

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**E-ATIK GERİ KAZANIM SİSTEMLERİNDE DEMONTAJ TESİS  
YERLEŞİM PLANLAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ozan ÇAPRAZ**

**Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Programı : Yüksek Lisans Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aşkiner GÜNGÖR**

**HAZİRAN, 2013**

## YÜKSEK LİSANS TEZ ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 101261005nolu öğrencisi Ozan ÇAPRAZ tarafından hazırlanan “E-ATIK GERİ KAZANIM SİSTEMLERİNDE DEMONTAJ TESİS YERLEŞİM PLANLAMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı :  
(Jüri Başkanı)

Prof. Dr. Aşkner GÜNGÖR  
(Pamukkale Üniversitesi)



Jüri Üyesi :

Doç. Dr. Turan PAKSOY  
(Selçuk Üniversitesi)



Jüri Üyesi :

Yrd. Doç. Dr. Hacer GÜNER GÖREN  
(Pamukkale Üniversitesi)



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .10.07.2013 tarih ve ...22/11.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü  
Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza : 

Öđrenci Adı Soyadı : Ozan ÇAPRAZ

## ÖNSÖZ

Teknolojinin gelişmesiyle her geçen gün artan elektronik atık (e-atık) miktarı, çevre sürdürülebilirliği ve insan sağlığı üzerinde tehdit oluşturmaktadır. Günümüzde, giderek büyüyen e-atık problemine önlem almak için devletler çeşitli politikalar oluşturmaya ve yönetmelikler hazırlamaya başlamıştır. Bu durum, günümüzde atık sahalarına ve geri dönüşüm tesislerine gönderilen ve dolayısıyla geri dönüşümü sağlanan e-atık miktarını daha da arttırmıştır.

Bu tez çalışmasında, e-atıkların geri kazanım süreçlerinde önemli bir yere sahip olan demontaj sistemleri için ideal yerleşim planlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Tez çalışmam süresince, beni yönlendiren ve sürekli olumlu yönde motive eden, her aşamada düşünce, öneri ve katkıları ile bana yol gösteren çok değerli hocam sayın Prof.Dr. Aşkıner Güngör'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi hazırlamamda ve bilimsel araştırmalarımda sürekli yanımda olan, çalışmam boyunca bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, çalışmalarım sırasında bana yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen Pamukkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi sayın Olcay Polat'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Endüstri Mühendisliği Anabilim dalı öğretim üyeleri Prof.Dr. Osman Kulak, Yrd.Doç.Dr. Özcan Mutlu, Yrd.Doç.Dr. Semih Coşkun, Yrd.Doç.Dr. Aliye Ayça Supçiller, Yrd.Doç.Dr. Leyla Demir ve anabilim dalı dışından Doç.Dr. Ramazan Baştürk ve Doç.Dr. İrfan Ertuğrul'a sağladıkları katkılar ve manevi destekler için ve tez jürisi öğretim üyeleri sayın Doç.Dr. Turan Paksoy ve Yrd.Doç.Dr. Hacer Güner Gören'e titiz değerlendirmeleri ve katkıları için teşekkür ederim.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında her türlü bilgi ve veri paylaşımı sağlayan Exitcom Recycling Türkiye ve Almanya firma sahibi ve genel müdürü sayın Murat Ilgar'a, Almanya tesisi fabrika müdürü sayın Süleyman Sarık'a ve Türkiye tesisi çevre mühendisi sayın Arzu Karabacak'a ve tüm Exitcom Recycling personeline teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, 111M428 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bu kapsamda TÜBİTAK'a da desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her anında ve çalışmalarım esnasında manevi desteklerini hissettiğim sevgili aileme ve değerli dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2013

Ozan ÇAPRAZ

Endüstri Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Tezin Kapsamı.....	3
1.3 Tezin Organizasyonu.....	4
<b>2. E-ATIK HAKKINDA GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>5</b>
2.1 E-atık Tanımı ve Kategorileri.....	8
2.2 E-atıkların İçerikleri .....	8
2.2.1 E-atıkların İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkisi .....	9
2.2.2 E-atıkların Ekonomik Potansiyeli .....	10
2.3 E-atıklar Üzerine Yasal Çerçeve .....	11
2.4 Genel Değerlendirme .....	12
<b>3. GERİ KAZANIM VE DEMONTAJ</b> .....	<b>13</b>
3.1 Montaj ve Demontaj Arasındaki Farklılıklar .....	15
3.2 Demontaj Sistemleri .....	17
3.2.1 Demontaj Çizelgeleme.....	17
3.2.2 Demontaj Sıralama .....	17
3.2.3 Demontaj Hat Dengeleme.....	18
3.2.4 Demontaj Sipariş Sistemi.....	18
<b>4. E-ATIK DEMONTAJ SİSTEMLERİNDE YERLEŞİM PLANLAMASI</b> .....	<b>19</b>
4.1 Mevcut Demontaj Yerleşim Yaklaşımları.....	21
4.2 Literatür Taraması: Demontaj Sistemlerinde Yerleşim Planlaması .....	22
<b>5. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>28</b>
5.1 Veri Toplama.....	29
5.1.1 Demontaj Süreçleri .....	29
5.1.1.1 Manuel Demontaj Süreci.....	31
5.1.1.2 Yiğın Geri Dönüşüm Süreci.....	33
5.1.2 Ürün Analizi .....	36
5.1.2.1 Kişisel Bilgisayar (PC).....	36
5.1.2.2 CRT TV ve Monitör.....	37
5.1.2.3 LCD TV ve Monitör.....	38
5.2 Önerilen Yerleşim Alternatifleri ve İlişkili Simülasyon Modelleri.....	41
5.2.1 Senaryo-1: Tek Demontaj İş İstasyonu.....	44
5.2.1.1 Senaryo-1(a): Tek Demontaj İş İstasyonu (+1).....	45
5.2.1.2 Senaryo-1 Simülasyon Modeli .....	45
5.2.2 Senaryo-2: Sınıflandırma .....	47
5.2.2.1 Öğrenme Eğrisi .....	48
5.2.2.2 Senaryo-2 Simülasyon Modeli .....	50
5.2.3 Senaryo-3: Hat Yerleşimi - Yakınsak Malzeme Akışı .....	52
5.2.3.1 Senaryo-3(a): Hat Yerleşimi - Yakınsak Malzeme Akışı (+1) .....	53

5.2.3.2 Senaryo-3 Simülasyon Modeli.....	53
5.2.4 Senaryo-4: Hat Yerleşimi - Iraksak Malzeme Akışı.....	54
5.2.4.1 Senaryo-4 Simülasyon Modeli.....	55
5.2.5 Senaryo-5: Hat Yerleşimi - Iraksak ve Yakınsak Malzeme Akışı.....	57
5.2.5.1 Senaryo-5 Simülasyon Modeli.....	57
<b>6. SİMÜLASYON SONUÇLARI.....</b>	<b>58</b>
6.1 Senaryo-1 Simülasyon Sonuçları .....	58
6.1.1 Senaryo-1(a) Simülasyon Sonuçları .....	60
6.2 Senaryo-2 Simülasyon Sonuçları .....	61
6.3 Senaryo-3 Simülasyon Sonuçları .....	64
6.3.1 Senaryo-3(a) Simülasyon Sonuçları .....	67
6.4 Senaryo-4 Simülasyon Sonuçları .....	68
6.5 Senaryo-5 Simülasyon Sonuçları .....	70
6.6 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	73
6.6.1 Bileşen Miktarı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	73
6.6.2 İşlenen Toplam Atık Sayısı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	75
6.6.3 Toplam Gelir Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	75
6.6.4 Katma Yaratmayan Aktiviteler Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması	77
6.6.5 Genel Karşılaştırma .....	77
6.6.6 Sonuçların İstatistiksel Analizi .....	78
<b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>82</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>

## KISALTMALAR

<b>AEEE</b>	: Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman
<b>BFR</b>	: Bromlu Alev Geciktiriciler - Brominated Flame Retardant
<b>CCFL</b>	: Soğuk Katotlu Arka Işık - Cold Cathode Fluorescent Lamps
<b>CRT</b>	: Katot Işın Tüpü - Cathode Ray Tube
<b>E-atık</b>	: Elektronik Atık
<b>EEA</b>	: Avrupa Çevre Ajansı - European Environmental Agency
<b>EEE</b>	: Elektrikli ve Elektronik Ekipman
<b>EPA:</b>	: ABD Çevre Koruma Ajansı - Environmental Protection Agency
<b>LCD</b>	: Sıvı Kristal Ekran - Liquid Crystal Display
<b>PCB</b>	: Baskılı Devre Kartı - Printed Circuit Board
<b>TESİD</b>	: Türk Elektronik Sanayicileri Derneği
<b>TUİK</b>	: Türkiye İstatistik Kurumu
<b>UN</b>	: Birleşmiş Milletler - United Nations
<b>UNEP</b>	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı - UN Environment Programme
<b>UNU</b>	: Birleşmiş Milletler Üniversitesi - United Nations University
<b>WEEE</b>	: Waste Electrical and Electronic Equipment

## TABLO LİSTESİ

### Tablolar

<b>2.1</b> : EU WEEE direktiflerine göre e-atık kategorileri (EU, 2002b) .....	8
<b>2.2</b> : Üç temel e-atık kategorisi için malzeme bileşenleri (Amoyaw-Osei ve diğ., 2011).....	9
<b>2.3</b> : Dünyada kalan doğal kaynak stokları (Reller ve Graedel (2007)'den düzenlenmiştir.) .....	11
<b>3.1</b> : Montaj ve demontaj aktivitelerinin operasyonel ve teknik farklılıkları (Brennan ve diğ., 1994; Gungor ve Gupta, 1999) .....	16
<b>5.1</b> : PC demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları ...	37
<b>5.2</b> : CRT TV demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	38
<b>5.3</b> : CRT monitör demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	38
<b>5.4</b> : LCD TV demontajından elde edilen bileşenler ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	40
<b>5.5</b> : LCD monitör demontajından elde edilen bileşenler ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	40
<b>5.6</b> : Çeşitli endüstrilerde öğrenme eğrisi eğimi (NASA, 2008) .....	48
<b>6.1</b> : Senaryo-1 için tekrar sayısının yeterliliği .....	58
<b>6.2</b> : Senaryo-2 için tekrar sayısının yeterliliği .....	62
<b>6.3</b> : Senaryo-3 için tekrar sayısının yeterliliği .....	65
<b>6.4</b> : Senaryo-4 için tekrar sayısının yeterliliği .....	68
<b>6.5</b> : Senaryo-5 için tekrar sayısının yeterliliği .....	70
<b>6.6</b> : Bileşen miktarları açısından senaryoların detaylı karşılaştırılması .....	74
<b>6.7</b> : Demontajı yapılan toplam atık sayısı için senaryoların karşılaştırılması ...	75
<b>6.8</b> : Toplam gelir açısından senaryoların detaylı karşılaştırılması .....	76
<b>6.9</b> : Katma değer yaratmayan süreler için senaryoların karşılaştırılması .....	77
<b>6.10</b> : Değerlendirme kriterlerine göre senaryoların karşılaştırılması .....	77
<b>6.11</b> : Toplam gelir için tek örneklem K-S testi sonuçları .....	79
<b>6.12</b> : İşlenen toplam atık miktarı için tek örneklem K-S testi sonuçları .....	79
<b>6.13</b> : İşlenen toplam atık miktarı için varyansların homojenliği testi sonuçları	80
<b>6.14</b> : Toplam gelir için Kruskal-Wallis H testi sonuçları .....	80
<b>6.15</b> : İşlenen toplam atık miktarı için Kruskal-Wallis H testi sonuçları .....	81



## ŞEKİL LİSTESİ

### Şekiller

2.1 : ABD’de elektronik ürün satışları (1984-2006) (EPA, 2008).....	5
2.2 : Dünyada 1000 kişi başına düşen bilgisayar ve cep telefonu sayısı (Baker ve diğ., 2004).....	6
2.3 : Türkiye’de e-atık toplama miktarı (2006-2009) (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2011) .....	7
3.1 : Thierry ve diğ. (1995) geri kazanım seçenekleri .....	13
3.2 : Yeniden üretim tesislerinde bir birimin ürünün akışı (Gungor ve Gupta, 1999).....	14
4.1 : E-atık demontaj sistemlerinin karakteristikleri (Hesselbach ve Westernhagen (1999)’den uyarlanmıştır.).....	19
4.2 : Mevcut demontaj yerleşim biçimleri (Opalić ve diğ., 2010).....	21
4.3 : Hesselbach ve Westernhagen (1999) esnek demontaj sistemi yerleşimi....	23
4.4 : Electrocyling demontaj sistemi yerleşimi (Scharke, 2003) .....	24
4.5 : Sony manuel demontaj hattı yerleşimi (Scharke, 2003).....	25
4.6 : Coolrec manuel demontaj hattı yerleşimi (Scharke, 2003) .....	25
4.7 : Tüketici ürünleri demontaj tesisi yerleşimi (Opalić ve diğ., 2010) .....	27
5.1 : Çalışmanın uygulama adımları ve kullanılan yöntemler .....	28
5.2 : Paydaş firma tesis yerleşim planı .....	29
5.3 : Paydaş firmada geri dönüşüm süreçleri .....	30
5.4 : E-atıkların tesise girişinden sonra depolanması ve sınıflandırılması .....	31
5.5 : İş istasyonlarında demontaj operasyonları ve iş istasyonu çevresinde yer alan e-atıklar .....	31
5.6 : E-atıkların demontajından elde edilen bileşenler ve sınıflandırma kutuları32	
5.7 : Konteynırlar içerisinde yer alan plastik çıktılar.....	32
5.8 : Paydaş firmada yığın geri dönüşüm süreci ve elde edilen bileşen tipleri... 34	
5.9 : Konveyör operatörü ve kırıcı yükleme bandı .....	34
5.10 : Zincirli kırıcı ve manuel ayrıştırma bandı .....	35
5.11 : Mıknatıs ve NE ayırıcı .....	35
5.12 : Depolama alanında e-atık çıktıları .....	35
5.13 : PC’nin bileşenleri ve konumları (CFER, 2013) .....	36
5.14 : CRT monitör bileşenleri ve konumları (CFER, 2013) .....	37
5.15 : LCD monitör bileşenleri ve konumları (Kim ve diğ., 2009a) .....	39
5.16 : LCD modül bileşenleri ve konumları (Kim ve diğ., 2009a).....	39
5.17 : Senaryo-1: tek demontaj iş istasyonu .....	44
5.18 : Senaryo-1’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü).... 45	
5.19 : Senaryo-1’de sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	46
5.20 : Senaryo-2: sınıflandırma .....	47
5.21 : PC için demontaj operatörü öğrenme eğrisi .....	49
5.22 : CRT TV ve monitör için operatör öğrenme eğrisi.....	50
5.23 : LCD TV ve monitör için demontaj operatörü öğrenme eğrisi .....	50
5.24 : Senaryo-2’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)... 51	

