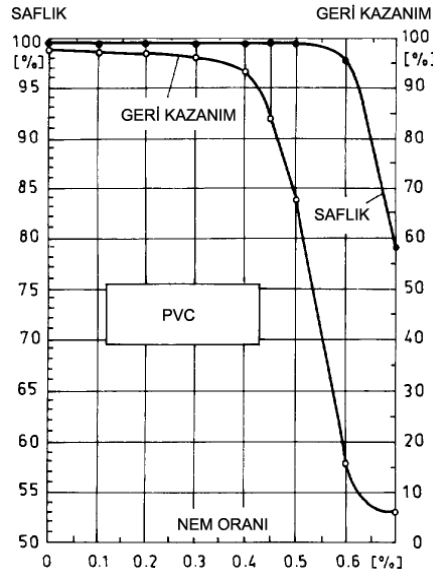


Şekil 5.67: Yüksek Voltaj ve Tane Boyutuna Bağlı Materyal Geri Kazanımı

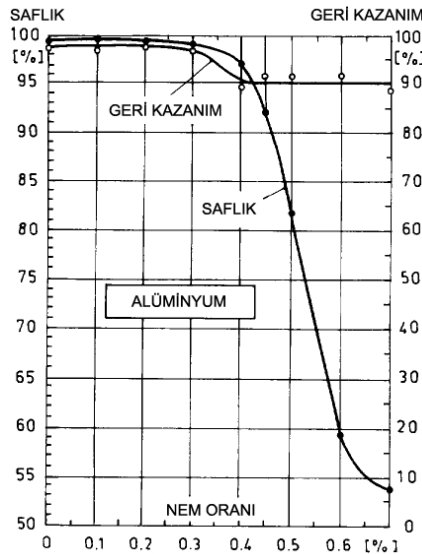


Şekil 5.68: Rotor Hızı ve Tane Boyutuna Bağlı Materyal Geri Kazanımı

Taç elektrostatik ayırmada elektrot sistemi, rotor hızı, nem içeriği ve tane boyutu ayırma sonuçlarını belirlemede oldukça etkilidir. Iuga ve diğerleri tarafından hem teorik temel teşkil edecek ve hem de uygulanabilir bir bakış açısıyla yeni bir elektrot sistemi tasarımı araştırılmış ve geliştirilmiştir [117,118,121]. Dascalescu ve diğerleri [119] tarafından yalıtkan – metal elektrostatik ayırmada materyal yüzey neminin etkisi üzerinde bir deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışma %0 - %0,9 nem oranında 10 adet %50 PVC ve %50 alüminyum veya bakır örneği üzerinde gerçekleştirilmiş ve etkin PVC – metal ayırımının %0,3 nem oranının altında gerçekleştiğini saptamışlardır. Ayrıca Şekil 5.69 ve Şekil 5.70’de sırasıyla PVC ve Alüminyum için nem miktarına bağlı olarak, geri kazanım ve saflık oranları görülmektedir.



Şekil 5.69: Nem Oranına Bağlı PVC Geri Kazanım ve Saflık Oranları



Şekil 5.70: Nem Oranına Bağlı Al Geri Kazanım ve Saflık Oranları

Iuga ve diğerleri [116] diğer bir çalışmalarında granül halindeki endüstriyel atıklardan metallerin ve plastiklerin elektrostatik ayırma yöntemiyle ayrılmasını incelemişleridir. Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre iri taneli bakır ve PVC karışımı için tek bir iğne uçlu elektrot iyi ayırma özelliği göstermektedir. İyonize olmayan yüksek voltajın bakır tanelerin yörüngeleri üzerinde belirgin bir etkisi görülememiştir. Yalıtkan tanelerin ortalama karakteristik boyutunun 2 mm'yi aşması durumunda taç yüklemeyi artırmak amacıyla ikinci bir iğne uçlu elektrot kullanılabilir. Alüminyum, PVC karışımı söz konusu olduğunda en iyi sonuç iğne uçlu ve tüp elektrotun birlikte kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Alüminyumun özgül ağırlığının bakırın özgül ağırlığından 3,3 kat düşük olması nedeniyle iyonize olmayan yüksek voltajın alüminyum tanelerinin yörüngeleri üzerinde kayda değer oranda etkili olduğu saptanmıştır. Burada da yalıtkan tanelerin yüklenmesini artırmak için iki iğne uçlu elektrotun kullanılabilmesi mümkündür. Tel bakır / PVC ve tel bakır / PE karışımı içinde en iyi şartlar yine iğne uçlu ve tüp elektrotun birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. PVC için bir veya iki iğne uçlu elektrotun kullanılması mümkün olmasına karşın yüksek dirence sahip olan PE için ikinci bir iğne uçlu elektrotun kullanılmasına gerek olmadığı saptanmıştır.

Yukarıda sözü edilen prosesler mineral işleme endüstrisindeki proseslerle karşılaştırıldığında elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümünde genellikle 5 – 8 mm arasındaki daha büyük serbest taneler ile karşılaşıldığı görülür bununla beraber genellikle bunlar küçük taneler olarak adlandırılırlar. Elektrostatik ayırmada işlenmemiş taneler küçük özgül elektriksel yüklemeler ve bundan dolayı oluşan küçük elektriksel kuvvetler ve aynı zamanda nispeten büyük merkezkaç kuvvetleri ile toplanırlar. Elektrot sisteminin optimizasyonu için elektrot voltajını artırarak ve rotor hızı azaltılarak yalıtkan tanelerin yapışması maksimize edilebilir.

Taç elektrostatik ayırma boyut aralığı 0,1 – 5 mm olan küçük taneler için uygulanabilir çok önemli bir tekniktir. Bu yöntem mineral işleme endüstrisinde yaygın şekilde kullanılmıştır. Ayrıca kablo atıklarının geri dönüşümünde de bazı uygulamalar mevcuttur. Elektrostatik ayırma başlangıçta sadece geri dönüşüm amacı ile elektrikli ve elektronik ekipman atıklarından metallerin geri kazanımında faydalanılmıştır. Tablo 5.10 taç silindir ayırıcılarının bazı endüstriyel uygulamalarını göstermektedir [27].

Tablo 5.10: Elektrostatik Ayırıcıların Kullanım Alanları

Materyaller	Atık Kaynağı	Ayırma Yöntemi	Tane Boyutu	Elde Edilebilir Mamul Kalitesi
Cu	Kablo atıkları	Kesici Değirmen	0,5 – 5 mm	Cu %90 – %99
PVC / PE				Plastikler %99
Al	Süt kutuları gibi gövde atıkları	Kesici Değirmen	6 – 12 mm	Al %100
PS				PS %99
Al	Tetra briket gibi bileşik materyaller	Kriyojenik Öğütme	50 – 500µm	Al %95
Plastikler				Plastikler %95
Cu	Bilgisayar baskılı devre levhaları	Çekiçli Değirmen	0,2 – 2 mm	Cu %99
Epoksi Resin				Resin %99,5
PE	Araba depoları	Kesici Değirmen	3 – 5 mm	PE %95
EOVH				EOVH %90

Kablo geri dönüşümünde elektrostatik ayırmanın avantajlarından biri metal içermeyen mamul elde edilmesidir. Ancak bazı durumlarda kablo yapımında kullanılan esnek PVC ve kauçukların belirli tiplerinin özgül dirençleri $4 \times 10^{10} \Omega m$ düşer. Bu nedenle taç elektrostatik ayırma zordur çünkü yalıtkanın elektriksel boşalma zaman sabiti 1 saniyenin altına düşebilir.

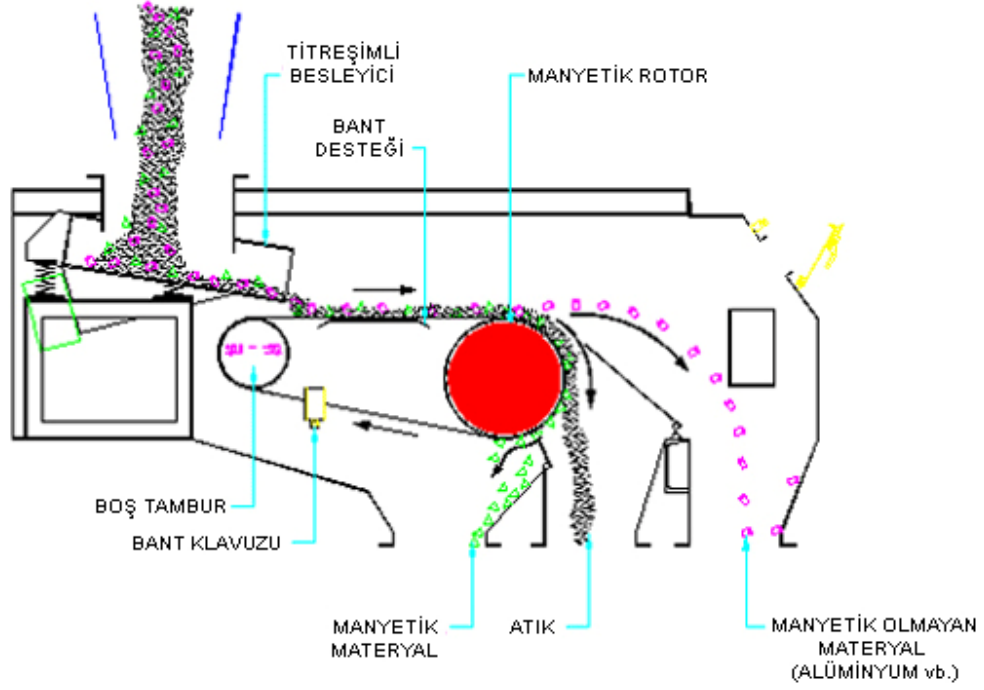
5.5.2 Girdap Akımı Ayırma

Geçen on senede, geri dönüşüm endüstrisindeki kayda değer en önemli gelişmelerden birisi nadir yerküre sürekli mıknatıslarının kullanıldığı girdap akımı ayırıcılarının kullanılmaya başlanmasıdır.

Ayırıcılar ilk olarak parçalanmış otomobil atıklarından demir dışı metallerin geri kazanımı veya kentsel katı atıklarının işlenmesi için geliştirilmiştir. Ancak günümüzde dökümhane döküm kumları, polyester polietilen tereftalat (PET), elektronik atıklar, cam kırıntıları ve öğütücü tozları içeren diğer uygulamalar içinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Özellikle göreceli olarak kaba boyutlu parçaların el ile beslenmesi için uygun olan girdap akımı ayırıcıları günümüzde neredeyse tamamen atık ıslahı için kullanılmaktadır. Şekil 5.71’de bir girdap akımı ayırıcısı görülmektedir [115].

Elektrik yükü q olan bir parçacık, bir elektrik alan ve manyetik alanın olduğu uzayda hareket ederse ona etkiyen toplan kuvvete Lorentz kuvveti denir. Elektrik kuvveti, manyetik kuvvet ve bu kuvvetlerin toplamı olan Lorentz kuvveti sırasıyla denklem 5.27, 5.28 ve 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.71: Girdap Akımı Ayırıcısı

$$F_e = qE \quad (5.27)$$

$$F_m = qvB \sin \theta \quad (5.28)$$

$$F_L = qE + qvB \sin \theta \quad (5.29)$$

F_e : Elektrik kuvveti (N)

F_m : Manyetik kuvvet (N)

F_L : Lorentz kuvveti (N)

q : elektrik yükü (Colomb)

E : elektrik alanı (Volt.m⁻¹)

v : hız (m.s⁻¹)

B : manyetik alan (Tesla)

θ : v hızı ve B manyetik alanı arasındaki açı

Döner girdap akımlı ayırıcılar birçok demir dışı metallerin ayrılmasında ve geri kazanım işlemlerinde başarılı olarak kullanılmaktadır, en yaygın olarak kıyılmış otomobil atıklarından ve kentsel katı atıklardan demir dışı metallerin ayrılmasında

kullanılmaktadır. Bununla birlikte elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümünde geleneksel girdap akımı ayırıcılarının kullanımı gerekli olan besleme boyutundan dolayı sınırlıdır. Taneler 5 mm'den daha büyük çapta veya 10 mm'den daha uzun olmalıdır.

Son yıllarda küçük tanelerin ayrılmasında kullanılan girdap akımı ayırma işlemlerinin tasarımında bazı gelişmeler olmuştur. Bu yeni tasarım için teorik bir alt yapı sağlamak için ayırıcı alanı ve iletken taneler arasındaki etkileşimin anlaşılması şarttır.

1990'lardan önce yoğun bir takım teorik çalışmalar Schlömann [122,123] ve van der Valk ve diğerleri tarafından sunulmuştur [124]. Periyodik değişimli manyetik bir alan içerisindeki küçük blok biçimli partiküller üzerinde sarf edilen kuvvetlerin büyüklüğünü hesaplamak için bir teorik model geliştirilmiştir. Çalışmalarda eğimli girdap akımı ayırıcıları (RECS – Ramp Eddy Current Separator), dikey girdap akımı ayırıcıları (VECS – Vertical Eddy Current Separator) ve döner disk ayırıcıları (RDS – Rotating Disc Separator) karşılaştırılmıştır. Bu model farklı alan dağıtımlarına ve mekanik konstrüksiyonlara sahip ayırıcıların tasarımı için kullanılmıştır. Bu modelin geçerliliği bir dikey girdap akımı ayırıcısı ilk örneğinde sapma ölçümleri ile ve iki farklı disk ayırıcısı ilk örneğinde de kuvvet ölçümleri ile test edilmiştir. Sapma ölçümleri öğütülmüş güç kablolarından çekilmiş bakır taneler ile elde edilmiştir. Taneler 0,2 – 4 mm çapında ve genelde 3 – 10 mm uzunluğunda kablo parçalarıdır. Tanelerin boyutları elemende ve hesaplamada birbirlerine tekabül etmektedir ve boyut aralığı ise 3 mm'yi geçmemektedir.

1990'ların başında, Fletcher ve diğerleri bir takım kuramsal çalışmalar yapmışlardır [125-129]. Bu çalışmalarda bir tek sınırlı girdap akımı ayırıcısının sınırındaki manyetik alan profilini göstermek için üç çeşit kuramsal model kullanılmıştır.

Rem ve çalışma diğerleri tarafından girdap akımı ayırıcısı yöntemi kullanılarak küçük tanelerin ayrılması ile ilgili önemli bir çalışma sunulmuştur [130]. Manyetik çift kutuplu olarak işlenen taneler vasıtasıyla hem simetrik ve hem de asimetrik alanlardaki küçük ve orta büyüklükteki taneler için bir model geliştirilmiştir. Rem makalesinde bir döner silindir ayırıcısı, bir kayan rampa ve bir dikey girdap akımı ayırıcısı için bir teori geliştirmiştir.

Zhang ve diğerleri döner tip bir girdap akımı ayırıcısı kullanılarak 5 mm'den daha küçük çeşitli materyallerin ayrılabilirliği ile ilgili araştırmalarını sonuçlarını sunmuşlardır [131]. Çalışma demir dışı küçük metal tanelerini ayırmak için manyetik silindirin ters yönde döndürülebileceğini göstermiştir. Elektromanyetik tork tarafından oluşturulan teğetsel girdap akımı kuvveti ve dinamik sürtünme kuvvetinin kıyaslanması ile elde edilen sonuçlardan ters yönde dönme kavramına varmışlardır.

Ayırma mekanizmaları ile ilgili analizlere dayanan öneriler küçük tanelerin seçilerek ayrılmasında gelişme sağlamıştır. Rem ve diğerleri girdap akımı ayırıcıları için bir takım yeni tasarım kavramları sunmuşlardır [132]. Yeniden tasarlanmış bir Delft dikey girdap akımı ayırıcısı (VECS – Vertical Eddy Current Separator), bir prototip TNO girdap akımı ayırıcısı ve bir laboratuvar ıslak girdap akım ayırıcısı (WECS – Wet Eddy Current Separator) araştırmalarında kullanılmıştır. Bu yeniden tasarım temel alınarak van der Valk ve diğerleri tarafından yeni bir dikey girdap akımı ayırıcısı geliştirilmiştir [133]. Bu çalışmada kullanılan mıknatıslar daha önce kullanılan mıknatıslardan çok daha güçlüdür. İkili karışımlar için Delft dikey girdap akımı ayırıcıları vasıtasıyla elde edilen ayırma sonuçları bu çalışmada sunulmuştur.

Uygulamalı bilimler konusunda araştırma yapan The Netherlands Organization (TNO) tarafından manyetik yüzey ve besleyici arasında yaklaşık olarak 20 mm'lik genişliğindeki dar bir aralıktaki küçük bir mil ile dakikada en fazla 4000 devire ulaşabilen yüksek rotor hızı birleştirilerek bir prototip tasarlanmıştır. TNO girdap akımı ayırıcısının teğetsel girdap akımı kuvvetinin döner konveyör bantlı silindirik girdap akımı ayırıcısının teğetsel girdap akımı kuvvetinin altı katı olduğunu göstermiştir. Islak girdap akımı ayırıcısı fikri ayırma işlemindeki elektromanyetik tork etkilerinin dönüşümünden gelmektedir. Akışkan deneylerinden iyi bilindiği gibi savrulan bir tane hem hareketin kendi doğrultusuna ve hem de dönme eksenine dik bir kuvvet sayesinde hareket eder. Bu Magnus etkisidir. Islak girdap akımı ayırıcıları ile ilgili deneysel sonuçlar umut verici olarak görünmektedir. Küçük taneler için farklı tasarım konseptlerine sahip dört tip girdap akımı ayırıcısının karşılaştırılması Tablo 5.11'da sunulmuştur [27].

Norrgran [134] alüminyum cürufaları, pirinç döküm kumları ve elektronik atıklar gibi küçük boyutlu metallerin zenginleştirmesinde bir döner konveyör bantlı silindir girdap akımı ayırıcısının uygulanmasını incelemiştir. Tablo 5.12 bu çalışmada tipik tüketici uygulamaları için elde edilen verimli ayırma sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 5.11: Girdap Akımı Ayırıcılarının Karşılaştırılması *

Tasarım Konsepti	Kuru			Islak
	RDS	VECS	TNO ECS	RD WECS
İşlem hacmi	++	0	+	+
Ayırma seçiciliği	+	0	++	+++
İşletme zorluğu (mıknatıslar için hassasiyetlik)	0	-	-	+
Bakım	0	+	-	-
Tek kademedeki metal olmayan mamullerin miktarı	0	-	0	+
1 t.sa ⁻¹ başına yatırım maliyeti	0	-	+	-
Kati sonuçlar	+++	-	++	++++

Tablo 5.12: Girdap Akımı Ayırıcılarının Tipik Uygulamaları

Basit tanımlama	Besleme oranı, tph [†]	Beslemenin ağırlığa oranı (%)		
		Manyetikler	İletkenler	Yalıtkanlar
Alüminyum kutular ve PET şişeler	1	-	49	51
Kırılmış PET şişeler ve alüminyum tüpler	1	-	2	98
Alüminyum ve PVC karışımı	1	-	33	67
Otomobil atıkları (camsız)	3	60	33	7
Otomobil atıkları (3,50 ")	3	30	35	35
Otomobil atıkları (- 0,50 ")	3	27	24	49
Demir ve demir dışı atık karışımı (- 0,75 ")	3	53	43	4
Kabul edilmeyen türetilmiş yakıt altı külleri (3,625 ")	6	3	3	94
Kabul edilmeyen türetilmiş yakıt altı külleri (- 0,625 ")	3	10	3	87
Alüminyum tüpler ile cam kırıntıları	3	1	9	90
Cam kırıntıları (kırılmış aydınlatma lambaları)	1	4	14	82
Elektronik atıklar, büyük	2	5	48	47
Elektronik atıklar, küçük	1	67	14	19
Fe, Al, Zn karışımı	4	10	55	35
Fe, Al, Cu, Pb, Zn karışımı	6	28	30	42
Pirinç dökümhanesi döküm kumları	3	-	12	88
Alüminyum dökümhanesi döküm kumları	6	-	5	95
Yüksek kalitede alüminyum cürufları	3	7	81	12
Düşük kalitede alüminyum cürufları	1	2	5	93
Alüminyum maden posası	4	-	26	74

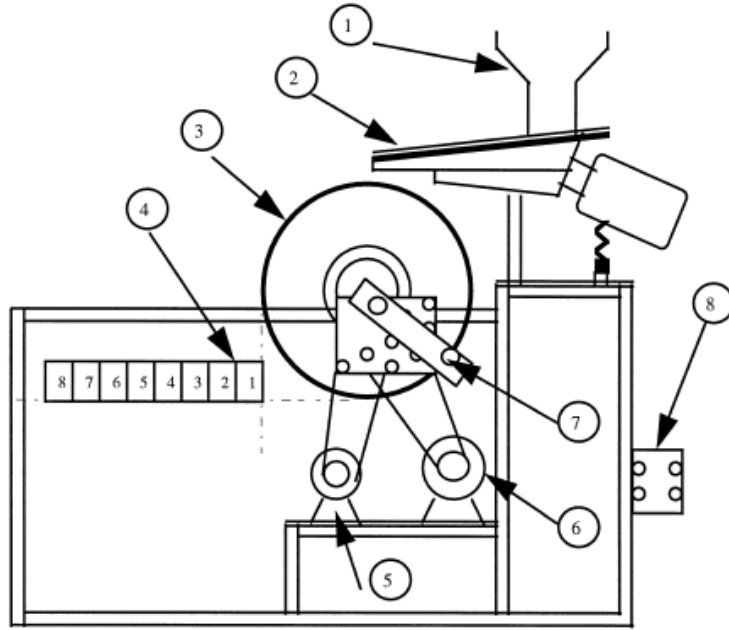
Zhang ve diğerleri [135] çalışmalarında yeni geliştirilmiş bir girdap akımı ayırıcısıyla alüminyumun geri kazanımı incelemiştir. Kırılmış kişisel bilgisayar ve baskılı devre levhası atıkları üzerinde yapılan araştırmada bir yüksek güçlü girdap akımı ayırıcısı kullanılmıştır. Çalışmada materyallerin bu yüksek güçlü girdap akımı

* "0", "-", "+" işaretleri sırasıyla temel, negatif ve pozitif anlamına gelmektedir.

† Rotor genişliği başına birim kapasite t.sa⁻¹.ft⁻¹

ayırıcısından tek seferde geçişiyle kişisel bilgisayar atıklarından %85 saflıkta alüminyum yoğunluğuna ulaşıldığı, besleme oranının dakikada 0,3 kg' a kadar çıkarılmasıyla da %90'ı geçeceği gösterilmiştir. Ayrıca bu yüksek güçlü girdap akımı ayırıcısından önce bir eleme işleminin yapılması ile karışan küçük parçaların elemine edilerek ayırıcının seçiciliğinin artırılacağı da gösterilmiştir.

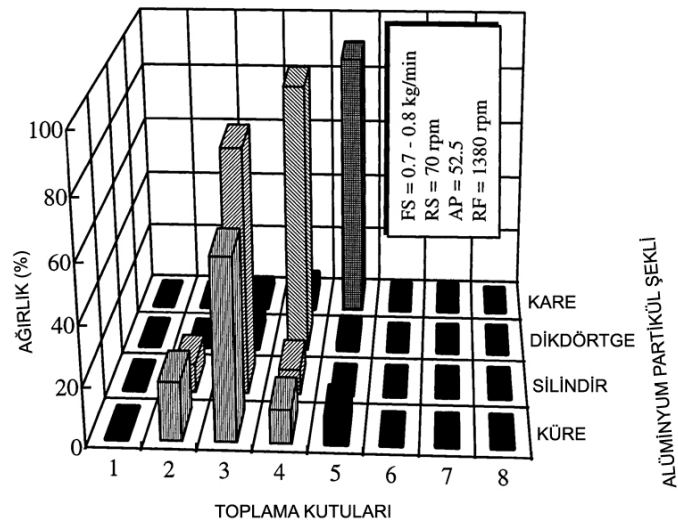
Zhang ve Fossberg [19] çalışmalarında Şekil 5.72'de şematik gösterimi verilen yeni geliştirilmiş bir yüksek güçlü girdap akımı ayırıcısı kullanmışlardır. Hedef ayırmada yer alan parçalama işlemi sonucunda oluşan tane şekil farklılıklarının etkinliğinin araştırılmasıydı. Keskin biçimli saf metal taneler benzer saf metal parçaların kesilmesi vasıtasıyla elde edilmiştir. Örnek olarak kişisel bilgisayar atıkları bir çember öğütücüde öğütülerek alüminyum alaşım taneleri elde edilmiştir. Yüksek güçlü girdap akımı ayırıcısından sonraki materyal dağılımı yüksek güçlü girdap akımı ayırıcısının dış tamburun önüne sekiz toplama kutusu konularak hesaplanmıştır.



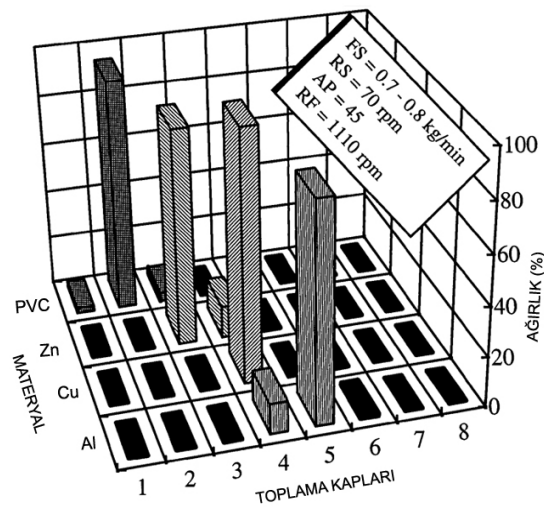
Şekil 5.72: Girdap Akımı Ayırma Deneyinin Şematik Gösterimi (1) Besleme Hunisi (2) Titreşimli Besleyici (3) Tambur (4) Sekiz Toplama Kutusu 500 mm x 80 mm x 100 mm (5) Tambur Tahrik Motoru (6) Devir Tahrik Motoru (7) Ayar Düzenek (8) Kontrol Paneli

Kişisel bilgisayarlar ve baskılı devre levhaları atıklarında yer alan tanelerin şekillerine ait karakteristikler ve ölçümler Zhang ve diğerleri tarafından ayrıntılı olarak tanımlanmıştır [48,136]. Tane boyutları müteakip ayırma işleminde özellikle de girdap akımı ayırma yönteminde kayda değer biçimde etkilidir. Alüminyum tane

şekline bağlı olarak toplama kutularında ağırlığa göre alüminyum dağılımı Şekil 5.73’de görülmektedir. Farklı şekillerdeki alüminyum tanelerinin sapmaları $D_{ss} > D_{rs} > D_{cd} > D_{sp}$ şeklindedir. Burada D_{ss} kare levhaların sapmasını, D_{rs} dörtgen şeritlerin sapmasını, D_{cd} silindirik tanelerin sapmasını ve D_{sp} küresel tanelerin sapmasını ifade etmektedir. Bu nedenle diğer şekillerle kıyaslandığında metal levhaların ve tabakaların sapması en geniş değere ulaştığından, levha ve/veya plaka biçimli taneler elde etmek için bir ayırıştırma tekniği amaçlandığında girdap akımı ayırıcısı esas olarak tercih edilir. Ayrıca Şekil 5.74’de 20 mm × 20 mm × 1 mm boyutunda ve kare şeklindeki Al, Cu, Zn ve PVC taneleri için elde edilen dağılım görülmektedir.

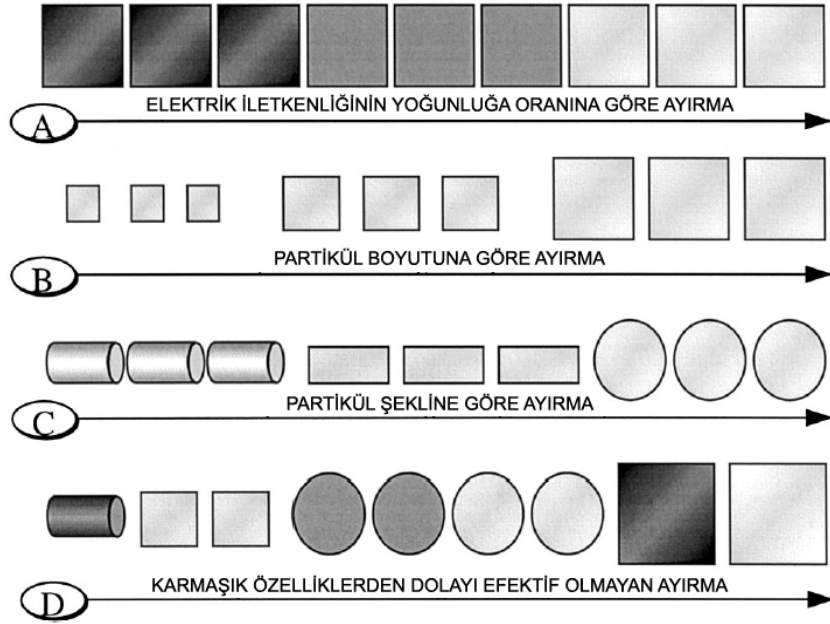


Şekil 5.73: Toplama Kutularındaki Al Dağılımı (FR = Besleme Oranı, ES = Dış Tamburun Açısal Hızı, AP = Manyetik Merdane Ünitesinin Açısal Konumu, RF = Manyetik Alanın Açısal Frekansı)



Şekil 5.74: Toplama Kutularındaki PVC, Zn, Cu ve Al Dağılımı (FR = Besleme Oranı, ES = Dış Tamburun Açısal Hızı, AP = Manyetik Merdane Ünitesinin Açısal Konumu, RF = Manyetik Alanın Açısal Frekansı)

Şekil 5.75’de Zhang ve diğerleri tarafından döner girdap akımı ayırıcısı vasıtasıyla seçilmiş olan metal/metal ayırımı için saptanan elektrik iletkenliğinin yoğunluğa oranına, tane boyutuna, tane şekline ve heterojen materyal beslemesine göre dört ayırma kriterinin davranışı görülmektedir.

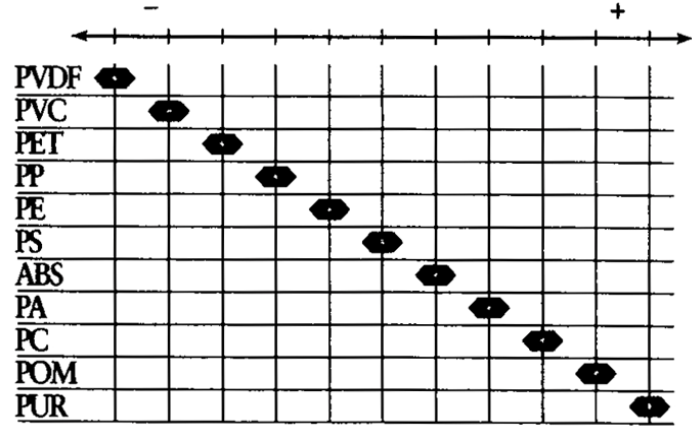


Şekil 5.75: Döner Tip Girdap Akımı Ayırıcısı Vasıtasıyla Seçilen Metal – Metal Ayırımı İçin Dört Ayırma Kriteri

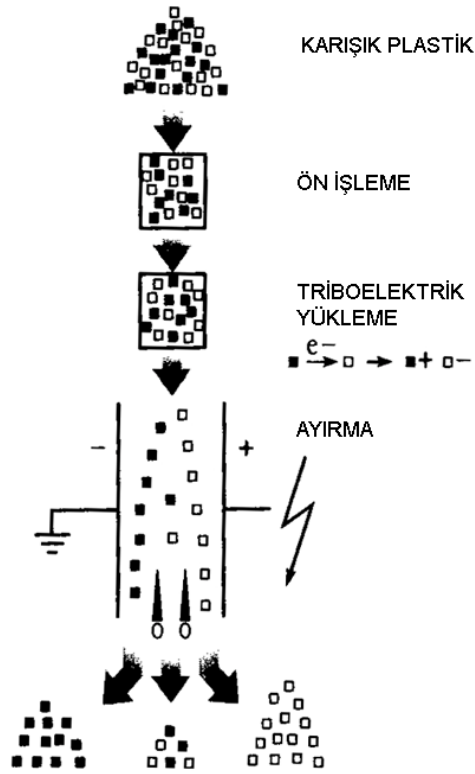
5.5.3 Triboelektrik Ayırma

Farklı tip plastiklerin tane özellikleri çok benzer olduğundan plastiklerin ayrılması sorun teşkil etmektedir. Triboelektrik ayırma plastiklerin sahip oldukları elektriksel özellikleri arasındaki farka göre tasnif edilmesini mümkün kılar. Tablo 3.15’de plastiklerin elektriksel karakteristikleri verilmiştir. Belirgin şekilde farklı elektrostatik yüklere sahip farklı plastiklerin yüklenme durumundaki dizilişleri Şekil 5.76’de görülmektedir [102].

Plastik atıkların işlenmesi konusunda yürütülen araştırmalar triboelektrik elektrostatik ayırmanın tane biçiminden bağımsız olması, düşük enerji tüketimi ve birim zamandaki işleme miktarının yüksek olması gibi birçok avantajının olduğunu göstermiştir [27]. Şekil 5.77’de gibi yüksek voltaj alanı içerisinde serbest düşmeye bırakılan tanelerin yüklenme özelliklerine bağlı olarak ayrılması görülmektedir.



Şekil 5.76: Plastikler İçin Triboelektrik Yüklenme Sıralaması



Şekil 5.77: Triboelektrik Yüklü Plastiklerin Ayrılması

6. GERİ KAZANIM İÇİN TESİS TASARIMI YAKLAŞIMLARI

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için elektrikli ve elektronik ekipman atığının türüne bağlı olarak bir takım adımlar izlenir. Genel olarak izlenen adımlar aşağıda sıralanmıştır [50].

Geri kazanım sürecinin ilk aşamasını mamul ömür sonuna gelmiş ekipmanların nakliyesini de kapsayan geri toplama adımı oluşturur.

İkinci adım, mamulün yeniden kullanılabilmesi için test işlemlerini de kapsayan onarım aşaması oluşturur. Bu aşamada onarım için yedek parçalara ihtiyaç duyulabilir.

Eğer mamulün tamamı bir bütün olarak kullanılamayacaksa, mamulün hasarsız demontajı yapılabilir. Mamulün hedeflenen parçalarına veya bileşenlerine bağlı olarak, mamul parçalarına ve bileşenlerine ayrılır. Elde edilen bileşenlerin ve parçaların yeniden test edilmesi ve muhtemelen onarılması gerekebilir. Bileşenler ve parçalar yeni ve yeniden imal edilecek mamullerde kullanılabileceği yedek parça olarak da kullanılabilirler.

Bazen hasarlı veya kısmi demontaj yapılması söz konusu olabilir. Hasarlı demontaj aşamasında parçaların ve bileşenlerin ayniyetinin korunması gözetilmez. Bu nedenle, bileşenlerin ve parçaların sahip oldukları değerli materyaller geri dönüşüm işleminde değerlendirilir. Bazen hasarlı veya kısmi demontaj farklı bileşenlerin veya parçaların hasarsız demontajını kolaylaştırmak için uygulanır. Hasarlı veya kısmi demontaj ucuz olması ve hasarsız demontaj işlemine göre daha az işçilik hassasiyetine ve daha düşük işçi kalifiyesine gerek olduğundan genellikle tercih edilir.

Bu işlemleri takiben geri dönüşüm için kusurlu veya zararlı olan farklı bileşenlerin veya materyallerin ayrılması işlemi olan ayıklama işlemi yer alır.

Hasarsız ve hasarlı demontaj işlemlerinin ardından mamulün geriye kalan kısmı için parçalama işlemi uygulanır. Parçalama işlemi atık mamulün boyutunun küçültülmesi işlemi olup dövme, kesme, öğütme gibi birçok yolla yerine getirilebilir. Genellikle giderek daha küçük tanelerin sağlanması için birkaç adımdan oluşur.