<b>5.25</b> : Senaryo-2’de PC grubu için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	51
<b>5.26</b> : Senaryo-3: Hat Yerleşimi - Yakınsak Malzeme Akışı .....	52
<b>5.27</b> : Senaryo-3’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)...	53
<b>5.28</b> : Senaryo-3’de sınıflandırma operatörü için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	54
<b>5.29</b> : Hat yerleşimi - ıraksak malzeme akışı.....	55
<b>5.30</b> : Senaryo-4’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)...	56
<b>5.31</b> : Senaryo-4’de kapalı döngü hat için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	56
<b>5.32</b> : Senaryo-5: hat yerleşimi: ıraksak ve yakınsak malzeme akışı .....	57
<b>6.1</b> : Senaryo-1’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%) ..	59
<b>6.2</b> : Senaryo-1’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%) .....	60
<b>6.3</b> : Senaryo-1 ve senaryo-1(a)’da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarlarının karşılaştırılması.....	61
<b>6.4</b> : Senaryo-2’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%) ..	62
<b>6.5</b> : Senaryo-1 ve senaryo-2’de e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarlarının karşılaştırılması.....	63
<b>6.6</b> : Senaryo-2’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%) .....	64
<b>6.7</b> : Senaryo-3’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%) ..	65
<b>6.8</b> : Senaryo-3’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%) .....	66
<b>6.9</b> : Senaryo-1 ve senaryo-3(a)’da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarlarının karşılaştırılması.....	67
<b>6.10</b> : Senaryo-4’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)	69
<b>6.11</b> : Senaryo-4’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%) .....	69
<b>6.12</b> : Senaryo-5’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)	71
<b>6.13</b> : Senaryo-5’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%) .....	72
<b>6.14</b> : Bileşen miktarı için senaryoların karşılaştırılması .....	73
<b>6.15</b> : Toplam gelir için senaryoların karşılaştırılması .....	75

## ÖZET

### E-ATIK GERİ KAZANIM SİSTEMLERİNDE DEMONTAJ TESİS YERLEŞİM PLANLAMASI

Kullanım dışı elektrikli ve elektronik ürünlerin oluşturduğu e-atıkların geri kazanımı, bu ürünlerin barındırdığı tehlikeli maddelerin insan sağlığı ve çevre sürdürülebilirliği üzerindeki olumsuz etkilerinin minimize edilmesi, taşıdığı ekonomik potansiyel ve dünyamızın limitli kaynaklarının verimli kullanımına yönelik katkısı bakımından önemlidir. Bu tez çalışmasında, e-atık geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahip olan demontaj sistemleri için ideal yerleşim tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, gerek literatürdeki çalışmalardan gerekse paydaş firmadan elde veriler ışığında, e-atık demontaj sistemleri ve süreçleri yakından incelenmiş ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, yerleşim planlaması probleminin temel prensiplerine ve demontaj sistemlerine özel durumlar ve ihtiyaçlara göre yerleşim alternatifleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yerleşim alternatifleri ARENA 10.0 simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modellerde, e-atıkların çeşitliliği ve yapısal belirsizliği nedeni ile demontaj süreleri bulanık olarak elde edilmiştir. Simülasyon modellerinin sonuçları, demontaj operasyonlarından elde edilen geri kazanılabilir bileşen miktarı, demontajı yapılan toplam atık sayısı, bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ve katma değer yaratmayan aktivitelere harcanan zaman gibi farklı performans ölçütlerine göre kıyaslanmıştır. Geliştirilen simülasyon modellerinin sonuçları Kruskal-Wallis H testi kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** E-Atık, Demontaj, Yerleşim Planlaması, Simülasyon

## **ABSTRACT**

### **DISASSEMBLY FACILITY LAYOUT PLANNING IN E-WASTE RECOVERY SYSTEMS**

Recovery of e-waste which is composed of outdated electrical and electronic products is important considering its potential to minimize negative effects of the dangerous materials contained by those products on the human health and environmental sustainability, their economic potential and added value on the effective use of world's limited resources. The objective of this study is to design ideal layout for disassembly systems which carries a crucial role in e-waste recovery process.

In the first phase of the study, e-waste disassembly systems and processes were closely investigated and data were collected by analyzing the related literature and gathering information from the firm in cooperation. After the first phase, alternative layouts were developed according to the basic layout principles and the specific needs and conditions of disassembly systems. Proposed alternative layouts were modeled in Arena 10.00 simulation software. In these models, operation times of disassembly activities were collected as fuzzy numbers in order to handle the structural uncertainty and variability of e-waste products. The results of the simulation models were compared based on some performance criteria such as recyclable fraction quantity from disassembly operations, total number of disassembled e-waste products, total revenue from the sales of recyclable fractions, and time spent for non-value-added activities. Simulation results were statistically analyzed using Kruskal-Wallis H test.

**Key Words:** E-waste, Disassembly, Layout Planning, Simulation

## 1. GİRİŞ

Dünyada çeşitli alanlarda yer alan ürünlerin kullanım sürelerini tamamlamasıyla ortaya çıkan ve her geçen gün artan atık miktarı, son yıllarda devletler, hükümetler ve akademik çevre tarafından geniş ölçekte tartışılan önemli bir problem haline gelmiştir. Bu durum karşısında oluşan atıkların yönetilmesi ve mümkünse geri kazanılması için gerekli ortamın yaratılması hem toplumlar hem de çevre için önemli bir konu olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde atıkların geri kazanılmasında oluşan bu ortam; çevresel kaygıların artmaya ve toplumların bilinçlenmeye, bu alana yönelik yatırım yapan şirketler çoğalmaya ve en önemlisi süreci teşvik eden yasalar ve yönetmelikler (EC, 2000; EU, 2002b, 2002a) hazırlamaya ve uygulanmaya başlanmasıyla daha uygun hale gelmektedir. Örneğin; 2002/96/EC WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) direktifi (EU, 2002b) Avrupa Birliğinde elektrikli ve elektronik cihaz üreticilerinin, ürünlerinin kullanım süresini tamamlaması sonucunda oluşan atıkların ayrı olarak toplanmasını ve geri kazanımını gerektirmektedir. WEEE Direktifin gerekliliklerini yerine getirmek için üreticiler de kendi ürün geri kazanım tesislerini kurmaya başlamışlardır (Grenchus ve diğ., 1997; Ridder ve Schedit, 1998).

Günümüzde atıkların geri kazanımında kullanılan farklı seçenekler kullanılmaktadır. Ilgin ve Gupta (2010) araştırmalarda en çok kullanılan geri kazanım seçeneklerini; direkt yeniden kullanım, onarım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf olarak tanımlamıştır. Demontaj, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf gibi geri kazanım operasyonlarında başlıca gerçekleştirilen bir faaliyettir (Gungor ve Gupta, 1999; McGovern ve Gupta, 2011). Demontaj, bir seri operasyon yoluyla kullanılmış üründen değerli parça/alt takım ve malzemelerin metodik çıkarılması için uygulanan bir prosestir (Gungor ve Gupta, 1997). Demontaj operasyonları, manuel, otomatik veya her ikisinin birleşimi şeklinde olabilir (Williams, 2006) ve genellikle tek bir iş istasyonunda, bir demontaj hücresinde veya bir demontaj hattında gerçekleştirilebilir. Bu nedenle demontaj operasyonları emek yoğun ve maliyetli faaliyetlerdir (Güngör ve Gupta, 2001b).

Dünya elektronik endüstrisini ele aldığımızda, hemen hemen her gün birçok yeni elektrikli ve elektronik ürün (EEE) insanlığın hizmetine sunulmaktadır. Diğer taraftan ise, teknolojinin sürekli gelişmesi ve moda baskıları bu ürünlerin yaşam süreleri gün geçtikçe kısaltmaktadır ve kısa süreler zarfında atık (elektronik atık veya e-atık) haline getirmektedir. Dolayısıyla teknolojinin ve sanayileşmenin sonucunda e-atıklar meydana gelmektedir. Teknolojinin sürekli gelişmesi ve gün geçtikçe yeni ürünlerin insanların kullanımına sunulması ile e-atıkların gelecekte daha da artacağına kesin gözü ile bakılmaktadır. E-atıklar, katı atık türleri arasında en fazla büyüyen atık türlerinden bir tanesidir ve artış hızını diğer atıklara göre 3 kat daha fazladır. UNEP (2006) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, dünya üzerinde yıllık 20 ile 50 milyon ton arasında e-atık üretilmektedir ve her yıl % 5 ile % 8 arasında bir artış göstermektedir. Ayrıca dünya genelinde en fazla e-atık Avrupa, Amerika ve Avustralya kıtalarında üretilmektedir (Robinson, 2009).

E-atıklar; içerisinde cıva, kurşun, arsenik, kadmiyum, selenyum gibi tehlikeli maddeler ve altın, gümüş, paladyum gibi değerli metalleri ihtiva eden çeşitli büyüklük ve boyutlarda 1000'den fazla maddeden oluşan heterojen bileşimler olarak karakterize edilebilir (Widmer ve diğ., 2005). E-atıkların yönetilmesi ve geri kazanılması temelde üç amaç için gereklidir: Bunlardan birincisi e-atıkların barındırdığı altın, gümüş paladyum gibi değerli elementlerin ve ekonomik değer taşıyan diğer malzeme bileşenlerinin elde edilerek ekonomik değer yaratılmasıdır (Widmer ve diğ., 2005). İkincisi ise, e-atıkların içlerinde barındırdığı zararlı malzeme bileşenlerinin çevresel problemlere dönüşmeden ve insan sağlığına zarar vermeden yönetilmesidir (Cui ve Forssberg, 2003; Cobbing, 2008). Üçüncü olarak, e-atıklardan elde edilecek olan metal, plastik vb. malzemelerle dünyanın sınırlı doğal kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkı sağlanmasıdır. Dolayısı ile e-atıkları geri kazanmak ve tekrar kullanımını sağlamak ekonomi, çevre ve sağlık açısından büyük önem arz etmektedir.

## **1.1 Tezin Amacı**

E-atıklar üzerinde hazırlanan yönetmelikler (EU, 2002b, 2002a; T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2009) nedeniyle son yıllarda atık sahalarına ve geri dönüşüm tesislerine gönderilen e-atık miktarını arttırmıştır ve gelecekte daha da arttıracaktır. Bu nedenle günümüzde daha verimli, daha düşük maliyetli ve daha yüksek kapasite çalışan

demontaj sistemlerinin tasarlanması gereklidir (Seliger ve Kernbaum, 2007; McGovern ve Gupta, 2011).

Literatürde demontaj sistemlerinin en uygun yerleşimini amaçlayan az sayıda çalışma vardır (Hesselbach ve Westernhagen, 1999; Limaye ve Caudill, 1999; Opalić ve diğ., 2004; Sim ve diğ., 2005; Opalić ve diğ., 2010). Bu tez çalışmasında e-atık geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahip olan demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi amacıyla ideal yerleşim planlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen yerleşim planlarının amacı, mevcut sisteme göre katma değer yaratmayan malzeme taşıma aktivitelerine harcanan süresinin azaltılmasını, operatörlerin boş bekleme sürelerinin minimize edilmesini ve operatörlerin daha hızlı çalışmasını sağlamaktır. Bu amacı gerçekleştirmek için, e-atık geri kazanımı alanında faaliyet gösteren bir paydaş firmadan veri desteği sağlanmıştır.

## **1.2 Tezin Kapsamı**

Tez çalışması kapsamında, e-atık demontaj sistemlerinde yerleşimi etkileyebilecek operasyonel yaklaşımlar altında alternatif yerleşim planları önerilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen başlıca işlemler sırasıyla şu şekildedir: çalışmanın ilk aşamasında, gerek literatürdeki çalışmalardan elde edilen bilgiler gerekse paydaş firmadan toplanan veriler ışığında mevcut e-atık demontaj sistemlerinin yerleşim planları ve e-atık demontaj süreçleri yakından irdelenmiş ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden sonra, katma değer yaratmayan malzeme taşıma aktivitelerine harcanan süresinin azaltılmasını ve operatörlerin daha hızlı çalışmasını amaçlayarak alternatif yerleşim planları önerilmiştir. Geliştirilen alternatif yerleşim planlarının demontaj sistemleri üzerindeki etkisinin test edilmesi amacıyla ayrık olaylı benzetim kullanılmıştır. Simülasyon modelleri ARENA 10.0 kullanılarak geliştirilmiştir. Modellerde, e-atıkların çeşitliliği ve yapısal belirsizliği nedeni ile demontaj süreleri bulanık olarak elde edilmiştir. Simülasyon modellerinin sonuçları, demontaj operasyonlarından elde edilen geri kazanılabilir bileşen miktarı, demontajı yapılan toplam atık sayısı, bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ve katma değer yaratmayan aktivitelere harcanan zaman gibi farklı performans ölçütlerine göre kıyaslanmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise, geliştirilen simülasyon modelleri farklı performans ölçülerine dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır.

Çalışma, e-atık demontaj sistemlerinin alternatif yerleşimlerini simülasyon modelleri ile test ederek mevcut literatürün geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu tez çalışmasının kapsamı, e-atık demontaj sistemlerinin yerleşimlerinin tasarımı ile sınırlandırılmıştır. Tersine lojistik, üretim planlama, demontaj çizelgeleme, demontaj sıralama ve demontaj hat dengeleme gibi ürün geri kazanımında önemli diğer problemler çalışmanın dışında bırakılmıştır.

### **1.3 Tezin Organizasyonu**

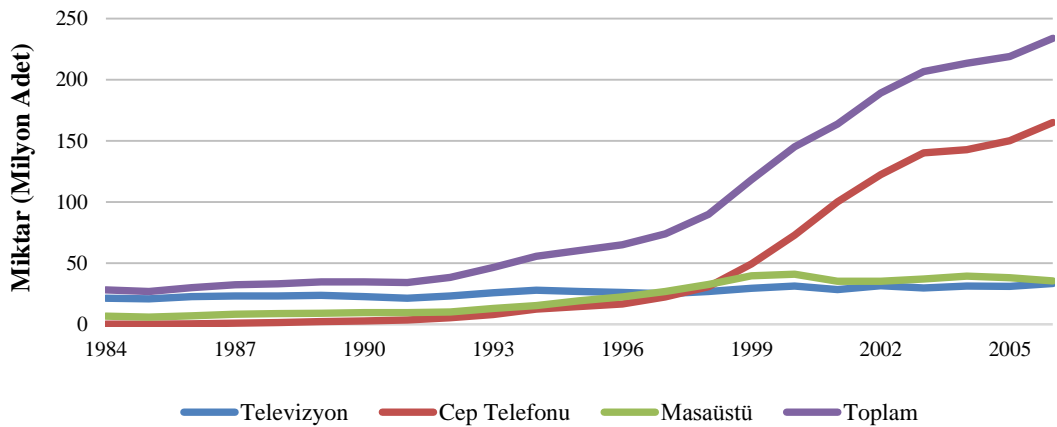
Bu çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır: İkinci bölümde, e-atıkların tanımı verilmiş ve ekonomi, çevre ve sağlık üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Üçüncü bölümde, ürün geri kazanımı ve geri kazanım alternatifleri incelenmiştir. Ürün geri kazanımında demontaj operasyonlarının rolü tartışılmış ve demontaj ve montaj sistemlerinin farklılıkları incelenmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan demontaj problemleri ile ilgili bir taramada bu bölümde yer almaktadır. Dördüncü bölümde, tez konusu olan e-atık demontaj sistemlerinin yerleşimleri hakkındaki çalışmalara ve bilgilere yer verilmiştir. Beşinci bölümde, simülasyon modellerinde kullanmak üzere gerek literatürdeki çalışmalardan elde edilen bilgiler gerekse paydaş firmadan elde edilen veriler tanımlanmıştır. E-atık demontaj sistemlerinde yerleşimi etkileyebilecek operasyonel yaklaşımlar altında hazırlanan alternatif yerleşim planları. ve ARENA 10.0 programında hazırlanan ilişkili simülasyon modelleri sunulmuştur. Elde edilen simülasyon çıktıları farklı performans kriterlerine göre dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır ve yorumlanmıştır. Son bölümde ise sonuçlar tartışılmış ve gelecek çalışma önerileri sunulmuştur.



## 2. E-ATIK HAKKINDA GENEL BİLGİLER

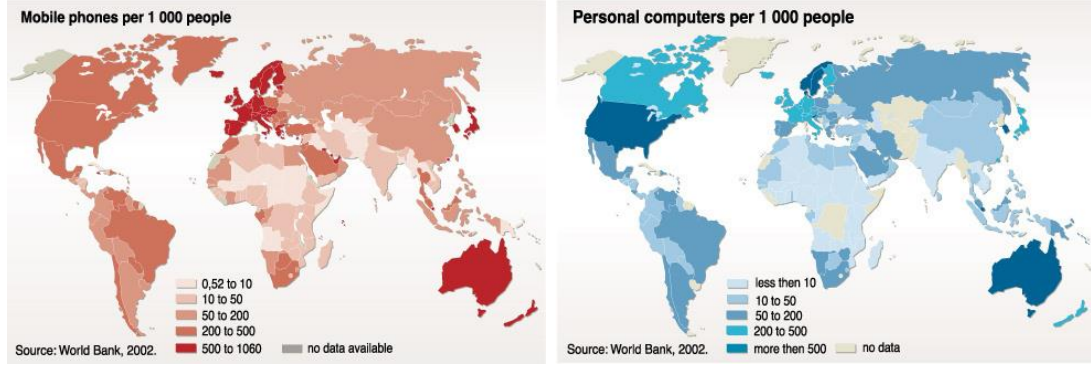
Günümüzde dünyada 7,082 milyar civarında insanın yaşadığı tahmin edilmektedir (USCB, 2012). Birleşmiş Milletler (UN) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, dünya nüfusu her yıl ortalama % 1,2 oranında artmaktadır ve 2050 yılında yaklaşık 12,8 milyar insana ulaşacağı öngörülmüştür (UN, 2003). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2010 yılında Türkiye nüfusu yaklaşık 73 milyon kişi olarak belirlenmiştir (TUIK, 2011) ve dünya nüfusuna paralel olarak Türkiye'nin de nüfusunun gelecek yıllarda artması beklenebilir. Bir taraftan hızla artan dünya nüfusu, diğer taraftan teknolojik yenilikler dünyada hem üretimi hem de buna bağlı olarak tüketimi hızla arttırmaktadır. Bu durumun, her sektörde olduğu gibi elektrikli ve elektronik sektöründe üretiminin ve tüketiminin artmasında büyük katkısı vardır.

Türk Elektronik Sanayicileri Derneği (TESİD) verilerine göre, Türkiye'de 2001 yılında 2.98 milyar \$ elektronik sanayi üretimi gerçekleşirken, bu rakam 2010 yılında 11.29 milyar \$'a yükselmiştir (TESİD, 2011). ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından hazırlanan rapora göre, 1984 ile 2006 yılları arasında ABD'de televizyon, cep telefonu ve masaüstü bilgisayar satışları Şekil 2.1'de sunulmuştur (EPA, 2008). ABD'de 1984 yılında cep telefonu satışı 0,11 milyon adet iken, bu rakam 2006 yılında 165,1 milyon âdete çıkmıştır. Masaüstü bilgisayar satışları ise 1984 yılından 2006 yılına % 56,81 oranında bir artış göstermiştir.



Şekil 2.1 : ABD'de elektronik ürün satışları (1984-2006) (EPA, 2008)

Günümüzde, dünya üzerinde 1 milyardan fazla kişisel bilgisayarın kullanımda olduğu tahmin edilmektedir (Bakınız Şekil 2.2). Ülke gelişmişliğine bağlı olarak, bir kişisel bilgisayarın ömrü 2 ile 5 yıl arasında değişmektedir. Cep telefonlarında bu süre yaklaşık 18 aydır (Baker ve diğ., 2004).



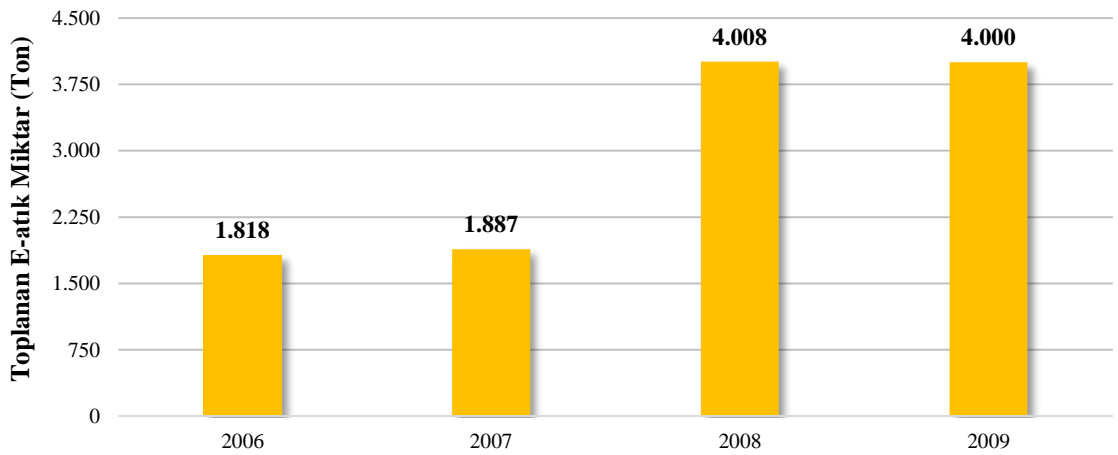
Şekil 2.2 : Dünyada 1000 kişi başına düşen bilgisayar ve cep telefonu sayısı (Baker ve diğ., 2004)

Gerek teknolojinin hızla gelişmesi gerekse elektronik ürünlerin moda baskıları ürün yaşam sürelerini gün geçtikçe kısaltmaktadır. Bu nedenle elektronik ürünler birkaç ay ile birkaç yıl arasında değişen zaman içinde kullanılmaz duruma gelmektedir. Teknolojinin ve sanayileşmenin sonucunda e-atıklar meydana gelmektedir. Teknolojinin sürekli gelişmesi, her geçen gün yeni ürünlerin insanların kullanımına sunulması ve ürün yaşam sürelerinin giderek azalması, e-atıkların gelecekte daha da artacağını işaret etmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)'nin araştırmasına göre, dünya genelinde yaklaşık olarak 20-50 milyon ton arasında e-atık oluştuğunu ve e-atık artış hızının diğer atıklara göre 3 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir (UNEP, 2006). Robinson (2009) çalışmasında dünya genelinde e-atık üretimini yıllık 20 ile 25 milyon arasında tahmin etmiştir ve en fazla e-atık Avrupa, Amerika ve Avustralya'da üretilmektedir.

Avrupa Çevre Ajansı (EEA), 2003 yılında yayımladığı raporunda ilk 15 Avrupa Birliği ülkelerinde (EU15) beş tip elektronik aletten oluşan toplam e-atık üretimini 1990-1999 yılları arasında kişi başına yıllık 3,3 ile 3,6 kg arasında tahmin etmiştir. Bu rakamın 2000-2010 yılları arasında kişi başına yıllık 3,9 ile 4,3 kg'a yükseleceğini öngörmüştür (EEA, 2003). Birleşmiş Milletler Üniversitesi (UNU), 2005 yılında EU27 ülkelerinde e-atık üretiminin tahmini yıllık 8,3 ile 9,1 milyon ton arasında belirlenmiş ve 2020 yılına kadar toplam e-atık miktarının yıllık % 2,5 ile % 2,7 arasında büyüyerek yaklaşık 12,3 milyon tona ulaşacağını öngörmüştür (Huisman ve diğ., 2007). ABD

Çevre Koruma Ajansı (EPA), 2007 yılında 140 milyon cep telefonun, 26,9 milyon televizyonun ve 41,1 milyon bilgisayarın (29,9 milyon masaüstü ve 12 milyon dizüstü) kullanılamayacak durumda olacağını tahmin etmiştir (EPA, 2008). EPA tarafından yayımlanan başka bir rapora göre, ABD’de 2008 yılında belirli tüketici elektronik cihazlarından 3,16 milyon ton e-atık üretilmiştir. Bu miktarın sadece 430.000 tonu geri dönüştürülmüştür (EPA, 2009). Avustralya’da ise 2008 yılında, 37 milyon bilgisayar, 17 milyon televizyon ve 56 milyon cep telefonu katı atık depolama alanlarına gönderilmiştir (Brindley ve Angel, 2008). Ayrıca, İsviçre Malzeme Bilimleri ve Teknolojileri Araştırma Laboratuvarlar Enstitüsü (EMPA) birçok ülkede e-atık üretiminin tahmin edilmesi üzerine araştırmalar yapmıştır (Eugster ve Fu, 2004; Widmer ve Lombard, 2005; Finlay ve Liechti, 2008; Laissaoui ve Rochat, 2008; Waema ve Mureithi, 2008; Wasswa ve Schluep, 2008; Garraway ve Ott, 2010; Amoyaw-Osei ve diğ., 2011; Magashi ve Schluep, 2011).