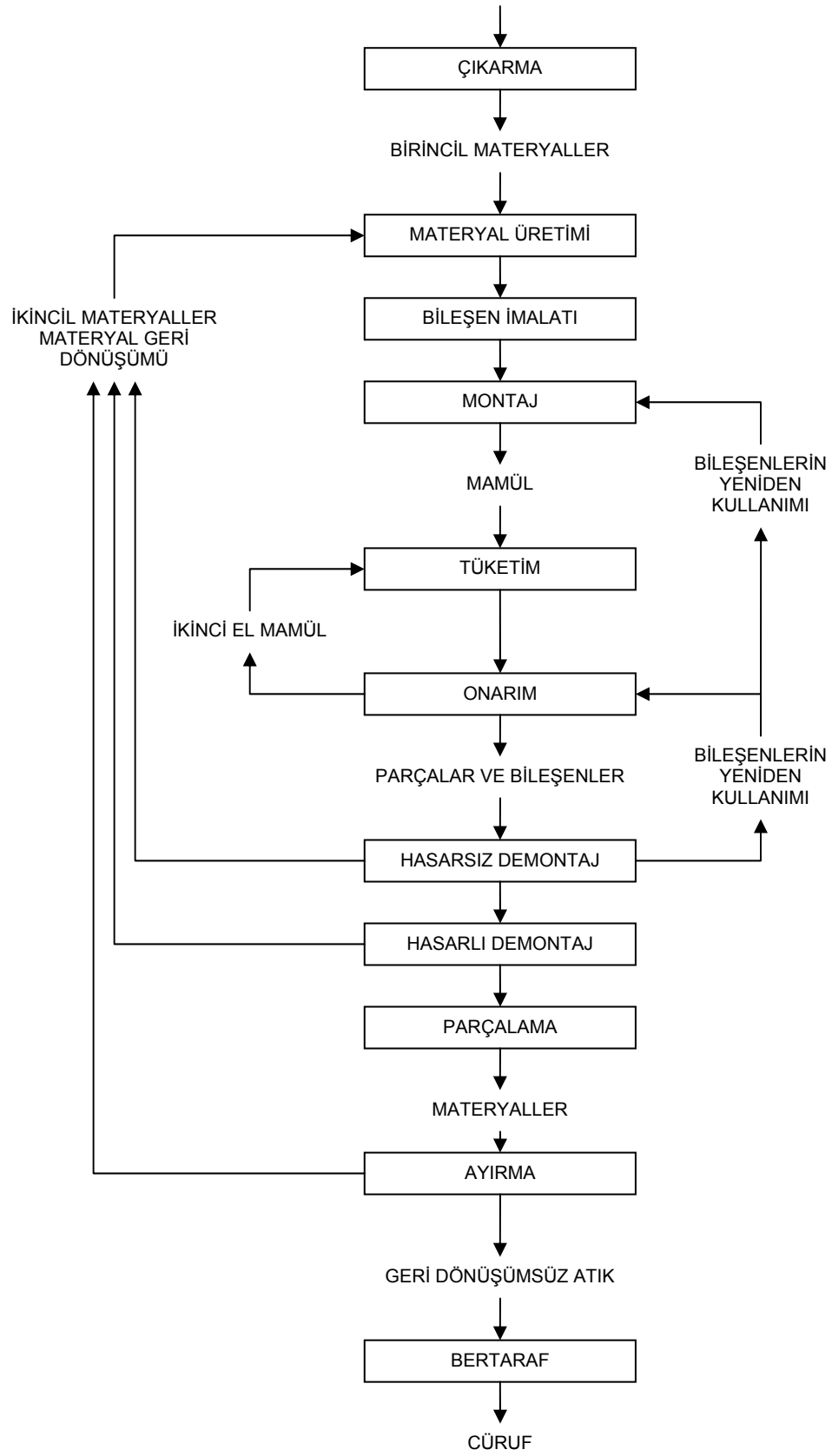
Boyut küçültme işleminden elde edilen yığınlar ayırma işlemiyle materyal kategorilerine göre tasnif edilir. Ayırma işlemlerinde kullanılan yöntemler genel olarak fiziksel, metalürjik ve kimyasal yöntemler olarak sınıflandırılır. Fiziksel yöntemler ile materyallerin sahip oldukları farklı elektromanyetik ve özgül ağırlık gibi materyal özellikleri temel alınarak materyallerin birbirlerinden ayrılması sağlanır. En çok kullanılan fiziksel yöntemler manyetik ve girdap akımı ile ayırma yöntemleridir. Metalürjik ve kimyasal yöntemler ise alaşımlar ve bileşikler gibi karmaşık materyallerin ayrıştırılması için kullanılır. Ayrıştırma işlemleri özel tesislerde gerçekleştirilir.

Ayırma işleminden arta kalan geri dönüşümsüz materyallerin güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi ile bu adımlar sonlanır.

Bu adımlar Şekil 6.1’da verilen mamul ömür çevrimi içerisinde görülmektedir [50].

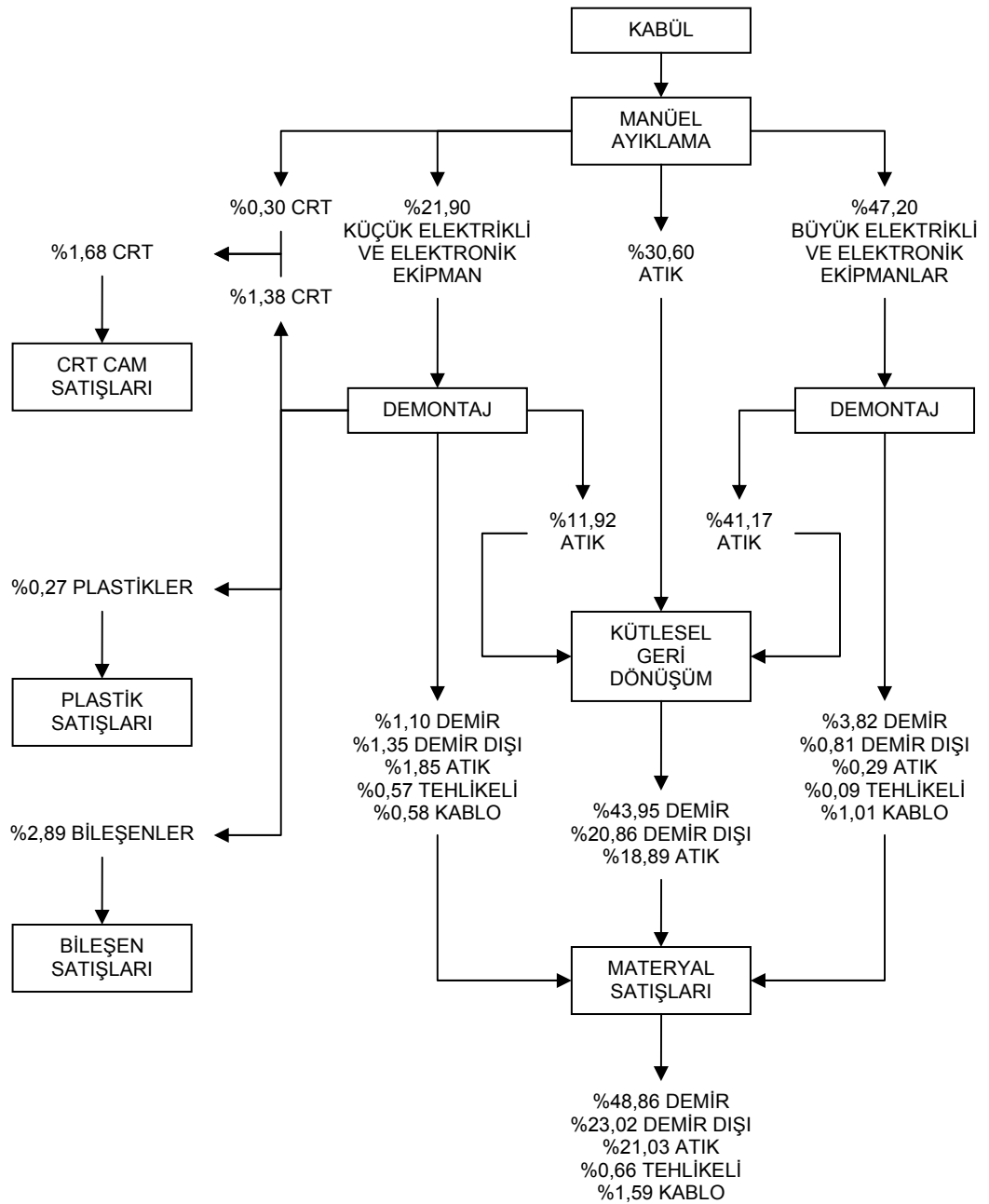
Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümünde kütleli geri dönüşüm yöntemi sıklıkla kullanılır. Kütleli geri dönüşüm yöntemi mamulün bir bütün olarak küçük taneler şeklinde bileşik karışım halinde parçalanıp ardından bir veya birden fazla işlemle ana bileşenlerine ayrılması yöntemidir. Bu gibi işlemler birçok araştırmacı tarafından modellenmiştir [106,137-144]. Kütleli geri dönüşüm proseslerinin modellenmesinde ve analizinde genel olarak şu adımlar izlenir [50]:

- Modelin hedefi belirlenir.
- Edinim, ayıklama, hasarlı ve hasarsız demontaj işlemlerini içeren kütleli geri dönüşüm tesisinin kütle akış diyagramı geliştirilir. Örnek bir kütle akış diyagramı Şekil 6.2’de verilmiştir [106]. Kütle akış diyagramı şartları kütleli geri dönüşüm tesisi işlemlerine taşınır.
- Kütleli geri dönüşüm süreçleri tetkik edilir. Genellikle birbirini izleyen çeşitli parçalama ve ayırma işlemlerinden müteşekkil bir süreçtir. Ayrıca aynı yapı içerisinde materyallerin yeniden parçalandığı ve ayrıldığı muhtelif tekrar işlemlerini içeren muhtemel döngüler olabilir. Bir kütleli geri dönüşüm çevrimi için bir örnek konfigürasyon Şekil 6.3’de sunulmuştur.
- Kütleli geri dönüşüm süreci matematiksel olarak formüle edilir. Bu ifade farklı parçalama ve ayırma işlemlerinin kapasite limitleri gibi kısıtlamaları içerir.

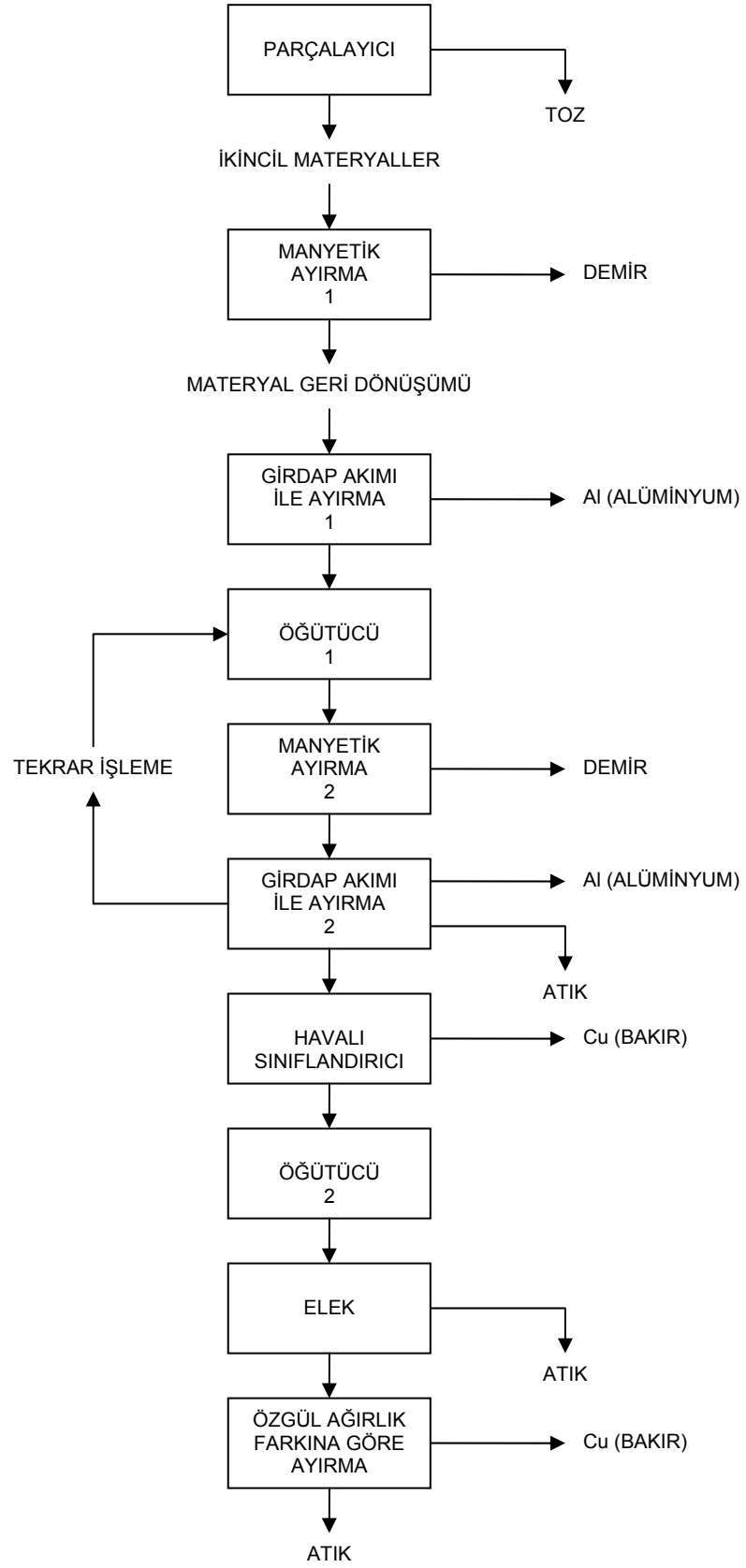


Şekil 6.1: Mamul Ömür Çevrimi

- Ayrıca seçilen farklı ayırma metotlarının geri kazanım verimleri için giriş verileri ve kabuller kullanılır.
- Optimum çözümü sağlamak için model kullanılır. Çoğunlukla matematiksel programlama metotları özellikle lineer programlama ve karma tamsayılı lineer programlama (MILP – Mixed Integer Linear Programming) modelleme için kullanılır. Karşılaştırmalı modelleme ile farklı nitelikteki proses konfigürasyonları birbirleriyle karşılaştırılır ve uygulanır.



Şekil 6.2: Bir EEEA Geri Dönüşüm Tesisi Örneği



Şekil 6.3: Tipik Toptan Geri Dönüşüm Sıralaması

Sodhi ve diğerkleri [137] çalışmalarında kütlesel geri dönüşüm işleminde materyal karışımlarının en efektif şekilde ayrılması için ayırma adımlarının en iyi sırasının belirlenmesini ele almışlardır. Sodhi ve diğerklerine göre ayırma adımlarının sıralanmasında her hangi bir kısıtlama söz konusu olamamakla beraber en uygun çözüm işlenecek materyal karışımına bağlıdır [137].

Örneğin eğer karışım düşük miktarda demir içeriyorsa manyetik ayırma işleminin diğerk işlemlerin sonunda yapılması diğerk tüm sıralamalardan daha ekonomik bir çözüm olacaktır.

Bunun yanı sıra bir yığının işlenmesi için gerekli olan zaman işlenecek toplam hacimle ilişkili olduğundan en iyi ayırma sıralamasının belirlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle en iyi sıralama farklı materyallerin rölatif hacimlerine bağlıdır örneğin farklı oranlarda aynı materyalden oluşan iki mamul için en iyi ayırma sırası farklı olacaktır.

Stuart ve Lu [138,139] kapasite limitleri içerisinde tekrar işleme alternatiflerinin seçimiyle ilgili çalışmışlardır. Stuart ve Lu [138] çalışmalarında bir geri dönüşüm merkezindeki çok sayıdaki benzer mamul için kütlesel geri dönüşüm ve tekrar işleme alternatiflerinin seçimi ile ilgili bir karar verme modeli geliştirmişlerdir. Model kütlesel geri dönüşüm adımlarının belirlenmesi konusunda mali açıdan en uygun seçimin yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımına kütlesel geri dönüşüm prensibi açısından bakılırsa burada cevap bulunması gereken soru geri dönüş tesisinde ne ölçüde bir boyut küçültme ve materyal ayırımı işleminin yapılacağıdır [139]. Bu nedenle geri dönüşüm sisteminin hedefi olarak pahalı işleme yöntemleriyle elde edilen yüksek saflıktaki materyallerin satışı veya sınırlı sayıdaki işleme yöntemiyle elde edilmiş olan karışım halindeki materyallerin satışı ve dış kaynak kullanımı arasında karar verilmesi gerekir.

Burada geri dönüşüm için verilmesi gerekli olan işleme veya satma kararı, imalat için verilmesi gerekli olan imal etme veya satın alma kararına benzetilebilir. Stuart ve Lu [139] çalışmalarında elektronik ekipman atıklarının işlenmesi veya satışı kararının verilebilmesi yanı sıra tek ve sürekli tekrar işleme alternatifi için bir model sunmuşlardır.

Spengler ve diğerleri [106,144] elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı konusunda bir örnek durum çalışması yapmışlardır. Çalışmada karma tamsayılı lineer programlama modeli kullanılarak TV, video kaydedici, kişisel bilgisayar, telefon, telefon santralı ve mobil telefonlar ile bu ekipmanlarda yer alan parçalar gibi elektronik ekipman atıklarının geri kazanım tesisine kabulü, demontajı ve kütleli geri dönüşümü işlemlerini kapsayan bir tümleşik planlama gerçekleştirilmiştir. Materyal akışının kütleli geri dönüşüm birimlerinin başından sonuna kadar tanımlanması, seçilen mamuller için kapasite sınırlarının incelenmesi ve de demontaj ve geri dönüşüm işlemleri arasındaki etkileşimin net bir şekilde ortaya konması çalışmayı öne çıkaran unsurlardır. Modelde bakır, alüminyum, demir temel alınmış diğer materyaller işlem atıkları olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca çalışmada materyal ve elektronik ekipman atıklarının fiyatlarının ve de demontaj ve kütleli geri dönüşüm birimlerinin kapasitelerinin değişimi gibi bir takım senaryolara yer verilmesinin yanı sıra geri dönüşüm için dış kaynak kullanımı da göz önüne alınmıştır.

Reimer ve diğerleri [140] çalışmalarında elektronik ekipmanların mamul ömür sonundaki bertaraf maliyetlerinin optimize edilmesi için karma tamsayılı lineer olmayan programlama (MINLP – Mixed Integer Non-Linear Programming) kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Mamul ömür sonundaki ekipmanların toplama maliyetlerinin minimize edilmesi, hedeflenen bileşenlerin demontajı, kütleli geri dönüşüm işlemi için materyal ayırma sıralaması ve saf metal geri kazanımı için materyal karışımlarının tasfiye edilmesi incelenmiştir.

Çalışmalarında geri alım planlamasını geleneksel imalat planlaması ile karşılaştıran ve tersine tedarik çemberi için bir model geliştiren Lu ve diğerleri [141] kütleli geri dönüşüm için uygulanabilir bir prensip şeması sunmuşlardır. Tablo 6.1’de bu prensipler görülmektedir [141].

Tablo 6.1: Kütleli Geri Dönüşüm Prensipleri

	Planlama Adımı Açıklaması	Performans Ölçüsü
1	Mamul tipine göre değişen toplam materyal geri kazanım değeri belirler	Materyal geri kazanım geliri
2	Mamul tipine göre değişen giren yığın miktarı belirler	Giren mamul gelirleri
3	Mamul yığını ile ilgili stok maliyetleri ve toplam ağırlık belirler	Materyal geri kazanım geliri ve stok alanı
4	Materyallerle ilgili olan müşteri taleplerinin niceliği belirler	Müşteri talebi
5	Belirli bir mamul tipinin hali hazırdaki yığınının işgal ettiği alan belirler	Stok alanı

1 numaralı prensip için yüksek değerli bileşik mamullerin işlenmesi önceliklidir. Burada yüksek değerli ifadesi seçilen büyük miktardaki yüksek değerli materyal içeren mamul tipinden ziyade parçalanmamış mamul tipinin toplam materyal geri kazanım değeri olarak kullanılır. 2 numaralı prensip hâsılât miktarının yüksekliğini göz önüne alır. 3 numaralı prensibe göre alan maliyetleri ile materyal geri kazanımının parasal değeri ve maliyetleri vasıtasıyla toplam değer ve hacim hesaplanır. Materyal geri kazanımından elde edilen tahmini brüt gelirden yığının alan maliyeti çıkarılır. 4 numaralı prensip için müşteri tercihleri ve 5 numaralı prensip için ise hacim önceliklidir.

Reuter ve diğerleri [142] çalışmalarında AB direktiflerince saptanan mamul ömür sonundaki taşıtların geri dönüşüm hedeflerinin uygulanabilir olup olmadığını geri dönüşüm teknolojisinin teknik, ekonomik ve çevresel boyutları ile ele almışlar ve temel teorik prensiplere göre geri dönüşümün limitlerini ortaya koymuşlardır. Pazarın ihtiyaçlarını karşılayabilmek için geri dönüşüm sisteminin performansının optimize edilmesi, geri dönüşümün limitlerini belirleyen çevre kanunları, fiziksel ve kimyasal prensiplere bağlı olarak sistemde yer alan her bir elemanın kendi sınırları içerisindeki faaliyetinin optimize edilmesi ile sağlanır. Bu unsurların toplamı ekonomikliği ve böylelikle mamulün geri dönüştürülebilirliği ve geri kazanılabilirliği ve buradan da geri dönüşüm ve geri kazanım oranını belirler.

Materyal geri kazanımındaki ve geri dönüşümünde etkili olan fiziksel ayırma prensipleri ve enerji geri kazanımında etkili olan termodinamik prensipler nedeniyle %100 materyal geri kazanımı ve %100 enerji geri kazanımı mümkün değildir. Özetle ticari geri dönüşüm sistemleri ile %100 saf materyal elde edilmesi mümkün değildir. Reuter ve diğerlerine göre [142] yasalarca ön görülen geri dönüşüm oranları fizik, termodinamik ve pratik temelde desteklenmelidir aksi takdirde öngörüler yasal ve teknik manada kuşku uyandıracaktır. Bu nedenle uygun istatistiksel doğrulanmış verilerin sağlanmasının şart olduğu ifade edilmiştir..

Krikke ve diğerleri [85] materyal geri dönüşüm planlamasında materyal geri dönüşümünden elde edilen kazancım maksimize etmek amacıyla demontaj planlaması ve maliyet analizi için tahmini dinamik programlama metodu kullanmışlardır.

Çeşitli elektrikli ev aletleri, elektronik mamuller ve çeşitli elektronik atıkların işlendiği tipik bir tesis Şekil 6.2’de tarif edilmiştir. Her mamulün geri dönüşüm hattından tamamıyla geçmesi söz konusu değildir. Prosesin sıralaması tedarikçilere ve pazarın talep ettiği şartlar gibi bir takım unsurlara bağlıdır. Bazı tesisler ikinci el bileşenlerin satışına veya mamullerin yeniden imalatına odaklanmışlardır. Genellikle demontaj kabloların, zararlı bileşenlerin ve akışkanların, CRT ünitelerinin, bazı plastik aksamın, değerli parçaların ve karmaşık bileşenlerin ayıklanması amacıyla ve de küçük bir alanda yürütülür. Farklı geri kazanım tesislerinden alınan ve tesislerin kapasitelerini gösteren veriler Tablo 6.2’de sunulmuştur [145].

Tablo 6.2: Geri Kazanım Tesislerine Ait Veriler

Tesis	Ülke	Kuruluş Yılı	İşlenen Materyaller	Tesis Alanı (m ²)	Kapasite (ton.h ⁻¹)	Kapasite (ton.h ⁻¹)
Takuma	Japonya	1997	Çeşitli Materyaller	105	0.5	3.000
Aprochim	Fransa	1997	Kapasitörler ve Bileşenler	130	0.3	2.000
RECYTECH	Kore	1999	E-Atık	1.350	2.0	11.000
WATCO	Belçika	2002	E-Atık, Alüminyum Bileşenler	-	4.0	25.000
P E G	İtalya	2002	E-Atık, Alüminyum Bileşenler	-	2.0	11.000

Farklı kaynaklara göre derlenmiş olan kütleli geri dönüşüm işlemlerine ait maliyetler Tablo 6.3’de verilmiştir [50].

Tablo 6.3: Geri Dönüşüm İşlemleri Maliyetleri

Faaliyet	Maliyet (\$·kg ⁻¹)
Küçük cihazların parçalanması	0,1 – 0,15
Parçalama	0,05
Büyük parçaların parçalanması	0,019
Öğütme	0,02
Transport*	0,045
Depolama†	0,001 – 0,005 (Fe)
	0,008 – 0,04 (Plastik)

* Mesafeye ve taşıma metoduna bağlıdır. Ortalama mesafe varsayılmıştır.

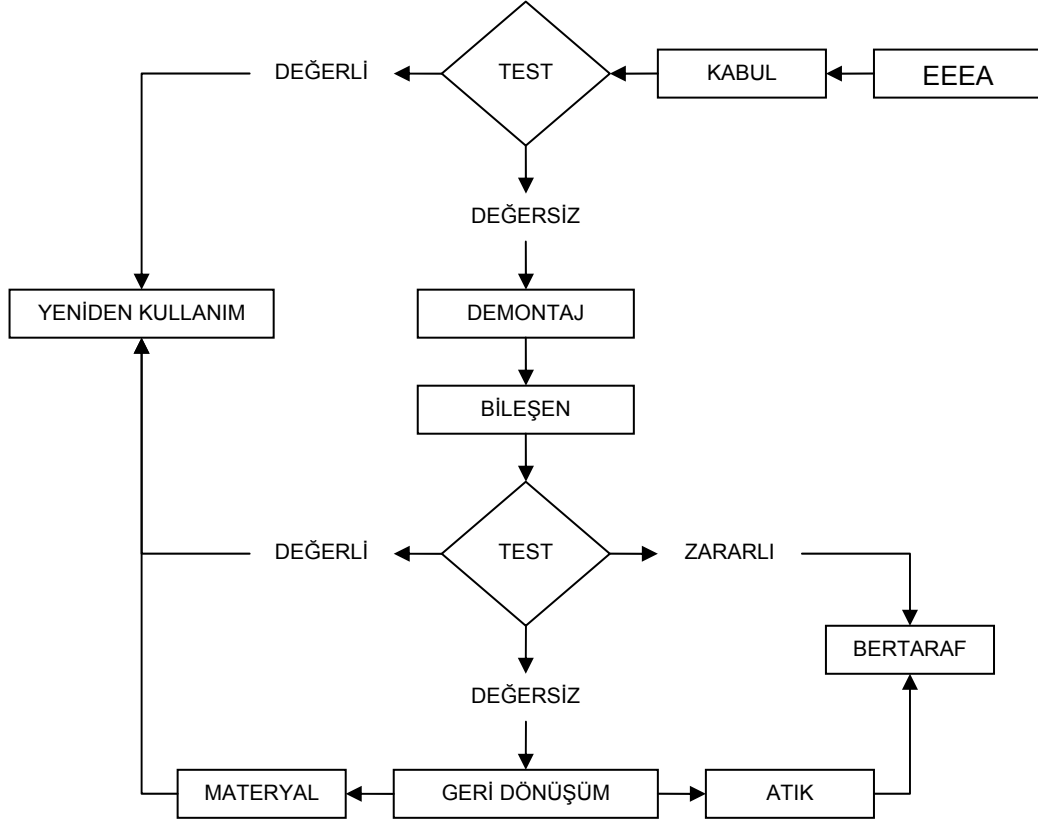
† Depolama süresine bağlıdır. Hacim etkisinden dolayı maliyet özgül ağırlıkla ters orantılıdır.

7. GERİ KAZANIM İÇİN TESİS KONSTRÜKSİYONU

7.1 Fonksiyon Strüktürleri ve Kabul Edilen Tasarım Prensipleri

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının miktarının ve çeşitliliğinin sürekli olarak artması, özellikle de taşınabilir elektrikli ve elektronik ekipmanların sayısındaki artış, ve bunun doğal sonucu olarak bu ekipmanların atık miktarının da yeni ekipmanların pazarda yerini almasıyla orantılı olarak artması, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının çevre problemlerine neden olacak zararlı ve tehlikeli materyaller içermelerinin yanı sıra yeniden değerlendirilebilecek değerli materyaller de içermeleri, kanunların çok daha zorlaşması, atıklar için depolama alanlarının daha maliyetli olması, çevre bilincinin gelişmesi, bu ekipman atıklarının geri dönüşümü sırasında yalnızca değerli metallerin ayrılması için elverişli olan pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrometalurjik metotlar yerine fiziksel metotların kullanılmasının gerekliliği, bu atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanılmasıyla kayda değer enerji ve materyal tasarruflarının sağlanması ve bu atıkların toplanması, geri dönüşümü ve yeniden kullanılmasının diğer ülkelerde olduğu gibi Türkiye için de yakın bir gelecekte yasal bir zorunluluk haline geleceğinden dolayı elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir bir fiziksel ayırma teknolojisi gereklidir. Şu an için Türkiye’de elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının toplanması, geri dönüşümü ve yeniden değerlendirilmesi çok yeni bir konu olmasına rağmen, bu alandaki boşluk, ticari kaygılar, mühendislik yaklaşımları, ahlaki ve gelecekte oluşacak yasal sorumluluklar dikkate alındığında bu konunun bir çok önemli unsuru ihtiva ettiği görülmektedir.

Öncelikli olarak geri kazanım tesisinin temel fonksiyonlarını belirleyen temel prensipleri ve sistemin alt fonksiyonlarını belirleyen ve bu alt fonksiyonların birbirleri ile olan ilişkisini gösteren fonksiyon strüktürlerinin oluşturulması gereklidir. Tasarımı düşünülen geri kazanım tesisinin temel fonksiyon strüktürü Şekil 7.1’de verilmiştir.



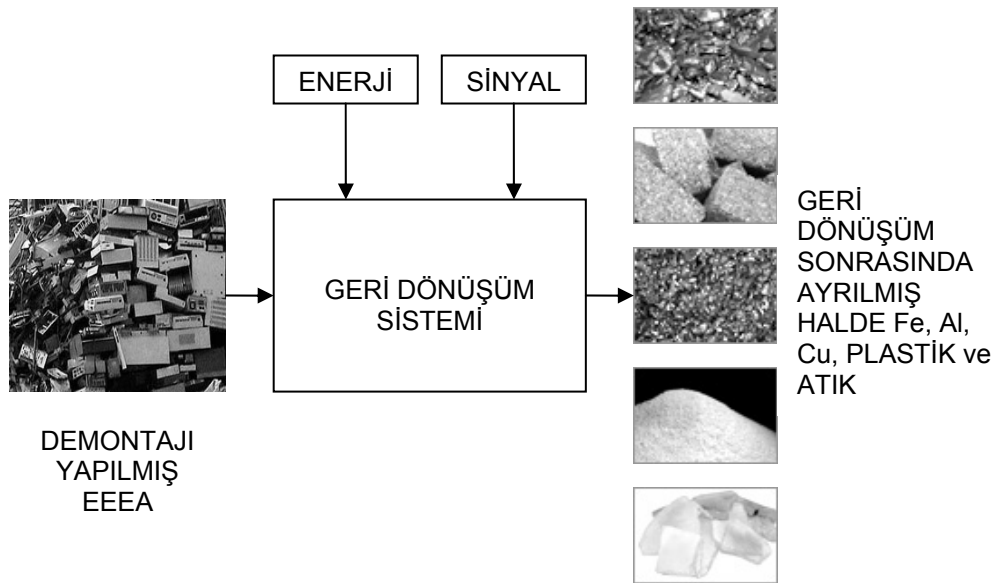
Şekil 7.1: Geri Kazanım Tesisi Temel Fonksiyon Strüktürü

Öncelikli olarak yapılması gerekli olan geri kazanım tesisine kabul edilecek olan elektrikli ve elektronik ekipman atığı tiplerinin belirlenmesidir. Beyaz eşya, kahverengi eşya ve gri eşya grubuna dahil dörder mamul tipi toplam 12 mamulün geri kazanım tesisine kabul edildiği varsayılp bunların ayrı ayrı geri kazanılabilirliği incelenecektir. Bu ekipman tipleri beyaz eşya grubu için buzdolabı, çamaşır makinesi, dondurucu ve tost makinesi, kahverengi eşya grubu için plak çalar, video kayıt cihazı, kaset çalar ve TV, gri eşya grubu içinse monitör, yazıcı, PC ve mobil telefon olarak belirlenmiştir. Kabul aşamasından sonra değerli olarak tanımlanan ekonomik değeri olan ekipmanların test alanında test edilerek yeniden kullanım için ayrılması ve geri kalan ekipmanların ise demontaj edilmesi için demontaj alanına sevkıyatı gereklidir. Demontaj alanında mamul mekanik takımlar yardımıyla demontaj yapılarak bileşenlerine ayrılır ve bileşenler zararlı, değerli ve değersiz olarak sınıflandırılır. Ekonomik değer taşıyan değerli olarak sınıflandırılan bileşenler test edilerek yeniden kullanım için ayrılır, zararlı bileşenler bertaraf edilir ve geri kalan bileşenler ise geri dönüşüm işlemine tabi tutulur. Tablo 7.1’de belirlenen 12 mamul tipi için geri dönüşüm öncesi demontaj yapılarak ayrılması gerekli olan bileşenler verilmiştir.

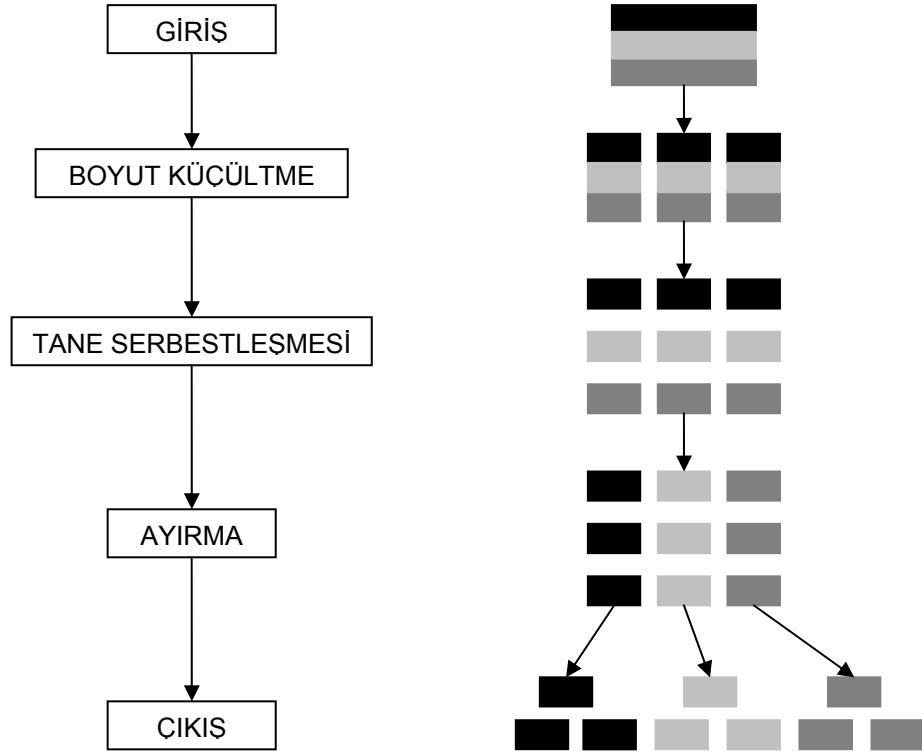
Tablo 7.1: Seçilen Mamul Tipleri İçin Demontajı Gerekli Olan Bileşen

Mamul	Bileşenler
Buzdolabı	Elektrikli aksam, CFC, akışkanlar
Çamaşır Makinesi	Elektrikli aksam, beton
Dondurucu	Elektrikli aksam, CFC, akışkanlar
Tost Makinesi	-
Plak Çalar	Baskılı devre levhası
Video Kaydedici	Baskılı devre levhası
Kaset Çalar	Baskılı devre levhası
TV	Baskılı devre levhası, Katot Işını Tüpü
Monitör	Baskılı devre levhası, Katot Işını Tüpü
Yazıcı	Baskılı devre levhası, Kartuş
Kişisel Bilgisayar	Baskılı devre levhası
Mobil Telefon	Baskılı devre levhası, Pil

Zararlı ve değerli bileşenleri ayrılan elektrikli ve elektronik ekipman atığı geri dönüşüm işlemine tabi tutulur. Önceki bölümlerde yer alan anahtar bulgulara dayanarak elektrikli ve elektronik ekipmanların mamul ömür sonunda yeniden değerlendirilebilmesine imkân sağlayacak; ısıl işlem içermeyen, tamamı kuru ortamda gerçekleştirilen, bir dizi kademededen oluşmuş, mekanik ve fiziksel proseslere dayanan ve saatte 1 ton materyal işleyecek bir geri dönüşüm tesisi, tasarlanacak sistemin temel prensipleri olarak belirlenmiştir. Geri dönüşüm sistemi için oluşturulan temel fonksiyon ve alt fonksiyon strüktürleri sırasıyla Şekil 7.2’de ve Şekil 7.3’de verilmiştir.



Şekil 7.2: Temel Fonksiyon Strüktürü



Şekil 7.3: Alt Fonksiyon Strüktürü

Sistemin ana girdisi olan elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının içerdiği materyal tiplerinin ve bunların miktarlarının saptanması ve geri dönüşüm sonunda elde edilecek materyal tiplerinin belirlenmesi geri dönüşüm sistemi tasarımı için öncelikli işlemdir. Geri dönüşüm sistemi için Fe, Al, Cu ve Plastikler hedef materyaller olarak belirlenmiştir. Sisteme kabul edilen ekipman tiplerinin hedeflenen materyal tiplerine göre içerdikleri materyal miktarları Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 4.5 kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7.2 ve Tablo 7.3’de verilmiştir. Tablo 7.2’de montaj edilen bileşenlerin ve diğer materyallerin miktarları ve Tablo 7.3’de ise yalnızca hedeflenen materyallerin miktarları hacim değerleri de dahil olmak üzere verilmiştir.