Türkiye’de ise, Çevre ve Orman Bakanlığınca uygunluk yazısı verilen firmalar tarafından 2006 yılında kayıt altına alınan e-atık toplama miktarı 1.818 ton iken, 2009 yılı sonu itibariyle bu rakam 4.000 tona ulaşmıştır (Bakınız Şekil 2.3). Toplanan 4.000 ton elektronik atığın işlenmesi sonucu 2.545 ton malzeme yurt içinde kullanılmak üzere satışa sunulurken, yurt içinde kullanım olanağı olmayan 1.146 ton elektronik devre, elektronik parça vb. ürünler yurt dışına ihraç edilmiştir (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2011).



Şekil 2.3 : Türkiye’de e-atık toplama miktarı (2006-2009) (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2011)

## 2.1 E-atık Tanımı ve Kategorileri

Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman (AEEE) veya e-atık, kullanıcıya herhangi bir değer yaratmayan ve çeşitli formlarda elektrikli ve elektronik ürünleri kapsayan genel bir terim olarak tanımlanır (Widmer ve diğ., 2005). E-atık; bilgisayar, televizyon, cep telefonu gibi atık elektronik eşyalardan oluşurken, AEEE; buzdolabı ve fırın gibi elektronik olmayan ürünleri de kapsamaktadır (Robinson, 2009). Bu tez çalışmasında, AEEE ve e-atık terimleri eş anlamlıdır.

2002/96/EC WEEE direktifine (EU, 2002b) göre e-atıkları oluşturan elektrikli ve elektronik ürünler Tablo 2.1’de sunulduğu üzere 10 kategoriden oluşmaktadır. Tablo 2.1’de listelenen 10 kategori içinde 1 ve 4 numaralı kategoriler arasında yer alan e-atıkların miktarı, üretilen tüm e-atıkların hemen hemen % 95’ini oluşturmaktadır.

Tablo 2.1 : EU WEEE direktiflerine göre e-atık kategorileri (EU, 2002b)

NO	KATEGORİ	ETİKET
1	Büyük Ev Aletleri (Buzdolabı, Çamaşır makinesi vb.)	Large HH
2	Küçük Ev Aletleri (Elektrik süpürgesi, tost makinesi vb.)	Small HH
3	IT ve Telekomünikasyon Ekipmanlar (Bilgisayar, telefon vb.)	ICT
4	Tüketici Elektroniği (Video kamera, müzik çalarlar vb.)	CE
5	Aydınlatma Ekipmanları	Lighting
6	Elektrikli ve elektronik ekipmanlar ( Matkap vb.)	E & E tools
7	Oyuncaklar, hobi ve spor aletleri	Toys
8	Tıbbi Cihazlar (Diyaliz ekipmanları vb.)	MedicalEquipment
9	Gözlem ve Kontrol Aletleri (Su ısıtıcı, ısı ayarlayıcı vb.)	M & C
10	Otomatlar	Dispensers

## 2.2 E-atıkların İçerikleri

E-atıklar, çeşitli büyüklük ve boyutlarda 1000’den fazla bileşenden oluşan heterojen karmaşık yapılarıdır. E-atıkların içerikleri genellikle beş grupta toplanmıştır: demir içeren metaller (fe metal), demir içermeyen metaller (non-fe metal), cam, plastik, diğerleri (Widmer ve diğ., 2005). Demir ve çelik gibi fe metaller, e-atıklar içerisinde en çok bulunan maddelerdir ve e-atığın toplam ağırlığının yaklaşık olarak % 50’sini oluştururlar. Plastikler yaklaşık % 21 ile e-atıklar içerisinde bulunan en büyük ikinci bileşenlerdir. Non-fe metaller, e-atıkların toplam ağırlığının % 13’ünü oluşturur. Alüminyum (Al), Bakır (Cu) ve Kalay (Sn) gibi yüksek değere sahip elementler toplam non-fe metallerin % 15’ini oluşturmaktadır (Huisman ve diğ., 2007). Üç ana e-atık kategorisi için ortalama malzeme yapısı Tablo 2.2’de sunulmuştur (Amoyaw-Osei ve diğ., 2011).

Tablo 2.2 : Üç temel e-atık kategorisi için malzeme bileşenleri (Amoyaw-Osei ve diğ., 2011)

MALZEME	BÜYÜK EV ALETLERİ (%)	KÜÇÜK EV ALETLERİ (%)	ICT VE TÜKETİCİ EKİPMANLARI (%)
Fe metal	43	29	36
Alüminyum	14	9,3	5
Bakır	12	17	4
Kurşun	1,6	0,57	0,29
Kadmiyum	0,0014	0,0068	0,018
Cıva	0,000038	0,000018	0,00007
Altın	0,00000067	0,00000061	0,00024
Gümüş	0,0000077	0,000007	0,0012
Paladyum	0,0000003	0,00000024	0,00006
İndiyum	0	0	0,0005
Bromlu plastik	0,29	0,75	18
Plastik	19	37	12
Kurşunlu cam	0	0	19
Cam	0,017	0,16	0,3
Diğer	10	6,9	5,7

E-atıkların içerisindeki maddeler, atığın yaşına ve tipine göre farklılık göstermektedir (Robinson, 2009) ve bu nedenle e-atıkların genel bir malzeme bileşen yapısını vermek zordur. Örneğin; büyük ev aletleri genellikle metallere oluşurken, küçük ev aletleri genellikle plastik, ekranlar ise cam içermektedir.

### 2.2.1 E-atıkların İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkisi

E-atıklar içerisinde cıva, kurşun, arsenik, kadmiyum gibi ağır toksin elementlerin yanı sıra bromlu alev geciktiriciler (BFR) gibi tehlikeli kimyasalları içerebilir. Basel sözleşmesine göre e-atıklar tehlikeli ve tehlikeli olmayan e-atıklar olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Puckett ve Smith, 2002):

Sözleşmenin 8.ekinin (A listesi), A1180 maddesine göre;

- Yapısında akümülatör, A listesinde belirtilmiş olan komponentler, cıva anahtarları, CRT (katot ışın tüpü) camı, diğer aktif cam veya PCB (poliklorlubifenil) kapasitörleri içeren,
- Sözleşmenin 1. ekinde sıralanmış olan maddelere (ör: cıva, kadmiyum, kurşun, PCB) bulaşmış olup sözleşmenin 3. ekinde belirtilen karakteristik özellikleri gösteren,

Elektrikli ve elektronik atıklar, tehlikeli ve çevreye zararlıdır.

Sözleşmenin 9.ekinin (B listesi), B1180 maddesine göre;

- Yalnızca metal ve alaşımlardan oluşan elektronik bileşenler,

- İçerisinde A listesinde bildirilen bileşenleri barındırmayan ve sözleşmenin 1. ekinde belirtilen maddelerle kontamine olmamış, CRT tüpü, diğer aktif cam ve PCB kapasitörleri içermeyen,

Elektrikli ve elektronik atıklar, tehlikeli ve zararlı değildir.

E-atıkların içerisinde yer alan ağır metaller ve halojenli bileşenlerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri şöyle sıralanabilir (Kaya, 2012):

- Kurşun (Pb): Çocuklarda beyin hasarı ve üreme bozuklukları yapar.
- Kadmiyum (Cd): Kadmiyum ve bileşikleri böbrekte birikir ve insanı zehirler.
- Berilyum (Be): Kanserojen olarak sınıflandırılmaktadır.
- Cıva (Hg): Düşük dozlarda bile zehirlidir. Beyin ve böbreklere zarar verir.
- Baryum (Ba): Kısa süre baryum maruziyeti beyin şişmesine, kas zayıflığına, kalp ve karaciğer hastalığına neden olabilmektedir.
- Fosfor (P): Kırılan tüpten oluşan tozların solunması çok risklidir.
- Krom 6 (Cr+6): DNA hasarı ve astım bronşite sebep olur.
- Alev Geciktirmeli Plastik: Düşük sıcaklıkta yanması zehirli gazlar oluşturur.
- Polivinil Klorid (PVC): Belli sıcaklıkta yandığında dioksin oluşur.

### 2.2.2 E-atıkların Ekonomik Potansiyeli

E-atıkların insan sağlığı ve çevrenin sürdürülebilirliği üzerindeki negatif etkilerinin yanı sıra e-atıklar içlerinde Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Platin (Pt) gibi önemli miktarda değerli metalleri barındırır (Widmer ve diğ., 2005). Değerli metallerin yüksek miktarı eğlence ve tüketici ekipmanlarının yanı sıra ofis, bilgi ve iletişim ekipmanlarının ana bileşeni olan PCB'lerde bulunur (Amoyaw-Osei ve diğ., 2011). Bir ton PCB'nin içerisinde 520 gr gümüş ve 68 gr altın ve bir ton DVD oynatıcının içerisinde 700 gr gümüş ve 100 gr altın bulunabilir (Huisman ve diğ., 2007). Günümüzde bir kişisel bilgisayar 1 gr altın içermektedir. 1 ton e-atık ise yaklaşık olarak 0,2 ton bakır içerir (Widmer ve diğ., 2005).

Bunlara ek olarak, e-atıklardan elde edilen çeşitli tiplerde metal ve plastikler dünyamızın limitli kaynaklarını etkili olarak kullanmamıza yardımcı olacaktır. Dünya üzerinde üretim işletmeleri insanların sürekli ve değişen ihtiyaçlarını karşılamak için trilyonlarca ton doğal kaynağı kullanmaktadır. Şu bir gerçektir ki, içerisinde bulunduğumuz dünyada kaynaklarımız sınırsız değildir ve tüketim hızına bağlı olarak

gün geçtikçe azalmaktadır. Reller ve Graedel (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, günümüzün evrensel tüketim oranları varsayıldığında nadir bulunan ve bilgisayar ile televizyonların sıvı kristal ekranlarının (LCD) yapımında kullanılan indiyumun stoklarının 13 yıl sonra tükeneceğini belirlenmiştir (Bakınız Tablo 2.3).

Tablo 2.3 : Dünyada kalan doğal kaynak stokları (Reller ve Graedel (2007)'den düzenlenmiştir.)

KAYNAK	YIL	KAYNAK	YIL	KAYNAK	YIL
Platin (Pt):	360	Uranyum (U):	59	Altın (Au):	45
Tantal (Ta):	116	Kurşun (Pb):	42	Gümüş (Ag):	29
Alüminyum (Al):	1027	İndiyum (In):	13	Çinko (Zn):	46
Kalay (Sn):	40	Bakır (Cu):	61	Nikel (Ni):	90
Fosfor (P):	345	Krom (Cr):	143	Antimon (Sb):	30

### 2.3 E-atıklar Üzerine Yasal Çerçeve

Dünya genelinde devletler giderek büyüyen e-atık problemine karşı politikalar oluşturmaya başlamıştır. E-atıkların insan sağlığı ve çevreye önlenmesi amacıyla Avrupa Birliği Komisyonu, 2002/96/EC sayılı Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıklarına yönelik WEEE Direktifini (EU, 2002b) ve 2002/95/EC sayılı Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi (RoHS) (EU, 2002a) yayımlamıştır.

Bahse konu olan WEEE Direktifi (EU, 2002b), e-atıkların ayrı toplanmasını ve geri kazanımını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, üreticilerin ürünlerinin ömrünü tamamlama aşamasından da sorumlu tutulmaları esasından hareketle, söz konusu üreticilerden ürünlerini geri kazanım, geri dönüşüm ve parçalanabilirlik olanaklarını değerlendirerek tasarımları beklenmektedir. RoHS direktifi (EU, 2002a) ise, elektrikli ve elektronik ürünlerin bazı tehlikeli madde içeriklerinin azaltılmasını temin etmek için yayımlanmıştır. RoHS Direktifine göre elektrikli ve elektronik ekipman atıkları ayrı toplanmış olsalar dahi içerdikleri tehlikeli maddelerden dolayı risk taşımaktadırlar. Söz konusu maddeler ise ağır metaller, PBB (çok bromlu bifenil) ve PBDE (çok bromlu difenil eteril) olarak sıralanmaktadır.

Türkiye’de de, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından bir taslak yönetmelik (Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği) yayımlanmıştır (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2009). Bu yönetmelik ile birlikte üretici ve tüketicilere sorumluluklar yüklenmiştir.

En önemli sorumluluklardan bir tanesi “Üreticinin Sorumluluğu” prensibidir. Bu sorumluluk, “üreticilerin ve ithalatçıların ürünlerinin son kullanıcılar tarafından kullanıldıktan sonra geri kalan atığın belirli bir yüzdesinin geri kazanımı faaliyetlerini kapsar. Üreticiler ve ithalatçılar aynı zamanda geri kazanım faaliyetlerini izlemek ve miktarlarını piyasaya sürdükleri ürün miktarı ile karşılaştırmak ve bu bilgilere yönelik kanıtlar sunmak zorundadır. AEEE yönetmeliği, her üretici ve ithalatçının bir geri dönüşüm/geri kazanım sistemi kurmasından ve kendi ürünlerinin geri dönüşümü ve geri alınması için finansman sağlamaktan sorumlu olduğunu” ifade etmektedir.