Tablo 7.2: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları

	Buzdolabı		Çamaşır Makinesi		Dondurucu		Tost Makinesi	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	36,10	11,9130	53,90	43,1200	35,30	12,9551	56,00	0,6160
Cu	1,00	0,3300	1,30	1,0400	1,00	0,3670	5,00	0,0550
Al	7,50	2,4750	1,40	1,1200	11,70	4,2939	2,00	0,0220
Plastik	12,60	4,1580	5,50	4,4000	8,60	3,1562	36,00	0,3960
Demontaj	36,90	12,1770	33,00	26,4000	28,10	10,3127	0,00	0,0000
Diğer	5,90	1,9470	4,90	3,9200	15,30	5,6151	1,00	0,0110
Toplam	100,00	33,0000	100,00	80,0000	100,00	36,7000	100,00	1,1000

Tablo 7.2: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları (Devam)

	Plak Çalar		Video Kaydedici		Kaset Çalar		TV	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	11,00	0,2310	54,00	2,0520	43,00	0,9675	7,80	1,9110
Cu	7,00	0,1470	7,00	0,2660	5,00	0,1125	4,90	1,2005
Al	1,00	0,0210	1,00	0,0380	1,00	0,0225	2,00	0,4900
Plastik	67,00	1,4070	20,00	0,7600	38,00	0,8550	34,20	8,3790
Demontaj	11,00	0,2310	16,00	0,6080	11,00	0,2475	51,10	12,5195
Diğer	3,00	0,0630	2,00	0,0760	2,00	0,0450	0,00	0,0000
Toplam	100,00	2,1000	100,00	3,8000	100,00	2,2500	100,00	24,5000

Tablo 7.2: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları (Devam)

	Monitör		Yazıcı		PC		Mobil Telefon	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	15,40	1,2320	39,00	2,7300	19,00	0,6973	3,00	0,0048
Cu	8,50	0,6800	13,00	0,9100	1,00	0,0367	15,00	0,0240
Al	5,10	0,4080	0,00	0,0000	4,00	0,1468	7,00	0,0112
Plastik	17,60	1,4080	36,00	2,5200	41,00	1,5047	49,00	0,0784
Demontaj	53,10	4,2480	0,00	0,0000	25,00	0,9175	26,00	0,0416
Diğer	0,30	0,0240	12,00	0,8400	10,00	0,3670	0,00	0,0000
Toplam	100,00	8,0000	100,00	7,0000	100,00	3,6700	100,00	0,1600

Tablo 7.3: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri

	g.cm ⁻³	Buzdolabı				Çamaşır Makinesi			
		%	kg	%	cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³
Fe	7,86	63,11	11,91	25,29	1515,65	86,80	43,12	56,29	5486,01
Cu	8,96	1,75	0,33	0,61	36,83	2,09	1,04	1,19	116,07
Al	2,70	13,11	2,48	15,30	916,67	2,25	1,12	4,26	414,81
Plastik	1,18	22,03	4,16	58,80	3523,73	8,86	4,40	38,26	3728,81
Toplam		100,00	18,88	100,00	5992,87	100,00	49,68	100,00	9745,70

Tablo 7.3: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri (Devam)

	g.cm ⁻³	Dondurucu				Tost Makinesi			
		%	kg	%	cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³
Fe	7,86	62,37	12,96	27,68	1648,23	56,57	0,62	18,30	78,37
Cu	8,96	1,77	0,37	0,69	40,96	5,05	0,06	1,43	6,14
Al	2,70	20,67	4,29	26,71	1590,33	2,02	0,02	1,90	8,15
Plastik	1,18	15,19	3,16	44,92	2674,75	36,36	0,40	78,36	335,59
Toplam		100,00	20,77	100,00	5954,27	100,00	1,09	100,00	428,25

Tablo 7.3: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri (Devam)

	g.cm ⁻³	Plak Çalar				Video Kaydedici			
		%	kg	%	cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³
Fe	7,86	12,79	0,23	2,36	29,39	65,85	2,05	27,51	261,07
Cu	8,96	8,14	0,15	1,32	16,41	8,54	0,27	3,13	29,69
Al	2,70	1,16	0,02	0,62	7,78	1,22	0,04	1,48	14,07
Plastik	1,18	77,91	1,41	95,70	1192,37	24,39	0,76	67,88	644,07
Toplam		100,00	1,81	100,00	1245,95	100,00	3,12	100,00	948,90

Tablo 7.3: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri (Devam)

	Kaset Çalar					TV			
	g.cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³
Fe	7,86	49,43	0,97	14,17	123,09	15,95	1,91	3,17	243,13
Cu	8,96	5,75	0,11	1,45	12,56	10,02	1,20	1,75	133,98
Al	2,70	1,15	0,02	0,96	8,33	4,09	0,49	2,37	181,48
Plastik	1,18	43,68	0,86	83,42	724,58	69,94	8,38	92,71	7100,85
Toplam		100,00	1,96	100,00	868,56	100,00	11,98	100,00	7659,44

Tablo 7.3: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri (Devam)

	Monitör					Yazıcı			
	g.cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³
Fe	7,86	33,05	1,23	9,94	156,74	44,32	2,73	13,44	347,33
Cu	8,96	18,24	0,68	4,81	75,89	14,77	0,91	3,93	101,56
Al	2,70	10,94	0,41	9,58	151,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Plastik	1,18	37,77	1,41	75,67	1193,22	40,91	2,52	82,63	2135,59
Toplam		100,00	3,73	100,00	1576,97	100,00	6,16	100,00	2584,48

Tablo 7.3: Seçilen Mamullerin Materyal Miktarları ve Hacim Değerleri (Devam)

	PC					Mobil Telefon			
	g.cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³	%	kg	%	cm ⁻³
Fe	7,86	29,23	0,70	6,24	88,72	4,05	0,0048	0,83	0,61
Cu	8,96	1,54	0,04	0,29	4,10	20,27	0,0240	3,63	2,68
Al	2,70	6,15	0,15	3,82	54,37	9,46	0,0112	5,61	4,15
Plastik	1,18	63,08	1,50	89,65	1275,17	66,22	0,0784	89,93	66,44
Toplam		100,00	2,39	100,00	1422,35	100,00	0,1184	100,00	73,88

Geri dönüşüm sisteminin boyut küçültme, tane serbestleşmesi ve ayırma fonksiyonlarını yerine getirecek olan sistem elemanlarının belirlenebilmesi için, hedef materyallerin fiziksel özelliklerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Hedeflenen materyallerin fiziksel karakteristikleri ele alınarak her bir materyal için ayırt edici fiziksel özellikler tespit edilir. Tespit edilen ayırt edici fiziksel özellikler dikkate alınarak sistemde kullanılabilecek ayırma makinelerinin seçimi yapılır. Tablo 3.13, Tablo 3.14 ve Tablo 3.15 kullanılarak hedef materyallerin fiziksel özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 7.4’de verilmiştir.

Tablo 7.4: Seçilen Mamullerin Materyal Özellikleri (Fiziksel)

	Manyetik Özellik	Elektriksel Özellik	Yoğunluk	Elektriksel İletkenlik	Elektriksel İletkenliğin Yoğunluğa Oranı
	-	-	kg.m ⁻³	m ⁻¹ .Ω ⁻¹	m ² .Ω ⁻¹ .kg ⁻¹
Fe	Ferromanyetik	İletken	7,86×10 ³	9,33×10 ⁶	1,19×10 ³
Al	Paramanyetik	İletken	2,70×10 ³	37,70×10 ⁶	13,96×10 ³
Cu	Diyamanyetik	İletken	8,96×10 ³	59,60×10 ⁶	6,65×10 ³
Plastik	Diyamanyetik	Yalıtkan	0,90×10 ³ – 1,43×10 ³	-	-

Tablo 7.4’de yer alan seçilen materyallerin fiziksel özelliklerine ait değerler ve bilgiler göz önüne alınarak her bir materyalin diğer materyallere ve materyal karışımına göre ayırt edici fiziksel özellikleri için kullanılabilecek kuru ayırma yöntemi alternatifleri Tablo 7.5’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.5: Materyal İçeriğine Bağlı Ayırıcı Alternatifleri

	Al	Cu	Plastik	Karışım
Fe	Manyetik Girdap Akımı Havalı Sınıflandırıcı	Manyetik Girdap Akımı	Manyetik Girdap Akımı Havalı Sınıflandırıcı	Manyetik Girdap Akımı
Al	-	Girdap Akımı Elektrostatik Havalı Sınıflandırıcı	Girdap Akımı Elektrostatik	Girdap Akımı Elektrostatik Havalı Sınıflandırıcı
Cu	-	-	Girdap Akımı Elektrostatik Havalı Sınıflandırıcı	Girdap Akımı Elektrostatik
Plastik	-	-	-	Girdap Akımı Elektrostatik Havalı Sınıflandırıcı

Tablo 7.4 ve Tablo 7.5 birlikte yorumlanacak olursa her bir materyal için birden fazla ayırma yönteminin kullanılabileceği görülmektedir. Bunun nedeni materyal ayırma yönteminin ve ayırıcının seçiminin ayrılacak olan materyal karışımına bağlı olmasıdır. Örneğin demir için materyal karışımı içerisinde bakırın olması efektif bir ayırmanın sağlanabilmesi için havalı sınıflandırıcıların seçimine engel oluştururken ayrılacak olan materyal karışımı içerisinde bakırın bulunmaması bu yöntemlerin kullanılabilmesine imkân sağlar. Bu nedenle demirin manyetik duyarlılığı ayırt edici bir özellik olarak ortaya çıkar ve birçok geri kazanım tesisinde de demirin ayrılması için manyetik ayırıcılar tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra girdap akımı ile ayırmada manyetik ayırıcıların birlikte kullanılması demir için manyetik ayırıcıların yanı sıra girdap akımı ayırıcılarının da kullanılabilmesine olanak tanır.

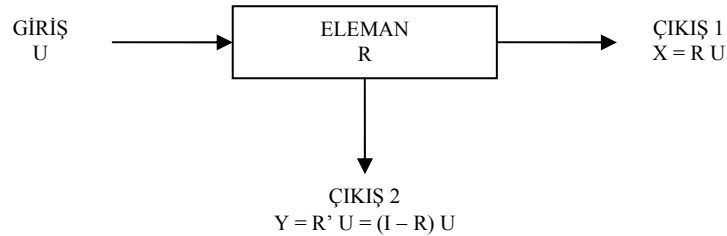
Alüminyum içinde benzer durum söz konusudur. Materyal karışımı içerisinde plastiklerin bulunup bulunmaması alüminyumun materyal karışımı içerisinden efektif olarak ayrılabilmesi için havalı sınıflandırıcıların seçimine etki eder. Alüminyum için girdap akımı ayırıcıların veya elektrostatik ayırıcılarının kullanılması durumunda ise bakırın materyal karışımı içerisinde olup olmaması etkilidir. Alüminyumun ve bakırın elektriksel iletkenliklerinin yoğunluklarına oranları karşılaştırılırsa, aynı boyuttaki alüminyum ve bakır taneleri üzerine uygulanacak elektrik şarjının oluşturacağı kaldırma kuvvetinin alüminyum için daha büyük olacağı görülür.

Ayırma yönteminin ve ayırıcının seçiminde boyut faktörü önemli diğer bir parametre olarak karşımıza çıkar. Geri dönüşüm sisteminde kullanılması muhtemel ayırma ve boyut küçültme makineleri için çalışılabilir tane boyutu kriterleri Tablo 7.6'de verilmiştir.

Tablo 7.6: Boyut Küçültme ve Ayırma Yöntemleri İçin Tane Boyutu Kriterleri

Ayırıcı (Kuru Ortamda)	Boyut (mm)	1500	100	25	15	10	5	1	0,1	0,07	0,001
Kırıcı	-1500 +5										
Öğütücü	-25 +0,001										
Elek	-100 +0,1										
Havalı Sınıflandırıcı	-10 +1										
Siklonlar	-0,5 +0,001										
DAŞ* Tamburlu Manyetik	-10 +0,1										
DAŞ Bantlı Manyetik	-15 +5										
YAŞ† Tamburlu Manyetik	-100 +0,07										
YAŞ Bantlı Manyetik	-10 +0,1										
Girdap Akımı Ayırıcı	-10 +5										
Elektrostatik Ayırıcı	-5 +0,1										

Geri dönüşüm sistemi tasarımının önemli aşamalarından biri de materyal akış diyagramını içeren ve sistem elemanlarının sıralamasının belirlenmesine yardımcı olacak olan sistem modelinin geliştirilmesidir [98,102,106,138,139,142-144]. Kütle korunumu kanununa göre geri dönüşüm sistemine giren ve çıkan materyal miktarı eşit olacağından geri dönüşüm sisteminin materyal akış diyagramı kütle korunumu kanununa bağlı kalarak oluşturulabilir. Sistemde yer alan her bir eleman için geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu metodu kullanılarak sistem modeli oluşturulabilir [98]. Geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu, birim elemana giren materyal karışımı içerisinde yer alan demir, alüminyum, bakır, plastik gibi her bir materyalin birim elemandan çıktıktan sonraki dağılımını gösteren bir çapraz matris olarak tanımlanabilir. Şekil 7.4'de birim eleman için bir model verilmiştir [98].



Şekil 7.4: Birim Eleman Modeli

* DAŞ: Düşük Alan Şiddetli

† YAŞ: Yüksek Alan Şiddetli

Sistem girişi, sisteme giren materyallerin miktarlarını gösteren U vektörü ile tanımlanmıştır. Sistem çıkışları, sistemden çıkan materyallerin miktarlarını gösteren X ve Y vektörleriyle tanımlanmıştır. U, X ve Y vektörleri sırasıyla denklem 7.1, 7.2 ve 7.3’de verilmiştir.

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ . \\ . \\ . \\ u_n \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ . \\ . \\ . \\ x_n \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

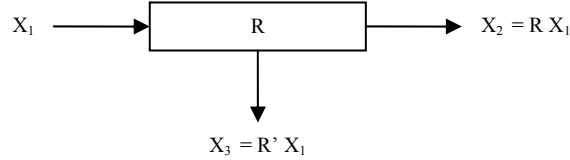
$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ . \\ . \\ . \\ y_n \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu matrisi R ve tamamlayıcı matrisi R’ ise denklem 7.4 ve 7.5’de verilmiştir.

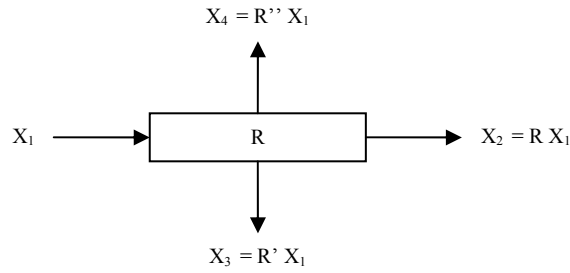
$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & . & . & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & . & . \\ . & 0 & . & . & . \\ . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & 0 & r_n \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

$$R' = I - R = \begin{bmatrix} 1-r_1 & 0 & . & . & 0 \\ 0 & 1-r_2 & 0 & . & . \\ . & 0 & . & . & . \\ . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & 0 & 1-r_n \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

R geri dönüşüm fonksiyonu transfer matrisi değerleri saha verilerinden yararlanılarak deneysel olarak veya analitik olarak belirlenir. Geri dönüşüm sistemi elemanları için çeşitli kaynaklara göre derlenmiş olan ve kabul edilen R geri dönüşüm fonksiyonu transfer matrisi değerleri Tablo 7.7’de verilmiştir [98,102,120]. Ayrıca geri dönüşüm sisteminde yer alabilecek her bir eleman için birim eleman modelleri Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’de verilmiştir.



Şekil 7.5: Kırıcı, Elek, Havalı Sınıflandırıcı, Siklon ve Manyetik Ayırıcı İçin Birim Eleman Modeli



Şekil 7.6: Girdap Akımı Ayırıcı ve Elektrostatik Ayırıcı İçin Birim Eleman Modeli

Tablo 7.7: Geri Dönüşüm Fonksiyonu Transfer ve Tamamlayıcı Matrisi

Sistem Elemanı	Fe	Cu	Al	Plastik	Diğer
Kırıcı (R_k)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kırıcı (R_k')	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Elek (R_e)	0,90	0,80	0,80	0,90	0,80
Elek (R_e')	0,10	0,20	0,20	0,10	0,20
Havalı Sınıflandırıcı (R_{hs})	0,96	0,90	0,50	0,02	0,96
Havalı Sınıflandırıcı (R_{hs}')	0,04	0,10	0,50	0,98	0,04
Siklon (R_s)	1,00	1,00	0,02	0,00	0,96
Siklon (R_s')	0,00	0,00	0,98	1,00	0,04
Girdap Akımı Ayırıcı (R_g)	0,10	0,13	0,01	1,00	0,96
Girdap Akımı Ayırıcı (R_g')	0,00	0,87	0,99	0,00	0,02
Girdap Akımı Ayırıcı (R_g'')	0,90	0,00	0,00	0,00	0,02
Elektrostatik Ayırıcı (R_{es})	0,98	0,11	0,01	0,02	0,96
Elektrostatik Ayırıcı (R_{es}')	0,02	0,87	0,99	0,00	0,02
Elektrostatik Ayırıcı (R_{es}'')	0,00	0,02	0,00	0,98	0,02
Düşük Alan Yoğunluklu Manyetik Ayırıcı (R_{mdas})	0,10	1,00	1,00	1,00	0,98
Düşük Alan Yoğunluklu Manyetik Ayırıcı (R_{mdas}')	0,90	0,00	0,00	0,00	0,02
Yüksek Alan Yoğunluklu Manyetik Ayırıcı (R_{mvas})	0,10	1,00	0,98	1,00	0,96
Yüksek Alan Yoğunluklu Manyetik Ayırıcı (R_{mvas}')	0,90	0,00	0,02	0,00	0,04

Tablo 7.7’de yer alan değerler matris formunda yazılabilir. Buna göre kırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.6 ve 7.7’de verilmiştir. Kırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.8 ve 7.9’da gösterilmiştir.

$$R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

$$R_k' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

$$R_k + R_k' = I \quad (7.8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Benzer olarak elek için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.10 ve 7.11’de verilmiştir. Elek için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.12 ve 7.13’de gösterilmiştir.

$$R_e = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

$$R_e' = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

$$R_e + R_e' = I \quad (7.12)$$

$$\begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Havalı sınıflandırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.14 ve 7.15’de verilmiştir. Havalı sınıflandırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.16 ve 7.17’de gösterilmiştir.

$$R_{hs} = \begin{bmatrix} 0,96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

$$R_{hs}' = \begin{bmatrix} 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

$$R_{hs} + R_{hs}' = I \quad (7.16)$$

$$\begin{bmatrix} 0,96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

Siklon için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.18 ve 7.19’da verilmiştir. Siklon için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.20 ve 7.21’de gösterilmiştir.

$$R_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

$$R_s' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

$$R_s + R_s' = I \quad (7.20)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

Girdap akımı ayırıcısı için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.22, 7.23 ve 7.24’de verilmiştir. Girdap akımı ayırıcısı için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.25 ve 7.26’da gösterilmiştir.

$$R_g = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

$$R_g' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

$$R_g'' = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

$$R_g + R_g' + R_g'' = I \quad (7.25)$$

$$\begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.26)$$

Elektrostatik ayırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.27, 7.28 ve 7.29'da verilmiştir. Elektrostatik ayırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.30 ve 7.31'de gösterilmiştir.

$$R_{es} = \begin{bmatrix} 0,98 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

$$R_{es}' = \begin{bmatrix} 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

$$R_{es}'' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

$$R_{es} + R_{es}' + R_{es}'' = I \quad (7.30)$$

$$\begin{bmatrix} 0,98 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.32 ve 7.33'de verilmiştir. Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.34 ve 7.35'de gösterilmiştir.

$$R_{mdaş} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,98 \end{bmatrix} \quad (7.32)$$

$$R_{mdaş}' = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

$$R_{mdaş} + R_{mdaş}' = I \quad (7.34)$$

$$\begin{bmatrix} 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,98 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu transfer ve tamamlayıcı matrisleri sırasıyla denklem 7.36 ve 7.37'de verilmiştir. Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı için geri dönüşüm fonksiyonu ve tamamlayıcı matrislerinin toplamının birim matrise eşit olduğu denklem 7.38 ve 7.39'da gösterilmiştir.

$$R_{myaş} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \quad (7.36)$$

$$R_{myaş}' = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} \quad (7.37)$$

$$R_{myaş} + R_{myaş}' = I \quad (7.38)$$

$$\begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.39)$$

Materyal karışımının içerdiği materyallerin miktarları göz önünde bulundurularak sistem elemanlarının sıralaması için en uygun çözümün oluşturulması amaçlanır [137]. Kapasite hedefi olan saatte 1 ton materyal işlenmesi için 12 mamul sınıfına ait kabul edilen mamul dağılımı ve buna bağlı olarak hesaplanan materyal miktarları Tablo 7.8’de ve materyal miktarı toplamaları Tablo 7.9’de verilmiştir.

Tablo 7.8: Kabul Edilen Mamul Adetleri ve Materyal Miktarları

	Buzdolabı		Çamaşır Makinesi		Dondurucu		Tost Makinesi	
	4 Adet		2 Adet		3 Adet		80 Adet	
	%	Kg	%	Kg	%	kg	%	kg
Fe	57,21	47,65	80,45	86,24	49,10	38,87	56,00	49,28
Cu	1,58	1,32	1,94	2,08	1,39	1,10	5,00	4,40
Al	11,89	9,90	2,09	2,24	16,27	12,88	2,00	1,76
Plastik	19,97	16,63	8,21	8,80	11,96	9,47	36,00	31,68
Diğer	9,35	7,79	7,31	7,84	21,28	16,85	1,00	0,88
Toplam	100,00	83,29	100,00	107,20	100,00	79,16	100,00	88,00

Tablo 7.8: Kabul Edilen Mamul Adetleri ve Materyal Miktarları (Devam)

	Plak Çalar		Video Kaydedici		Kaset Çalar		TV	
	45 Adet		25 Adet		45 Adet		7 Adet	
	%	Kg	%	Kg	%	kg	%	kg
Fe	12,36	10,40	64,29	51,30	48,31	43,54	15,95	13,38
Cu	7,87	6,62	8,33	6,65	5,62	5,06	10,02	8,40
Al	1,12	0,95	1,19	0,95	1,12	1,01	4,09	3,43
Plastik	75,28	63,32	23,81	19,00	42,70	38,48	69,94	58,65
Diğer	3,37	2,84	2,38	1,90	2,25	2,03	0,00	0,00
Toplam	100,00	84,11	100,00	79,80	100,00	90,11	100,00	83,86

Tablo 7.8: Kabul Edilen Mamul Adetleri ve Materyal Miktarları (Devam)

	Monitör		Yazıcı		PC		Mobil Telefon	
	20 Adet		10 Adet		30 Adet		650 Adet	
	%	Kg	%	Kg	%	kg	%	kg
Fe	32,84	24,64	39,00	27,30	25,33	20,92	4,05	3,12
Cu	18,12	13,60	13,00	9,10	1,33	1,10	20,27	15,60
Al	10,87	8,16	0,00	0,00	5,33	4,40	9,46	7,28
Plastik	37,53	28,16	36,00	25,20	54,67	45,14	66,22	50,96
Diğer	0,64	0,48	12,00	8,40	13,33	11,01	0,00	0,00
Toplam	100,00	75,04	100,00	70,00	100,00	82,58	100,00	76,96

Tablo 7.9: Kabul Edilen Mamullere Ait Materyal Miktarları Toplamı

	Beyaz Eşya		Kahverengi Eşya		Gri Eşya		Toplam	
	%	Kg	%	Kg	%	kg	%	kg
Fe	67,32	222,04	27,10	118,61	34,24	75,98	58,28	416,63
Cu	1,76	8,90	9,06	26,73	12,12	39,40	3,84	75,03
Al	7,76	26,78	3,00	6,34	4,15	19,84	6,72	52,96
Plastik	11,88	66,58	59,87	179,44	40,45	149,46	21,57	395,48
Diğer	11,28	33,35	0,97	6,76	9,04	19,89	9,59	60,00
Toplam	100,00	357,65	100,00	337,88	100,00	304,58	100,00	1000,11

7.2 Ayırıcı Sıralaması İçin Farklı Tasarım Alternatiflerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde temel fonksiyon strüktürlerine ve kabul edilen tasarım prensiplerine göre materyal geri dönüşüm oranı göz önünde bulundurularak ayırma elemanları için en uygun sıralama tespit edilecektir. En yüksek materyal geri dönüşüm oranını verecek olan sıralamanın tespiti için farklı geri dönüşüm senaryoları için farklı tasarım alternatifleri uygulanarak sistemlerin karşılaştırması yapılacaktır. Öncelikli olarak geri dönüşüm sistemi elemanlarının basit bir hat üzerinde farklı sırada dizilmesi ile elde edilecek olan geri dönüşüm oranları hesaplanacak daha sonra materyal geri dönüşüm oranını artırmak amacıyla sistemin iyileştirilmesi yapılacaktır. Yapılan hesaplamalarda öncelikli olarak MATHCAD sürüm 12.0 [146] programı kullanılmıştır. Akabinde MATLAB ve SIMULINK sürüm 7.0 (R14) [147] programları kullanılarak geri dönüşüm sisteminin elemanlarının birim modelleri oluşturulmuş ve tasarlanan sistemlerin benzetimleri yapılmıştır. EK C’de benzetim için yapılan veri girişi kodları verilmiştir. Yapılan hesap ve benzetim sonucu elde edilen değerler karşılaştırılmış ve benzetim doğrulanmıştır. Sistem tasarımı için mamul tiplerinin ayrıştırılmasına gidilmeden tek hat üzerinde ve geri beslemesiz bir geri dönüşüm sistemi tasarımı seçilmiştir. Sistem elemanları olarak 10 mm boyutunda tane çıkışı verecek kırıcı, sisteme beslenen materyal boyutunu kontrol etmek için 10 mm elek açıklığına sahip elek, materyal atığı içerisinde demirin ayrılması için düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırıcı, alüminyum ve bakırın ayrılması için girdap akımı ayırıcısı ve plastiğin ayrılması için havalı sınıflandırıcı seçilmiştir. Kırıcılarda tek kademedeki 10 mm çıkış boyutunda ürün alınması oldukça güçtür bu nedenle sistemde bir ön kırıcı kullanılması gereklidir. Ancak kırıcılar için geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu, birim matrise eşit olduğundan ve sonucu değiştirmeyeceğinden hesaplara dâhil edilmemiştir. Kütle akış diyagramlarında kullanılan sistem elemanlarının açıklamaları EK D’de verilmiştir.

7.2.1 Senaryo 1

Senaryo 1 için sıralama kırıcı, elek, manyetik ayırıcı, girdap akımı ayırıcısı ve havalı sınıflandırıcı olarak seçilmiştir. Bu sıralamaya göre sistemin kütle akış diyagramı çıkarılarak, sistemden elde edilen materyal geri dönüşüm miktarları hesaplanacak ve sistemin benzetimi yapılacaktır. Şekil 7.7’de tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı verilmiştir.

Geri dönüşüm sistemine giren toplam materyal miktarı (x_1) denklem 7.40’da tanımlanmıştır. Buna göre kırıcıdan geçen materyal miktarı (x_2) denklem 7.42’de ve kırıcıdan atık olarak ayrılan materyal miktarı (x_3) ise denklem 7.44’de hesaplanmıştır.

$$x_1 = \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60,00 \end{bmatrix} \quad (7.40)$$

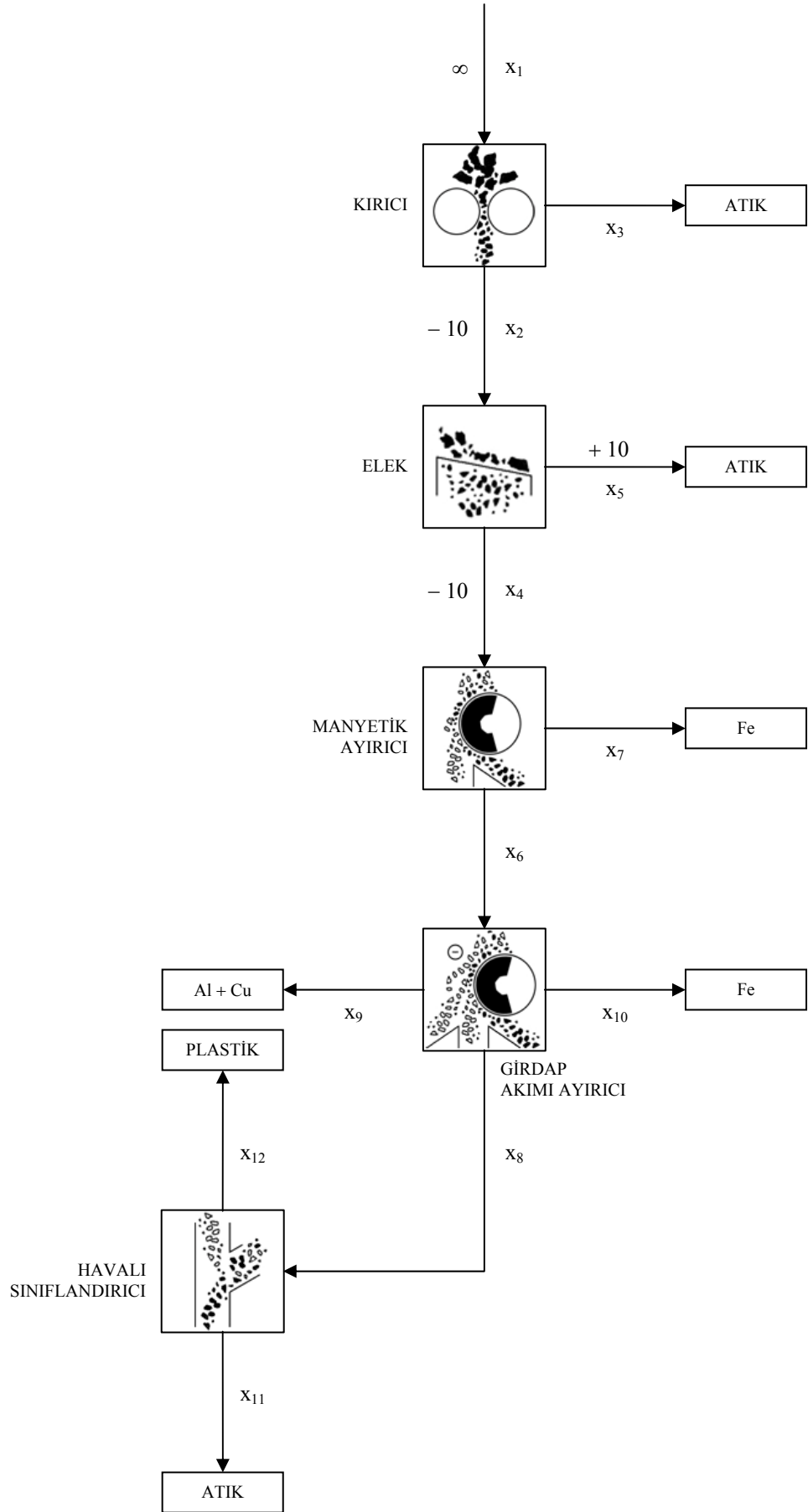
$$x_2 = R_k \cdot x_1 \quad (7.41)$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60 \end{bmatrix} \quad (7.42)$$

$$x_3 = R'_k \cdot x_1 \quad (7.43)$$

$$x_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.44)$$

Elekten geçen materyal miktarı (x_4) denklem 7.46’da ve elekten atık olarak ayrılan materyal miktarı (x_5) ise denklem 7.48’de hesaplanmıştır.



Şekil 7.7: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 1)

$$x_4 = R_e \cdot x_2 \quad (7.45)$$

$$x_4 = \begin{bmatrix} 0,90 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,80 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 374,97 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 48 \end{bmatrix} \quad (7.46)$$

$$x_5 = R_e' \cdot x_2 \quad (7.47)$$

$$x_5 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} \quad (7.48)$$

Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıdan geçen materyal miktarı (x_6) denklem 7.50'de ve düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıdan ayrılarak Fe silosuna gönderilen materyal miktarı (x_7) ise denklem 7.52'de hesaplanmıştır.

$$x_6 = R_{mdaş} \cdot x_4 \quad (7.49)$$

$$x_6 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,98 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 374,97 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 48 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 37,5 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 47,04 \end{bmatrix} \quad (7.50)$$

$$x_7 = R_{mdaş}' \cdot x_4 \quad (7.51)$$

$$x_7 = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 374,97 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 48,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 337,47 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,96 \end{bmatrix} \quad (7.52)$$

Girdap akımı ayırıcısından geçen materyal miktarı (x_8) denklem 7.54’de, girdap akımı ayırıcısından ayrılarak Al+Cu silosuna gönderilen materyal miktarı (x_9) denklem 7.56’da ve yine girdap akımı ayırıcısından ayrılarak Fe silosuna gönderilen materyal miktarı (x_{10}) ise denklem 7.58’de hesaplanmıştır.

$$x_8 = R_g \cdot x_6 \quad (7.53)$$

$$x_8 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 37,5 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 47,04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,75 \\ 7,8 \\ 0,42 \\ 355,93 \\ 45,16 \end{bmatrix} \quad (7.54)$$

$$x_9 = R_g' \cdot x_6 \quad (7.55)$$

$$x_9 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 37,5 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 47,04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 52,22 \\ 41,94 \\ 0 \\ 0,94 \end{bmatrix} \quad (7.56)$$

$$x_{10} = R_g'' \cdot x_6 \quad (7.57)$$

$$x_{10} = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 37,5 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 47,04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33,75 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,94 \end{bmatrix} \quad (7.58)$$

Havalı sınıflandırıcıdan geçen atık materyal miktarı (x_{11}) denklem 7.60’da ve havalı sınıflandırıcıdan ayrılarak plastik silosuna gönderilen materyal miktarı (x_{12}) ise denklem 7.62’de hesaplanmıştır.

$$x_{11} = R_{hs} \cdot x_8 \quad (7.59)$$

$$x_{11} = \begin{bmatrix} 0,96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3,75 \\ 7,8 \\ 0,42 \\ 355,93 \\ 45,16 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,6 \\ 7,02 \\ 0,21 \\ 7,12 \\ 43,35 \end{bmatrix} \quad (7.60)$$

$$x_{12} = R'_{hs} \cdot x_8 \quad (7.61)$$

$$x_{12} = \begin{bmatrix} 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3,75 \\ 7,8 \\ 0,42 \\ 355,93 \\ 45,16 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,15 \\ 0,78 \\ 0,21 \\ 348,81 \\ 1,81 \end{bmatrix} \quad (7.62)$$

Geri dönüşüm sisteminde materyal silolarında ayrılan geri dönüştürülen materyal ve atık materyal toplamaları (S) aşağıda verilmiştir. Sırasıyla atık materyal miktarı ($S_{Atık}$) denklem 7.63'de, Fe silosunda toplanan materyal miktarı (S_{Fe}) denklem 7.64'de, Al+Cu silosunda toplanan materyal miktarı (S_{Al+Cu}) denklem 7.65'de ve plastik silosunda toplanan materyal miktarı ($S_{Plastik}$) denklem 7.66'da hesaplanmıştır.

$$S_{Att} = x_3 + x_5 + x_{11} = \begin{bmatrix} 45,26 \\ 22,03 \\ 10,8 \\ 46,67 \\ 55,36 \end{bmatrix} \quad (7.63)$$

$$S_{Fe} = x_7 + x_{10} = \begin{bmatrix} 371,22 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1,9 \end{bmatrix} \quad (7.64)$$

$$S_{Al+Cu} = x_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ 52,22 \\ 41,95 \\ 0 \\ 0,94 \end{bmatrix} \quad (7.65)$$

$$S_{Plastik} = x_{12} = \begin{bmatrix} 0,15 \\ 0,78 \\ 0,21 \\ 348,80 \\ 1,81 \end{bmatrix} \quad (7.66)$$

Materyal geri dönüşüm oranı (η), ele alınan materyalin geri dönüşüm miktarının, beslemedeki miktarına oranı hesaplanarak bulunabilir. Sırasıyla Fe için geri dönüşüm oranı (η_{Fe}) denklem 7.67’de, Cu için geri dönüşüm oranı (η_{Cu}) denklem 7.68’de, Al için geri dönüşüm oranı (η_{Al}) denklem 7.69’da ve plastik için geri dönüşüm oranı ($\eta_{Plastik}$) ise denklem 7.70’de verilmiştir.

$$\eta_{Fe} = \frac{m'_{Fe}}{m_{Fe}} \cdot 100 = \frac{371,20}{416,63} \cdot 100 = 89,10 \quad (7.67)$$

$$\eta_{Cu} = \frac{m'_{Cu}}{m_{Cu}} \cdot 100 = \frac{52,22}{75,03} \cdot 100 = 69,60 \quad (7.68)$$

$$\eta_{Al} = \frac{m'_{Al}}{m_{Al}} \cdot 100 = \frac{41,95}{52,96} \cdot 100 = 79,21 \quad (7.69)$$

$$\eta_{Plastik} = \frac{m'_{Plastik}}{m_{Plastik}} \cdot 100 = \frac{348,80}{395,48} \cdot 100 = 88,20 \quad (7.70)$$

Her bir geri dönüşüm silosundaki hedef materyalin saflık oranı (β), hedef materyalin geri dönüşüm silosundaki miktarının silodaki toplam materyal miktarına oranı hesaplanarak bulunabilir. Buna göre sırasıyla Fe için saflık oranı (β_{Fe}) denklem 7.71’de, Cu için saflık oranı (β_{Cu}) denklem 7.72’de, Al için saflık oranı (β_{Al}) denklem 7.73’de ve plastik için saflık oranı ($\beta_{Plastik}$) denklem 7.74’de hesaplanmıştır.