Tüketiciler, “e-atıkları diğer evsel atıklarla karıştırmamakla, ellerindeki e-atıkları üreticiler tarafından istenen toplama noktalarına getirmekle ve yenisini alırken eskisini bayilere götürmekle yükümlüdürler.” Bu taslak yönetmelikte, 2018 yılına kadar en az 4 kg/(kişi\*yıl) evsel e-atıklardan ayrı toplanmasını öngörmektedir.

Yönetmelik, “EEE’lerin tasarımı ve üretimi sırasında, atık önlenmesini ve ürünlerin uzun ömürlülüğüne öncelik verilmesini, ürünlerin kolayca parçalara ayrılabilmesini, EEE’lerin ve EEE’yi teşkil eden unsurların ve malzemelerin tercihen tekrar kullanımını, tekrar kullanımın mümkün olmadığı durumlarda geri kazanımını kolaylaştırmak doğrultusunda teşvik edici olma garantisini vermektedir.”

## **2.4 Genel Değerlendirme**

E-atıkların içerdiği cıva, kurşun, arsenik, kadmiyum, selenyum gibi zehirli elementler nedeniyle çevrenin sürdürülebilirliği üzerinde yaratacağı olumsuz etkileri vardır. Diğer taraftan, e-atıklar içlerinde barındırdıkları altın, gümüş gibi değerli metaller nedeniyle ekonomik potansiyele sahiptir. Ayrıca e-atıklardan elde edilecek olan metal, plastik vb. malzemeler dünyanın sınırlı doğal kaynaklarının daha verimli kullanılmasına da katkı sağlamaktadır. Tüm bunların yanında, büyüyen e-atık problemine karşı devletler tarafından yönetmelikler hazırlanmıştır ve hazırlanmaya devam edecektir.

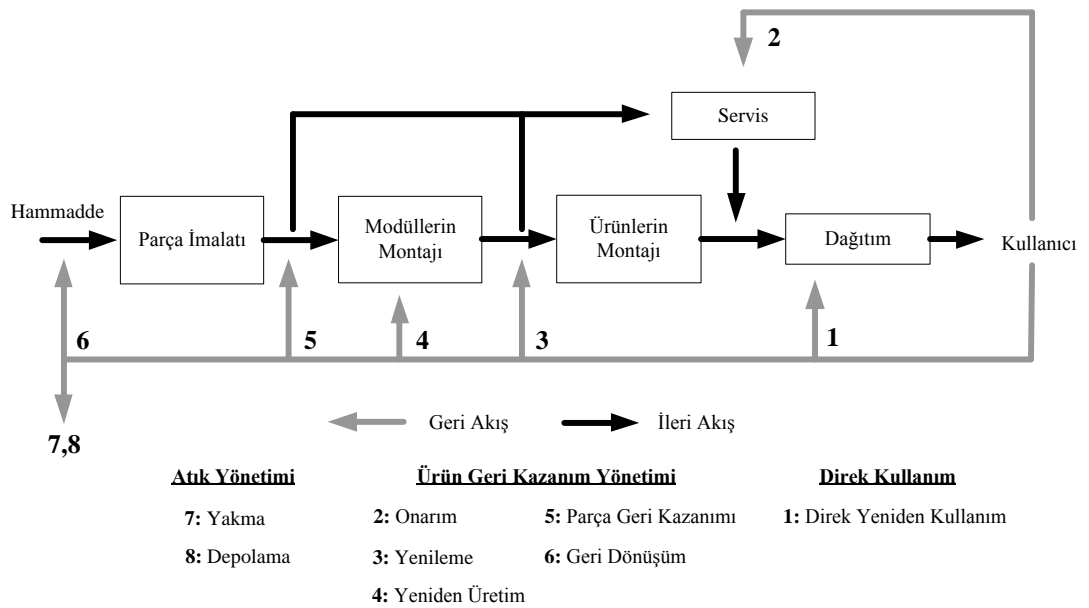
E-atıkların insan sağlığı ve çevre üzerindeki negatif etkilerinin minimize edilmesi, giderek azalan doğal kaynakların korunması gerekliliği, e-atıklardan elde edilen bileşenler ve malzemeler için pazarın gelişmesi ve e-atıklara karşı hazırlanan yasal düzenlemeler nedeniyle e-atıkların geri kazanımı gerekli hale gelmiştir.



### 3. GERİ KAZANIM VE DEMONTAJ

Çevreye duyarlı üretim ve ürün geri kazanımı konusu özellikle 90'lı yıllardan itibaren araştırmacıların ilgisi çekmiştir. Bu alanda yer alan araştırmaları barındıran kapsamlı literatür taraması çalışmaları bulunmaktadır (Gungor ve Gupta, 1999; Ilgin ve Gupta, 2010).

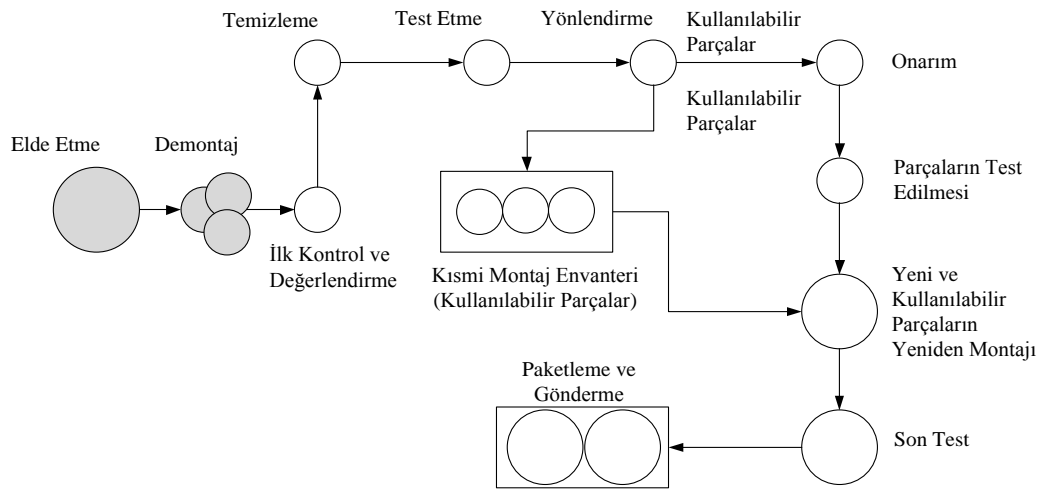
Ürün geri kazanımı, depolara gönderilen atık miktarını minimize etmek amacıyla geri dönüşüm veya yeniden üretim yoluyla atık ürünlerden malzeme ve parçaların elde edilmesini amaçlamaktadır (Cui ve Zhang, 2008). Atıkların geri kazanımında kullanılan farklı seçenekler bulunmaktadır. Thierry ve diğ. (1995) geri kazanım seçeneklerini, onarım, yenileme, yeniden üretim, parça geri kazanımı ve geri dönüşüm olarak incelemiştir. Fleischmann ve diğ. (1997) geri kazanımı, malzeme geri kazanımı ve katma değer geri kazanımı olarak ele almıştır. Gungor ve Gupta (1999) ise geri kazanımı malzeme geri kazanımı (geri dönüşüm) ve ürün geri kazanımı (yeniden üretim) olarak iki grupta sınıflandırmıştır. Ilgin ve Gupta (2010) araştırmalarda en çok kullanılan geri kazanım seçeneklerini, direkt yeniden kullanım, onarım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf olarak belirtmiştir.



Şekil 3.1 : Thierry ve diğ. (1995) geri kazanım seçenekleri

Direkt yeniden kullanım seçeneği; ürünün kendi orijinal işlevlerini yerine getirdiği gibi tüm ürünün yeniden kullanılmasını ifade eder. Onarım seçeneğinde; tam olarak fonksiyonlarını yerine getiren bir ürün elde etmek amacıyla zarar görmüş parçalar değiştirilir. Geri dönüşüm; kullanılmış ve fonksiyonu olmayan ürünlerin içerisindeki malzemeleri kazanmak için gerekli demontaj, sınıflandırma ve kimyasal operasyonları gerçekleştirerek yapılan bir işlemdir. Yeniden üretim; kullanılmış bir ürünü yeni ürünün benzer kalitesine ulaştırmak için gerekli demontaj, sınıflandırma ve yenileme operasyonlarını gerçekleştirerek yapılan yenileme çalışmasıdır. Bertaraf ise kullanılmış ürünlerin atık sahasında depolanmasını veya yakılmasını tanımlar (İlgin ve Gupta, 2010). Atık geri kazanımında, ilk önce ürünün yeniden kullanımı veya yeniden üretimi, daha sonra geri dönüşüm teknikleri kullanarak malzemelerin geri kazanımı ve en son alternatif olarak bertaraf seçeneğinin uygulanması istenir (Cui ve Zhang, 2008).

Demontaj, bir ürünün yaşam öncesi dönemi (tasarım periyodu ve yaşam döngüsü analizi); yaşam dönemi (ürün imalatı ve kullanım süresi) ve yaşam sonrası dönemini (geri kazanım veya bertaraf süresi) içeren geri kazanım alternatiflerinde başlıca gerçekleştirilen bir faaliyettir ve tüm geri kazanım aşamaları ile etkileşim halindedir (McGovern ve Gupta, 2011). Demontaj operasyonları, atıktan istenen malzemelerin ve parçaların seçilerek ayrılmasına imkân verdiği için ürün geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahiptir (Gungor ve Gupta, 1999; İlgin ve Gupta, 2010). Yeniden üretim süreçlerindeki akış Şekil 3.2’de verilmiştir (Gungor ve Gupta, 1999).



Şekil 3.2 : Yeniden üretim tesislerinde bir birimin ürünün akışı (Gungor ve Gupta, 1999)

Demontaj operasyonlarından sonra elde edilen yeniden kullanılabilir parçalar temizlenir, yenilenir, test edilir ve yeniden üretim operasyonlarında kullanılmak için parça envanterine gönderilir. Arta kalan malzemeler depolara gönderilirken; geri dönüştürülebilir malzemeler hammadde tedarikçilerine satılır (McGovern ve Gupta, 2011).

Tanımlamak gerekirse demontaj, kullanılmış üründen değerli parça ve malzemelerin bir seri operasyon yoluyla çıkarılması için uygulanan bir prosestir (Gungor ve Gupta, 1997) ve çevreyi korumayı ve değerli parçaları yeniden kazanmayı amaçlar (Penev ve de Ron, 1996). Demontaj, geri kazanılabilir ürünleri, gerek parçalayarak, gerekse parçalamadan parçalarına, alt parçalarına veya bileşenlerine ayrılmasıdır (Teunter, 2006). Demontaj operasyonlarında, eğer ürün tamamen demontaj olacaksa tam demontaj ya da sadece bazı parçalar ve alt takımlar kaldırılacaksa kısmi demontaj olarak adlandırılır (Gungor ve Gupta, 1999).

Genel olarak demontaj operasyonları; üründen değerli parça ve alt parçaların geri kazanımını, üretimi sonlandırılmış ürünlerin parça ve alt parçalarının; bu parçalara olan ani talepleri karşılamak için elde edilmesini, tehlikeli parçaların ortadan kaldırılmasını, kimyasal operasyonlarda kullanılmak üzere ürünün kalan kısmının saflık derecesinin arttırılmasını, ürünün geri kalan kısmından gelecekte kullanım için envantere gönderilebilecek parçaların çıkarımını, atık alanlarına gönderilen artık miktarlarının azaltılmasını ve çevre dostu üretim standartlarının başarılanmasını amaçlamaktadır (Güngör ve Gupta, 2001b, 2002).

### **3.1 Montaj ve Demontaj Arasındaki Farklılıklar**

Montaj sistemlerinde bir ürünün montajı, ürünü oluşturan parçaların ve alt montajın bir araya getirilmesi ve üzerinde bir takım işlemlerin yapılması ile gerçekleştirilir. Demontaj sistemlerinde bir ürünün demontajı ise, ihtiyaç duyulan parçaların, bileşenlerin ve alt parçaların sistematik biçimde alınması ile gerçekleşir. Bir ürün montaj olduğu sıra ile demontaj olmak zorunda değildir ve bir ürün tamamen alt parçalarına ayrılmak zorunda değildir. Yani yapı itibari ile demontaj kavramı montaj kavramının tam tersi değildir. Montaj ve demontaj sistemleri arasındaki operasyonel farklılıklar Tablo 3.1’de verilmiştir (Brennan ve diğ., 1994; Gungor ve Gupta, 1999).

Özellikle karmaşık yapıya sahip ürünler için montaj sistemleri ve demontaj sistemlerinin operasyonel karakteristikleri oldukça farklıdır. Demontaj sistemleri, genellikle yüksek esnek yapılara sahiptir. Sistemlerin esnekliği, değişkenlik ve yapısal belirsizlikler için gereklidir (Gungor ve Gupta, 1999)

Tablo 3.1 : Montaj ve demontaj aktivitelerinin operasyonel ve teknik farklılıkları (Brennan ve diğ., 1994; Gungor ve Gupta, 1999)

<b>SİSTEM KARAKTERİSTİĞİ</b>	<b>MONTAJ AKTİVİTELERİ</b>	<b>DEMONTAJ AKTİVİTELERİ</b>
Talep Edilen Girdi	Hammadde	EOL Ürün
Talep Edilen Çıktı	Bitmiş Ürün	Değerli Parçalar
Malzeme Akış Yönü	İleri	Düzensiz
Malzeme Akış Süreci	Yakınsak	Iraksak
Öncelik İlişkisi	Var	Var
Öncelik Kısıtları ile İlgili Karmaşıklık	Orta	Yüksek
Parça Kalitesi İle İlgili Belirsizlik	Düşük	Çok Yüksek
İş İstasyonları Arasında Envanter Taşıma Karmaşıklığı	Orta	Yüksek
Yerleşim Alternatifleri	Çoklu	Çoklu
Performans Ölçütleri	Çok Sayıda	Az
İşlem Karmaşıklığı	Orta	Yüksek
İşlem Sürelerinin Belirlenmesi	Kolay	Zor
Ekipman Özelliği	Özel Amaçlı	Genel Amaçlı
Çevre Yönetim Süreçlerinin Gerekliliği	Az-Orta	Çok Yüksek
Malzeme Taşıma Sistemlerine Yönelik Ar-Ge Çalışmaları	Çok Yüksek	Oldukça Düşük

Demontaj sistemlerinde yaşanan en zor problem, bir ürün ya da parçanın bozulması nedeniyle demontaj operasyonlarının her zaman başarılı bir şekilde tamamlanması mümkün olmayabilir. Bu durumda, demontaj operasyonunun bırakılması veya yıkıcı demontaj uygulamasına geçilmesi arasında seçim yapılması gereklidir. Ayrıca, eğer demontaj operasyonlarını yürütmek karlı değilse bazı operasyonlar ihmal edilebilir. Yaşanan bu belirsizlikler operasyon sürelerini etkilemektedir. Bunun gibi montaj sistemlerinden farklı olarak demontaj sistemlerinde birçok problem de meydana gelmektedir. Örneğin; demontaj sistemlerinde parça talepleri arasındaki farklılıklar nedeniyle önemli envanter problemleri ortaya çıkabilir. Montaj ve demontaj sistemlerinde akış da farklıdır. Montaj ortamlarında yakınsak ürün akışı varken, demontaj ortamlarında malzeme akışı iraksaktır. Ayrıca demontaj sistemine getirilen atıkların yapısında ve kalitesinde yüksek derecede belirsizlik vardır. Atıkların içerisindeki bazı parçalar tehlikeli olabilir. Özel işlem gerektiren bu tehlikeli parçalar demontaj kaynaklarının kullanımını etkileyebilir (McGovern ve Gupta, 2011).

## **3.2 Demontaj Sistemleri**

1990'ların sonlarında literatürde tanımlanmış olan demontaj sistemleri üzerinde problemler yeni ve büyümekte olan bir araştırma alanıdır. Demontaj sistemleri içerisinde yer alan çizelgeleme, sıralama, hat dengeleme ve sipariş sistemi vb. çalışma alanları ile ilgili özet bir literatür taraması alt bölümlerde sunulmuştur.

### **3.2.1 Demontaj Çizelgeleme**

Demontaj çizelgeleme problemi, montaj sistemlerinde parti büyüklüğü probleminin tersine çalışan bir versiyonu olarak bilinmektedir (Gupta ve Taleb, 1994). İlk olarak Gupta ve Taleb (1994) çeşitli parçaların taleplerini karşılamaında bir ürünün demontajı için miktar ve zamanın belirlemesi için bir algoritma ortaya koymuşlardır.

Lee ve diğ. (2001) demontaj planlama ve çizelgeleme problemleri için bir literatür araştırması sunmuşlardır. Genel olarak demontaj çizelgeleme problemi kapasiteli ve kapasitesiz olarak gruplanabilir (Ilgın ve Gupta, 2010). Kapasitesiz durumlar için (Gupta ve Taleb, 1994; Taleb ve Gupta, 1997; Taleb ve diğ., 1997; Kim ve diğ., 2003; Lee ve diğ., 2004; Lee ve Xirouchakis, 2004; Kim ve diğ., 2006b; Barba-Gutiérrez ve diğ., 2008; Kim ve diğ., 2009b) ve kapasiteli durumlar için (Meacham ve diğ., 1999; Lee ve diğ., 2002; Kim ve diğ., 2006a; Kim ve diğ., 2006c).

### **3.2.2 Demontaj Sıralama**

Demontaj sıralama, bir ürünün demontajı için gerekli operasyonların en iyi sıralamasının belirlenmesi problemidir (Ilgın ve Gupta, 2010). Demontaj sıralama problemi, olası demontaj sıralamaları arasından optimum çözümü arar. Demontaj sıralama problemi bir NP-Complete problem olduğu için, optimum çözümün bulunması kolay değildir (Gungor ve Gupta, 1997). Literatürde demontaj sıralama problemi birçok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Lambert (2003) yaptığı çalışmasında demontaj sıralama ile ilgili literatürde mevcut yaklaşık 300 tane makale ve kongre yazısı incelemiştir.

Demontaj çizelgeleme probleminin çözümü için literatürde yer alan yaklaşımlar şunlardır: çeşitli grafiksel yaklaşımlar (Lambert, 1997; Kaebnick ve diğ., 2000; Torres ve diğ., 2003; Dong ve diğ., 2006; Li ve diğ., 2006), olay tabanlı düşünme (Zeid ve diğ., 1997; Veerakamolmal ve Gupta, 2002), petri ağı (Moore ve diğ., 1998; Zussman ve Zhou, 1999; Zha ve Lim, 2000; Zussman ve Zhou, 2000; Moore ve diğ.,

2001; Tang ve diğ., 2001; Rai ve diğ., 2002; Tiwari ve diğ., 2002; Kumar ve diğ., 2003; Singh ve diğ., 2003; Gao ve diğ., 2004; Tang ve Zhou, 2006; Grochowski ve Tang, 2009), matematiksel programlama teknikleri (Lambert, 1999, 2006, 2007), meta sezgisel yöntemler (Seo ve diğ., 2001; Li ve diğ., 2005; González ve Adenso-Díaz, 2006; Kongar ve Gupta, 2006a; Reveliotis, 2007; Shimizu ve diğ., 2007; Hui ve diğ., 2008; Tripathi ve diğ., 2009), sezgisel yöntemler (Gungor ve Gupta, 1997, 1998; Kuo, 2000; Erdos ve diğ., 2001; Güngör ve Gupta, 2001a; Mascle ve Balasoiu, 2003; Sarin ve diğ., 2006; Adenso-Díaz ve diğ., 2008; Lambert ve Gupta, 2008) ve yapay sinir ağları (Huang ve diğ., 2000).

### **3.2.3 Demontaj Hat Dengeleme**

Demontaj hattı dengeleme problemleri, demontaj operasyonlarını sıralı bir istasyon dizisine atarken demontaj operasyonları arasındaki öncelik ilişkilerini sağlayıp, istasyon sayısının en küçüklenmesi, çevrim süresinin en küçüklenmesi, verimliliğin en büyüklenmesi, karın en büyüklenmesi veya maliyetin en küçüklenmesi gibi ölçütleri amaçlar (McGovern ve Gupta, 2011).

Demontaj hatları, ilk defa Güngör ve Gupta (2002) tarafından montaj hattı davranışlarından ayrılmış, McGovern ve Gupta (2003) tarafından matematiksel olarak modellenmiş ve McGovern ve Gupta (2006) resmen tanımlanmıştır. Güngör ve Gupta (2001b) ve Güngör ve Gupta (2002) ise demontaj hattı dengeleme algoritmasının ilk örneğini sunmuşlardır.

Literatürde demontaj hatlarının dengelenmesi probleminin çözümü için meta sezgisel yaklaşımlar (Agrawal ve Tiwari, 2007; McGovern ve Gupta, 2007b, 2007a) ve matematiksel modeller (Altekin ve diğ., 2008; Koc ve diğ., 2009) kullanılmıştır.

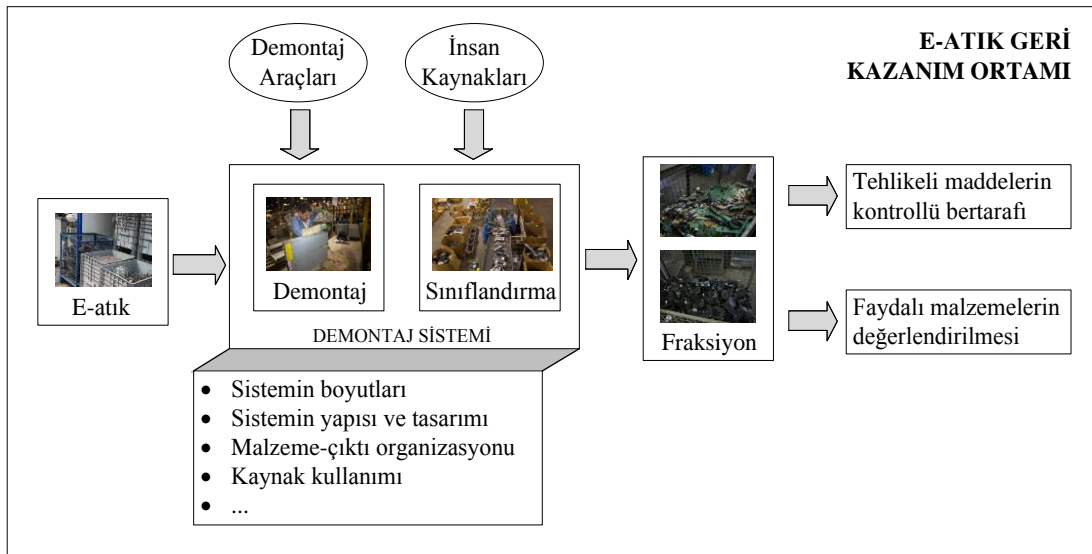
### **3.2.4 Demontaj Sipariş Sistemi**

Demontaj sipariş sisteminin amacı, talebin karşılanması amacıyla ne kadar ürünün demonte edileceğinin belirlenmesidir (Lambert ve Gupta, 2002). Literatürde deterministik (Kongar ve Gupta, 2002; Lambert ve Gupta, 2002; Kongar ve Gupta, 2006b; Langella, 2007; Kongar ve Gupta, 2009) ve stokastik (Inderfurth ve Langella, 2006) durumlar altında problemin çözümü bulunmaya çalışılmıştır.

#### 4. E-ATIK DEMONTAJ SİSTEMLERİNDE YERLEŞİM PLANLAMASI

Dünya genelinde e-atıklar üzerinde hazırlanan yönetmeliklerin de etkisi ile (EU, 2002b, 2002a; T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2009) günümüzde atık sahalarına ve geri dönüşüm tesislerine gönderilen e-atık miktarı artmıştır ve gelecekte daha da artacaktır. Bu nedenle, yeni tesislerin kurulması yanında mevcut e-atık işleme tesislerinin daha verimli, daha düşük maliyetli ve daha yüksek kapasitede çalışması gerekmektedir (Seliger ve Kernbaum, 2007; McGovern ve Gupta, 2011).

Demontaj sistemlerinde operasyonlar; otomobiller, elektronik ürünler gibi farklı ürünler üzerinde gerçekleştirilir (İlgin ve Gupta, 2011). Şekil 4.1, e-atık demontaj sistemlerinde, süreç akışını ve sistem karakteristiklerini göstermektedir. E-atıklar, sistemde demontaj işlemlerine tabi tutulur ve sistemden bileşen formunda ayrılır (Hesselbach ve Westernhagen, 1999). Sistemin çalışması için önemli ve gerekli kaynaklar genellikle; iş istasyonları, sabitleyiciler, sensorlar, robotlar, demontaj araçları, taşıma sistemleri ve sınıflandırma kutularından oluşmaktadır (Wiendahl ve diğ., 2001). Demontaj operasyonları; genellikle tek bir iş istasyonunda, bir demontaj hücresinde veya bir demontaj hattında (Güngör ve Gupta, 2001b); manuel olarak, otomatik olarak veya her ikisinin birleşimi şeklinde gerçekleştirilir (Williams, 2006).



Şekil 4.1 : E-atık demontaj sistemlerinin karakteristikleri (Hesselbach ve Westernhagen (1999)'den uyarlanmıştır.)

Manuel demontaj sistemlerinde, demontaj ve sınıflandırma işlemleri sadece demontaj operatörleri tarafından manuel olarak gerçekleştirilir. Demontaj operatörleri öncelikli olarak olası yeniden kullanım için bozulmadan değerli parçaların (çipler, hafızalar, sabit diskler vb.) ve tehlikeli bileşenlerin (kapasitörler vb.) demontajını yaparlar. Operatörleri desteklemek için, iş istasyonlarında çekiç, tornavida, kerpeten gibi geleneksel demontaj araçları bulunmaktadır. Ayrıca, hava basınçlı vida çıkarma araçları gibi özel araçlarda kullanılmaktadır. Otomatik sistemler ise, en az bir yazılım sistemi veya robot tarafından planlanan ve çalıştırılan bir bireysel proses içermelidir (Scharke, 2003). Robotlar otomatik iş istasyonlarında tanımlanan basit ve karmaşık görevleri yerine getirirler. Dolayısıyla, otomatik sistemler tek tip ürünlerin demontajı için daha uygundur (Opalić ve diğ., 2010)

Sabitleyiciler ürünlerin iş istasyonlarına sabitlenmesi ve demontaj prosesi süresince ürün değişimlerinin önlenmesi için gereklidir. Sensorlar ise, demontaj ve taşıma işlemleri süresince mevcut proses ilerleyişi hakkında bilginin taşınması ve demontaj süreçlerinin planlanması ve kontrolü için gereklidir (Wiendahl ve diğ., 2001).