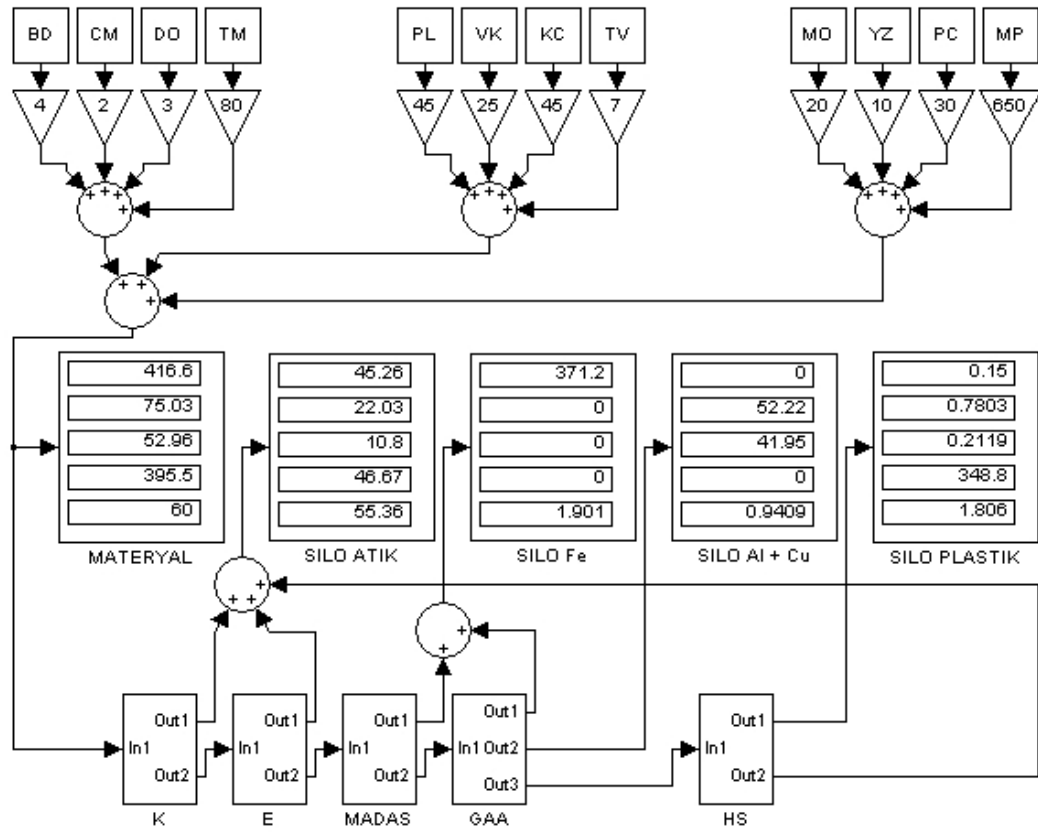
$$\beta_{Fe} = \frac{m'_{Fe}}{m_{SILO-Fe}} \cdot 100 = \frac{371,20}{373,10} \cdot 100 = 99,49 \quad (7.71)$$

$$\beta_{Cu} = \frac{m'_{Cu}}{m_{SILO-Cu+Al}} \cdot 100 = \frac{52,22}{95,11} \cdot 100 = 54,90 \quad (7.72)$$

$$\beta_{Al} = \frac{m'_{Al}}{m_{SILO-Cu+Al}} \cdot 100 = \frac{41,95}{95,11} \cdot 100 = 44,11 \quad (7.73)$$

$$\beta_{Plastik} = \frac{m'_{Plastik}}{m_{SILO-Plastik}} \cdot 100 = \frac{348,80}{351,75} \cdot 100 = 99,16 \quad (7.74)$$

Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.8: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 1)

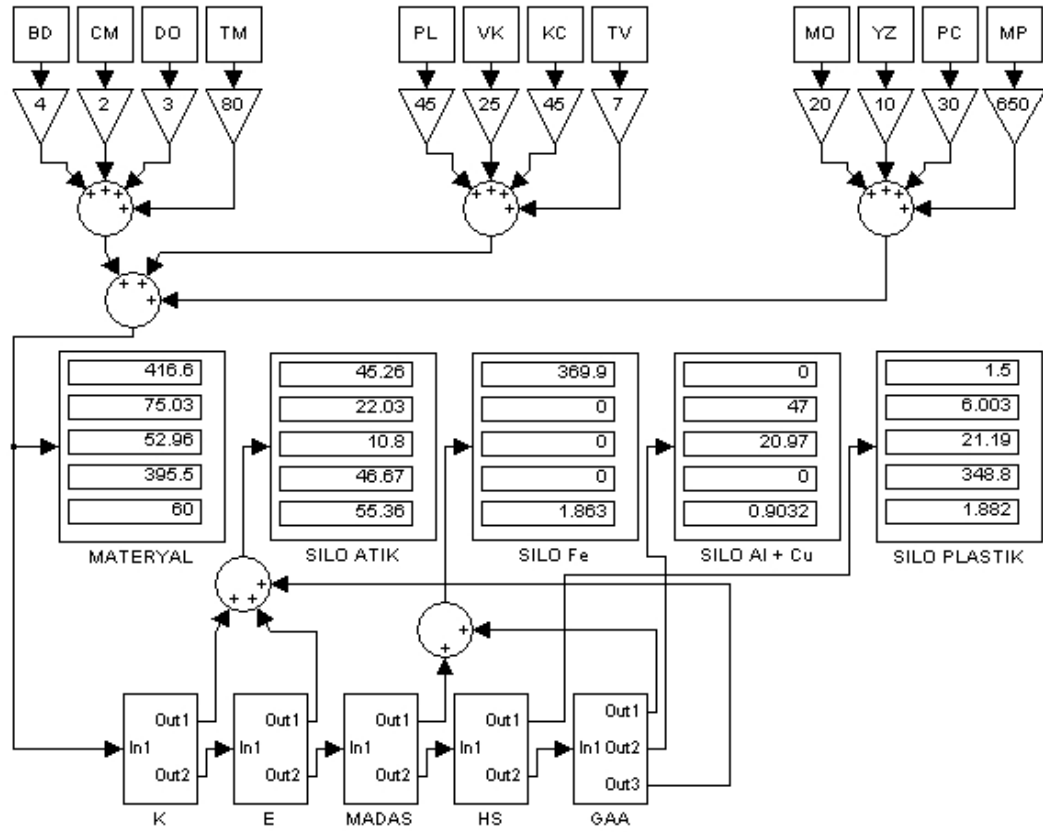
Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak sonuçlar Tablo 7.10'de verilmiştir.

Tablo 7.10: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 1)

Materyal	Besleme		Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	89,10	371,20	99,49
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,90
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,11
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	99,16
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74
Toplam	100,00	1000,11	86,95	869,53	-

7.2.2 Senaryo 2

Senaryo 2 için sıralama kırıcı, elek, manyetik ayırıcı, havalı sınıflandırıcı ve girdap akımı ayırıcısı olarak seçilmiştir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.9’de verilmiştir. Şekil 7.10’de tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı verilmiştir.

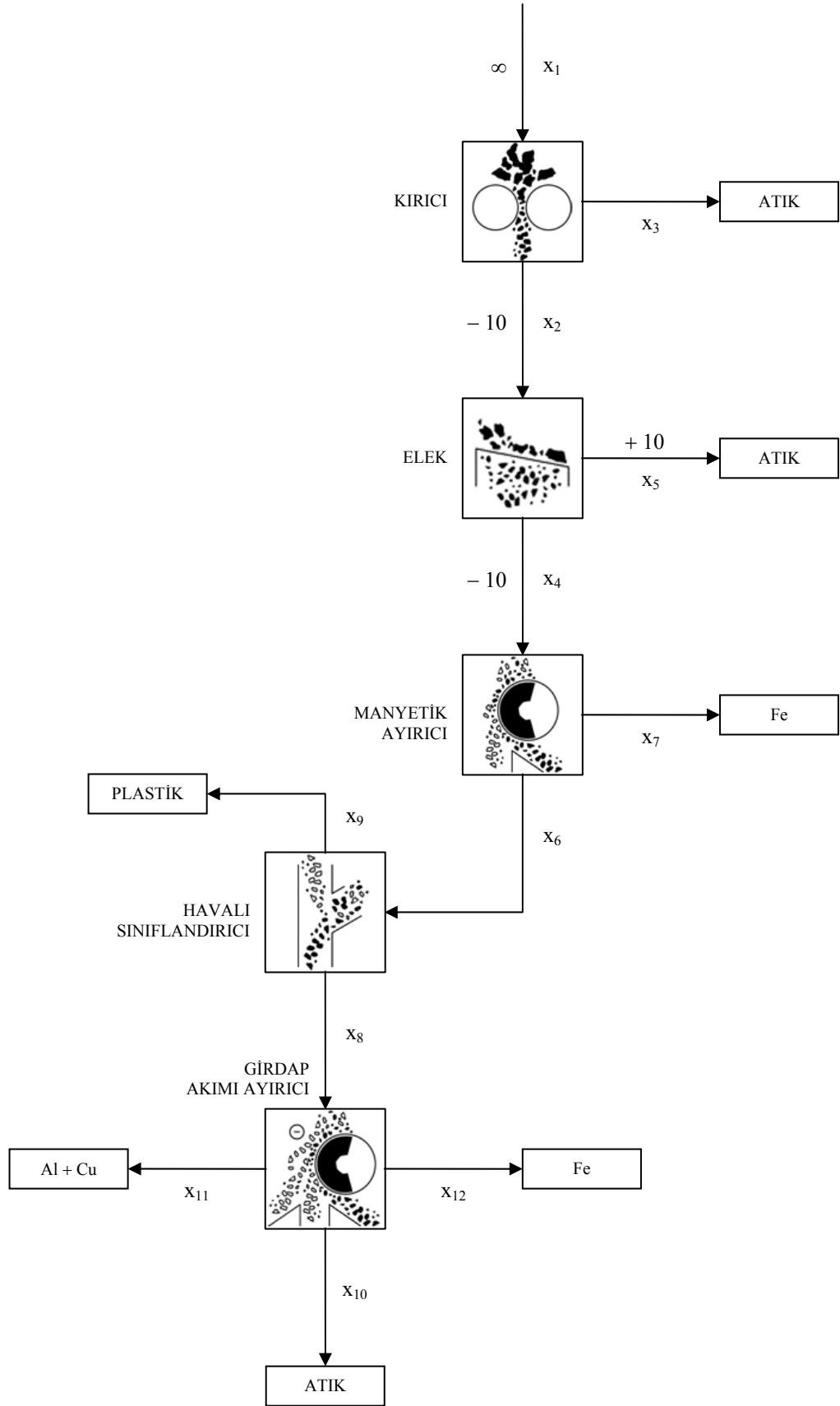


Şekil 7.9: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 2)

Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak sonuçlar Tablo 7.11’de verilmiştir.

Tablo 7.11: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 2)

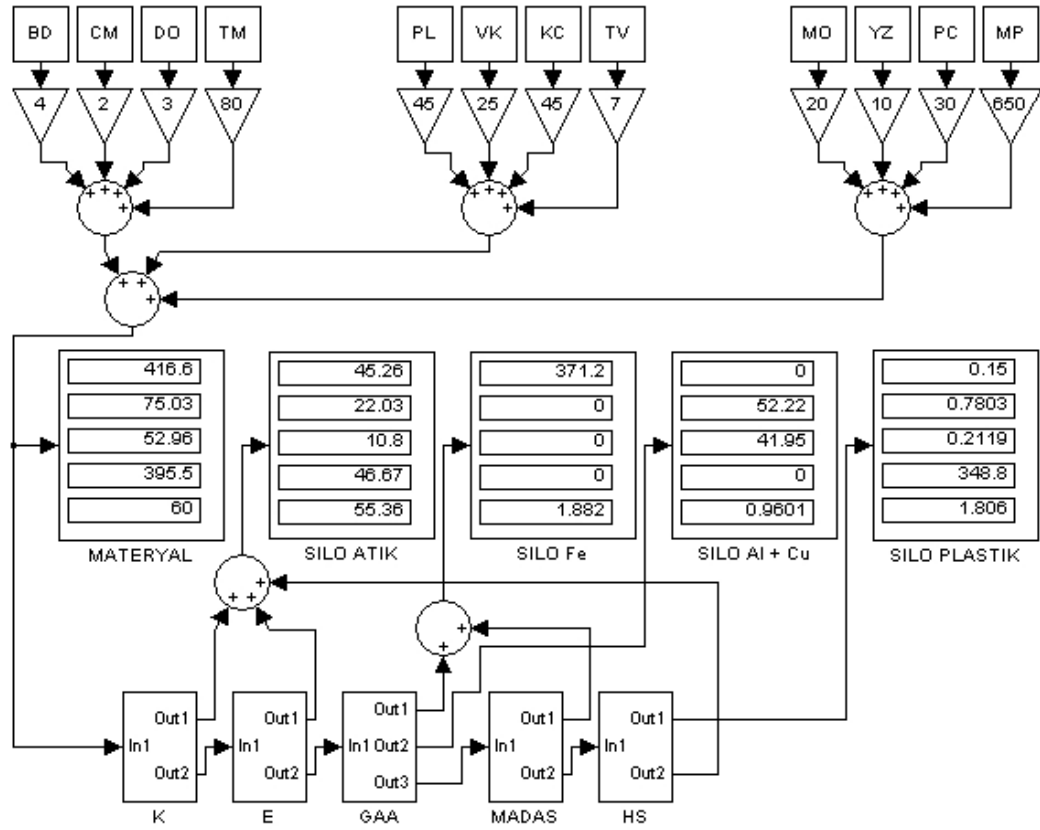
Materyal	Besleme		Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	88,78	369,90	99,50
Cu	3,84	75,03	62,64	47,00	68,24
Al	6,72	52,96	39,59	20,97	30,45
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	91,94
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74
Toplam	100,00	1000,11	84,19	842,03	-



Şekil 7.10: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 2)

7.2.3 Senaryo 3

Senaryo 3 için sıralama kırıcı, elek, girdap akımı ayırıcısı, manyetik ayırıcı ve havalı sınıflandırıcı olarak seçilmiştir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.11’de verilmiştir. Şekil 7.12’de tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı verilmiştir.

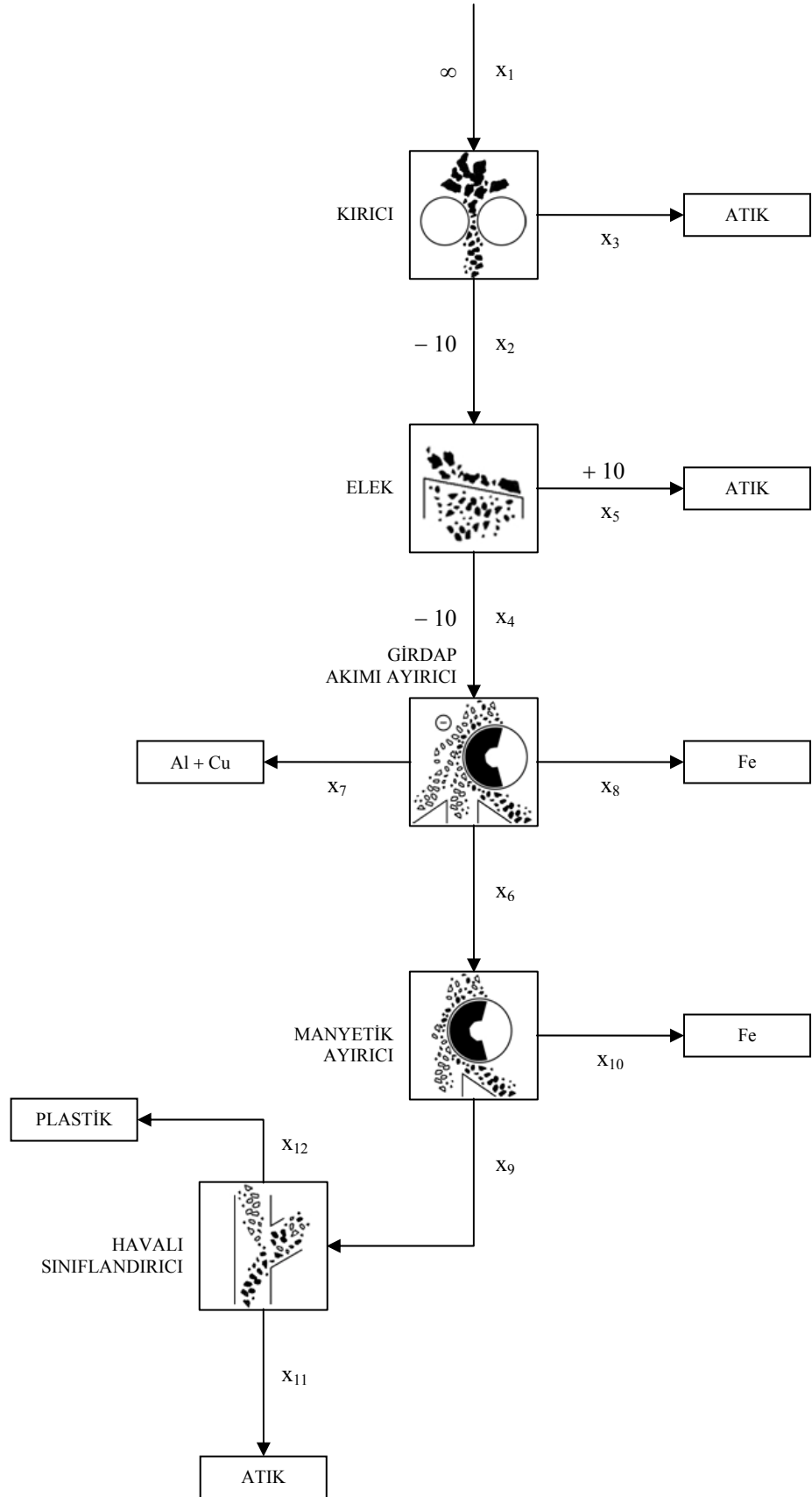


Şekil 7.11: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 3)

Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak sonuçlar Tablo 7.12’de verilmiştir.

Tablo 7.12: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 3)

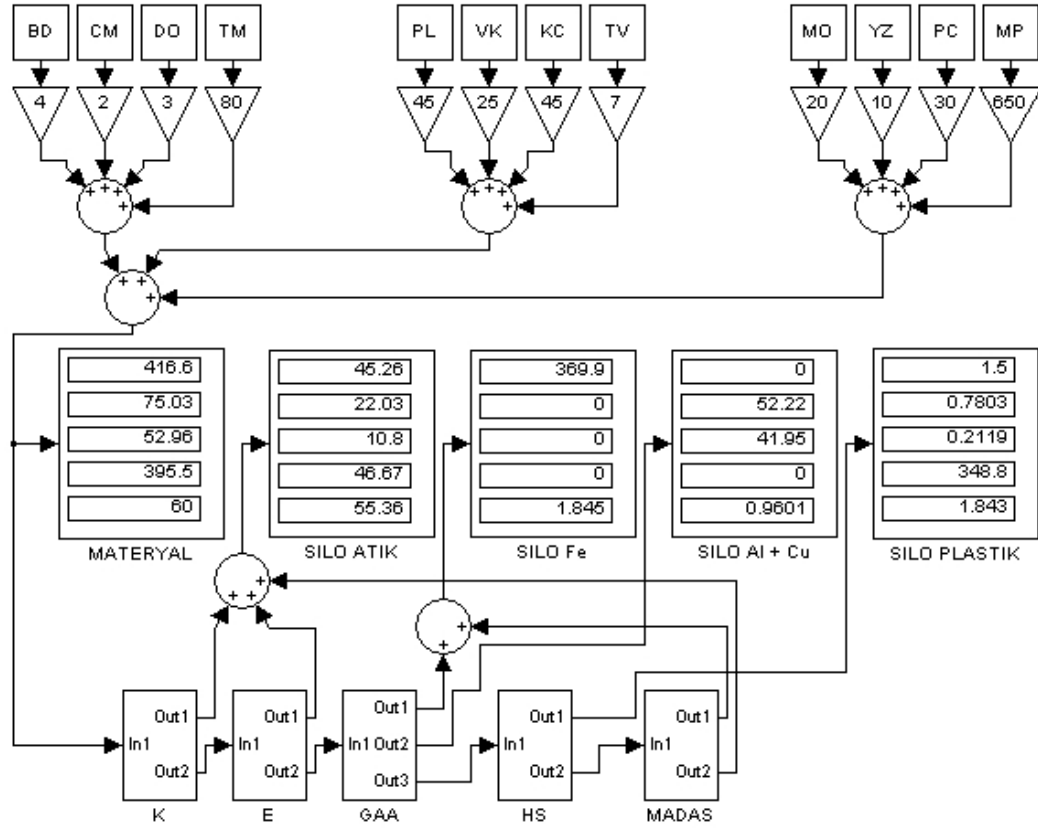
Materyal	Besleme		Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	89,10	371,20	99,50
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,89
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,10
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	99,16
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74
Toplam	100,00	1000,11	86,95	869,53	-



Şekil 7.12: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 3)

7.2.4 Senaryo 4

Senaryo 4 için sıralama kırıcı, elek, girdap akımı ayırıcısı, havalı sınıflandırıcı ve manyetik ayırıcı olarak seçilmiştir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.13’de verilmiştir. Şekil 7.14’de tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı verilmiştir.

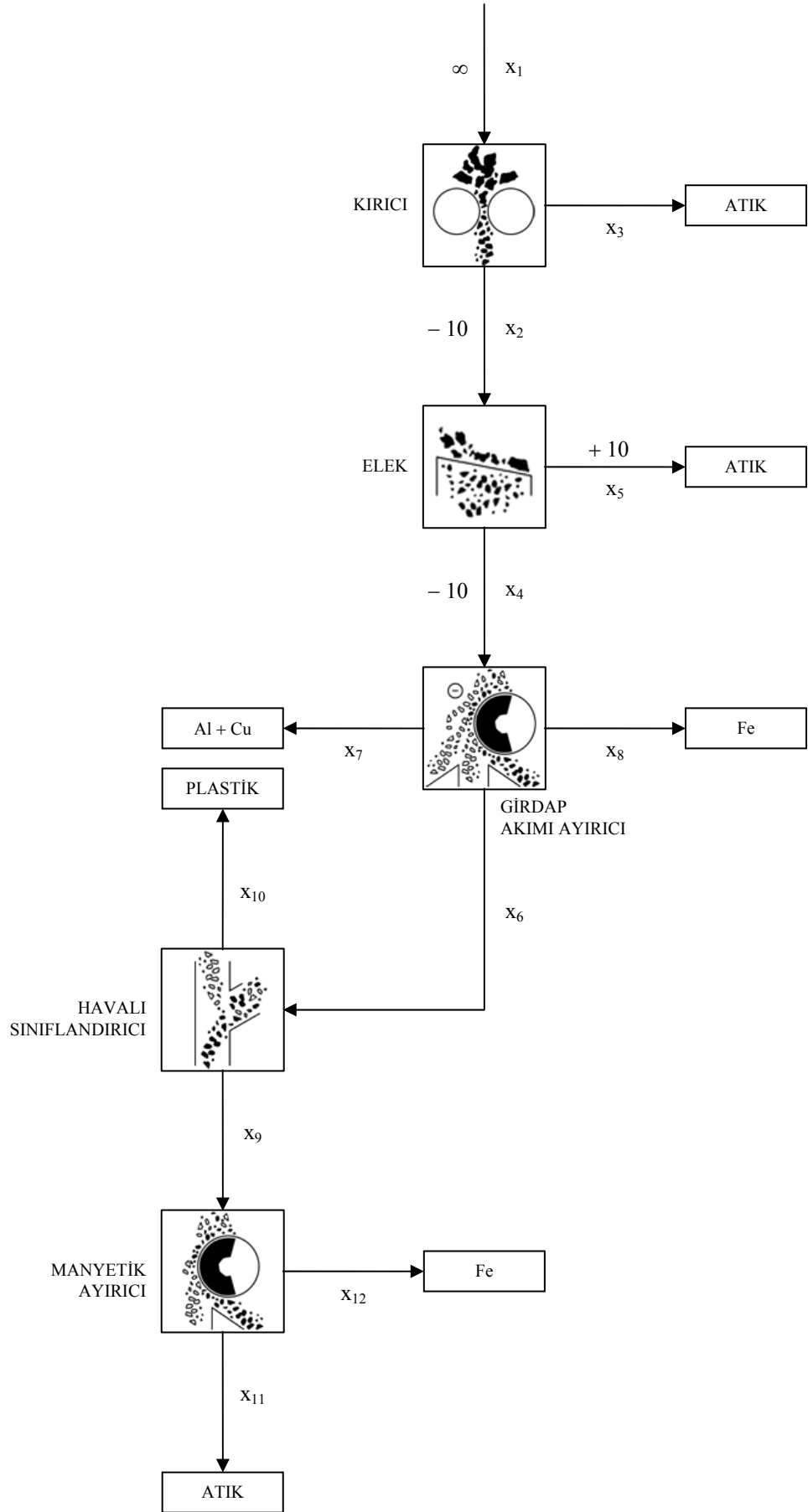


Şekil 7.13: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 4)

Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak sonuçlar Tablo 7.13’de verilmiştir.

Tablo 7.13: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 4)

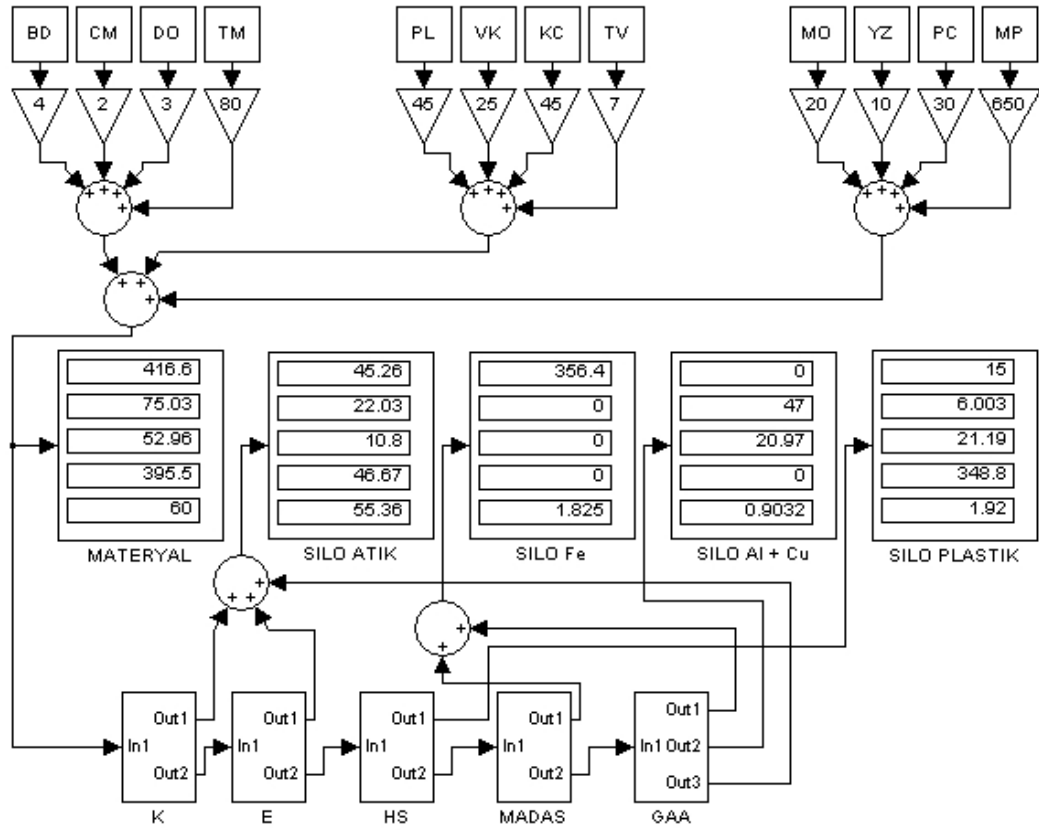
Materyal	Besleme		Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	88,78	369,90	99,50
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,89
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,10
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	98,77
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74
Toplam	100,00	1000,11	86,81	868,23	-



Şekil 7.14: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 4)

7.2.5 Senaryo 5

Senaryo 5 için sıralama kırıcı, elek, havalı sınıflandırıcı, manyetik ayırıcı ve girdap akımı ayırıcısı olarak seçilmiştir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.15’de verilmiştir. Şekil 7.16’de tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı verilmiştir.

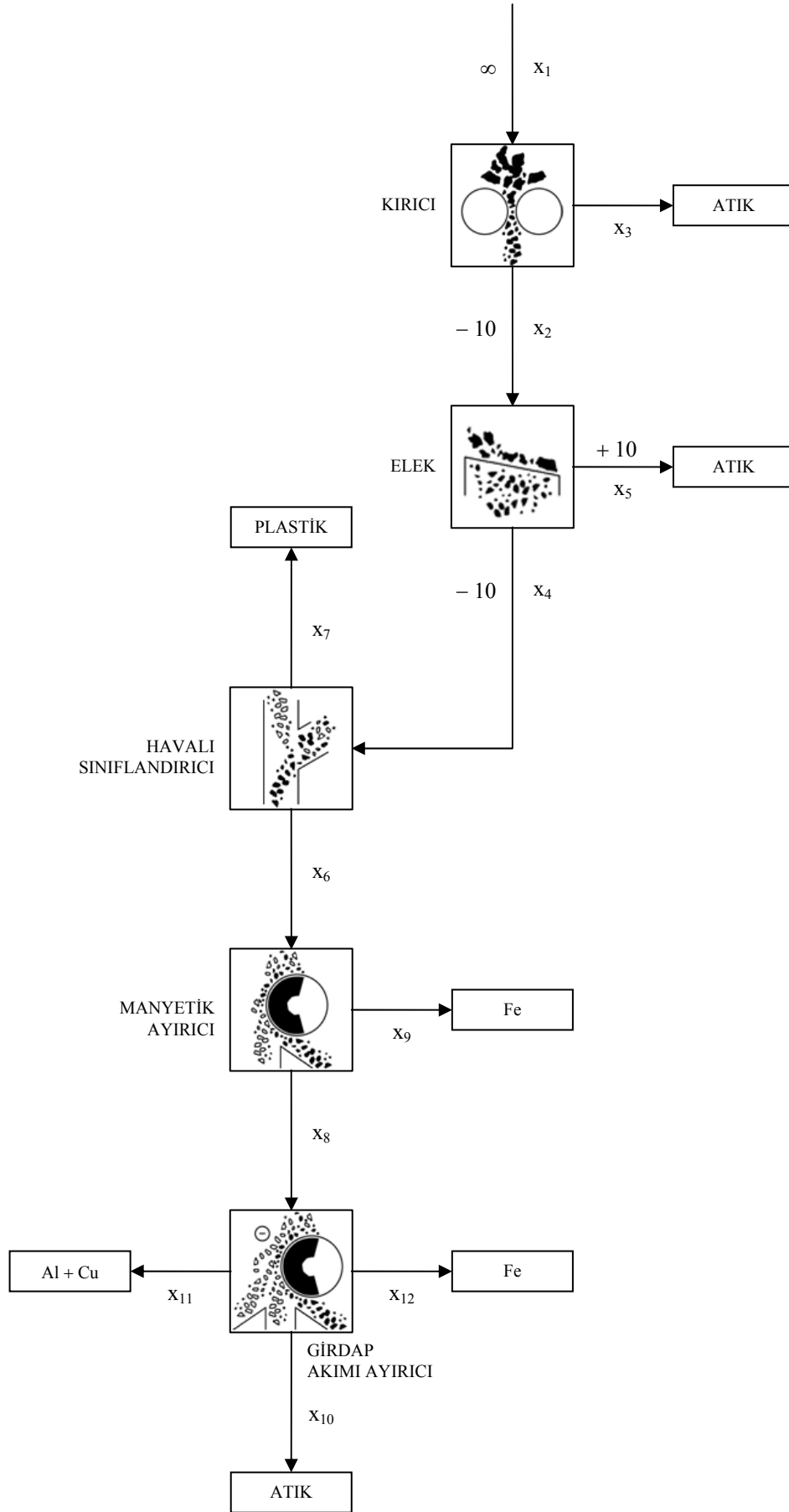


Şekil 7.15: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 5)

Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak sonuçlar Tablo 7.14’de verilmiştir.

Tablo 7.14: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 5)

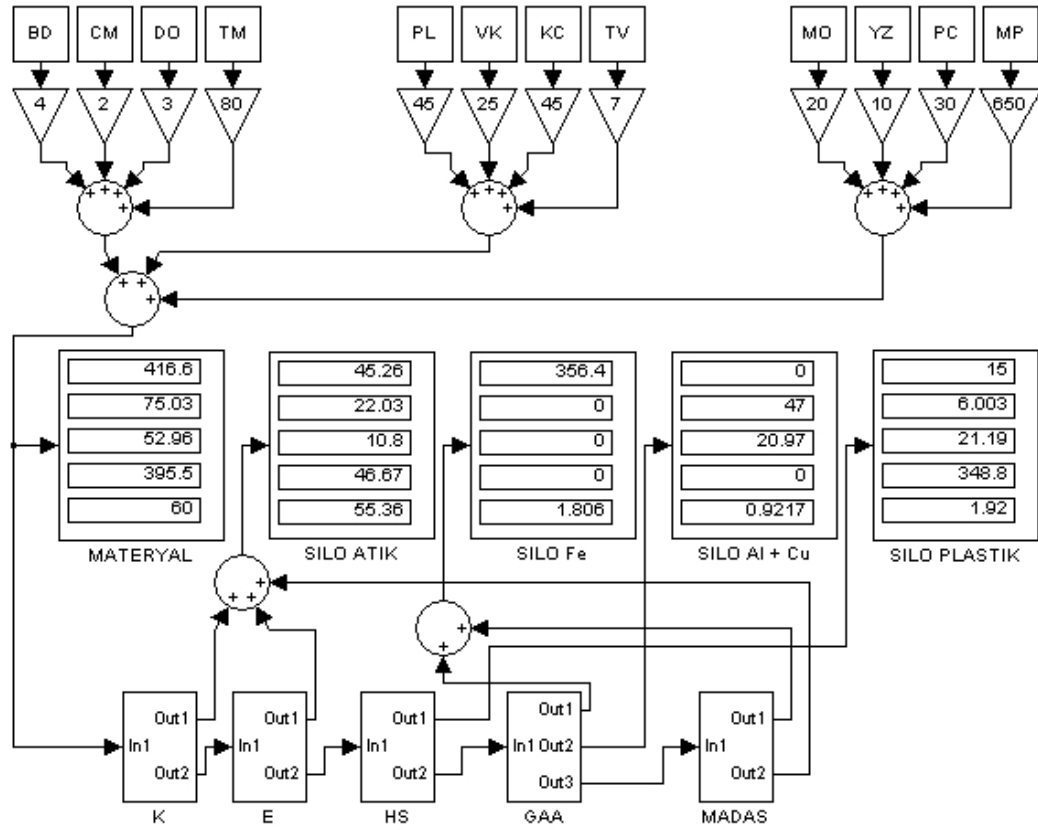
Materyal	Besleme		Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	85,54	356,40	99,49
Cu	3,84	75,03	62,64	47,00	68,24
Al	6,72	52,96	39,59	20,97	30,45
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	88,77
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74
Toplam	100,00	1000,11	82,84	828,53	-



Şekil 7.16: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 5)

7.2.6 Senaryo 6

Senaryo 6 için sıralama kırıcı, elek, havalı sınıflandırıcı, girdap akımı ayırıcısı ve manyetik ayırıcı olarak seçilmiştir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.17’de verilmiştir. Şekil 7.18’de tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı verilmiştir.

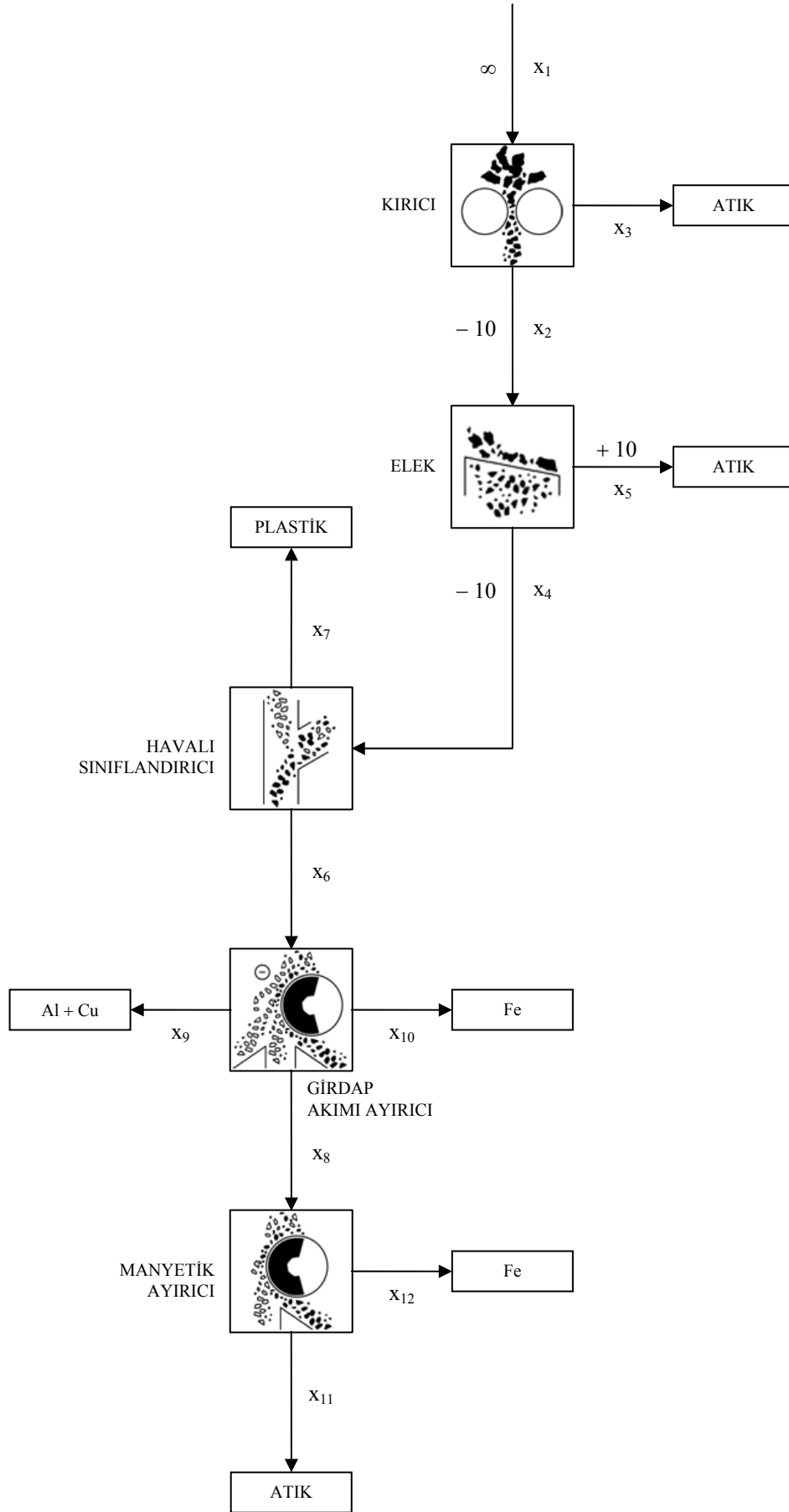


Şekil 7.17: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 6)

Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak sonuçlar Tablo 7.15’de verilmiştir.

Tablo 7.15: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 6)

Materyal	Besleme		Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	85,54	356,40	99,50
Cu	3,84	75,03	62,64	47,00	68,22
Al	6,72	52,96	39,59	20,97	30,44
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	88,77
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74
Toplam	100,00	1000,11	82,84	828,53	-



Şekil 7.18: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 6)

7.2.7 Senaryoların Karşılaştırılması

Yapılan farklı sıralamalara göre elde edilen materyal geri dönüşüm oranları ve saflık değerleri sırasıyla Tablo 7.16’de ve Tablo 7.17’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.16: Geri Dönüşüm Oranlarının Karşılaştırılması

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5	Senaryo 6
	%	%	%	%	%	%
Fe	89,10	88,78	89,10	88,78	85,54	85,54
Cu	69,60	62,64	69,60	69,60	62,64	62,64
Al	79,21	39,59	79,21	79,21	39,59	39,59
Plastik	88,20	88,20	88,20	88,20	88,20	88,20
Diğer	92,26	92,26	92,26	92,26	92,26	92,26
Toplam	86,95	84,19	86,95	86,81	82,84	82,84

Tablo 7.17: Saflık Oranlarının Karşılaştırılması

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5	Senaryo 6
	%	%	%	%	%	%
Fe	99,49	99,50	99,50	99,50	99,49	99,50
Cu	54,90	68,24	54,89	54,89	68,24	68,22
Al	44,11	30,45	44,10	44,10	30,45	30,44
Plastik	99,16	91,94	99,16	98,77	88,77	88,77
Diğer	30,74	30,74	30,74	30,74	30,74	30,74

Tablo 7.16 ve Tablo 7.17 incelendiğinde materyal geri dönüşüm oranlarına göre sistem elemanları için en uygun sıralamanın senaryo 1 ve senaryo 3 için sağlandığı görülmektedir. Ancak elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları demir ve plastik dışında tatminkâr olamadığı için sistemin materyal geri dönüşüm oranlarının iyileştirilmesi gerekmektedir.

Çalışılabilir tane boyutu aralığının düşük manyetik ayırıcılar için girdap akımı ayırıcısına göre daha geniş olmasından dolayı ilerleyen bölümlerde sistem elemanlarının sıralaması için senaryo 1 temel sistem seçilerek, sistemin materyal geri kazanım oranlarının artırılması için farklı senaryoların sistemin materyal geri dönüşüm oranına etkileri incelenecektir.

7.3 Sistemin Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranlarının İyileştirilmesi

Bu bölümde temel sistem olarak belirlenen ayırıcı sıralaması göz önünde bulundurularak, geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının artırılması amacıyla sistemin iyileştirilmesi yapılacaktır. Burada da önceki bölümde olduğu gibi farklı iyileştirme senaryoları tasarlanarak elde edilen geri dönüşüm ve materyal oranları karşılaştırılacaktır.

7.3.1 Senaryo 1

Senaryo 1’de, temel sistemde elek üstü olarak ayrılan materyalin, atık silosu yerine ikinci bir kırıcı ve elek sisteminden geçirilerek geri dönüşüm sistemine yeniden beslenmesinin geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranlarına etkisi incelenecektir. Buna göre tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı Şekil 7.19’de verilmiştir.

Geri dönüşüm sistemine giren toplam materyal miktarı (x_1) denklem 7.75’de tanımlanmıştır. Buna göre birinci kırıcıdan geçen materyal miktarı (x_2) denklem 7.77’de ve birinci kırıcıdan atık olarak ayrılan materyal miktarı (x_3) ise denklem 7.79’da hesaplanmıştır.

$$x_1 = \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60,00 \end{bmatrix} \quad (7.75)$$

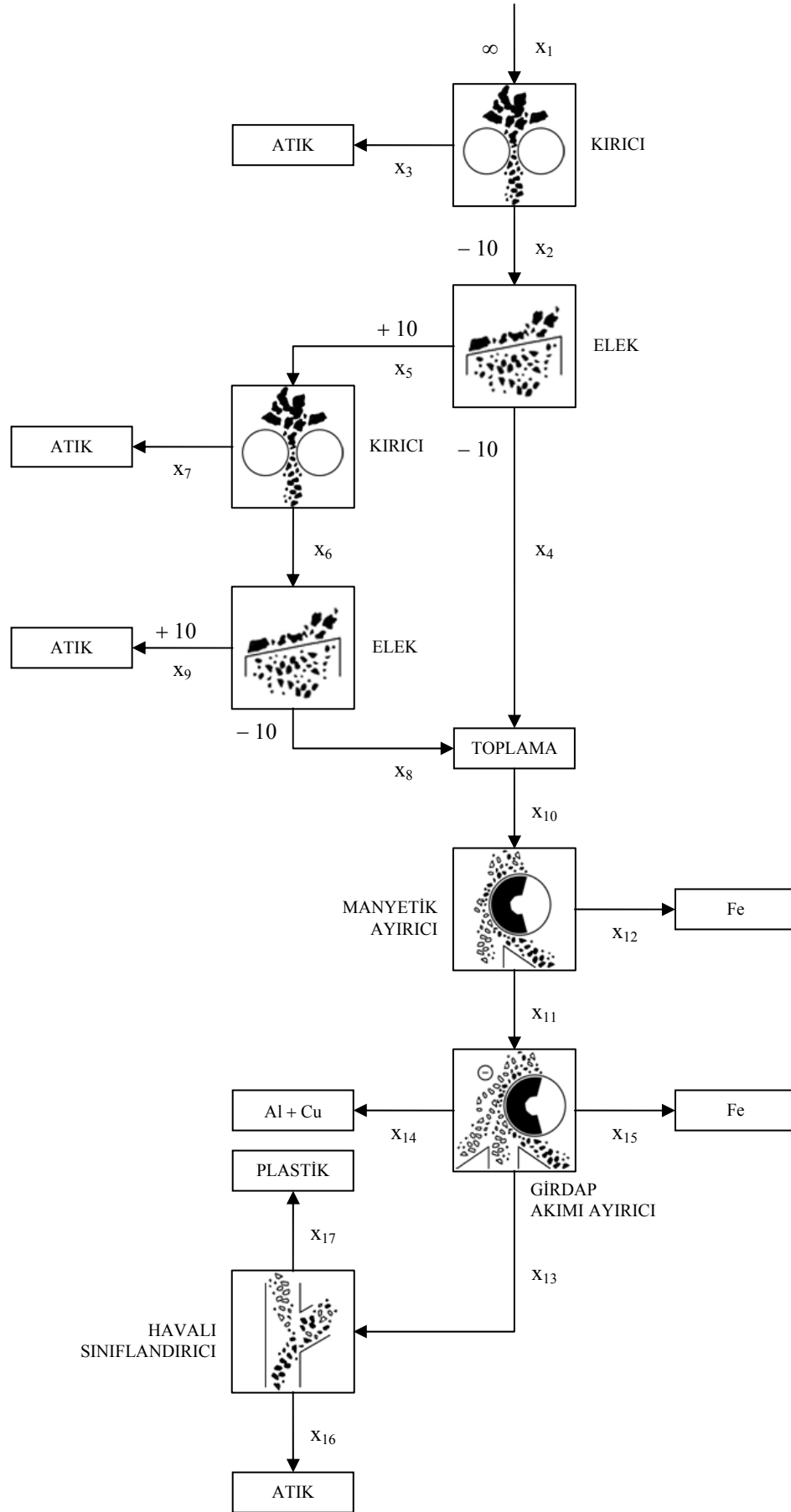
$$x_2 = R_k \cdot x_1 \quad (7.76)$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60 \end{bmatrix} \quad (7.77)$$

$$x_3 = R'_k \cdot x_1 \quad (7.78)$$

$$x_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.79)$$

Birinci elekten geçen materyal miktarı (x_4) denklem 7.81’de ve birinci elekten atık olarak ayrılan ve ikinci kırıcıya gönderilen materyal miktarı (x_5) ise denklem 7.83’de hesaplanmıştır.



Şekil 7.19: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 1)

$$x_4 = R_e \cdot x_2 \quad (7.80)$$

$$x_4 = \begin{bmatrix} 0,90 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,80 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 374,97 \\ 60,02 \\ 42,37 \\ 355,93 \\ 48 \end{bmatrix} \quad (7.81)$$

$$x_5 = R_e' \cdot x_2 \quad (7.82)$$

$$x_5 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 416,63 \\ 75,03 \\ 52,96 \\ 395,48 \\ 60,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} \quad (7.83)$$

İkinci kırıcıdan geçen materyal miktarı (x_6) denklem 7.85’de ve ikinci kırıcıdan atık olarak ayrılan materyal miktarı (x_7) ise denklem 7.87’de hesaplanmıştır.

$$x_6 = R_k \cdot x_5 \quad (7.84)$$

$$x_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} \quad (7.85)$$

$$x_7 = R_k' \cdot x_5 \quad (7.86)$$

$$x_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.87)$$

İkinci elekten geçen materyal miktarı (x_8) denklem 7.89’da ve ikinci elekten atık olarak ayrılan materyal miktarı (x_9) ise denklem 7.91’de hesaplanmıştır.

$$x_8 = R_e \cdot x_6 \quad (7.88)$$

$$x_8 = \begin{bmatrix} 0,90 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,80 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 37,5 \\ 12 \\ 8,47 \\ 35,59 \\ 9,6 \end{bmatrix} \quad (7.89)$$

$$x_9 = R_e' \cdot x_6 \quad (7.90)$$

$$x_9 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,66 \\ 15,01 \\ 10,59 \\ 39,55 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,17 \\ 3 \\ 2,12 \\ 3,95 \\ 2,4 \end{bmatrix} \quad (7.91)$$

Birinci ve ikinci elekten geçen materyal miktarı toplamı (x_{10}) denklem 7.93'de hesaplanmıştır.

$$x_{10} = x_4 + x_8 \quad (7.92)$$

$$x_{10} = \begin{bmatrix} 412,46 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 57,6 \end{bmatrix} \quad (7.93)$$

Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıdan geçen materyal miktarı (x_{11}) denklem 7.95'de ve düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıdan ayrılarak Fe silosuna gönderilen materyal miktarı (x_{12}) ise denklem 7.97'de hesaplanmıştır.

$$x_{11} = R_{mdaş} \cdot x_{10} \quad (7.94)$$

$$x_{11} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,98 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 412,46 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 57,6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41,25 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 56,45 \end{bmatrix} \quad (7.95)$$

$$x_{12} = R_{mdaş}' \cdot x_{10} \quad (7.96)$$

$$x_{12} = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 412,46 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 57,6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 371,22 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1,15 \end{bmatrix} \quad (7.97)$$

Girdap akımı ayırıcısından geçen materyal miktarı (x_{13}) denklem 7.99'da, girdap akımı ayırıcısından ayrılarak Al+Cu silosuna gönderilen materyal miktarı (x_{14}) denklem 7.101'de ve yine girdap akımı ayırıcısından ayrılarak Fe silosuna gönderilen materyal miktarı (x_{15}) ise denklem 7.103'de hesaplanmıştır.

$$x_{13} = R_g \cdot x_{11} \quad (7.98)$$

$$x_{13} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,25 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 56,45 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,12 \\ 9,36 \\ 0,51 \\ 391,53 \\ 54,19 \end{bmatrix} \quad (7.99)$$

$$x_{14} = R_g' \cdot x_{11} \quad (7.100)$$

$$x_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,25 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 56,45 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 62,67 \\ 50,33 \\ 0 \\ 1,13 \end{bmatrix} \quad (7.101)$$

$$x_{15} = R_g'' \cdot x_{11} \quad (7.102)$$

$$x_{15} = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 41,25 \\ 72,03 \\ 50,84 \\ 391,53 \\ 56,45 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 37,12 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1,13 \end{bmatrix} \quad (7.103)$$

Havalı sınıflandırıcıdan geçen atık materyal miktarı (x_{16}) denklem 7.105'de ve havalı sınıflandırıcıdan ayrılarak plastik silosuna gönderilen materyal miktarı (x_{17}) ise denklem 7.107'de hesaplanmıştır.

$$x_{16} = R_{hs} \cdot x_{13} \quad (7.104)$$

$$x_{16} = \begin{bmatrix} 0,96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4,12 \\ 9,36 \\ 0,51 \\ 391,53 \\ 54,19 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,96 \\ 8,43 \\ 0,25 \\ 7,83 \\ 52,02 \end{bmatrix} \quad (7.105)$$

$$x_{17} = R_{hs}' \cdot x_{13} \quad (7.106)$$

$$x_{17} = \begin{bmatrix} 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4,12 \\ 9,36 \\ 0,51 \\ 391,53 \\ 54,19 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,16 \\ 0,94 \\ 0,25 \\ 383,69 \\ 2,17 \end{bmatrix} \quad (7.107)$$

Geri dönüşüm sisteminde Fe, Al+Cu ve plastik silolarında ayrılan geri dönüştürülmüş materyal ve atık materyal toplamaları (S) aşağıda verilmiştir. Sırasıyla toplam atık materyal miktarı ($S_{Atık}$) denklem 7.108'de, Fe silosunda toplanan toplam materyal miktarı (S_{Fe}) denklem 7.109'da, Al+Cu silosunda toplanan toplam materyal miktarı (S_{Al+Cu}) denklem 7.110'da ve plastik silosunda toplanan toplam materyal miktarı ($S_{Plastik}$) denklem 7.111'de hesaplanmıştır.

$$S_{Att} = x_3 + x_7 + x_9 + x_{16} = \begin{bmatrix} 8,13 \\ 11,43 \\ 2,37 \\ 11,79 \\ 54,42 \end{bmatrix} \quad (7.108)$$

$$S_{Fe} = x_{12} + x_{15} = \begin{bmatrix} 408,34 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2,28 \end{bmatrix} \quad (7.109)$$

$$S_{Al+Cu} = x_{14} = \begin{bmatrix} 0 \\ 62,67 \\ 50,33 \\ 0 \\ 1,13 \end{bmatrix} \quad (7.110)$$

$$S_{Plastik} = x_{17} = \begin{bmatrix} 0,16 \\ 0,94 \\ 0,25 \\ 383,69 \\ 2,17 \end{bmatrix} \quad (7.111)$$

Materyal geri dönüşüm oranları (η), ele alınan materyalin geri dönüşüm miktarının, beslemedeki miktarına oranı hesaplanarak bulunmuştur. Sırasıyla Fe için geri dönüşüm oranı (η_{Fe}) denklem 7.112’de, Cu için geri dönüşüm oranı (η_{Cu}) denklem 7.113’de, Al için geri dönüşüm oranı (η_{Al}) denklem 7.114’de ve plastik için geri dönüşüm oranı ($\eta_{Plastik}$) denklem 7.115’de verilmiştir.

$$\eta_{Fe} = \frac{m'_{Fe}}{m_{Fe}} \cdot 100 = \frac{408,34}{416,63} \cdot 100 = 98,01 \quad (7.112)$$

$$\eta_{Cu} = \frac{m'_{Cu}}{m_{Cu}} \cdot 100 = \frac{62,67}{75,03} \cdot 100 = 83,52 \quad (7.113)$$

$$\eta_{Al} = \frac{m'_{Al}}{m_{Al}} \cdot 100 = \frac{50,33}{52,96} \cdot 100 = 95,03 \quad (7.114)$$

$$\eta_{Plastik} = \frac{m'_{Plastik}}{m_{Plastik}} \cdot 100 = \frac{383,69}{395,48} \cdot 100 = 97,02 \quad (7.115)$$

Materyal saflık oranları (β), ele alınan materyalin toplama silosundaki miktarının silodaki toplam materyal miktarına oranı hesaplanarak bulunmuştur.

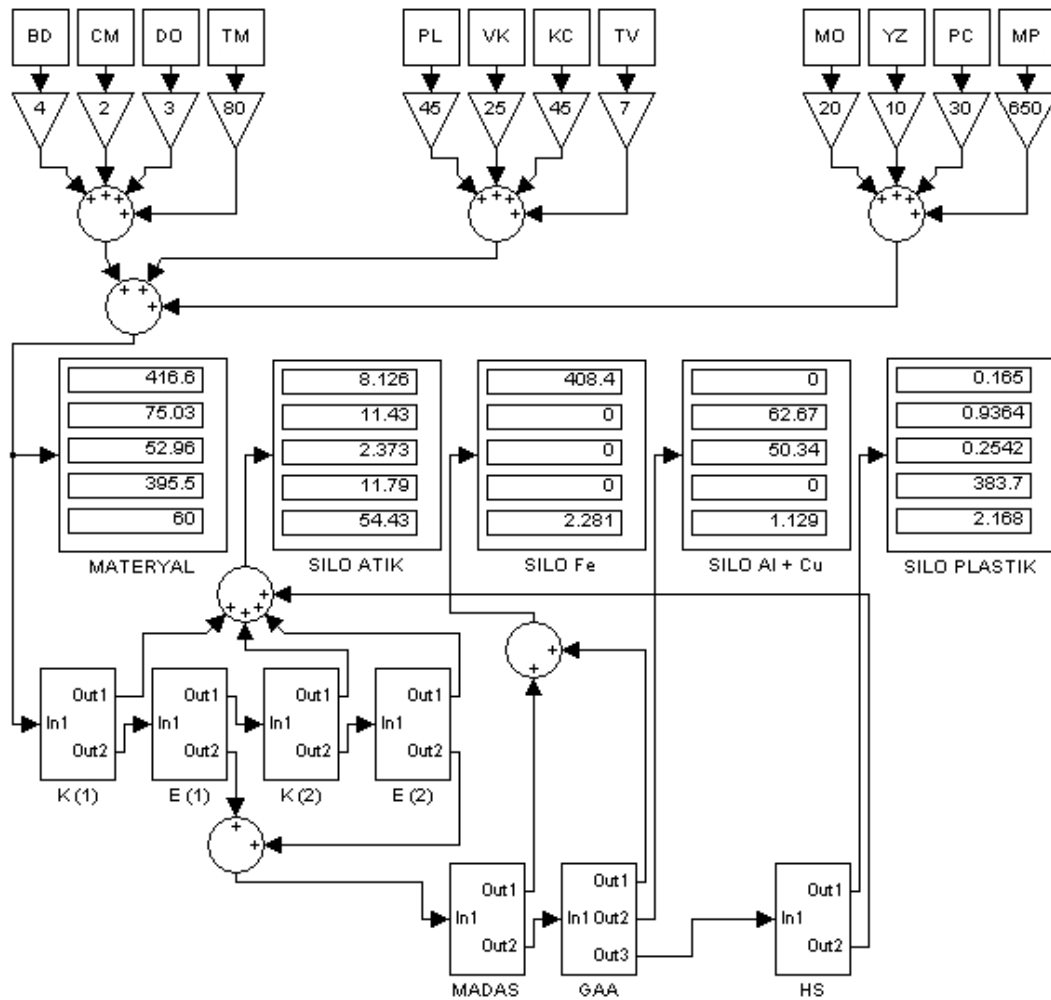
$$\beta_{Fe} = \frac{m'_{Fe}}{m_{SILO-Fe}} \cdot 100 = \frac{408,34}{410,62} \cdot 100 = 99,44 \quad (7.116)$$

$$\beta_{Cu} = \frac{m'_{Cu}}{m_{SILO-Cu+Al}} \cdot 100 = \frac{62,67}{114,13} \cdot 100 = 54,91 \quad (7.117)$$

$$\beta_{Al} = \frac{m'_{Al}}{m_{SILO-Cu+Al}} \cdot 100 = \frac{50,33}{114,13} \cdot 100 = 44,10 \quad (7.118)$$

$$\beta_{Plastik} = \frac{m'_{Plastik}}{m_{SILO-Plastik}} \cdot 100 = \frac{383,69}{387,21} \cdot 100 = 99,09 \quad (7.119)$$

Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.20’de verilmiştir.



Şekil 7.20: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 1)

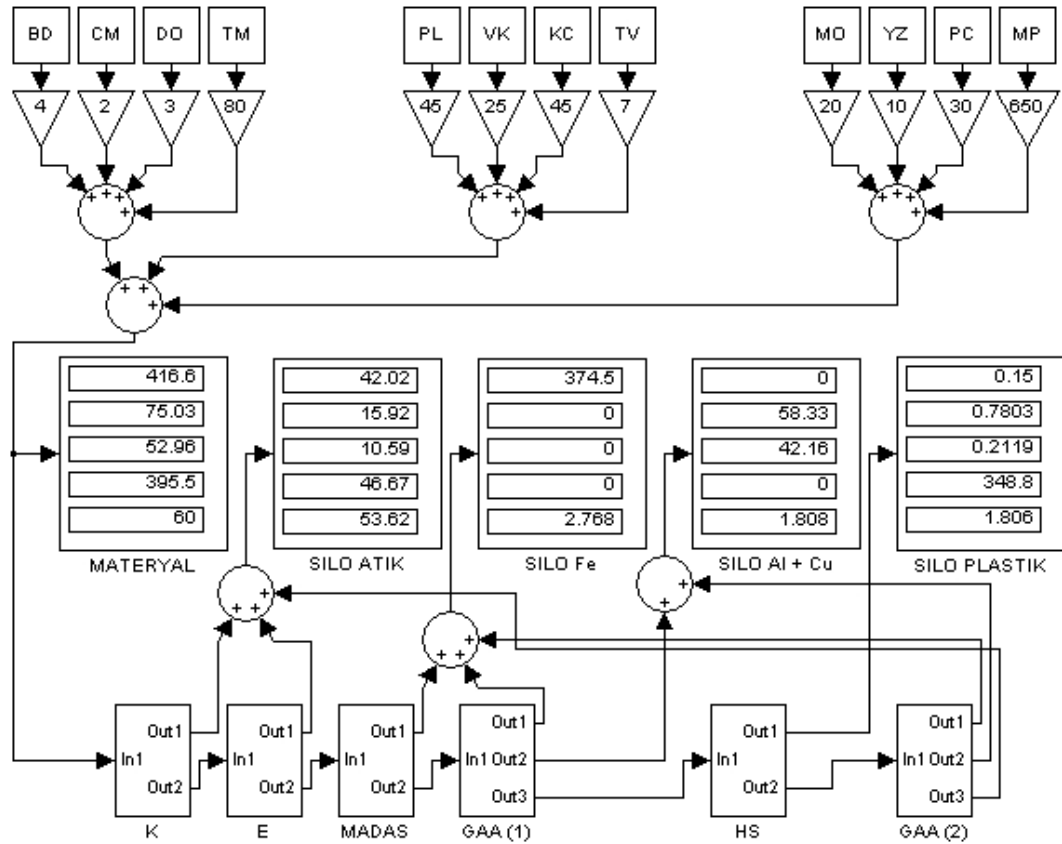
Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları karşılaştırmalı olarak Tablo 7.18’de verilmiştir.

Tablo 7.18: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 1)

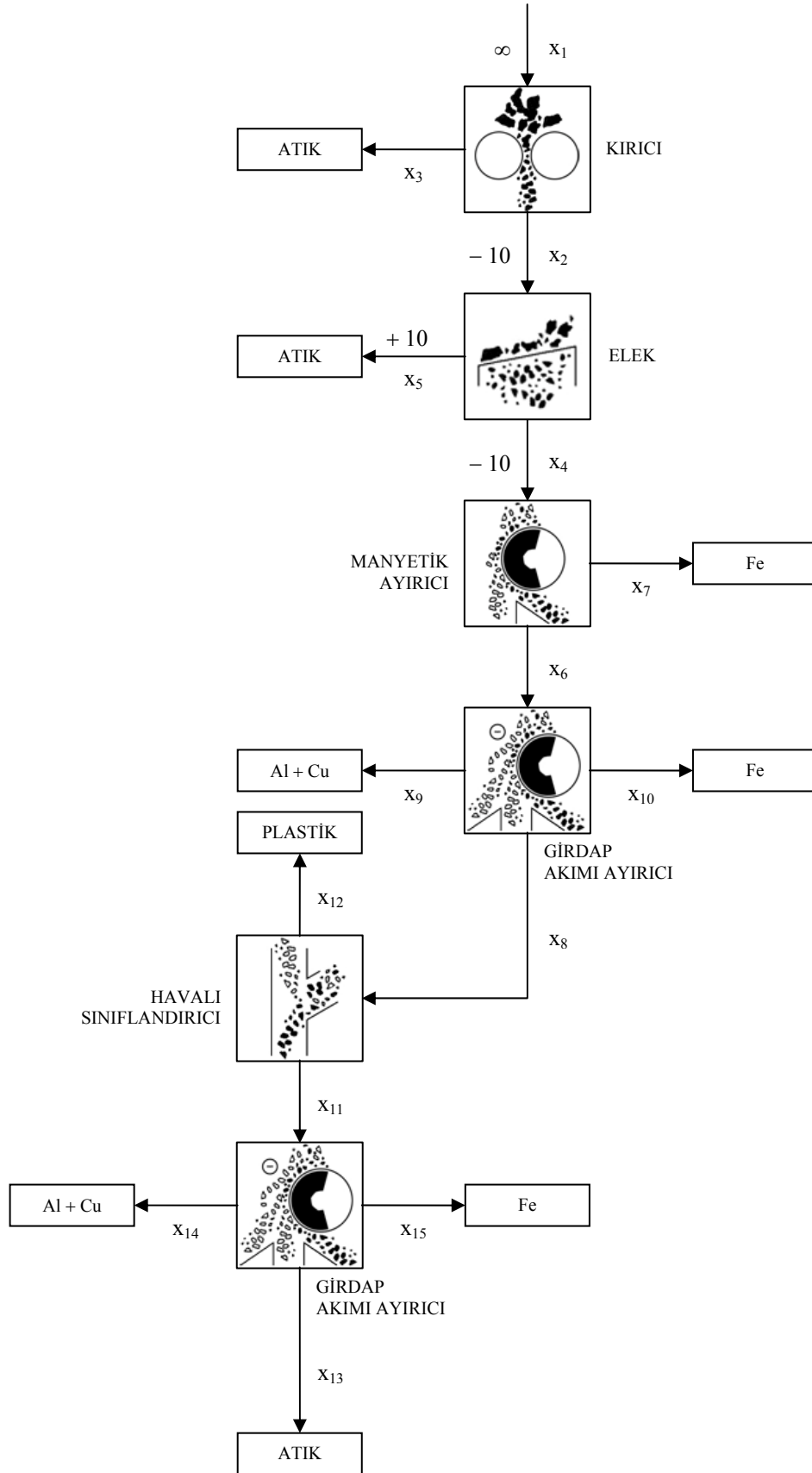
	Besleme		İyileştirme Öncesi			İyileştirme Sonrası		
			Geri Dönüşüm		Saflık	Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	89,10	371,20	99,49	98,03	408,40	99,44
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,90	83,52	62,67	54,91
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,11	95,03	50,34	44,10
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	99,16	97,02	383,70	99,09
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74	90,71	54,43	61,75
Toplam	100,00	1000,11	86,95	869,53	-	95,94	959,45	-

7.3.2 Senaryo 2

Senaryo 2’de geri dönüşüm sistemi sonundan atık olarak ayrılan materyalin, atık silosu yerine ikinci bir girdap akımı ayırıcısına gönderilmesinin geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranlarına etkisi incelenecektir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.21’de yer almaktadır. Buna göre tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı Şekil 7.22’de verilmiştir. Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak yapılan iyileştirme sonucu elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak Tablo 7.19’de verilmiştir.



Şekil 7.21: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 2)



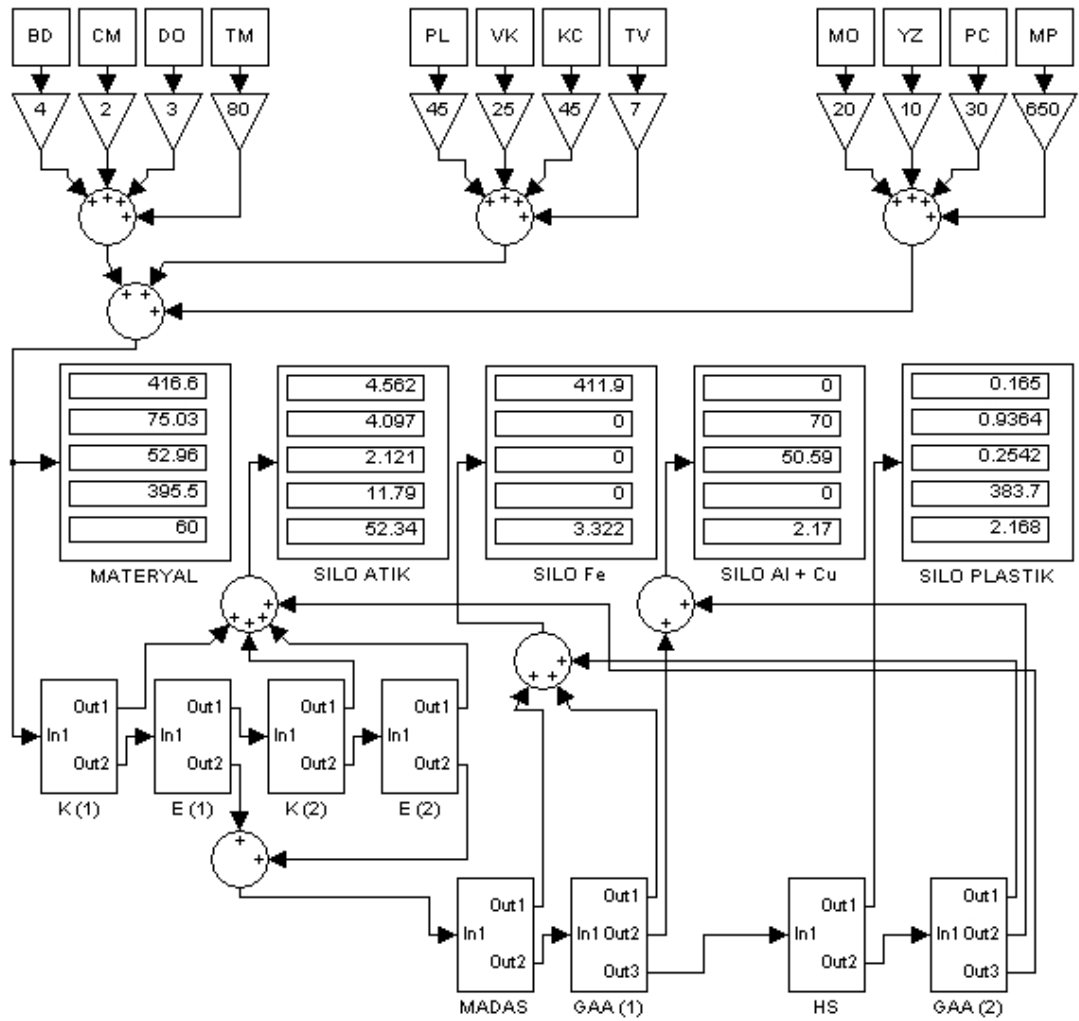
Şekil 7.22: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 2)

Tablo 7.19: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 2)

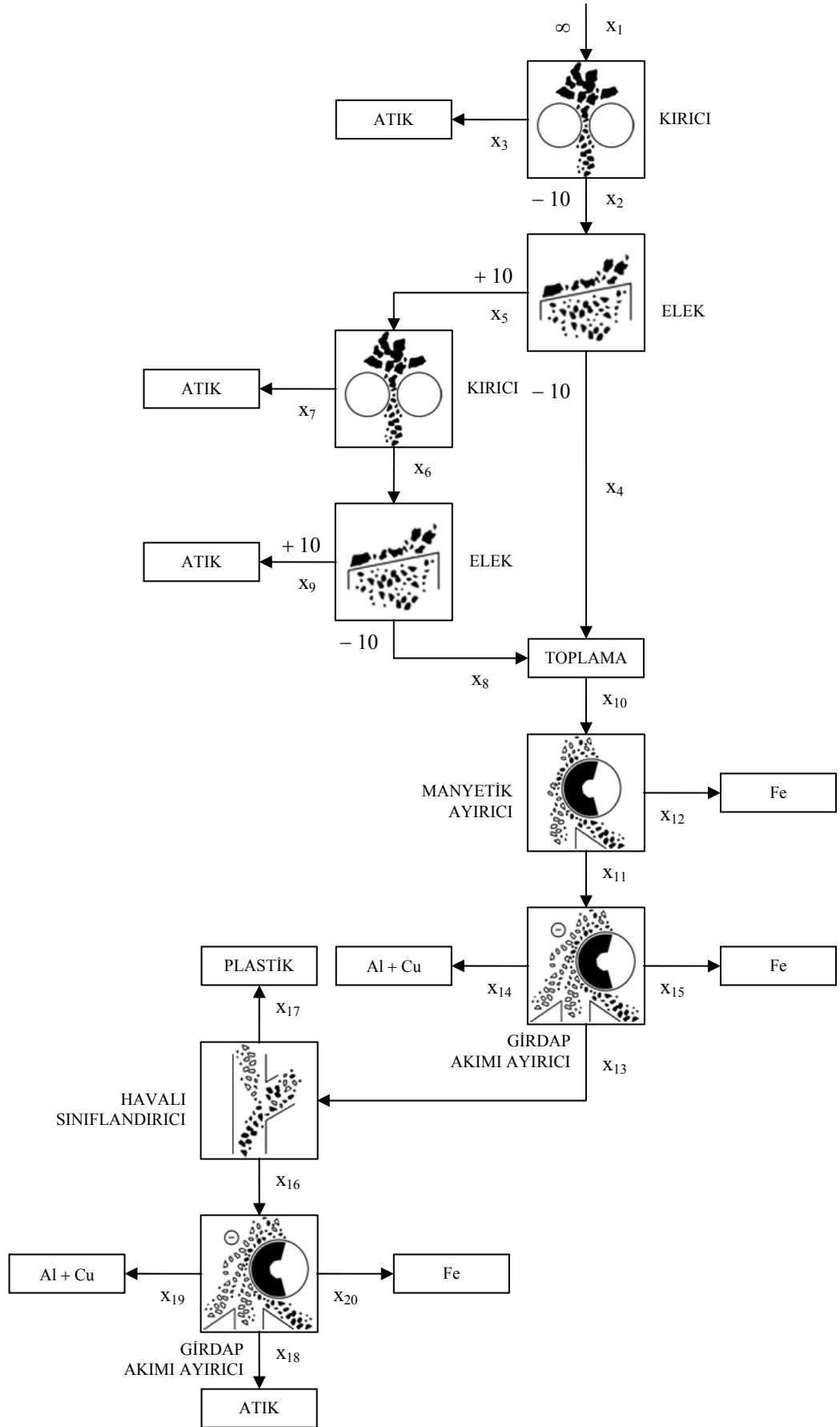
	Besleme		İyileştirme Öncesi			İyileştirme Sonrası		
			Geri Dönüşüm		Saflık	Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	89,10	371,20	99,49	89,89	374,50	99,27
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,90	77,74	58,33	57,02
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,11	79,60	42,16	41,21
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	99,16	88,20	348,80	99,16
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74	89,36	53,62	31,76
Toplam	100,00	1000,11	86,95	869,53	-	87,73	877,41	-

7.3.3 Senaryo 3

Senaryo 3’de; senaryo 1 ve senaryo 2’nin beraber uygulanmasının, geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranlarına etkisi incelenecektir. Buna göre tasarlanan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.23’de, geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı Şekil 7.24’de verilmiştir.



Şekil 7.23: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 3)



Şekil 7.24: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 3)

Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları Tablo 7.20’de verilmiştir.