İş istasyonlarının yanı sıra, taşıma sistemleri de demontaj sistemlerinin önemli kaynaklarından bir tanesidir. Demontaj prosesi süresince katma değer yaratmayan aktivitelerin azaltılmasını sağlar. Taşıma sisteminde her zaman girdi ve çıktı noktası bulunmaktadır. Örneğin; atık ürünlerin iş istasyonlarına taşınması veya işlenen ürünlerden elde edilen bileşenlerin sınıflandırma alanına ve kutularına taşınması. Taşıma operasyonları; düz hat, döngü hat veya ikisinin kombinasyonunu içeren hatlar üzerinde gerçekleştirilebilir. Düz hatlar genellikle tek bir iş istasyonuna ihtiyaç olduğu durumlarda kullanılır. Döngü veya kombinasyon hatlar ise esnek bağlantılara ihtiyaç olduğu durumlarda kullanılır (Wiendahl ve diğ., 2001). Bireysel demontaj iş istasyonlarından oluşan bir demontaj sisteminin etkinliği, iş istasyonları arasındaki bağlantıların sağlanması ile, % 70 kadar arttırılabilir (Wiendahl ve diğ., 1998).

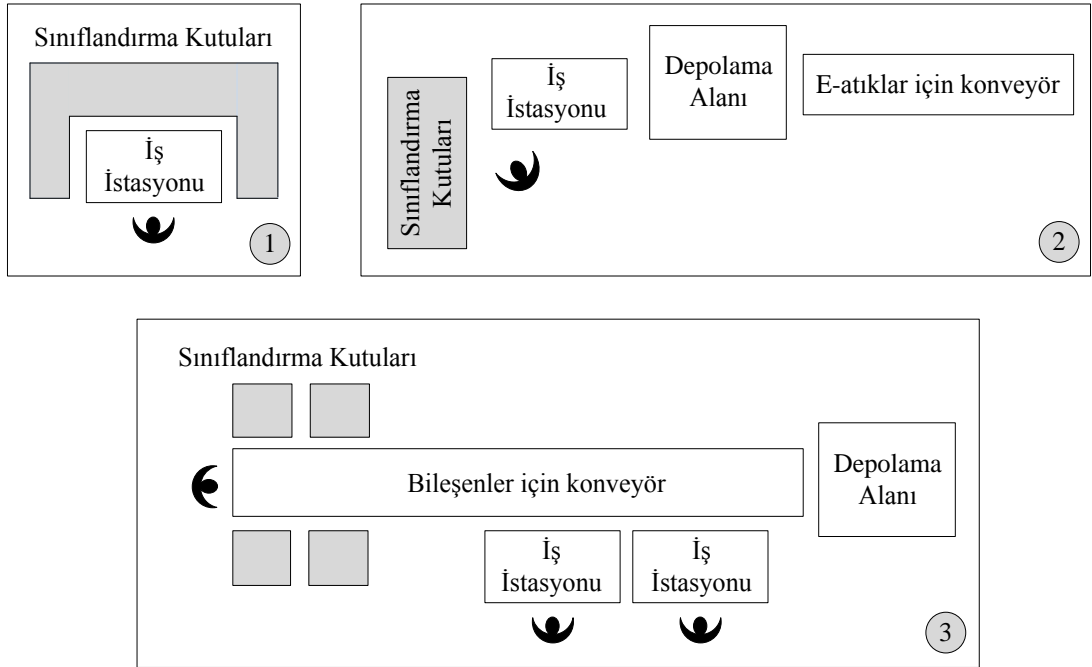
Son olarak demontajdan elde edilen bileşenler operatörleri tarafından görsel olarak kontrol edildikten sonra kutular içerisinde sınıflandırılır. Bu kutular, sınıflandırılmış malzemelerin toplanması ve taşınması için kullanılır. Büyük kutular, genellikle plastik bileşenler ve devre kartları için uygulanırken, kapasitör gibi tehlikeli malzemeler için iş istasyonlarının yanına konumlandırılmış küçük kutular kullanılır. Hafıza kartı gibi yeniden kullanılabilir bileşenlerin toplanması için ise köpüklü malzemelerle çevrelenmiş küçük kutular için kullanılır (Wiendahl ve diğ., 2001).



Demontaj sistemlerinin yerleşimleri; genellikle iş istasyonunun sayısı, iş istasyonları arasındaki bağlantıların türü ve iş istasyonlarının konumlarının düzenlenmesi ile planlanır (Hesselbach ve Westernhagen, 1999). Demontaj sistemlerinde yerleşim değişiklikleri ile; (1) malzemelerin etkili taşınması sağlanabilir ve bunun sonucunda da demontaj hızı arttırılabilir; (2) demontaj süresince ekipman taşınma mesafesi minimuma indirilebilir; (3) benzer parçalar özel iş istasyonlarında demonte edilerek ekipman dağınlıklığı minimuma indirilebilir; (4) demonte olan bileşenlerin daha doğru sınıflandırılması sağlanabilir (Opalić ve diğ., 2004, 2010).

#### 4.1 Mevcut Demontaj Yerleşim Yaklaşımları

Literatürde veya faaliyet gösteren yeniden üretim veya geri dönüşüm tesislerinde çeşitli demontaj hatları veya demontaj hücreleri bulunmaktadır. Opalić ve diğ. (2010) mevcut e-atık demontaj yerleşim yaklaşımlarını 3 farklı biçimde sınıflandırmışlardır (Bakınız Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Mevcut demontaj yerleşim biçimleri (Opalić ve diğ., 2010)

Şekil 4.2'de verilen ilk yerleşim biçiminde, e-atıklar operatörler tarafından iş istasyonlarında demonte edilir ve elde edilen bileşenler, iş istasyonunun çevresindeki kutularda sınıflandırılır. Bu yerleşimde, birden fazla operatör olması durumunda iş istasyonlarında operatörler paralel olarak çalışırlar. Her biri bağımsız olarak atık partileri alırlar, demonte ederler ve sonunda toplama alanındaki çıkış kutusuna teslim

ederler. Bu yerleşim şeklinde, operatörler malzeme yükleme aktiviteleri ile (alma ve dağıtma) zamanın çoğunu harcamaktadır (Opalić ve diğ., 2004, 2010).

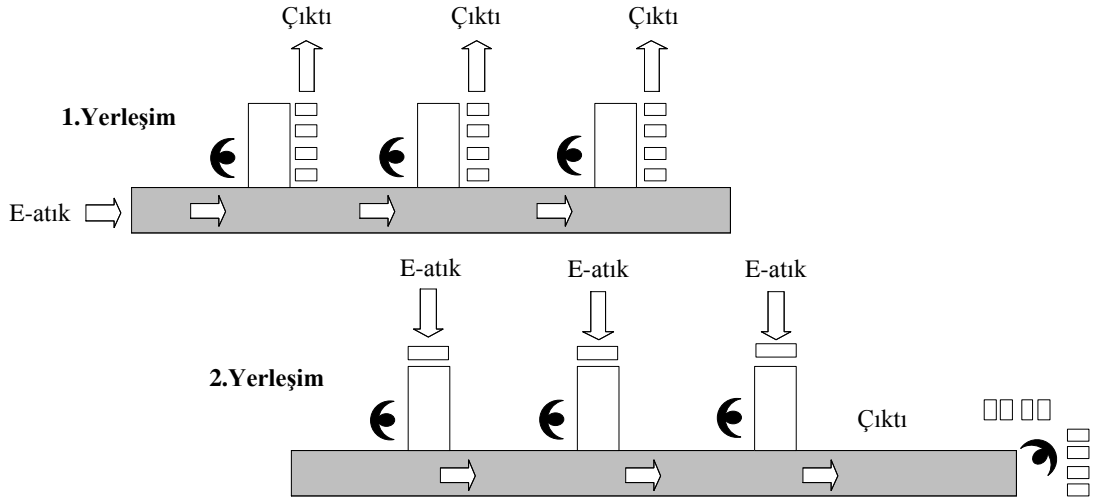
İkinci yerleşim biçiminde, atıklar konveyör üzerinde depolama ve sınıflandırma alanına gelir. İlk yerleşimin aksine ürünler demontaj için sınıflandırılırlar ve sıralanırlar. Operatörler, depolama alanından ürünleri alır, demontajını yapar ve demonte olmuş parçaları çıktı önlerinde bulunan sınıflandırma kutularına koyar. Malzeme yükleme zamanı birinci yerleşimden daha azdır. Ancak, demontaj işleminden elde edilen bileşenlerin sınıflandırma kutularına taşınması için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır (Opalić ve diğ., 2004, 2010).

Üçüncü yerleşim biçimi, demonte olmuş parçaların taşınması için ek bir konveyörü içerir. Operatör konveyör hattına bitişik bir iş istasyonunda birimleri demonte eder. Demonte edilen her bir parça hat üzerine yerleştirilir. Konveyörün sonunda uzman operatörler farklı kutulara demontaj parçalarını sınıflandırır. Bu yerleşimde demontaj parçalarının taşınmasında konveyör hattının uygulanması, demontaj zamanını arttırır, maliyetleri düşürür ve kaldırma hareketlerini azaltır (Opalić ve diğ., 2004, 2010).

#### **4.2 Literatür Taraması: Demontaj Sistemlerinde Yerleşim Planlaması**

Literatürde demontaj sistemlerinin en uygun yerleşimini amaçlayan az sayıda çalışma vardır.

Hesselbach ve Westernhagen (1999), ürünlerin farklı karakteristiklerine dayanarak hiyerarşik kümeleme analizi ile e-atıkları farklı ürün ailelerine ayrılmış ve esnek demontaj sistemleri üretmişlerdir (Bakınız Şekil 4.3). Tanımlanan sistemde ilk yerleşim, ıraksak malzeme akışı ile karakterize edilir. E-atıklar yürüyen bant üzerinde sisteme girerler ve iş istasyonlarından bileşen formunda ayrılırlar. Bu tip yerleşim sistemi, TV setleri ve monitörler gibi homojen ve karmaşık ürünleri işlemek için önerilmiştir. İkinci yerleşim ise, yakınsak malzeme akışı ile aynı yerleşim için kullanılır. Elektronik atıklar sisteme üç iş istasyonunda girer ve tüm gerekli demontaj operasyonları gerçekleştirilir ve demontaj olan tüm bileşenler yürüyen bant ile merkez sınıflandırma ve toplama alanına taşınır. Bu demontaj sistemi, çok çeşitli bileşenlere sahip heterojen ürünlerin işlenmesi için önerilmiştir. Bu demontaj sistemlerinin yerleşimlerini analiz etmek için LaySID (Layout Simulation for Disassembly) adı verilen simülasyon destekli bir yazılım aracı kullanmışlardır.

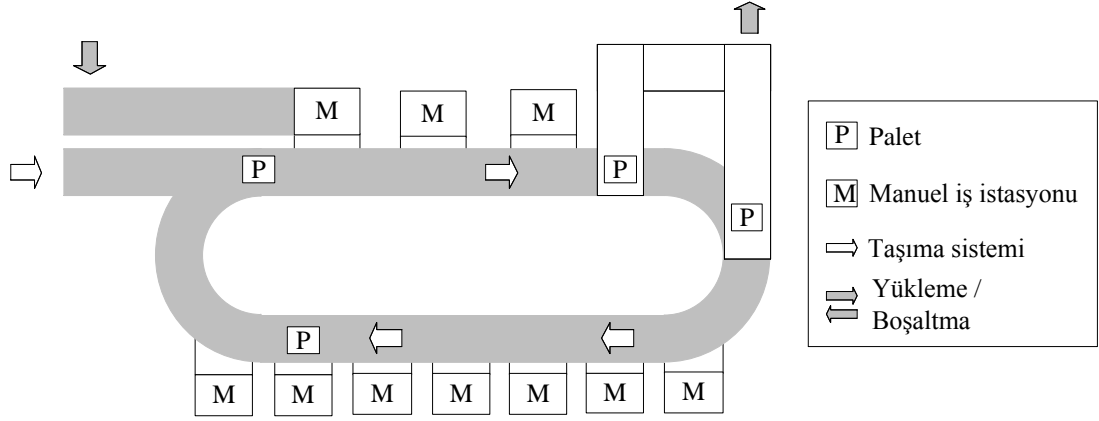


Şekil 4.3 : Hesselbach ve Westernhagen (1999) esnek demontaj sistemi yerleşimi

Limaye ve Caudill (1999) geri dönüşüm tesisleri için bilgisayar destekli yaklaşımlar geliştirmiş ve küçük bir ürün geri dönüşümü yapan elektronik işletmesinde uygulamışlardır. Demontaj operasyonlarının modellenmesi için Arena yazılımı kullanılmış ve faaliyet tabanlı maliyet modelinin entegrasyonu için Microsoft Visual Basic ile Arena yazılımının entegrasyonu sağlanmıştır. Operasyonlar, kaynak kullanımı, ekipman seçimi ve tesis yerleşiminde önerilen değişim sonuçlarında darboğazları değerlendirmek için çeşitli gelişim senaryoları modellenmiş ve simülasyonla analizleri yapılmıştır. Faaliyet tabanlı maliyet modeli her bir demontaj aktivitesi ile ilişkili sabit ve değişken maliyetler tanımlanarak geliştirilmiştir. Mevcut sistemin simülasyonu sonucunda katma değersiz taşıma aktivitelerinin, proses zamanından daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Scharke (2003) farklı ülkelerdeki manuel demontaj tesislerini incelemiştir. Bu inceleme sonucunda, en ucuz ve en hızlı yolla demontaj felsefesi sonucunda mevcut demontaj yapan işletmelerin demontaj lojistikleri, demontaj stratejileri ve demontaj derinliği gibi düşük planlama ölçüleri ile karakterize edildiğini tespit etmiştir. İncelenen demontaj tesislerinin yerleşimleri aşağıda özetlenmiştir:

Electrocycling, Goslar, Almanya: Tesis yaklaşık 21000 ton yıllık elektronik atık işleme amacıyla kurulmuştur. Telefon, CD sürücü, TV seti, bilgisayar ve mikrodalga fırın gibi 5 kg'dan 70 kg'a kadar ürünleri işleme kapasitesi vardır (Bakınız Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Electrocyling demontaj sistemi yerleşimi (Scharke, 2003)

Electrocyling; telefonlar, 5 kg kadar hafif aletler, orta büyüklükteki aletler, 50 kg kadar TV setleri ve monitörler, 200 kg kadar ağır aletler ve cam tüpleri işlemek için farklı demontaj hatlarına sahiptir. Elde edilen bileşenler, bataryalar, kapasitörler, LCD'ler, cam tüpler, bakır bobinler ve baskılı devrelerdir. Bir kapalı döngü taşıma sistemi, paletlerdeki ürünleri iş istasyonlarına kadar taşır.