Tablo 7.20: Materyal Geri Dönüşüm ve Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 3)

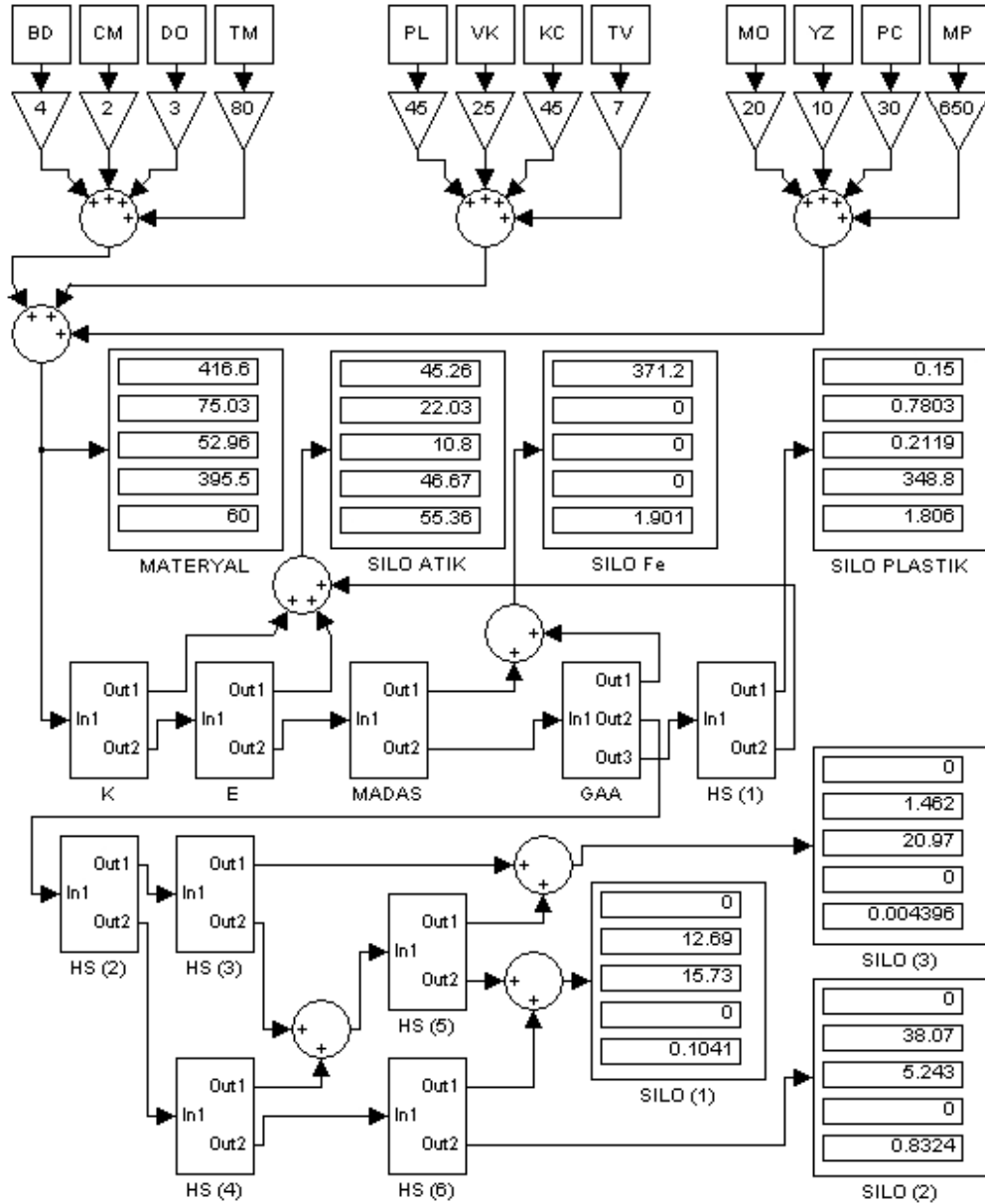
	Besleme		İyileştirme Öncesi			İyileştirme Sonrası		
			Geri Dönüşüm		Saflık	Geri Dönüşüm		Saflık
	%	kg	%	kg	%	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	89,10	371,20	99,49	98,87	411,90	99,20
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,90	93,29	70,00	57,02
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,11	95,52	50,59	41,21
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	99,16	97,02	383,70	99,09
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74	87,23	52,34	69,87
Toplam	100,00	1000,11	86,95	869,53	-	96,84	968,53	-

7.3.4 Senaryo 4

Senaryo 4’de, temel alınan geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının iyileştirilmesi için tasarlanan senaryolardan farklı olarak, temel alınan geri dönüşüm sisteminin karışım halinde ayrılan alüminyum ve bakırın birbirinden ayrılarak saflık derecelerinin artırılması için ek bir ayırma işleminin uygulanmasının materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarına etkisi incelenecektir.

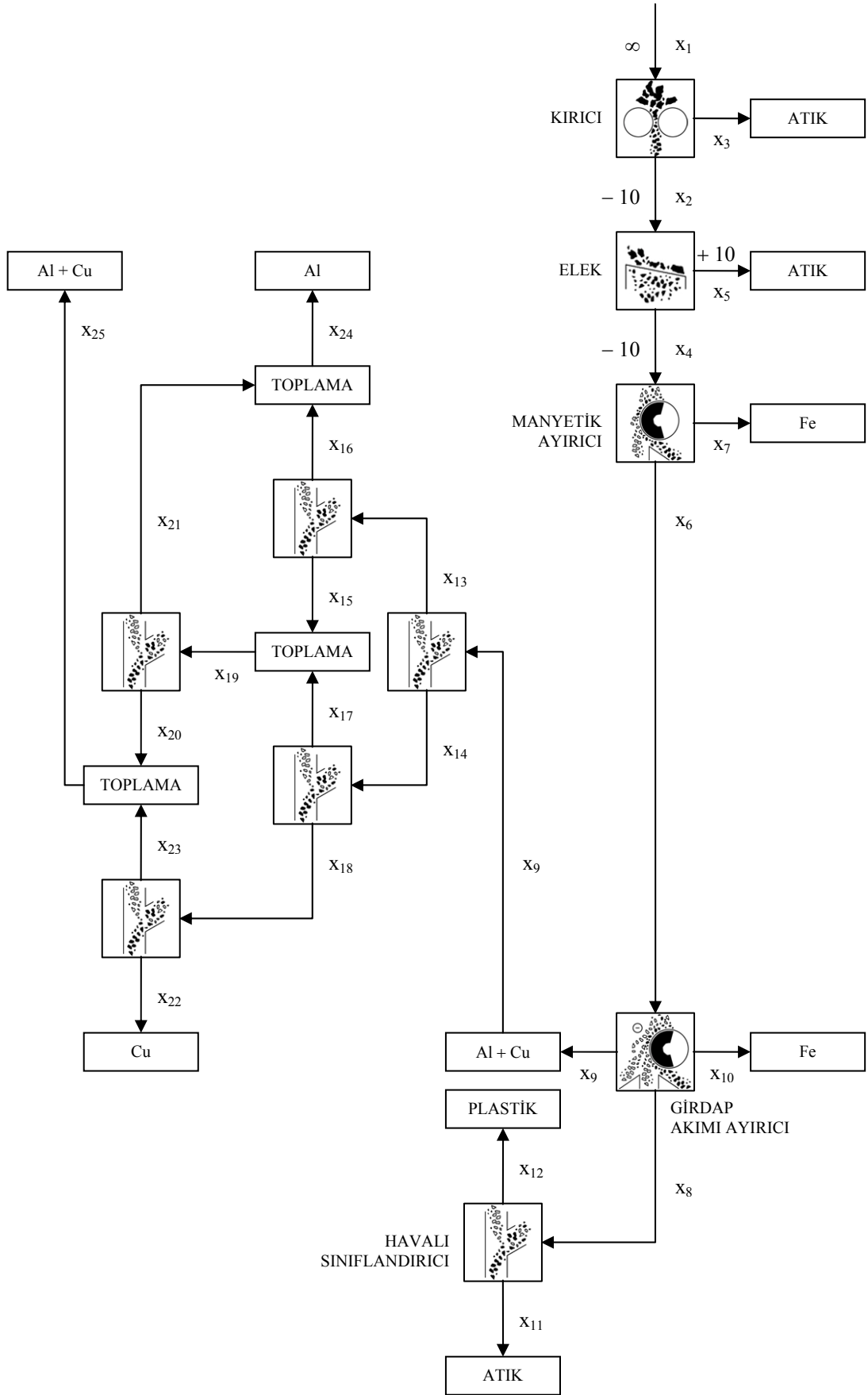
Geri dönüşüm sisteminden karışım halinde toplanan bakır ve alüminyumun birbirinden ayrılması için kullanılabilecek ayırma yöntemleri ve ayırma makineleri Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 kullanılarak belirlenebilir. Tablo 7.5 göz önüne alındığında bakır ve alüminyum karışımının ayrılmasında girdap akımı ayırıcıları, elektrostatik ayırıcılar ve havalı sınıflandırıcıların kullanılabileceği görülür. Tablo 7.6 yardımıyla ayırıcılar için geçerli olan tane boyutu kriterleri temel alınarak ayırıcı seçimi yapılabilir. Buna göre havalı sınıflandırıcılar için çalışılabilir tane boyutu aralığının $-10 +1$, girdap akımı ayırıcıları için çalışılabilir tane boyutu aralığının $-10 +5$ ve elektrostatik ayırıcılar için çalışılabilir tane boyutu aralığının ise $-5 +0,1$ olduğu görülür. Temel sistemde Al+Cu silosunda toplanan geri dönüşümle elde edilmiş olan bakır ve alüminyum karışımının tane boyutunun -10 olduğu düşünülürse, bu ayırma işlemi için elektrostatik ayırıcıların kullanılması durumunda ilave bir kırıcı ve eleğe gereksinim olacağı aşikârdır. Bunun yanı sıra girdap akımı ayırıcıları ile havalı sınıflandırıcılar arasında bir kıyaslama yapılması durumunda, havalı sınıflandırıcıların çalışılabilir tane boyutu aralığının girdap akımı ayırıcılarının çalışılabilir tane boyutu aralığından daha geniş olduğu görülür. Ayrıca her bir ayırma makinesinin ilk yatırım ve işletme maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu iyileştirme senaryosu için havalı sınıflandırıcıların kullanılması tercih edilmiştir. Buna göre tasarlanan geri dönüşüm sistemine ait benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları Şekil 7.25’de, kütle akış diyagramı Şekil 7.26’da verilmiştir.



Şekil 7.25: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 4)

Şekil 7.25’de ve Şekil 7.26’da görüldüğü gibi beş kademeli bir havalı sınıflandırma sistemi kullanılmıştır. Beş kademeli bu havalı sınıflandırma sisteminde bakır ve alüminyum karışımı üç ayrı siloda ve ayrı saflık oranlarında ayrılmıştır. Bunlar sırasıyla bakır ve alüminyumun yine karışım olarak toplanmasının hedeflendiği Silo 1, bakırın yüksek oranda toplanmasının hedeflendiği Silo 2 ve son olarak da alüminyumun yüksek oranda toplanmasının hedeflendiği Silo 3’dür.



Şekil 7.26: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 4)

Tablo 7.21 ve Tablo 7.22’de temel geri dönüşüm sistemi ve beş kademeli havalı sınıflandırma sistemi ile elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları, her bir siloda toplanan materyal oranları baz alınarak, karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.21: Materyal Geri Dönüşüm Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 4)

	Al + Cu Besleme		Silo 1 (Cu + Al)		Silo 2 (Cu)		Silo (Al)	
	%	Kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	69,60	52,22	16,91	12,69	50,74	38,07	1,95	1,46
Al	79,21	41,95	29,70	15,73	9,90	5,24	39,59	20,97
Plastik	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diğer	1,57	0,94	0,17	0,10	1,39	0,83	0,01	0,00
Toplam	9,51	95,11	2,85	28,52	4,41	44,15	2,24	22,44

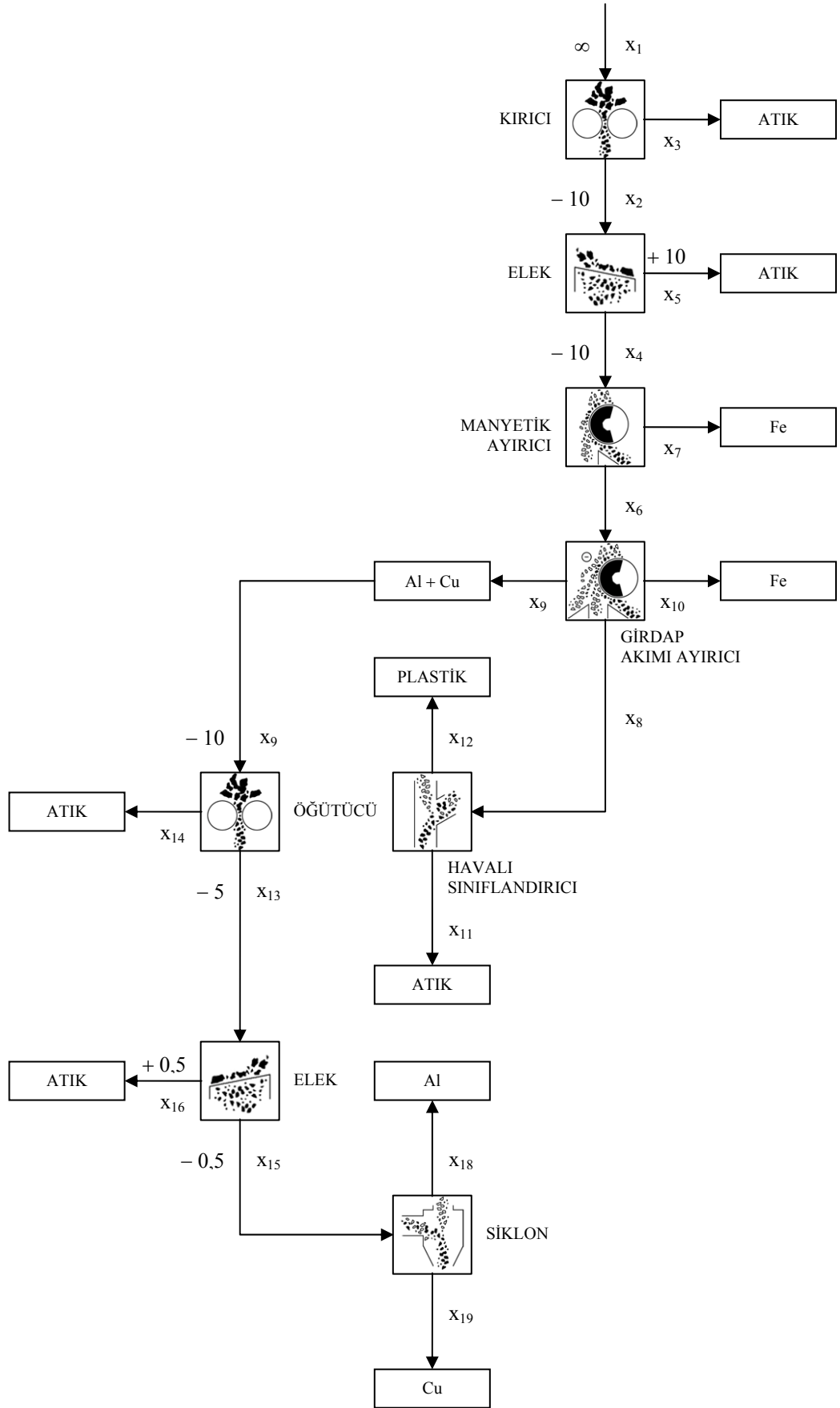
Tablo 7.22: Materyal Saflık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 4)

	Al + Cu Besleme		Silo 1 (Cu + Al)		Silo 2 (Cu)		Silo (Al)	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	54,90	52,22	44,49	12,69	86,24	38,07	6,52	1,46
Al	44,11	41,95	55,15	15,73	11,88	5,24	93,46	20,97
Plastik	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diğer	0,99	0,94	0,36	0,10	1,89	0,83	0,02	0,00
Toplam	100,00	95,11	100,00	28,52	100,00	44,15	100,00	22,44

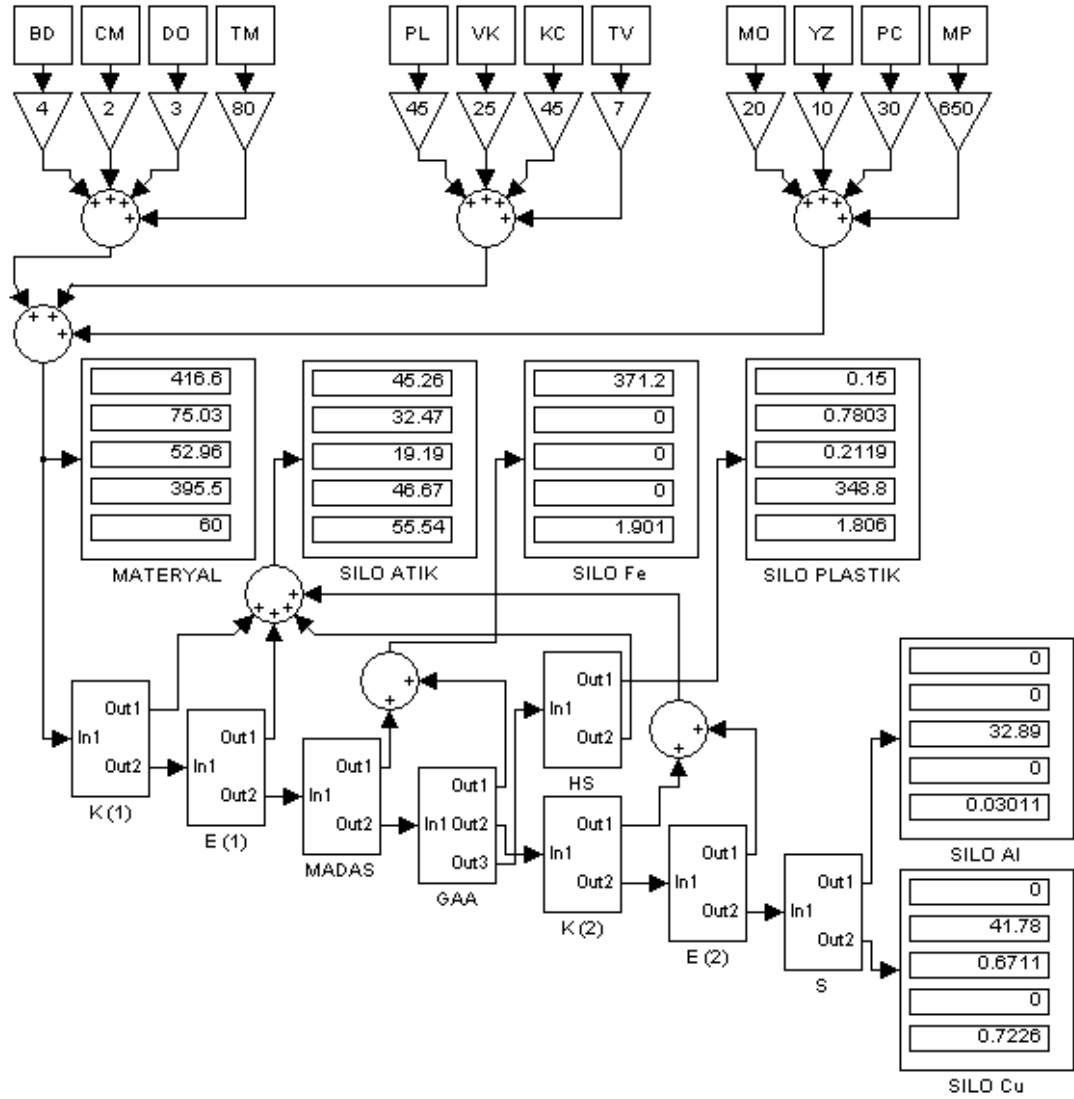
Tablo 7.22’de beş kademeli havalı sınıflandırma sisteminin kullanılması durumunda bile bakır için elde edilen saflık oranının %86,24 ve alüminyum için elde edilen saflık oranının ise %93,46 olduğu görülmektedir. Sınıflandırma kademelerinin artırılması ile bu oranların daha da yukarı çekilmesi mümkündür.

7.3.5 Senaryo 5

Senaryo 5’de karışım halindeki alüminyum ve bakırın birbirinden ayrılarak saflık derecelerinin artırılması için siklon kullanılmasının materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarına etkisi incelenecektir. Alüminyumun ve bakırın siklon ile ayrılabilmesi için tane boyutunun 0,5 mm’nin altına indirilmesi gereklidir. Bu nedenle sistemde ek olarak materyal boyutunu 0,5 mm altına düşürecek bir öğütücü ve siklona girecek olan materyalin tane boyutunu kontrol edebilmek için de 0,5 mm elek açıklığına sahip bir elek sisteme ilave edilmiştir. Buna göre tasarlanmış olan geri dönüşüm sistemine ait kütle akış diyagramı Şekil 7.27’de verilmiştir. Sistem için yapılan benzetim ve materyal geri dönüşüm miktarları ise Şekil 7.28’de yer almaktadır. Sistemin materyal geri dönüşüm ve materyal saflık oranları hesaplanarak yapılan iyileştirme sonucu elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak sırasıyla Tablo 7.23’de verilmiştir.



Şekil 7.27: Sistem Modeli ve Kütle Akış Diyagramı (Senaryo 5)



Şekil 7.28: Benzetim ve Materyal Geri Dönüşüm Miktarları (Senaryo 5)

Tablo 7.23: Materyal Geri Dönüşüm ve Safılık Oranları Sonuç Tablosu (Senaryo 5)

	Besleme		İyileştirme Öncesi			İyileştirme Sonrası		
			Geri Dönüşüm		Safılık	Geri Dönüşüm		Safılık
	%	kg	%	kg	%	%	kg	%
Fe	58,28	416,63	89,10	371,20	99,49	89,10	371,20	99,49
Cu	3,84	75,03	69,60	52,22	54,90	55,68	41,78	96,77
Al	6,72	52,96	79,21	41,95	44,11	62,10	32,89	99,91
Plastik	21,57	395,48	88,20	348,80	99,16	88,20	348,80	99,16
Diğer	9,59	60,00	92,26	55,36	30,74	92,56	55,54	27,89
Toplam	100,00	1000,11	86,95	869,53	-	85,01	850,21	-

Tablo 7.23’de görüldüğü gibi tasarlanan sistem alüminyum ve bakırın yüksek saflık oranında ayrılmasını sağlamasına rağmen alüminyumun ve bakırın geri dönüşüm oranının düşmesine neden olmuştur.

7.3.6 Senaryoların Karşılaştırılması

Geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm oranını artırmak amacıyla ele alınan farklı senaryolara göre elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranları sırasıyla Tablo 7.24’de ve Tablo 7.25’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca geri dönüşüm sisteminden karışım halinde alınan bakırın ve alüminyumun, ilave ayırma işlemleri ile ayrılarak saflık oranlarını artırmak amacıyla tasarlanan senaryolara göre elde edilen geri dönüşüm ve saflık oranları da karşılaştırmalı olarak sırasıyla Tablo 7.26 ve Tablo 7.27’de verilmiştir.

Tablo 7.24: Geri Dönüşüm Oranlarının Karşılaştırılması

	İyileştirme Öncesi		İyileştirme Sonrası Geri Dönüşüm Miktarları ve Oranları					
			Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3 (1 ve 2)	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	89,10	371,20	98,03	408,40	89,89	374,50	98,87	411,90
Cu	69,60	52,22	83,52	62,67	77,74	58,33	93,29	70,00
Al	79,21	41,95	95,03	50,34	79,60	42,16	95,52	50,59
Plastik	88,20	348,80	97,02	383,70	88,20	348,80	97,02	383,70
Diğer	92,26	55,36	90,71	54,43	89,36	53,62	87,23	52,34
Toplam	86,95	869,53	95,94	959,45	87,73	877,41	96,84	968,53

Tablo 7.25: Saflık Oranlarının Karşılaştırılması

	İyileştirme Öncesi		İyileştirme Sonrası Geri Dönüşüm Miktarları ve Saflık Oranları					
			Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3 (1 ve 2)	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Fe	99,49	371,20	99,44	408,40	99,27	374,50	99,20	411,90
Cu	54,90	52,22	54,91	62,67	57,02	58,33	57,02	70,00
Al	44,11	41,95	44,10	50,34	41,21	42,16	41,21	50,59
Plastik	99,16	348,80	99,09	383,70	99,16	348,80	99,09	383,70
Diğer	30,74	55,36	61,75	54,43	31,76	53,62	69,87	52,34

Tablo 7.26: Cu ve Al İçin Geri Dönüşüm Oranlarının Karşılaştırılması

	İyileştirme Öncesi		İyileştirme Sonrası Geri Dönüşüm Miktarları ve Oranları							
			Senaryo 4						Senaryo 5	
			Silo 1 (Cu+Al)		Silo 2 (Cu)		Silo 3 (Al)			
	%	Kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Cu	69,60	52,22	16,91	12,69	50,74	38,07	1,95	1,46	55,68	41,78
Al	79,21	41,95	29,70	15,73	9,90	5,24	39,59	20,97	62,10	32,89

Tablo 7.27: Cu ve Al İçin Saflık Oranlarının Karşılaştırılması

	İyileştirme Öncesi		İyileştirme Sonrası Geri Dönüşüm Miktarları ve Saflık Oranları							
			Senaryo 4						Senaryo 5	
			Silo 1 (Cu+Al)		Silo 2 (Cu)		Silo 3 (Al)			
	%	Kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Cu	54,90	52,22	44,49	12,69	86,24	38,07	6,52	1,46	96,77	41,78
Al	44,11	41,95	55,15	15,73	11,88	5,24	93,46	20,97	99,91	32,89

Geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının artırılması için tasarlanan sistemlere ait elde edilen değerlerin bir özeti olan tablolar incelendiğinde geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının uygulanan iyileştirmeler sonucunda artırılabilceği görülmektedir. Bunun yanı sıra geri dönüşüm sisteminden bakırın ve alüminyumun girdap akımı ayırıcısında birlikte ayrılmaları bakır ve alüminyumun ancak düşük saflıkta elde edilebilmelerine neden olmaktadır. Karışım halindeki alüminyum ve bakır birbirinden ayrılması ek ayırma işlemleriyle sağlanabilir. Bakır ve alüminyum için söz konusu durum plastikler için de söz konusudur. Yüksek geri dönüşüm oranıyla materyal karışımından ayrılan plastiklerin de ek ayırma işlemleriyle cinslerine ayrılması sağlanabilir. Ancak materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının artırılması, sistem tasarımının belirlenmesinde tek başına yeterli değildir. Sistemde yapılabilecek iyileştirmelerin belirlenebilmesi açısından ilk yatırım maliyetlerinin, işletme giderlerinin ve materyal satış gelirlerinin de göz önüne alınarak değerlendirilmesi gereklidir.

7.4 Sistem Tasarımı İçin Gider ve Gelirlerin Tespiti

Bu bölümde sistem tasarımında etkili olan ilk yatırım maliyetleri ve işletme giderleri ile geri dönüşüm sonrasında elde edilecek materyallerin satışından elde edilecek gelirlerin tahmini tespiti yapılacaktır. Geri dönüşüm sisteminde kullanılabilecek kırma ve ayırma makineleri başta makine imalatçıları olmak üzere çeşitli kaynaklardan yararlanılarak tespit edilmiş ve karşılaştırmalı olarak Tablo 7.28'de sunulmuştur [115, 148-159]. Makine fiyat aralığının belirlenmesinde, maksimum 4 ton.sa⁻¹ kapasite için kullanılabilecek makineler temel alınmıştır. Makinelerin kapasiteleri atık karışımı içerisindeki materyallerin oranlarına bağlı olarak değişeceğinden ve söz konusu makineler için tek bir standart kapasiteden bahsetmek güçtür. Sistemde kullanılabilecek makinelerin seçiminde, sisteme beslenecek atık karışımının içerdiği materyal oranlarının da değişebileceği göz önüne alınmalıdır. EK E'de makine imalatçıların kataloglarından elde edilen; çekiçli kırıcılar, kesmeli kırıcılar, öğütücüler, havalı sınıflandırıcılar, girdap akımı ayırıcılar, tamburlu manyetik ayırıcılar, bantlı elektro mıknatıslı manyetik ayırıcılar ve bantlı doğal manyetik ayırıcılar ve tek katlı titreşimli eleklere ait sistem tasarımında etkili olan teknik veriler derlenerek tablolar halinde sunulmuştur.

Tablo 7.28: Boyut Küçültme ve Ayırma Makineleri İçin Fiyat Aralıkları

Boyut Küçültme ve Ayırma Makineleri	Fiyat Aralığı (\$) (4 ton.saat ⁻¹ Kapasiteye Kadar)
Kırıcılar ve Öğütücüler	50.000 – 450.000
Elekler	2.500 – 10.500
Havalı Sınıflandırıcılar	20.000 – 80.000
Siklon	30.000 – 90.000
Tamburlu Manyetik Ayırıcılar	8.000 – 50.000
Bantlı Doğal Mıknatıslı Manyetik Ayırıcılar	10.000 – 85.000
Bantlı Elektro Mıknatıslı Manyetik Ayırıcılar	20.000 – 95.000
Girdap Akımı Ayırıcıları	50.000 – 120.000

Tablo 7.28 yer alan boyut küçültme ve ayırma makineleri için fiyat aralıkları ve EK E’de yer alan geri dönüşüm sisteminde kullanılabilecek olan makinelere ait veriler göz önüne alınarak temel sistem tasarımı ve iyileştirme alternatifleri için tahmini ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri hesaplanmıştır. Tablo 7.29’da ilk yatırım maliyetleri ve Tablo 7.30’de ise ayırma ve kırma makinelerine ait işletme giderleri sunulmuştur. Hesaplara; arazi, inşaat ve kurulum masrafları, geri kazanım tesisine gelen elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının, demontajı yapılmış bileşenlerin ve geri dönüşüm sonunda elde edilen materyallerin ve atıkların depolama maliyetleri, nakliye ve işçilik giderleri ile vergiler yansıtılmamıştır. Detaylı bir maliyet analizi sunabilmek için bu kalemlerinde belirlenerek yapılan hesaplara dahil edilmesi gereklidir.

Tablo 7.29: İlk Yatırım Maliyetleri

İlk Yatırım Maliyetleri (\$)	Adet	Temel Sistem	İyileştirme (1)	İyileştirme (2)
Kırıcı (1)	1	330.000,00	330.000,00	330.000,00
Kırıcı (2)	1	200.000,00	200.000,00	200.000,00
Elek (1)	1	3.500,00	3.500,00	3.500,00
Tamburlu Manyetik Ayırıcı	1	9.000,00	9.000,00	9.000,00
Girdap Akımı Ayırıcı (1)	1	85.000,00	85.000,00	85.000,00
Havalı Sınıflandırıcı (1)	1	22.000,00	22.000,00	22.000,00
Kırıcı (3)	1	-	200.000,00	-
Elek (2)	1	-	3.500,00	-
Girdap Akımı Ayırıcı (2)	1	-	-	60.000,00
Havalı Sınıflandırıcı (2)	5	-	-	-
Öğütücü	1	-	-	-
Elek (3)	1	-	-	-
Siklon	1	-	-	-
Bantlı Konveyör (1)	12	45.000,00	45.000,00	45.000,00
Bantlı Konveyör (2)	4	-	6.000,00	-
Bantlı Konveyör (3)	3	-	-	3.000,00
Bantlı Konveyör (4)	8	-	-	-
Bantlı Konveyör (5)	7	-	-	-
Silo (1)	7	3.500,00	3.500,00	3.500,00
Silo (2)	2	-	1.000,00	1.000,00
Silo (3)	4	-	-	-
Silo (4)	6	-	-	-
Toplam Yatırım Maliyeti	-	698.000,00	908.500,00	762.000,00

Tablo 7.29: İlk Yatırım Maliyetleri (Devam)

İlk Yatırım Maliyetleri (\$)	Adet	İyileştirme (3)	İyileştirme (4)	İyileştirme (5)
Kırıcı (1)	1	330.000,00	330.000,00	330.000,00
Kırıcı (2)	1	200.000,00	200.000,00	200.000,00
Elek (1)	1	3.500,00	3.500,00	3.500,00
Tamburlu Manyetik Ayırıcı	1	9.000,00	9.000,00	9.000,00
Girdap Akımı Ayırıcı (1)	1	85.000,00	85.000,00	85.000,00
Havalı Sınıflandırıcı (1)	1	22.000,00	22.000,00	22.000,00
Kırıcı (3)	1	200.000,00	-	-
Elek (2)	1	3.500,00	-	-
Girdap Akımı Ayırıcı (2)	1	60.000,00	-	-
Havalı Sınıflandırıcı (2)	5	-	110.000,00	-
Öğütücü	1	-	-	330.000,00
Elek (3)	1	-	-	5.000,00
Siklon	1	-	-	40.000,00
Bantlı Konveyör (1)	12	45.000,00	45.000,00	45.000,00
Bantlı Konveyör (2)	4	-	-	-
Bantlı Konveyör (3)	3	-	-	-
Bantlı Konveyör (4)	8	25.000,00	25.000,00	-
Bantlı Konveyör (5)	7	-	-	21.000,00
Silo (1)	7	3.500,00	3.500,00	3.500,00
Silo (2)	2	-	-	-
Silo (3)	4	2.000,00	-	2.000,00
Silo (4)	6	-	3.000,00	-
Toplam Yatırım Maliyeti	-	988.500,00	836.000,00	1.096.000,00

Tablo 7.30: İşletme Giderleri

İşletme Giderleri (\$) (1 ton.kWh ⁻¹)	Adet	Temel Sistem	İyileştirme (1)	İyileştirme (2)
Kırıcı (1)	1	7,92	7,92	7,92
Kırıcı (2)	1	2,16	2,16	2,16
Elek (1)	1	0,16	0,16	0,16
Tamburlu Manyetik Ayırıcı	1	0,04	0,04	0,04
Girdap Akımı Ayırıcı (1)	1	0,54	0,54	0,54
Havalı Sınıflandırıcı (1)	1	0,37	0,37	0,37
Kırıcı (3)	1	-	2,16	-
Elek (2)	1	-	0,16	-
Girdap Akımı Ayırıcı (2)	1	-	-	0,54
Havalı Sınıflandırıcı (2)	5	-	-	-
Öğütücü	1	-	-	-
Elek (3)	1	-	-	-
Siklon	1	-	-	-
Bantlı Konveyör (1)	12	1,30	1,30	1,30
Bantlı Konveyör (2)	4	-	0,43	-
Bantlı Konveyör (3)	3	-	-	0,32
Bantlı Konveyör (4)	8	-	-	-
Bantlı Konveyör (5)	7	-	-	-
Toplam İşletme Gideri		12,49	15,24	13,35
Yıllık Toplam İşletme Gideri		36.366,22	44.375,39	38.882,19

Tablo 7.30: İşletme Giderleri (Devam)

İşletme Giderleri (\$) (1 ton.kWh ⁻¹)	Adet	İyileştirme (3)	İyileştirme (4)	İyileştirme (5)
Kırıcı (1)	1	7,92	7,92	7,92
Kırıcı (2)	1	2,16	2,16	2,16
Elek (1)	1	0,16	0,16	0,16
Tamburlu Manyetik Ayırıcı	1	0,04	0,04	0,04
Girdap Akımı Ayırıcı (1)	1	0,54	0,54	0,54
Havalı Sınıflandırıcı (1)	1	0,37	0,37	0,37
Kırıcı (3)	1	2,16	-	-
Elek (2)	1	0,16	-	-
Girdap Akımı Ayırıcı (2)	1	-	-	-
Havalı Sınıflandırıcı (2)	5	-	1,87	-
Öğütücü	1	-	-	12,24
Elek (3)	1	-	-	0,16
Siklon	1	-	-	0,32
Bantlı Konveyör (1)	12	1,30	1,30	1,30
Bantlı Konveyör (2)	4	-	-	-
Bantlı Konveyör (3)	3	-	-	-
Bantlı Konveyör (4)	8	0,86	0,86	-
Bantlı Konveyör (5)	7	-	-	0,76
Toplam İşletme Gideri		15,67	15,22	25,97
Yıllık Toplam İşletme Gideri		45.633,37	44.333,45	75.615,32

Tablo 7.29 ve Tablo 7.30’de ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri açısından en ucuz tasarımın temel sistem tasarımına ve ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri açısından en pahalı tasarımın ise 5 numaralı iyileştirme senaryosunda yer alan sistem tasarımına ait olduğu görülmektedir.

Geri dönüşüm sisteminden elde edilecek olan materyallerin satışından elde edilecek gelirlerden, işletme masrafları düşülerek, yapılan ilk yatırım maliyetlerini geri ödeme süreleri tespit edilmesi gereklidir. Materyallerin satış gelirleri Tablo 3.10 temel alınarak hesaplanarak, Tablo 7.31’de birim materyal satış gelirleri ve Tablo 7.32’de ise toplam materyal satış gelirleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hesaplamalarda her bir senaryo için geri dönüşüm sisteminden elde edilen materyallerin saflık oranları dikkate alınarak, her bir materyal için saflık oranına bağlı birim satış fiyatları belirlenmiştir.

Tablo 7.31: Birim Materyal Satış Gelirleri

	Temel Sistem			İyileştirme (1)			İyileştirme (2)		
	kg	%	\$.kg	kg	%	\$.kg	kg	%	\$.kg
Fe	373,10	99,49	0,11	410,68	99,44	0,11	377,27	99,27	0,11
Al+Cu	95,11	54,90	1,25	114,14	54,91	1,25	102,30	57,02	1,25
Plastik	351,75	99,16	0,22	387,22	99,09	0,22	351,75	99,16	0,22
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 7.31: Birim Materyal Satış Gelirleri (Devam)

	İyileştirme (3)			İyileştirme (4)			İyileştirme (5)		
	kg	%	\$.kg	kg	%	\$.kg	kg	%	\$.kg
Fe	415,22	99,20	0,11	373,10	99,49	0,11	373,10	99,49	0,11
Al+Cu	122,76	57,02	1,25	28,52	44,49	0,85	-	-	-
Plastik	387,22	99,09	0,22	351,75	99,16	0,22	351,75	99,16	0,22
Al	-	-	-	22,44	93,46	1,70	32,92	99,91	1,89
Cu	-	-	-	44,15	86,24	2,00	43,17	96,77	2,25

Tablo 7.32: Toplam Materyal Satış Gelirleri

Materyal Satış Gelirleri (\$) (1 ton.saatt ⁻¹)	Temel Sistem	İyileştirme (1)	İyileştirme (2)
Fe	41,04	45,17	41,50
Al+Cu	118,89	142,68	127,88
Plastik	77,39	85,19	77,39
Al	-	-	-
Cu	-	-	-
Toplam Materyal Satış Geliri	237,31	273,04	246,76
Yıllık Toplam Gelir	691.056,91	795.087,24	718.564,25

Tablo 7.32: Toplam Materyal Satış Gelirleri (Devam)

Materyal Satış Gelirleri (\$) (1 ton.saatt ⁻¹)	İyileştirme (3)	İyileştirme (4)	İyileştirme (5)
Fe	45,67	41,04	41,04
Al+Cu	153,45	24,24	-
Plastik	85,19	77,39	77,39
Al	-	38,15	62,22
Cu	-	88,30	97,13
Toplam Materyal Satış Geliri	284,31	269,12	277,78
Yıllık Toplam Gelir	827.918,29	783.665,79	808.887,50

Tablo 7.32’da geri dönüşüm sistemi tasarımı alternatiflerinden elde edilen materyallerin saflık oranlarına bağlı olarak yapılan hesaplara göre, materyal satış geliri en düşük tasarımın temel sistem tasarımına ve materyal satış geliri en yüksek tasarımın ise 5 numaralı iyileştirme senaryosunda yer alan tasarımına ait olduğu görülmektedir. Temel sistem tasarımı düşük ilk yatırım maliyetli, düşük işletme giderli ve az gelirli bir sistem tasarımı ve 5 numaralı iyileştirme senaryosunda yer alan sistem tasarımının yüksek ilk yatırım maliyetli, yüksek işletme giderli ve yüksek gelirli olduğu yapılan hesaplarla tespit edilmiştir.

Her bir sistem için hesaplanan; ilk yatırım maliyetleri, işletme giderleri ile materyal satışından elde edilecek olan gelirler göz önünde bulundurularak; her bir alternatif sistem için toplam yatırım maliyetleri, toplam işletme giderleri ve toplam materyal satış gelirleri ile her bir alternatif iyileştirme tasarımın temel tasarıma göre farkları hesaplanarak karşılaştırmalı gider – gelir sonuç tablosu olarak Tablo 7.33’da sunulmuştur.

Tablo 7.33: Gider – Gelir Sonuç Tablosu

Gider – Gelir Miktarı (\$)	Temel Sistem	İyileştirme (1)	İyileştirme (2)
Toplam Yatırım Maliyeti	698.000,00	908.500,00	762.000,00
Yatırım Maliyeti Farkı	-	210.500,00	64.000,00
Toplam İşletme Gideri*	12,49	15,24	13,35
Yıllık Toplam İşletme Gideri	36.366,22	44.375,22	38.882,19
İşletme Gideri Farkı	-	8.009,00	2.515,97
Toplam Materyal Satış Geliri†	237,31	273,04	246,76
Yıllık Toplam Gelir	691.056,91	795.087,24	718.564,25
Materyal Geliri Farkı	-	104.030,33	27.507,33
İşletme Gideri Materyal Satış Geliri Farkı	654.690,69	750.712,02	679.682,06
Amorti Süresi (Yıl)	1,07	1,21	1,12

Tablo 7.33: Gider – Gelir Sonuç Tablosu (Devam)

Gider – Gelir Miktarı (\$)	İyileştirme (3)	İyileştirme (4)	İyileştirme (5)
Toplam Yatırım Maliyeti	988.500,00	836.000,00	1.096.000,00
Yatırım Maliyeti Farkı	290.500,00	138.000,00	398.000,00
Toplam İşletme Gideri‡	15,67	15,22	25,97
Yıllık Toplam İşletme Gideri	45.633,37	44.333,45	75.615,32
İşletme Gideri Farkı	9.267,15	7.967,23	39.249,10
Toplam Materyal Satış Geliri§	284,31	269,12	277,78
Yıllık Toplam Gelir	827.918,29	783.665,79	808.887,50
Materyal Geliri Farkı	136.861,38	92.608,88	117.830,59
İşletme Gideri Materyal Satış Geliri Farkı	782.284,92	739.332,34	733.272,18
Amorti Süresi (Yıl)	1,26	1,13	1,49

Her bir tasarım alternatifi için, yıllık materyal satışından elde edilen gelirlerden yıllık işletme giderleri çıkarılarak, elde edilen net yıllık gelirin, sistemin ilk yatırım maliyetine oranı hesaplanarak, geri ödeme süreleri tespit edilmiştir. Tablo 7.33 gider – gelir sonuç tablosuna göre; yapılan yatırımı geri ödeme süreleri arasında kayda değer bir fark olmamakla beraber yatırım maliyetini en kısa sürede amorti eden sistem tasarımı olarak temel sistem tasarımı olduğu görülmektedir.

7.5 Örnek Sistem Tasarımı

Materyal geri dönüşüm ve saflık oranları, ilk yatırım maliyeti, işletme giderleri ve materyal satışından elde edilen gelirler göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeler neticesinde, ilk yatırım maliyetini geri ödeme süresi en kısa olan sistem tasarımı, öneri sistem tasarımı olarak belirlenmiştir. Belirlenen sistemin tasarımının bir özeti Tablo 7.34’de verilmiştir. Sistem konstrüksiyonu EK F’de verilmiştir.

* 1 ton.kWh⁻¹

† 1 ton.saatt⁻¹

‡ 1 ton.kWh⁻¹

§ 1 ton.saatt⁻¹

Tablo 7.34: Geri Dönüşüm Sistemi Özet Tablosu

Gelir – Gider Bilgileri						
Kapasite	Toplam Yatırım Maliyeti	Yıllık Toplam İşletme Gideri	Yıllık Toplam Gelir	İşletme Gideri Materyal Satış Geliri Farkı	Amorti Süresi (Yıl)	
1 ton.sa ⁻¹	698.000,00 \$	36.366,22 \$	691.056,91 \$	654.690,69 \$	1,07	
Hedeflenen Mamul Grupları ve Tipleri						
Beyaz Eşya		Buzdolabı, Çamaşır Makinesi, Dondurucu, Tost Makinesi				
Kahverengi Eşya		Plak Çalar, Video Kayıt Cihazı, Kaset Çalar, TV				
Gri Eşya		Monitör, Yazıcı, PC, Mobil Telefon				
Sisteme Beslenen Materyal İçeriği						
Materyal	Fe	Cu	Al	Plastik	Diğer	Toplam
Miktar (kg)	416,63	75,03	52,96	395,48	60,00	1000,11
(%)	58,28	3,84	6,72	21,57	9,59	100,00
Sistemde Geri Dönüşümü Sağlanan Materyal İçeriği						
Materyal	Fe	Cu	Al	Plastik	Diğer	Toplam
Miktar (kg)	371,20	52,22	41,95	348,80	55,36	869,53
(%)	89,10	69,60	79,21	88,20	92,26	86,95
Saflık (%)	99,49	54,90	44,11	99,16	30,74	-
Kırıcı ve Ayırıcıların Teknik Özellikleri						
Kırıcı (1) – Shredtech						
Model		Güç (kW)		Kapasite (kg.sa ⁻¹)		Kesme Açıklığı (mm)
ST – 500 HS		149 – 447		-		1524 × 1092
Kırıcı (2) – Shredtech						
Model		Güç (kW)		Kapasite (kg.sa ⁻¹)		Kesme Açıklığı (mm)
ST – 50 E		30 – 37		-		1016 × 533
Titreşimli Tek Katlı Elek (20°) – Na – Ce						
Model		Motor Gücü (kW)		Kapasite (kg.sa ⁻¹)		En × Boy (mm)
TE1 1020		2,2		-		1000 × 2000
Tamburlu Manyetik Ayırıcı – Goudsmit						
Model		Motor Gücü (kW)		Kapasite (m ³ .sa ⁻¹)		Çap × En (mm)
STRK100044		0,55		150		400 × 1000
Girdap Akımı Ayırıcı – Goudsmit						
Model	Bant Gücü (kW)		Rotor Gücü (kW)		Vibrator Gücü (kW)	Bant Genişliği (mm)
NF 600	0,75		1,5		1,4	600
Havalı Sınıflandırıcı – Sturtevant						
Model		Güç (kW)		Kapasite (kg.sa ⁻¹)		Çap × Boy (mm)
Whirlwind		3,7 – 5,2		1000		737 × 1143

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı, konunun çevresel, yasal, ekonomik ve teknik boyutlarıyla ele alındı. Öncelikli olarak elektrikli ve elektronik ekipmanların geri kazanımını gündeme taşıyan tarihsel süreçler sunuldu. Farklı kaynaklardan elde edilen elektrikli ve elektronik ekipmanlar ve ekipmanların atıklarıyla ilgili verilere, mevcut ve planlanan ulusal ve uluslar arası yasal düzenlemelere, geri dönüştürülmüş materyal kullanımının çevresel ve ekonomik avantajlarına, yer verilerek konunun önemi vurgulanmaya çalışıldı.

Türkiye’de elektrikli ve elektronik ekipman atıklarıyla ilgili mevcut bir yasal düzenleme bulunmamasına rağmen, Türkiye’nin gerek tehlikeli atıkların sınırlar ötesi taşınmasının ve bertarafının kontrolüne ilişkin Basel Sözleşmesine taraf olması, gerekse Avrupa Birliği üyeliği sürecinde olması ve elektrikli ve elektronik ekipman ihracatı ve ithalatının yoğun şekilde Avrupa Birliği üyesi ülkelerle yapılması nedeniyle, Avrupa Birliğinin mevcut elektrikli ve elektronik ekipman atıkları (WEEE) ve elektrikli ve elektronik ekipmanlarda bazı zararlı maddelerin kullanılmasının sınırlandırılması (RoHS) direktiflerinin, orta vadede Türk mevzuatına da yansıtılacağına dikkat çekildi.

Çalışma sırasında Türkiye’de elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının sınıflandırılmasının yapılmadığı, bu atıkların genel atıklar içerisinde değerlendirildiği ve bu nedenle elektrikli ve elektronik ekipman atıklarıyla ilgili istatistiksel verilerin olmadığı saptandı.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı sağlayacak etkin bir geri dönüşüm sistemi geliştirebilmek için, bu ekipman atıklarının içerdiği materyaller ve bu materyallerin fiziksel özellikleri ile yine bu atıkların ihtiva ettiği çevre ve insan sağlığı açısından tehlikeli ve zararlı olan materyaller ilgili bilgi verildi.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının tekrar kullanılabilir bileşenlerinin ve tehlikeli ve zararlı bileşenlerinin mamulden ayrılarak geri dönüşüm işlemi için hazır

hale getirilmesi için zaruri olan demontaj yöntemleri, demontaj yöntem planlaması, demontaj araçlarının gelişimi ve demontaj uygulamaları hakkında bilgi verildi.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümünde kullanılabilecek geri dönüşüm yöntemlerine değinilerek, mekanik ve fiziksel ayırma yöntemlerinin diğer ayırma yöntemlerine göre avantajları tespit edildi.

Katı atık işleme ve cevher zenginleştirme yöntemleri incelenerek, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşümü için kullanılabilecek boyut küçültme ve ayırma yöntemleri tespit edildi ve her bir yöntemlerde kullanılan makinelerin sınıflandırmaları yapılarak bu makinelerin işletme parametreleri belirlendi.

Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri kazanımı için tesis tasarımında; geri kazanım stratejilerinin belirlenmesi, kütleli geri dönüşüm yöntemi prensiplerini içeren yaklaşımlar incelendi.

Geri kazanım tesisinin temel fonksiyonlarını belirleyen temel prensipleri ve sistemin alt fonksiyonlarını belirleyen ve bu alt fonksiyonların birbirleri ile olan ilişkisini gösteren fonksiyon strüktürleri oluşturuldu. Geri kazanım tesisine kabul edilecek olan elektrikli ve elektronik ekipman atığı tipleri belirlendi. Beyaz eşya, kahverengi eşya ve gri eşya grubuna dahil dörder mamul tipi toplam 12 mamulün geri kazanım tesisine geri kazanımı yapılamak üzere alındığı kabul edildi. Bu ekipman tipleri beyaz eşya grubu için buzdolabı, çamaşır makinesi, dondurucu ve tost makinesi, kahverengi eşya grubu için plak çalar, video kayıt cihazı, kaset çalar ve TV, gri eşya grubu içinse monitör, yazıcı, PC ve mobil telefon olarak belirlendi. Belirlenen 12 mamul tipi için geri dönüşüm öncesi demontaj yapılarak ayrılması gerekli olan bileşenler tespit edildi.

Demontajı yapılarak geri dönüşüme hazır hale getirilen elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının içerdikleri materyallerin geri dönüşümünü sağlayacak; ısı işleme içermeyen, tamamı kuru ortamda gerçekleştirilen, bir dizi kademedan oluşmuş, mekanik ve fiziksel proseslere dayanan ve saatte 1 ton materyal işleyecek bir geri dönüşüm tesisi, sistemin temel prensipleri olarak belirlendi.

Geri dönüşüm sistemi için Fe, Al, Cu ve Plastikler hedef materyaller olarak belirlendi. Sisteme kabul edilen ekipman tiplerinin hedeflenen materyal tiplerine göre içerdikleri materyal miktarları hesaplandı.

Hedeflenen materyallerin fiziksel karakteristikleri ele alınarak her bir materyal için ayırt edici özellikler tespit edildi ve tespit edilen fiziksel özellikler göz önüne alınarak her bir materyalin diğer materyallere ve materyal karışımına göre ayırt edici fiziksel özellikleri için kullanılabilecek kuru ayırma yöntemi alternatifleri belirlendi. Ayırma yönteminin ve ayırıcının seçiminde boyut faktörü önemli diğer bir parametre olduğundan, geri dönüşüm sisteminde kullanılması muhtemel ayırma ve boyut küçültme makineleri için çalışılabilir tane boyutu kriterleri tespit edildi.

Geri dönüşüm sistemi tasarımının önemli aşamalarından biri olan materyal akış diyagramını içeren ve sistem elemanlarının sıralamasının belirlenmesine yardımcı olacak olan sistem modeli geliştirildi. Geri dönüşüm sisteminin materyal akış diyagramı kütle korunumu kanununa bağlı kalarak oluşturuldu. Sistemde yer alan her bir eleman için geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu metodu kullanılarak sistem modeli oluşturuldu. Geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu, birim elemana giren materyal karışımı içerisinde yer alan demir, alüminyum, bakır, plastik gibi her bir materyalin birim elemandan çıktıktan sonraki dağılımını gösteren bir çapraz (diyagonal) matris olarak tanımlandı. Sisteme giren ve sistemden çıkan materyallerin miktarları vektör olarak tanımlandı. Geri dönüşüm sistemi elemanları için geri dönüşüm fonksiyonu transfer matrisi değerleri çeşitli kaynaklara göz önüne alınarak belirlendi. Geri dönüşüm sisteminde yer alabilecek her bir eleman için birim eleman modelleri oluşturuldu. En yüksek materyal geri dönüşüm oranını verecek olan ayırma makinesi sıralamasının tespiti için farklı geri dönüşüm senaryoları kurularak sistemlerin karşılaştırmaları yapıldı. Yapılan hesaplamalarda öncelikli olarak MATHCAD sürüm 12.0 programı kullanıldı. Akabinde MATLAB ve SIMULINK sürüm 7.0 (R14) programları kullanılarak geri dönüşüm sisteminin elemanlarının birim modelleri oluşturuldu ve tasarlanan senaryoların benzetimleri yapıldı. Benzetim elektrikli ve elektronik ekipman atığı cinsinin ve/veya adedinin ve/veya içerdiği materyal miktarının değişimine göre, geri dönüşüm sisteminin materyal dağılımını verecek şekilde tasarlandı. Yapılan hesap ve benzetim sonucu elde edilen değerler karşılaştırılarak benzetim doğrulandı.

Sistem tasarımı için mamul tiplerinin ayrıştırılmasına gidilmeden tek hat üzerinde ve geri beslemesiz bir geri dönüşüm sistemi tasarımı seçildi. Sistem elemanları olarak 10 mm boyutunda tane çıkışı verecek kırıcı, sisteme beslenen materyal boyutunu kontrol etmek için 10 mm elek açıklığına sahip elek, materyal atığı içerisinde

demirin ayrılması için düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırıcı, alüminyum ve bakırın ayrılması için girdap akımı ayırıcısı ve plastiğin ayrılması için havalı sınıflandırıcı seçildi. Kırıcılar için belirlenen geri dönüşüm faktörü transfer fonksiyonu, birim matrise eşit olduğundan ve sonucu değiştirmeyeceğinden sistemde kullanılması gerekli olan ön kırıcı hesaplara dâhil edilmedi.

Yapılan farklı sıralamalara göre elde edilen materyal geri dönüşüm oranları ve saflık değerleri karşılaştırıldı ve en uygun iki sıralamanın ilki olarak kırıcı, elek, manyetik ayırıcı, girdap akımı ayırıcı, havalı sınıflandırıcı ve ikincisi olarak da kırıcı, elek, girdap akımı ayırıcı, manyetik ayırıcı ve havalı sınıflandırıcı sıralaması olduğu görüldü. Ancak elde edilen materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının demir ve plastik dışında tatminkâr olamadığı ve sistemin materyal geri dönüşüm oranlarının iyileştirilmesi gerektiği tespit edildi. Çalışılabilir tane boyutu aralığı göz önünde bulundurularak kırıcı, elek, manyetik ayırıcı, girdap akımı ayırıcı, havalı sınıflandırıcı sıralaması temel sistem tasarımı kabul edilerek sistemin materyal geri kazanım ve saflık oranlarının artırılması için farklı senaryoların sistemin materyal geri dönüşüm oranına etkileri incelendi. Geri dönüşüm sisteminin materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının uygulanan iyileştirmeler sonucunda artırılabilceği görüldü.

Ancak materyal geri dönüşüm ve saflık oranlarının artırılması, sistem tasarımının belirlenmesinde tek başına yeterli olmadığından, sistem tasarımının belirlenebilmesi açısından ilk yatırım maliyetleri, işletme giderleri ve materyal satış gelirleri de göz önüne alınarak alternatif iyileştirmeler değerlendirildi. Geri dönüşüm sisteminde kullanılabilecek kırma ve ayırma makineleri için başta makine imalatçıları olmak üzere çeşitli kaynaklardan yararlanılarak fiyat aralıkları belirlendi. Boyut küçültme ve ayırma makineleri için belirlenen fiyat aralıkları ve geri dönüşüm sisteminde kullanılabilecek olan makinelere ait imalatçı kataloglarındaki veriler göz önüne alınarak temel sistem tasarımı ve iyileştirme alternatifleri için tahmini ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri hesaplandı.

Buna ek olarak her bir senaryo için geri dönüşüm sisteminden elde edilen materyallerin saflık oranları dikkate alınarak, her bir materyal için saflık oranına bağlı birim satış fiyatları belirlendi ve her bir tasarım için materyal satışından elde edilecek gelir hesaplandı. Hesaplamalarda ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri düşük olan bir sistemde materyal satışından elde edilecek gelirlerin düşük olduğu ve

ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleri yüksek olan bir sistemde materyal satışından elde edilecek gelirin yüksek olduğu görüldü. Her bir sistem için hesaplanan; ilk yatırım maliyetleri, işletme giderleri ile materyal satışından elde edilecek olan gelirler göz önünde bulundurularak; her bir alternatif sistem için toplam yatırım maliyetleri, toplam işletme giderleri ve toplam materyal satış gelirleri ile her bir alternatif iyileştirme tasarımının temel tasarıma göre farkları hesaplanarak karşılaştırmalı gider – gelir sonuç tablosu sunuldu.

Her bir tasarım alternatifi için, yıllık materyal satışından elde edilen gelirlerden yıllık işletme giderleri çıkarılarak, elde edilen net yıllık gelirin, sistemin ilk yatırım maliyetine oranı hesaplanarak, en kısa geri ödeme süresinin 1,07 yıl ve en uzun ödeme süresinin 1,49 yıl olduğu tespit edildi. Geri ödeme süreleri arasında kayda değer bir fark olmamakla beraber yatırım maliyetini en kısa sürede amorti eden sistem tasarımının, ön kırıcı, kırıcı elek, manyetik ayırıcı, girdap akımı ayırıcısı ve havalı sınıflandırıcı sıralamasına sahip temel sistem tasarımı olduğu belirlendi. Bu tasarıma göre örnek bir geri kazanım tesisi sonuç olarak sunuldu.

KAYNAKLAR

- [1] **75/442/EEC**, 1975. Council Directive of 15 July 1975 on Waste, *The Council of the European Communities*, Brussels, Belgium.
- [2] **14.03.2005–25755**, 2005. Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 14.03.2005 tarih ve 25755 sayılı Resmi Gazete, *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara.
- [3] **2000/158/COD and 2000/159/COD**, 2000. 2000/158/COD Proposal for a European Parliament and Council directive on waste electric and electronic equipment, 2000/159/COD Proposal for a European Parliament and Council directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment, *Commission of the European Communities*, Brussels, 13.06.2000, Belgium.
- [4] **2002/96/EC**, 2003. Directive of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), *Official Journal of the European Union*, 13.02.2003.
- [5] **2002/95/EC**, 2003. Directive of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, *Official Journal of the European Union*, 13.02.2003.
- [6] **TS EN 50419**, 2004. 2002/96/EC Direktifi (WEEE) Madde 11(2)'ye göre elektrikli ve elektronik cihazların işaretlenmesi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- [7] **ACRR**, 2006. The Management of Waste Electrical and Electronic Equipment, A guide for Local and Regional Authorities, *The Association of Cities and Regions for Recycling (ACRR)*. <<http://www.acrr.org/>>
- [8] **14.03.1991–20814**, 1991. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 14.03.1991 tarih ve 20814 sayılı Resmi Gazete, *T.C. Çevre Bakanlığı*, Ankara.
- [9] **Uykan, M.**, 2005. Elektrikli Elektronik Ekipmanların Geri Dönüşümü, Demontaj Yöntemleri ve Maliyet Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **White, C.D., Masanet, E., Rosen, C.M., Beckman, S.L.**, 2003. Product recovery with some byte: an overview of management challenges and environmental consequences in reverse manufacturing for the computer industry, *Journal of Cleaner Production*, **11**, 445-458.

- [11] **Ishii, K.** 1999. Incorporating end-of-life strategy in product definition, *Proceedings of EcoDesign '99: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 1–3 February 1999, Tokyo, Japan, 364-369.
- [12] **Li, J., Shrivastava, P., Zhang, H.C.,** 2004. A Distributed Design Methodology for Extensible Product Life Cycle Strategy, *Conference Record 2004 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 10-13 May 2004, 214-219.
- [13] Central Intelligence Agency (CIA). <<http://www.odci.gov>>
- [14] eWaste Guide, International E-Waste Generation. <<http://www.ewaste.ch/>>
- [15] **Reed Electronics Group**, 2000. Reed Number of Computers In Use Worldwide 1991-2000 & Number of Computers In Use 1991 – 2000 Regional Groupings, <<http://www.reed-electronics.com>>
- [16] **ICSG**, 2003. Waste Electric & Electronic Equipment (WEEE), International Copper Study Group (ICSG) Information Circular. <<http://www.icsg.org>>
- [17] **GRID**, 2006. United Nations Environment Programme, Division of Early Warning and Assessment (DEWA), Global Resource Information Database (GRID) – Europa. <<http://www.grid.unep.ch>>
- [18] **Middendorf, A.,** 2005. Introduction to EcoDesign, Doğa Uyumlu Elektronik Tasarım Stratejilerine Giriş, *Rekabet Gücünü Artırmak için Doğa Uyumlu Elektronik Tasarım (ECODESIGN) Çalıştayı*, İstanbul, 2 Eylül 2005.
- [19] **Zhang, S., and Forssberg, E.,** 1999. Intelligent Liberation and classification of electronic scrap, *Powder Technology*, **105**, 295-301.
- [20] The World Bank, Turkey Data Profile. <<http://www.worldbank.org>>
- [21] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). <<http://www.die.gov.tr/>>
- [22] Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı. <<http://www.dpt.gov.tr>>
- [23] Dokuzuncu Kalkınma Planı, Makina ve Metal Eşya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Taslak Raporu, İstanbul, 2005. <<http://www.dpt.gov.tr>>
- [24] Beyaz Eşya Yan Sanayicileri Derneği (BEYSAD). <<http://www.beysad.org.tr>>
- [25] Türk Elektronik Sanayicileri Derneği (TESİD). <<http://www.tesid.org.tr/>>
- [26] **Kaya, M.,** 2005. E-Atıklar Hem Önemli Sorun Hem de Fırsat, *Su ve Çevre Teknolojileri*, Eylül – Ekim 2005, sayfa 60-62.

- [27] **Cui, J. and Forssberg, E.**, 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, **B99**, 243–263.
- [28] Electronic Waste Recycling Act of 2003: Covered Electronic Waste Pament System (SB20/SB50), California Integrated Waste Management Board (CIWMB). <<http://www.ciwmb.ca.gov/Electronics/Act2003/>>
- [29] Silicon Valley Toxic Coalition (SVTC). <<http://www.svtc.org/>>
- [30] **Matsuto, T., Jung, C.H., and Tanaka, N.**, 2004. Material and heavy metal balance in a recycling facility for home electrical appliances, *Waste Management*, **24**, 425-436.
- [31] **Crama, Y., van de Klundert, J. and Spijksma, F. C. R.**, 2002. Production planning problems in printed circuit board assembly, *Discrete Applied Mathematics*, **123**, 339-361.
- [32] **Chien, Y. C., Wang, H. P., Lin, K. S., Huang, Y. J., and Yang, Y. W.**, 2000. Fate of bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes, *Chemosphere*, **40**, 383-387.
- [33] **Lee, C.H., Chang, S.L., Wang, K.M., and Wen, L.C.**, 2000. Management of scrap computer recycling in Taiwan, *Journal of Hazardous Materials*, **A73**, 209-220.
- [34] **Lee, C.H., Chang, C.T., and Tsai, S.L.**, 1998. Development and implementation of producer responsibility recycling system. *Resources, Conservation and Recycling*, **24**, 121-135.
- [35] **Pennock, M.**, 2003. Waste Elektrical and Electronic Equipment (WEEE): Creating an electronics equipment takeback program in light of current European Union directives and possible U.S. legislation, *MSc Thesis*, University of Wisconsin-Stout, Wisconsin, USA.
- [36] **PSB**, 2005. Consumer's Perspectives on E-Waste and Electronics Recycling, *Penn, Schoen & Berland Assocites, Inc. for HP*, March 2005. <<http://www.hp.com/>>
- [37] Citiraya Industies Ltd. <<http://www.citiraya.com>>
- [38] United Nations Environment Programme (UNEP), Secretariat of the Basel Convention. <<http://www.basel.int>>
- [39] **TÜSİAD**, 1998. Dış Ticarete Çevre Koruma Kaynaklı Tarife Dışı Teknik Engeller ve Türk Sanayii İçin Eylem Planı, *Türk Sanayicileri ve İşadamları Derneği (TÜSİAD)*, İstanbul, Ağustos 1998.
- [40] Türkiye Cumhuriyeti AB Çevre Uyum Stratejisi, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2005.

- [41] **Basel**, 2005. Basel Convention, Mobie Phone Partnership Initiative, Guidance Document, Environmentally Sound Managemnt Of Used & End-Of-Life Mobile Phones, June 15, 2005. <<http://www.basel.int>>
- [42] Europa, Gateway to the European Union, Waste Electrical and Electronic Equipment. <<http://www.europa.eu.int/>>
- [43] **Schischke, K., Hagelüken, M., and Steffenhagen, G.**, 2005. An Introduction to EcoDesign Strategies? Why, what and how?, Doğa Uyumlu Stratejilere Bir Giriş? Niçin, Ne ve Nasıl?, *Rekabet Gücünü Artırmak için Doğa Uyumlu Elektronik Tasarım (ECODESIGN) Çalıştayı*, İstanbul, 2 Eylül 2005.
- [44] Cisco Systems, Takeback and Recycle Program. <<http://www.cisco-returns.com/>>
- [45] İstanbul Sanayi Odası (ISO). <<http://www.iso.org.tr>>
- [46] **AEEE**, 2004. Atık Elektrik Elektronik Eşyaların Kontrolü ve Yönetimi Taslak Yönetmeliği (AEEE Yönetmeliği), T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, 01.09.2004.
- [47] **Akbaş, Ş.T.**, 2005. Çevre Yönetim Sistemi Uygulamaları: Tasarım ve Üretim Örnekleri, Beko Elektronik A.Ş., *Rekabet Gücünü Artırmak için Doğa Uyumlu Elektronik Tasarım (ECODESIGN) Çalıştayı*, İstanbul, 2 Eylül 2005.
- [48] **Zhang, S. and Forssberg, E.**, 1997. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap, *Resources, Conservation and Recycling*, **21**, 247-269.
- [49] **APME**, 2004. Plastics a Material of Choice for the Electric and Electronic Industry, Plastics Consumption and Recovery in Western Europe 1995, *Association of plastics manufacturers in Europe (APME)*, Brussels, Belgium.
- [50] **Lamber, A.J.D. and Gupta, S.M.**, 2005. Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse, and Recycling, CRC Press, Florida.
- [51] **Brodersen, K., Tartler, D., and Danzer, B.**, 1994. Scrap of electronics a challenge to recycling activities, *Proceedings of the 1994 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, IEEE, NY, 174-176.
- [52] **Menad, N., Bojörkman, B. and Allain, E.G.**, 1998. Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap, *Resources, Conservation and Recycling*, **24**, 65-85.
- [53] **Harper, C.A.**, 1975. Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, 1st edition, McGraw-Hill, New York.

- [54] **Harper, C.A.**, 1992. Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, 2nd edition, McGraw-Hill, New York.
- [55] CHEMIX School Version 3.00 Chemistry Software. <<http://www.standnes.no/>>
- [56] **Kaytaz, Y.**, 1990. Cevher Hazırlama, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- [57] **Önal, G.**, 1980. Cevher Hazırlamada Flotasyon Dışındaki Zenginleştirme Yöntemleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- [58] **Koyanaka, S., Endoh, S., Ohya, H., and Iwata, H.**, 1997. Particle shape of copper milled by swing-hammer-type impact mill, *Powder Technology*, **90**, 135-140.
- [59] **Güngör, A., and Gupta, S.M.**, 1998. Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery, *Computers and Industrial Engineering*, **35**, 161-164.
- [60] **Güngör, A. and Gupta, S. M.**, 1999. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, *Computers and Industrial Engineering*, **36**, 811-853.
- [61] **Kuo, T. C.**, 2000. Disassembly sequence and cost analysis for electromechanical products, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **16**, 43-54.
- [62] **Veerakamolmal, P., and Gupta, S.M.**, 1999. Combinatorial cost-benefit analysis methodology for designing modular electronic products for the environment, *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Danvers, IEEE, Piscataway, USA, 268-273.
- [63] **Wiendahl, H.P., Seliger, G., Perlewitz, H., and Burkner, S.**, 1999. General approach to disassembly planning and control, *Production Planning and Control*, **10**, 718-726.
- [64] **Moore, K.E., Gungor, A., and Gupta, S.M.**, 1998. Petri net approach to disassembly process planning, *Computers and Industrial Engineering*, **35**, 165-168.
- [65] **Lambert, A. J. D.**, 2002. Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment, *Computers & Industrial Engineering*, **43**, 553-575.
- [66] **Homem de Mello, L. S. and Sanderson, A. C.**, 1990. AND/OR graph representation of assembly plans, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **6**, 188-199.

- [67] **Homem de Mello, L. S. and Sanderson, A. C.**, 1991. A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **7**, 228-240.
- [68] **Baldwin, D. F., Abell, T. A., Lui, M. C. M., De Fazio, T. L., and Whitney, D. E.**, 1991. An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **7**, 78-94.
- [69] **De Fazio, T. L., and Whitney, D. E.**, 1987. Simplified generation of all mechanical disassembly sequences, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **RA-3**, 640-658.
- [70] **Gu, P., and Yan, X.**, 1995. CAD-directed automatic assembly sequence planning, *International Journal of Production Research*, **33**, 3069-3100.
- [71] **Navin-Chandra, D.**, 1994. The recovery problem in product design, *Journal of Engineering Design*, **5**, 65-86.
- [72] **Lambert, A. J. D.**, 1997. Optimal disassembly of complex products, *International Journal of Production Research*, **35**, 2509-2523.
- [73] **Veerakamolmal, P., and Gupta, S.M.**, 1998. Optimal analysis of lot-size balancing for multiproducts selective disassembly, *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing*, **6**, 245-269.
- [74] **Veerakamolmal, P., and Gupta, S.M.**, 1999. Analysis of design efficiency for the disassembly of modular electronic products, *Journal of Electronics Manufacturing*, **9**, 79-95.
- [75] **Kanehara, T., Suzuki, T., Inaba, A., and Okuma, S.**, 1993. On algebraic and graph structural properties of assembly Petri Net, Searching by linear programming, *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Yokohama, Japan, July 26-30, 2286-2293.
- [76] **Lambert, A. J. D.**, 1999. Linear programming in disassembly/clustering sequence generation, *Computers and Industrial Engineering*, **36**, 723-738.
- [77] **Kanai, S., Sasaki, R., and Kishinami, T.**, 1999. Representation of product and processes for planning disassembly, shredding, and material sorting based on graphs, *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Piscataway, NJ: IEEE, 123-128.
- [78] **Zussman, E., Kriwet, A., and Seliger, G.**, 1994. Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling, *Annals of the CIRP*, **43**, 9-14.

- [79] **Kroll, E., and Carver, B. S.,** 1999. Disassembly analysis through time estimation and other metrics, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **15**, 191-200.
- [80] **Salomonski, N., and Zussman, E.,** 1999. On-line predictive model for disassembly process planning adaptation, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **15**, 211-220.
- [81] **Zussman, E., and Zhou, M. C.,** 1999. A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **15**, 190-194.
- [82] **Kuo, T. C., Zhang, H. C., and Huang, S. H.,** 2000. Disassembly analysis for electromechanical products: a graph-based heuristic approach, *International Journal of Production Research*, **38**, 993-1007.
- [83] **Zhang, H.C., and Kuo, T.C.,** 1996. A graph-based approach to disassembly model for end-of-life product recycling, *Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, IEEE: Piscataway, NJ, 247-254.
- [84] **Zhang, H.C., and Yu, S.Y.,** 1997. An environmentally conscious evaluation/design support tool for personal computers, *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 131-136.
- [85] **Krikke, H. R., Van Harten, A., and Schuur, P. C.,** 1998. On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products, *International Journal of Production Research*, **36**, 111-139.
- [86] **Nishi, T., Ohashi, T., Hiroshige, Y., Hirano, M., and Ueno, K.,** 1999. Study on TV recyclability, *Proceedings of 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 278-280.
- [87] **Smith, D., Small, M., Dodds, R., Amagai, S., and Strong, T.,** 1995. Computer monitor recycling: A case study. *Proceedings of IEE Conference no. 415 on Clean Electronics Products and Technology*, 124-128.
- [88] **Danloy, J., Petit, F., Leroy, A., De Lit, P., and Rekiek, B.,** 1999. A pragmatic approach for precedence graph generation, *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Piscataway, NJ: IEEE, 387-392.
- [89] **Johnson, M. R., and Wang, M. H.,** 1998. Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse, *International Journal of Production Research*, **36**, 3227-3252.
- [90] **Feldmann, K., Trautner, S., and Meedt, O.,** 1999. Innovative disassembly strategies based on flexible partial destructive tools, *Annual Reviews in Control*, **23**, 159-164.

- [91] **Kopacek, B., Kopacek, P.,** 1999. Intelligent disassembly of electronic equipment, *Annual Reviews in Control*, **23**, 165-170.
- [92] **Scholz-Reiter, B., Scharke, H., and Hucht, A.,** 1999. Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **15**, 247-255.
- [93] Ragn-Sells Elektronikåtervinning AB. <<http://www.ragnsells.se/>>
- [94] **Boks, C., and Tempelman, E.,** 1998. Future Disassembly and Recycling Technology: Results af a Delphi Study, *Futures*, **30**, 425-442.
- [95] **Chiodo, J.D., Billett, E.H., and Harrison, D.J.,** 1999. Active disassembly using shape memory polymers for the mobile phone industry, *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Danvers, IEEE, Piscataway, USA, 151-156.
- [96] **Bayraktar, T.C.,** 1974. Cevher Hazırlamada Zenginleştirme Öncesi İşlemler, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- [97] **Ergüenalp, F.,** 1959. Cevher Hazırlama Prensipleri, Berksoy Matbaası, İstanbul.
- [98] **Rhyner, C.R., Schwartz, L.J., Wenger, R.B., and Kohrell, M.G.,** 1995. Waste Management and Resource Recovery, CRC, Lewis Publishers.
- [99] **Tolun, R.,** 1961. Cevher Zenginleştirme – Minerallerin Ayrılma Prensipleri ve Maden Sanayindeki Tatbikatı, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, **56**, 115-132.
- [100] **Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S.,** 1993. Integrated Solid Waste Manegement, Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, Inc.
- [101] **Stessel, R.I.,** 1996. Recycling and Resource Recovery Engineering, Principles of Waste Processing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [102] **Vesilind, P.A., Worrell, W.A., and Reinhart, D.R.,** 2002. Solid Waste Engineering, Brooks/Cole, Thomson Learning, CA, USA.
- [103] **Weiss, N.L.,** 1985. SME Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, USA.
- [104] **Acarkan, N.,** 2000. Cevher Hazırlamada Flotasyon Dışındaki Zenginleştirme Yöntemlerine Ait Uygulamalar, Yurt Madencilliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, 1. Baskı, Ardıçlı Matbaacılık, İstanbul.
- [105] **Cui, J.,** 2005. Mechanical Recycling of Consumer Electronic Scrap, *Licentiate Thesis*, Division of Mineral Processing, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.

- [106] **Spengler, T., Ploog, M., and Schröter, M.,** 2003. Integrated Planning of Acquisition, Disassembly and Bulk Recycling: A Case Study on Electronic Scrap Recovery, *OR Spectrum*, **25**, 413-442.
- [107] **Önal, G. ve Ateşok G.,** 1994. Cevher Hazırlama El Kitabı, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [108] **Zhang, S., and Forssberg, E.,** 1997. Electronics scrap characterization for materials recycling, *Journal of Waste Management and Resource Recovery*, **3**, 157-167.
- [109] **Önal, G.,** 2006. Kişisel Görüşme.
- [110] **Shapiro, M., and Galperin, V.,** 2005. Air Classification of Solid Particles: a Review, *Chemical Engineering and Processing*, **44**, 279-285.
- [111] **Peirce, J.J.,** 1991. Understanding Technology: New Concepts for Air Classification in Waste Processing and Resource Recovery, *Proceeding of Frontiers in Education Conference, 1991, Twenty-First Annual Conference, Engineering Education in a New World Order*, 21-24 September 1991, 325-328.
- [112] **B.A. Wills,** Mineral Processing Technology, 4th ed., Pergamon Press, Oxford, England, 1988.
- [113] **de Jong, T.P.R., and Dalmijn, W.L.,** 1997. Improving jigging results of non-ferrous car scrap by application of an intermediate layer, *International Journal of Mineral Processing*, **49**, 59-72.
- [114] **Oberteuffer, J.,** 1974. Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications, *IEEE Transactions on Magnetism*, **10**, 223-238.
- [115] Han Kook Matics Co. Ltd. <<http://www.matics.co.kr/>>
- [116] **Iuga, A., Morar, R., Samuila, A., Dascalescu, L.,** 1998. Electrostatic Separation of Metals and Plastics from Granular Industrial Wastes, *Thirty-Third IAS Annual Meeting of the IEEE on Industry Applications Conference*, 12-15 October 1998, 1953-1960.
- [117] **Iuga, A., Neamtu, V., Suarasan, I., Morar, R., and L., Dascalescu,** 1998. Optimal high-voltage energization of corona-electrostatic separators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **34**, 286-293.
- [118] **Dascalescu, L., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., Neamtu, V., and Suarasan, I.,** 1994. Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators, *Journal of Physics (D) Applied Physics*, **27**, 1242-1251.
- [119] **Dascalescu, L., Samuila, A., Iuga, A., Morar, R., Csorvassy, I.,** 1994. Influence of material superficial moisture on insulation-metal electroseparation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **30**, 844-849.

- [120] **Zhang, S., and Forssberg, E.**, 1998. Optimization of electrodynamic separation for metals recovery from electronic scrap, *Resources, Conservation and Recycling*, **22**, 143-162.
- [121] **Iuga, A., Neamtu, V., Suarasan, I., Morar, R., and Dascalescu, L.**, 1995. High-voltage supplies for corona-electrostatic separators, *Proceedings of the Annual Meeting of 1995 IEEE Industry Applications 30th IAS*, IEEE Industry Applications Society, Orlando, IEEE, Piscataway, USA, 1503-1507.
- [122] **Schlömann, E.**, 1975. Separation of non-magnetic metals from solid waste by permanent magnets I theory, *Journal of Applied Physics*, **46**, 5012-5021.
- [123] **Schlömann, E.**, 1975. Separation of non-magnetic metals from solid waste by permanent magnets II experiments on circular disks, *Journal of Applied Physics*, **46**, 5022-5029.
- [124] **Braam, B.C., van der Valk, H. J. L., Dalmijn, W. L.**, 1988. Eddy-current separation by permanent magnets Part II: Rotating disc separators, *Resources, Conservation and Recycling*, **1**, 3-17.
- [125] **Fletcher, D., and Gerber, R.**, 1994. Small particle limit for electromagnetic separation, *IEEE Transactions Magnetics*, **30**, 4656-4658.
- [126] **Fletcher, D., Gerber, R., Lawson, P., and Boehm, J.**, 1991. Eddy-current separation of non-ferrous conductors and non-conductors: theory and initial experiments, *IEEE Transactions Magnetics*, **27**, 5375-5377.
- [127] **Fletcher, D., and Gerber, R.**, 1993. Electromagnetic separation: the prediction and measurement of conductor separability, *IEEE Transactions Magnetics*, **29**, 3255-3257.
- [128] **Fletcher, D., Gerber, R., and Reid, T.**, 1993. Theory and experimental investigation of an improved field boundary model for a single boundary Eddy-current separator, *IEEE Transactions Magnetics*, **29**, 3258-3260.
- [129] **Fletcher, D., Gerber, R., and Moore, T.**, 1994. Electromagnetic separation of metals from insulators, *IEEE Transactions Magnetics*, **30**, 4659-4661.
- [130] **Rem, P.C., Leest, P.A., and van den Akker, A.J.**, 1997. Model for Eddy current separation, *International Journal of Mineral Processing*, **49**, 193-200.
- [131] **Zhang, S., Rem, P.C., and Forssberg, E.**, 1999. Investigation of separability of particles smaller than 5mm by Eddy current separation technology, Part I, Rotating type Eddy current separators, *Magnetic and Electrical Separation*, **9**, 233-251.

- [132] **Rem, P.C., Zhang, S., Forssberg, E., and de Jong, T.P.R.,** 2000. Investigation of separability of particles smaller than 5mm by Eddy-current separation technology, part II, Novel design concepts, *Magnetic and Electrical Separation*, **10**, 85-105.
- [133] **van der Valk, H.J.L., Dalmijn, W.L., and Duyvesteyn, W.P.P.,** 1998. Eddy-current separation methods with permanent magnets for the recovery of non-ferrous metals and alloys, *Erzmetall*, **41**, 266-274.
- [134] **Norrgran, D.A., and Wernham, J.A.,** 1991. Recycling and secondary recovery applications using an Eddy-current separator, *Minerals and Metallurgical Processing*, **8**, 184-187.
- [135] **Zhang, S., Forssberg, E., Arvidson, B. and Moss, W.,** 1998. William Moss, Aluminum recovery from electronic scrap by High-Force® eddy-current separators, *Resources, Conservation and Recycling*, **23**, 225-241.
- [136] **Zhang, S., Forssberg, E., Arvidson, B., and Moss, W.,** 1999. Separation Mechanisms and Criteria Of a Rotating Eddy-Current Separator Operation, *Resources, Conservation and Recycling*, **25**, 215-232.
- [137] **Sodhi, M.S., Young, J., and Knight, W.A.,** 1999. Modelling material separation processes in bulk recycling, *International Journal of Production Research*, **37**, 2239-2252.
- [138] **Stuart, J.A., and Lu, Q.,** 2000. A model for discrete processing decisions for bulk recycling of electronics equipment, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, **23**, 314-320.
- [139] **Stuart, J.A., and Lu, Q.,** 2000. A refine-or-sell decision model for a station with continuous reprocessing options in an electronics recycling center, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, **23**, 321-327.
- [140] **Reimer, B., Sodhi, M.S., and Knight, W.A.,** 2000. Optimizing electronics end-of-life disposal cost, *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 342-347.
- [141] **Lu, Q., Christina, V., Stuart, J.A., and Rich, T.,** 2000. A practical framework for the reverse supply chain, *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 266-271.
- [142] **M.A. Reuter, A. van Schaik, O. Ignatenko, G.J. de Haan,** 2006. Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles, *Minerals Engineering*, **19**, 433-449.
- [143] **King, R.P.,** 2001. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems, Butterworth – Heinemann, London, England.

- [144] **Spengler, T.**, 2003. Management of Material Flows in Closed-Loop Supply Chains, Decision Support System for Electronic Scrap Recycling Companies, *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 6-9 January 2003, Hawaii, USA, 81b.
- [145] Result Technology AG. <<http://www.result-technology.com/>>
- [146] Mathsoft Engineering & Education, Inc. <<http://www.mathsoft.com/>>
- [147] The MathWorks, Inc. <<http://www.mathworks.com/>>
- [148] Untha Shredders. <<http://www.untha.com/>>
- [149] Sturtevant Inc. <<http://www.sturtevantinc.com/>>
- [150] Stedman Machine. <<http://www.stedman-machine.com/>>
- [151] SHRED-TECH. <<http://www.shred-tech.com/>>
- [152] Satrind SPA. <<http://www.satrind.it/>>
- [153] Granutech Saturn Systems. <<http://www.granutech.com/>>
- [154] Goudsmit Magnetic Systems <<http://www.goudsmit-magnetics.nl/>>
- [155] Eriez Manufacturing Co. <<http://www.eriez.com/>>
- [156] Karabulut, Y.E., 2006. Kişisel Görüşme.
- [157] Hinsey, M., 2006. Kişisel Görüşme.
- [158] van den Boomen, E., 2006. Kişisel Görüşme
- [159] Na – Ce Makina AŞ. <<http://www.nace.com.tr/>>

EK A

A.1 Atıkların Sınıflandırılması

- i. Aşağıda başka şekilde belirtilmemiş üretim veya tüketim artıkları
- ii. Standart dışı ürünler
- iii. Son kullanım süresi geçmiş olan ürünler
- iv. Dökülmüş, niteliği bozulmuş veya yanlış kullanıma maruz kalmış olan maddeler (örnek: kaza sonucu bozulmuş olan maddeler ve benzeri)
- v. Aktiviteler sonucu bozulmuş veya kirlenmiş olan maddeler (örnek: temizleme işlemi atıkları, ambalaj malzemeleri, konteynırlar ve benzeri)
- vi. Kullanılmayan kısımlar (örnek: atık piller ve katalizörler ve benzeri)
- vii. Yararlı performans gösteremeyen maddeler (örnek: bozulmuş asitler, bozulmuş çözücüler, bitmiş yumuşatma tuzları ve benzeri)
- viii. Endüstriyel proses kalıntıları (örnek: cürufklar, dip tortusu ve benzeri)
- ix. Kirliliğin önlenmesi süreçlerinden kaynaklanan kalıntılar (örnek: yıkama çamurları, filtre tozları, kullanılmış filtreler ve benzeri)
- x. Makine ve/veya yüzey işlemleri kalıntıları (örnek: torna atıkları, frezeleme tortuları ve benzeri)
- xi. Hammadde çıkarılması ve işlenmesinden kaynaklanan kalıntılar (örnek: petrol slopları, madencilik atıkları ve benzeri)
- xii. Saflığı bozulmuş materyaller (örnek; Poliklorlanmış Bifenillerle kontamine olmuş yağlar ve benzeri)
- xiii. Yasa ile kullanımı yasaklanmış olan ürün, madde ve materyaller
- xiv. Sahibi tarafından artık kullanılmayan ürünler (örnek: tarımsal, evsel, ofis, ticari ve market kalıntıları ve benzeri)
- xv. Arazi ıslahı ve iyileştirilmesi faaliyetleri sonucu bozulmuş madde, materyal ve ürünler
- xvi. Yukarıdaki kategorilerde yer almayan herhangi madde, materyal ve ürünler

A.2 Elektrikli ve Elektronik Ekipmanların Sınıflandırılması

- i. Büyük ev gereçleri (büyük beyaz eşyalar); büyük soğutma gereçleri, buzdolapları, dondurucular, yiyeceklerin soğutulmasında, muhafazasında ve saklanmasında kullanılan diğer büyük gereçler, çamaşır makineleri, kurutucular, bulaşık makineleri, ocaklar, elektrikli fırınlar, mikrodalga fırınları, yiyeceklerin pişirilmesinde ve hazırlanmasında kullanılan diğer büyük gereçler, elektrikli ısıtıcılar, elektrikli radyatörler, diğer büyük oda

- ısıtıcıları, yataklar ve oturma gurupları, elektrikli fanlar, hava şartlandırıcıları, diğer fan, vantilatörler ve şartlandırma ekipmanları
- ii. Küçük ev gereçleri (küçük beyaz eşyalar); vakumlu temizleyiciler, elektrikli süpürgeler, diğer temizlik gereçleri, tekstil ürünlerinin dikilmesinde, örülmesinde, dokunmasında ve işlenmesinde kullanılan diğer gereçler, Ütüler ve elbiselerin ütülenmesinde, preslenmesinde ve bakımında kullanılan diğer gereçler, tost makineleri, fritözler, öğütücüler, kahve makineleri ile konservelerin ve paketlerin açılmasında ve kapatılmasında kullanılan gereçler, elektrikli bıçaklar, saç kesim, saç kurutuma, diş fırçalama, tıraş, masaj ve diğer vücut bakım gereçleri, saatler, zaman göstergeleri ve zaman ölçme, gösterme veya kaydetme amacıyla kullanılan gereçler, teraziler
- iii. Bilgi teknolojisi ve iletişim ekipmanları (gri eşyalar);
- a. Merkezi veri işleme donanımları; merkezi işlem birimleri, minibilgisayarlar, yazıcı birimleri
- b. Kişisel bilgisayarlar donanımları; kişisel bilgisayarlar (işlemci, fare, ekran ve klavye dahil), dizüstü bilgisayarlar (işlemci, fare, ekran ve klavye dahil), el bilgisayarı bilgisayarlar, tablet bilgisayarlar, yazıcılar, kopyalama ekipmanları, elektrikli ve elektronik daktilolar, cep ve masa hesap makineleri, ve elektronik olarak bilginin toplamasında, saklamasında, işlenmesinde, sunulmasında veya iletilmesinde ulanılan diğer donanım ve ekipmanlar
- c. Kullanıcı birimleri ve sistemleri
- d. Faks cihazları, teleks, telefonlar, ankesörlü telefonlar, kablosuz telefonlar, mobil telefonlar, çağrı cihazları, ve iletişim yoluyla ses, görüntü ve diğer bilgilerin iletilmesini sağlayan donanım ve ekipmanlar
- iv. Tüketici gereçleri (kahverengi eşyalar); radyo setleri, televizyon setleri, video kameralar, video kaydediciler, yüksek duyarlı ses kaydediciler, ses dalgası yükselticileri, müzik enstrümanları, ve iletişim yoluyla ses ve görüntünün yayınlanması için sinyal ve diğer teknolojileri de içeren, ses veya görüntülerin kaydedilmesi veya kopyalanması amacıyla kullanılan diğer donanım ve ekipmanlar
- v. Aydınlatma ekipmanları; flüoresan lambalar için avizeler (evlerde kullanılan avizeler hariç), geleneksel flüoresan lambalar, kompakt flüoresanlar lambalar, basınçlı sodyum ve metal halojen lambaları dahil olmak üzere yüksek yoğunluklu akış lambaları, düşük basınçlı sodyum lambaları, filaman ampulleri hariç olmak üzere ışığın yayılması veya kontrolü amacıyla kullanılan diğer aydınlatma tertibatları veya ekipmanları
- vi. Elektrikli ve elektronik aletler (büyük ölçekli sabit endüstriyel aletler hariç), matkap, testere, dikiş makineleri, ahşap, metal ve diğer materyallerin döndürülmesinde, frezelenmesinde, zımparalanmasında, taşlanması, biçilmesinde, kesilmesinde, kırılmasında, delinmesinde, zımbalanmasında, katlanması, bükülmesinde ve benzer işlemlerde kullanılan aletler, perçinleme, çivileme veya vidalamada yada perçinlerin, çivilerin, vidaların veya benzer uygulamaların çıkarılmasında kullanılan aletler, kaynak, lehim ve benzer uygulamalarda kullanılan aletler, sıvıların ve gazların

püskürtmesinde, yayılmasında, dağıtılmasında ve diğer işlemlerinde kullanılan aletler, biçme ve diğer bahçıvanlık işlerinde kullanılan araçlar

- vii. Oyuncaklar, eğlence ve spor ekipmanları; elektrikli trenler veya araba yarışı setleri, elle kumanda edilen video oyunu konsolları, video oyunları, bisiklet, dalış, koşu, kürek vb. için bilgisayarlar, elektrikli ve elektronik bileşenlere sahip spor ekipmanları, jetonlu oyun makineleri
- viii. Tıbbi aygıtlar (bütün tedavi amaçlı vücut içerisine yerleştirilmiş aygıtlar ve enfeksiyon taşıyan aygıtların hariç); radyoterapi cihazları, kardiyoloji cihazları, diyaliz cihazları, solunum cihazları, nükleer tıp cihazları, tüplü (in vitro) teşhis kullanılan laboratuvar ekipmanları, analizörler, dondurucular, gebelik testleri, hastalık, yara veya maluliyetin incelemesi, önlemesi, izlemesi, tedavisi, teskin esilmesinde kullanılan aygıtlar
- ix. İzleme ve kontrol cihazları; duman detektörleri, ısı regülatörleri, termostatlar, ev veya laboratuvar ekipmanı olarak ölçüm, tartım veya ayar cihazları, kontrol panelleri gibi endüstriyel tesisatlarda kullanılan diğer izleme ve kontrol cihazları
- x. Otomatik dağıtıcılar; sıcak içecekler için otomatik dağıtıcılar, sıcak veya soğuk şişeli veya kutulu içecekler için otomatik dağıtıcılar, katı mamuller için otomatik dağıtıcılar, para için otomatik dağıtıcılar, her tür mamulün otomatik olarak teslimatını sağlayan tüm cihazlar

A.3 Uygulamada Karşılaşılan Tüm Geri Kazanım İşlemleri

- i. Enerji üretimi amacıyla başlıca yakıt olarak veya başka şekillerde kullanma
- ii. Solvent (çözücü) ıslahı ve/veya yeniden üretimi
- iii. Solvent olarak kullanılmayan organik maddelerin ıslahı ve/veya geri dönüşümü (Kompost ve diğer biyolojik dönüşüm süreçleri dahil)
- iv. Metallerin ve metal bileşiklerinin ıslahı ve/veya geri dönüşümü
- v. Diğer anorganik maddelerin ıslahı ve/veya geri dönüşümü
- vi. Asitlerin veya bazların yeniden üretimi
- vii. Kirliliğin azaltılması için kullanılan parçaların (bileşenlerin) geri kazanımı
- viii. Katalizör parçalarının (bileşenlerinin) geri kazanımı
- ix. Kullanılmış yağların yeniden rafine edilmesi veya diğer tekrar kullanımları
- x. Ekolojik iyileştirme veya tarımcılık yararına sonuç verecek arazi ıslahı
- xi. Madde (i) ile (x) arasındaki işlemlerden elde edilecek atıkların kullanımı
- xii. Atıkların madde (i) ile (xi) arasındaki işlemlerden herhangi birine tabi tutulmak üzere değişimi
- xiii. Madde (i) ile (xii) arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutuluncaya kadar atıkların stoklanması (atığın üretildiği alan içinde geçici depolama, toplama hariç)

A.4 Uygulamada Karşılaşılan Tüm Bertaraf İşlemleri

- i. Arazi içerisine veya üzerine koymak (örneğin: gömme ve benzeri),
- ii. Arazi işleme (örneğin: sıvıların veya çamur atıkların toprak içerisinde biyolojik bozunması ve benzeri)
- iii. Derine enjeksiyon (örneğin: pompalanabilir atıkların kuyulara, tuz kayalarına veya doğal olarak bulunan boşluklara enjeksiyonu ve benzeri),
- iv. Yüzey doldurma (örneğin: Sıvı yada çamur atıkların kovuklara, havuzlara ve lagünlere doldurulması ve benzeri)
- v. Özel mühendislik gerektiren toprağın altında veya üstünde düzenli depolama (örneğin: çevreden ve her biri ayrı olarak izole edilmiş ve örtülmüş hücresel depolama ve benzeri)
- vi. Denizler ve/veya okyanuslar hariç bir su kitlesine tahliye etme
- vii. Deniz yatağına doldurma dahi denizlere ve/veya okyanuslara tahliye etme
- viii. Madde (i) ile (xii) arasında verilen işlemlerden herhangi biri ile bertaraf edilen nihai bileşiklere veya karışımlara uygulanan ve bu ekin başka bir yerinde ifade edilmeyen biyolojik işlemler
- ix. Madde (i) ile (xii) arasında verilen işlemlerden herhangi biri ile bertaraf edilen nihai bileşiklere veya karışımlara uygulanan ve bu ekin başka bir yerinde ifade edilmeyen fiziksel-kimyasal işlemler (örneğin: buharlaştırma, kurutma, ısıtma ve benzeri)
- x. Arazi üzerinde yakma
- xi. Deniz üzerinde yakma
- xii. Sürekli depolama (örneğin: bir madende konteynırların yerleştirilmesi ve benzeri)
- xiii. Madde (i) ile (xii) arasında verilen işlemlerden herhangi birilerini harmanlama veya karıştırma
- xiv. Madde (i) ile (xii) arasında verilen işlemlerden herhangi birilerini yeniden düzenleme
- xv. Madde (i) ile (xiv) arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutuluncaya kadar atığın üretildiği alan içinde geçici depolama (ara depolama tesisleri ve toplama işlemi hariç)

EK B

TESİD (Türk Elektronik Sanayicileri Derneği) Verilerine Göre Türk Elektronik Sanayisinin Alt Sektörlerine Ait İthalat ve İhracat Rakamları [25]

Tablo B.1: Türk Elektronik Sanayisinin Bileşenler Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri

Mamul Cinsi	İthalat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
1. Devre Elemanları	481.104	621.823	872.123
Kondansatörler	56.629	67.805	93.731
Elektrikli Rezistanslar	22.846	27.496	35.808
Diyot, Transistor vb.	72.044	85.961	117.930
Entegre Devreler	329.585	440.561	624.654
2. Resim Tüpleri	769.279	896.969	1.139.432
3. Bobin ve Transformatörler	48.552	58.407	87.414
4. Akustik Elemanlar	45.355	72.493	96.103
5. Bağlantı Elemanları ve Röleler	43.802	73.075	87.054
6. Baskılı Devreler	28.551	12.281	27.836
Toplam	1.416.640	1.735.048	2.309.962

Tablo B.2: Türk Elektronik Sanayisinin Bileşenler Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri

Mamul Cinsi	İhracat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
1. Devre Elemanları	9.275	12.384	16.473
Kondansatörler	946	960	1.744
Elektrikli Rezistanslar	555	1.108	1.052
Diyot, Transistor vb.	1.379	1.086	1.705
Entegre Devreler	6.395	9.230	11.972
2. Resim Tüpleri	589	809	1.237
3. Bobin ve Transformatörler	17.802	14.360	21.479
4. Akustik Elemanlar	835	1.484	2.014
5. Bağlantı Elemanları ve Röleler	26.397	35.910	56.403
6. Baskılı Devreler	6.024	7.305	5.903
Toplam	60.922	72.252	103.509

Tablo B.3: Türk Elektronik Sanayisinin Tüketim Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri

Mamul Cinsi	İthalat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Renkli Televizyon	90.727	118.734	193.691
Audio Cihazları	78.657	142.376	219.571
Video Oynatıcı	28.711	59.240	54.863
Yazar Kasa	58.057	55.930	112.688
Elektronik Hesap Makineleri	9.519	8.673	19.682
Audio Video Kasetler	89.215	82.876	142.542
TV Uydu Alıcıları ve Anten Santr.	41.354	138.901	232.380
Elektronik Tartı ve Cihazlar	9.426	10.340	16.319
Toplam	405.666	617.070	991.736

Tablo B.4: Türk Elektronik Sanayisinin Tüketim Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri

Mamul Cinsi	İhracat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Renkli Televizyon	1.540.095	1.878.700	2.788.500
Audio Cihazları	5.413	10.141	10.153
Video Oynatıcı	1.350	4.739	65.853
Yazar Kasa	1.631	1.583	1,649
Elektronik Hesap Makineleri	131	334	263
Audio Video Kasetler	15.538	26.655	25.435
TV Uydu Alıcıları ve Anten Santr.	6.151	14.100	17.922
Elektronik Tartı ve Cihazlar	593	1.634	3.713
Toplam	1.570.902	1.937.886	2.913.488

Tablo B.5: Türk Elektronik Sanayisinin Telekomünikasyon Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri

Mamul Cinsi	İthalat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Hat bağlantı cihazları	17.299	10.581	19.455
Uç cihazlar (telefon, faks, vb.)	32.891	47.213	76.942
Transmisyon Cihazları	88.043	119.887	268.141
Telsiz telefon, telsiz, telgraf alıcı ve verici	550.091	690.425	1.137.106
Anten aksamaları	78.738	103.658	175.696
Kablolar	134.072	125.085	233.687
Telekom Kabloları	22.890	41.217	114.846
Bakır İletkenli Enerji Kabloları	109.178	80.942	113.394
Fiber Optik Kabloları	2.004	2.926	5.447
Toplam	901.134	1.096.849	1.911.027

Tablo B.6: Türk Elektronik Sanayisinin Telekomünikasyon Cihazları Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri

Mamul Cinsi	İhracat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
Hat bağlantı cihazları	15.971	14.668	5.639
Uç cihazlar (telefon, faks, vb.)	3.527	7.300	2.059
Transmisyon Cihazları	21.293	15.980	16.525
Telsiz telefon, telsiz, telgraf alıcı ve verici	22.640	8.462	6.513
Anten aksamaları	7.870	12.937	14.878
Kablolar	476.605	478.060	557.823
Telekom Kabloları	120.273	110.010	110.484
Bakır İletkenli Enerji Kabloları	327.287	346.860	427.080
Fiber Optik Kabloları	29.045	21.190	20.259
Toplam	547.906	537.407	603.437

Tablo B.7: Elektronik Sanayisinin Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar Alt Sektörünün Yıllara Göre İthalat Değerleri

Mamul Cinsi	İthalat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
1. Ses ve Görüntü Sistemler		72.803	149.900
2. Endüstriyel Elektronik Cihazlar		373.953	843.478
Statik Konvektörler		176.060	217.660
Otomasyon Cihazları		48.818	62.936
Sinyalizasyon ve Alarm Cihazları		117.391	538.820
Endüksiyon Ocakları		31.684	24.062
3. Tıbbi Elektronik		206.855	334.770
4. Test ve Ölçü Aletleri		367.853	516.654
5. Otomotiv Elektroniği		30.203	53.698
6. Elektronik Saatler		87.354	125.195
7. Diğer Cihazlar		121.546	159.237
Toplam		1.260.567	2.182.932

Tablo B.8: Elektronik Sanayisinin Profesyonel ve Endüstriyel Cihazlar Alt Sektörünün Yıllara Göre İhracat Değerleri

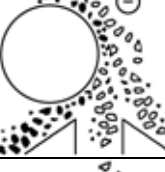
Mamul Cinsi	İhracat (Bin \$)		
	2002	2003	2004
1. Ses ve Görüntü Sistemler		1.362	2.484
2. Endüstriyel Elektronik Cihazlar		166.312	250.162
Statik Konvektörler		154.445	224.614
Otomasyon Cihazları		5.033	12.571
Sinyalizasyon ve Alarm Cihazları		4.756	8.845
Endüksiyon Ocakları		2.078	4.132
3. Tıbbi Elektronik		7.888	11.501
4. Test ve Ölçü Aletleri		15.027	24.975
5. Otomotiv Elektroniği		330	3.735
6. Elektronik Saatler		5.299	9.438
7. Diğer Cihazlar		6.943	8.569
Toplam		203.161	310.864

EK C

```
MATERYAL=[416.63;75.03;52.96;395.48;60.0]
Kx=[1 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 1]
Ex=[0.9 0 0 0 0;0 0.8 0 0 0;0 0 0.8 0 0;0 0 0 0.9 0;0 0 0 0 0.8]
HSx=[0.96 0 0 0 0;0 0.9 0 0 0;0 0 0.5 0 0;0 0 0 0.02 0;0 0 0 0 0.96]
Sx=[1 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 0.02 0 0;0 0 0 0 0;0 0 0 0 0.96]
MDASx=[0.10 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 0.98]
MYASx=[0.10 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 0.98 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 0.96]
Gx=[0.1 0 0 0 0;0 0.13 0 0 0;0 0 0.01 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 0.96]
Gz=[0.9 0 0 0 0;0 0 0 0 0;0 0 0 0 0;0 0 0 0 0;0 0 0 0 0.02]
ESx=[0.98 0 0 0 0;0 0.11 0 0 0;0 0 0.01 0 0;0 0 0 0.02 0;0 0 0 0 0.96]
ESz=[0 0 0 0 0;0 0.02 0 0 0;0 0 0 0 0;0 0 0 0.98 0;0 0 0 0 0.02]
I=[1 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 1]
Ky=I-Kx
Ey=I-Ex
HSy=I-HSx
Sy=I-Sx
MDASy=I-MDASx
MYASy=I-MYASx
Gy=I-Gx-Gz
ESy=I-ESx-ESz
BD=[11.9130;0.3300;2.4750;4.1580;1.9470]
CM=[43.12;1.04;1.12;4.40;3.92]
DO=[12.9551;0.3670;4.2939;3.1562;5.6151]
TM=[0.6160;0.0550;0.0220;0.3960;0.0110]
PL=[0.2310;0.1470;0.0210;1.4070;0.0630]
VK=[2.0520;0.2660;0.0380;0.7600;0.0760]
KC=[0.9675;0.1125;0.0225;0.8550;0.0450]
TV=[1.9110;1.2005;0.4900;8.3790;0.0000]
MO=[1.2330;0.6800;0.4080;1.4080;0.0240]
YZ=[2.7300;0.9100;0.0000;2.5200;0.8400]
PC=[0.6973;0.0367;0.1468;1.5047;0.3670]
MP=[0.0048;0.0240;0.0112;0.0784;0.0000]
```

EK D

Tablo D.1: Kütle Akış Diyagramlarında Kullanılan Sistem Elemanlarına Ait Şematik Gösterimlerin Açıklamaları

Şematik Gösterim	Açıklama
	Kırıcı veya Öğütücü
	Elek
	Manyetik Ayırıcı
	Girdap Akım Ayırıcı
	Elektrostatik Ayırıcı
	Havalı Sınıflandırıcı
	Siklon

EK E

Tablo E.1: Çekiçli Kırıcılar

İmalatçı	Model	Güç (kW)	Kapasite (kg.saat ⁻¹)	Kesme Açıklığı (mm)
Stedman	-	19	750 – 1.000	508 × 305
	-	23	1.250 – 1.500	508 × 406
	-	30	1.750 – 2.000	610 × 508
	-	37	2.250 – 2.500	610 × 610
Sturtevant	5	3,7	500 – 1.500	127 × 102
	10	7,5	1.000 – 6.000	279 × 254

Tablo E.2: Kesmeli Kırıcılar ve Öğütücüler

İmalatçı	Model	Güç (kW)	Kapasite (kg.saat ⁻¹)	Kesme Açıklığı (mm)
Untha	RS60 960	52 – 60 – 74	4.000	960 × 860
	RS60 1200		5.000	1200 × 860
	RS60 1440		6.000	1440 × 860
	RS100 1200	75 – 100	8.000	1200 × 1020
	RS100 1500		10.000	1500 × 1020
Shredtech	STQ 50	54 – 67	-	700 × 740
			-	700 × 985
			-	700 × 1230
	ST – 500 HS	149 – 447	-	1524 × 1092
	ST – 50 E	30 – 37	-	102 × 53
Stedman	GSB 2424	-	5.000	610 × 610
Granutech	-	60 – 75	1.400 – 2.100	-
	Grind M50	20	-	508 × 546
	Grind M70	50	-	826 × 991
	Grind M80	75	-	826 × 991
	Grind M110	100	-	1372 × 2032
	Grind M160	150	-	1613 × 2032
	Grind M200	200	-	2146 × 2540
	Grizzly	225	-	-

Tablo E.3: Havalı Sınıflandırıcılar

İmalatçı	Model	Güç (kW)	Kapasite (kg.saat ⁻¹)	Çap × Boy (mm)
Sturtevant	Superfine	7,5 – 15	450 – 4.500	1143 × 1676
	Whirlwind	3,7 – 5,2	1000	737 × 1143
		5,2 – 7,5	3000	991 × 2007

Tablo E.4: Girdap Akımı Ayırıcıları

İmalatçı	Model	Bant Motor Gücü (kW)	Rotor Motor Gücü (kW)	Vibrator Motor Gücü (kW)	Bant Genişliği (mm)
Han Kook Matics	HAR300	0,4	5,5	0,12 × 2	457
	HAR450	0,75	5,5	0,12 × 2	610
	HAR600	0,75	5,5 – 7,5	0,12 × 2	762
	HAR750	0,75	7,5	0,25 × 2	914
	HAR900	1,5	7,5 – 11	0,25 × 2	1067
Goudsmit	NF 600	0,75	1,5	1,4	600
	NF 850	1,1	2,2	2,2	850
	NF 1050	1,5	3,0	3,0	1050
Eriez	ECS 12	-	6,25	-	305
	ECS 16	-	6,25	-	406
	ECS 20	-	6,25	-	508
	ECS 24	-	6,25	-	601
	ECS 32	-	6,25	-	810
	ECS 48	-	8,60	-	1212
	ECS 60	-	12,10	-	1500

Tablo E.5: Tamburlu Manyetik Ayırıcılar

İmalatçı	Model	Motor Gücü (kW)	Kapasite (m ³ .saat ⁻¹)	Çap × En (mm)
Han Kook Matics	HDPT3030	0,3 – 0,4	5	305 × 305
	HDPT3040		7	305 × 406
	HDPT3050		9	305 × 508
	HDTP3060		12	305 × 610
Goudsmit	SRTK040034	0,37	35	300 × 400
	STRK060034	0,37	52	300 × 600
	STRK080034	0,37	70	300 × 800
	STRK060044	0,55	90	400 × 600
	STRK080044	0,55	120	400 × 800
	STRK100044	0,55	150	400 × 1000
	STRK100055	0,75	180	500 × 1000
	STRK120055	0,75	215	500 × 1200
	STRK140055	0,75	250	500 × 1400
Eriez	HFP RE 12	0,25	28	305 × 305
		0,25	34	305 × 356
		0,25	40	305 × 406
		0,25	45	305 × 457
		0,25	50	305 × 508
		0,25	62	305 × 610
		0,25	80	305 × 762
		0,38	93	305 × 915
		0,38	110	305 × 1067
	HFP RE 15	0,56	35	381 × 305
		0,56	50	381 × 406
		0,56	62	381 × 508
		0,56	76	381 × 610
		1,1	116	381 × 915
		2,2	156	381 × 1219

Tablo E.6: Bantlı Elektro Mıknatıslı Manyetik Ayırıcılar

İmalatçı	Model	Motor Gücü (kW)	Elektro Mıknatıs Gücü DC (kW)	Bant Genişliği (mm)
Han Kook Matics	HOB5450	0,75	1,5	406
	HOB5600	0,75	2,0	610
	HOB5800	1,5	2,9	762
	HOB51000	2,2	4,0	965
	HOB51200	2,2	5,6	1168
Goudsmit	SEEB080022	1,5	3,3	800
	SEEB100022	2,2	5,2	1000
	SEEB120002	2,2	7,6	1200
	SEEB140022	2,2	10,3	1400
	SEEB160022	3,0	15,4	1600
	SEEB180022	4,0	20	1800
	SEEB200022	4,0	26	2000

Tablo E.7: Bantlı Doğal Mıknatıslı Manyetik Ayırıcılar

İmalatçı	Model	Motor Gücü (kW)	Uygulama Mesafesi (mm)	Bant Genişliği (mm)
Han Kook Matics	HFP400	0,4	-	406
	HFP500	0,4	-	457
	HFP600	0,75	-	559
	HFP800	0,75	-	711
	HFP1000	0,75	-	914
	HFP1200	1,5	-	1219
Goudsmit	SEPB065012	-	210	500
	SEPB080012	-	210	500
	SEPB065013	-	280	650
	SEPB080013	-	280	650
	SEPB100013	-	280	650
	SEPB080014	-	320	800
	SEPB100014	-	320	800
	SEPB120014	-	320	800
	SEPB100015	-	400	1000
	SEPB120015	-	400	1000
	SEPB140015	-	400	1000

Tablo E.8: Tek Katlı Titreşimli Elekler (20°)

İmalatçı	Model	Motor Gücü (kW)	Kapasite (kg.saat ⁻¹)	En × Boy (mm)
Na – Ce	TE1 1020	2,2	-	1000 × 2000
	TE1 1025	3	-	1000 × 2500
	TE1 1030	4	-	1000 × 3000

ATIK SILOSU

HAVALI SINIFLANDIRICI - Sturtevant
MODEL : Whirlwind
GUC : 3,7 - 5,2 kW
CAP x BOY : 737 x 1143 mm

GIRDAP AKIMI AYIRICI - Goudsmit
MODEL : NF 600
GUC : 2,65 kW
BANT GENISLIGI : 600 mm

TAMBURLU MANYETIK AYIRICI - Goudsmit
MODEL : STRK100044
GUC : 0,55 kW
CAP x EN : 400 x 1000 mm

TITRESIMLI ELEK (20°) - Na - Ce
MODEL : TE1 1020
GUC : 2,2 kW
EN x BOY : 1000 x 2000 mm

KIRICI (2) - Shredtech
MODEL : ST - 50 E
GUC : 30 - 37 kW
KESME ACIKLIGI : 1016 x 533 mm

KIRICI (1) - Shredtech
MODEL : ST - 500 HS
GUC : 149 - 447 kW
KESME ACIKLIGI : 1524 x 1092 mm

CIZEN	CENK TOLGA CIGGIN	REFERANS	EK F - SEKIL F.1
KONTROL	CENK TOLGA CIGGIN	TARİH	08.05.2006
OLCEK	ELEKTRIKLI ve ELEKTRONIK EKIPMAN ATIKLARI ICIN GERI DONUSUM SISTEMI TASARIMI		
1/40			

ÖZGEÇMİŞ

Cenk Tolga ıgğın 19 Mayıs 1977’de Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğretimini sırasıyla İstanbul Ahmet Rasim İlkokulu, Şenesenevler Ortaokulu ve Kenan Evren Lisesinde tamamladı.1994’de Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 1998’de aynı bölümden birincilikle mezun oldu. 2002’de İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programına kabul edildi. 2006 Haziran ayında, bu programdan Yüksek Lisans derecesi alması bekleniyor.