Demontaj sistemi, 11 manuel iş istasyonunun yanı sıra iki yükleme operatöründen oluşmaktadır. Demontaj genellikle keski, tornavida ve pense gibi geleneksel araçlarla manuel olarak gerçekleştirilir. Demontaj derinliği ve stratejisi ile ilgili kararları operatör kendisi verir. Bir ayak ile kontrol edilebilen anahtar ile operatör dönen konveyörde ürünü durdurur ve iş istasyonuna taşır. Demontaj işlemlerinden sonra, bileşenler bir sonraki prosese nakledilir ya da özel konteynırlarda toplanır. Geri kalan bileşenler kırıcıya gönderilir.

Sony Manuel Demontaj Sistemi, Stuttgart, Almanya: Manuel demontaj sisteminde, TV setlerinin demontajı yapılır. Bir ürün için ortalama demontaj zamanı 10 dakikadır ve 15 farklı bileşen elde edilir (plastik, baskı kartları, cam tüpler vb.). Sistemin tasarımı tamamen modülerdir ve hücrenin kapasitesinin artırılması gibi değişimler mümkündür (Bakınız Şekil 4.5).

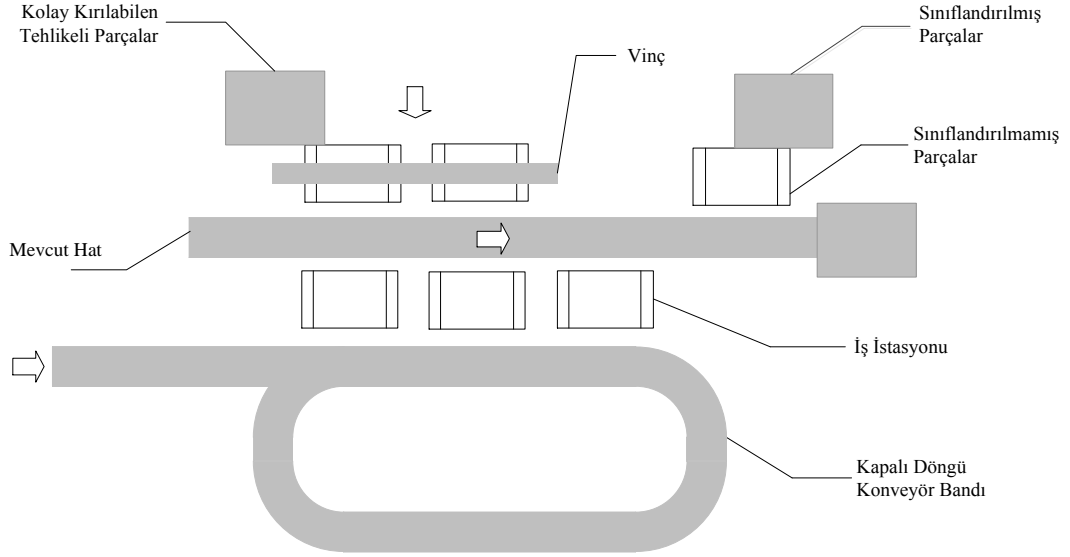
Sistem, bir test istasyonu, bir yükleme ve boşaltma istasyonu ile dört demontaj hücresinin beraber bağlantısını sağlayan otomatik bir taşıma sisteminden oluşur. Sistemin yapısı döngüsel ve sayısal olarak kontrol edilir. 1.istasyon; yükleme, test etme ve arka kapağın demontajı ile tüpün havalandırılması için kullanılır. Diğer üç istasyon, geriye kalan demontaj işlemlerinde yer alır. Ek olarak bir test istasyonu vardır. Paletler döngüsel hat üzerinde hareket eder ve iş istasyonlarına taşınır.



Manuel Demontaj Hattı, Mirecb.v., Eindhoven, Hollanda: Bilgisayar donanımları, ses ve video ekipmanları ve beyaz eşyalar gibi çeşitli tipteki hurda ürünleri demonte etmek için çeşitli demontaj hatları kurmuştur. Demontaj operatörleri çok çeşitli ürünlerle başa çıkmak zorundadır. Demontaj tesisi konveyör sistemine sahip değildir. Eski araçlar ve demonte olmuş parçalar iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda depolanır. Özel ekipmanlar, vidaların gevşetilmesi ve bağlantıların koparılması için kullanılır. Ürün gruplarının, özel laboratuvarlarda gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal ve ekonomik analizinden sonra demontaj işçileri, demontaj derinliği ve değerli parçalar hakkında talimatları alır.

Sim ve diğ. (2005) farklı ülkelerde var olan dört otomobil demontaj sistemlerinin zayıf ve güçlü yönlerini değerlendirmiş ve bu analize dayanarak yeni geliştirdikleri bir demontaj sistemi önermişlerdir. Bu yeni sistem, yeni sistemin yapımında ve işletiminde direk olarak ilgili olacak tesisin uzmanları, işçiler ve yöneticiler tarafından tasarlanmıştır. Arena simülasyon modeli kullanılarak mevcut modellerden birinin ve yeni önerilen sistemin simülasyon ile analizini yapmışlardır. Araştırmacılar tarafından belirlenen performans ölçülerine dayanarak elde edilen sonuçlara göre yeni geliştirilen sistemin çıktılarının mevcut sistemin çıktılardan daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Otomobil demontaj sistemlerinde performansın geliştirilmesi amacıyla 4 alternatif önermişler ve verimliliğin test edilmesi amacıyla mevcut sistem ve geliştirilen sisteme uygulamışlardır.

Opalić ve diğ. (2010) hem küçük tüketici ürünleri (mikrodalga fırınlar, PC, elektrik makinesi, telefonlar vb.) hem de büyük tüketici ürünleri (TV ve monitörler vb.) için karma modelli bir demontaj iş atölyesi önermişlerdir. Önerilen yerleşim biçimi, biri küçük parçalar için ve diğeri büyük parçalar için olmak üzere iki paralel hattın meydana gelmektedir. Her iki hatta son sınıflandırma alanına demonte olmuş parçaları taşıyan ortak bir konveyör bulunmaktadır. Küçük parça iş istasyonları, benzer parçaların demontajı için işçilere izin veren sürekli bir dairesel konveyör hattıyla beslenir. Büyük parça iş istasyonları, ağır elektronik parçaların kaldırılmasını minimize etmek amacıyla tezgâha bağlanmış ve raylı bir sistem tarafından beslenir. Bu iş istasyonları ayrıca kolayca kırılabilen CRT için ayrı bir depolama kabına sahiptir. Opalić ve diğ. (2010)'nin tüketici elektronikleri için özel demontaj yerleşimi Şekil 4.7'de verilmiştir.

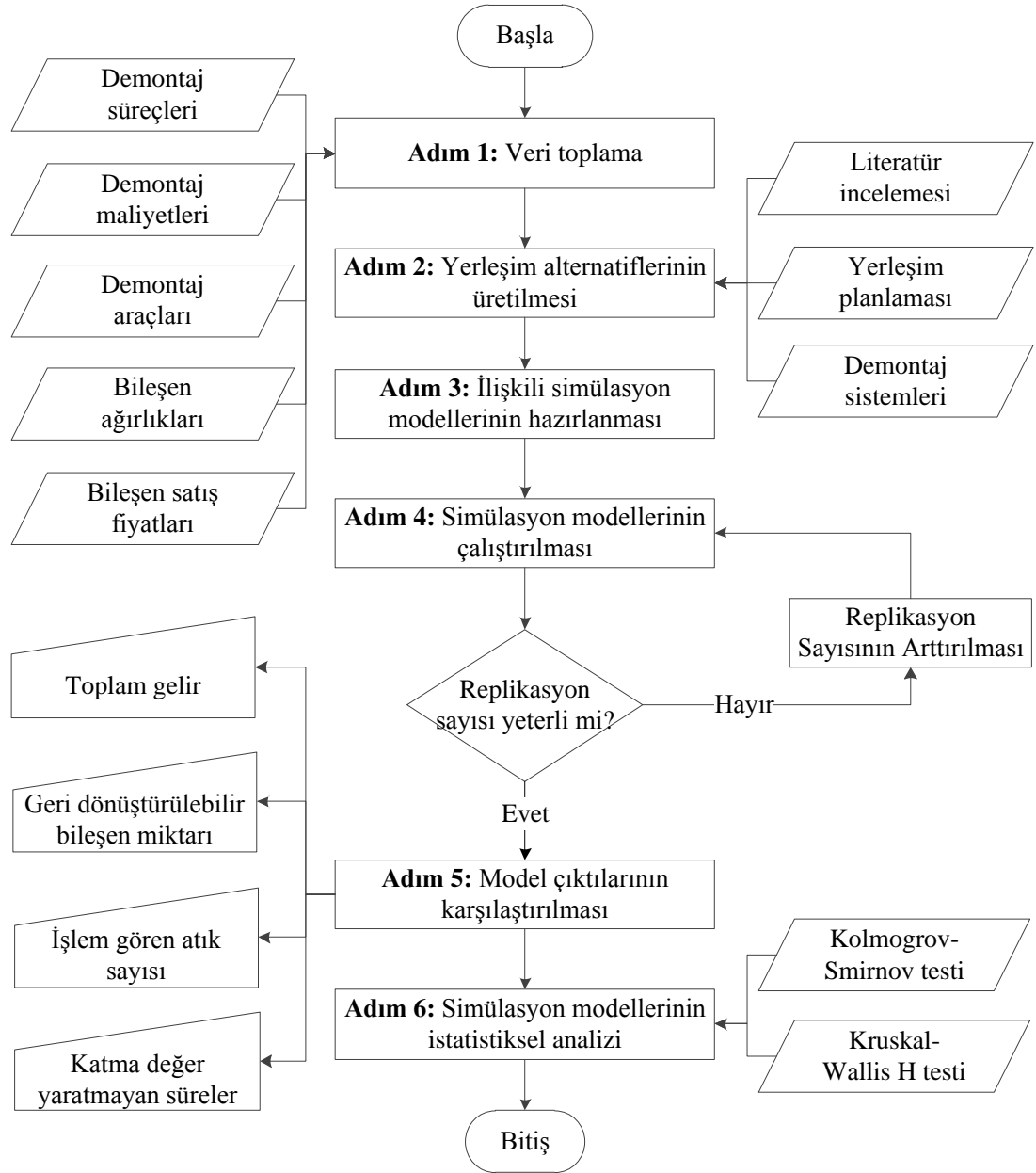


Şekil 4.7 : Tüketici ürünleri demontaj tesisi yerleşimi (Opalić ve diğ., 2010)

Demontaj sistemleri içerisinde çizelgeleme (scheduling), sıralama (sequencing), hat dengeleme (line balancing), sipariş sistemi (order systems) ve yerleşim planlaması (layout planning) vb. 1990'ların sonlarında literatürde tanımlanmış farklı konuları barındırır. Bu çalışma alanları güncel araştırmalarla geliştirilmektedir. Demontaj sistemlerinde yerleşim planlaması problemi, zaman, para ve iş gücü gibi kaynakların kullanımını optimize eden demontaj sistemlerine olan ihtiyaçların giderek artması nedeniyle, son yıllarda demontaj literatüründe çalışılmaya başlanan konulardan bir tanesi haline gelmiştir. Yukarıdaki bölümde sunulan literatür taramasında elde edilen bilgiler sonucunda, demontaj sistemlerinin yerleşim planlaması konusunda yapılan çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir. Sonuç olarak, tez çalışması bu alana katkı sağlamak amacı ile demontaj sistemlerinde yerleşimi etkileyecek operasyonel yaklaşımlar altında alternatif yerleşim planları önerilmiştir. Önerilen yerleşim planları simülasyon yöntemiyle modellenmiş ve farklı performans kriterlerine dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır.

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, e-atık demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi için ideal yerleşim planlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla çalışmanın mimarisi Şekil 5.1’de verildiği gibi yapılandırılmıştır.



Şekil 5.1 : Çalışmanın uygulama adımları ve kullanılan yöntemler



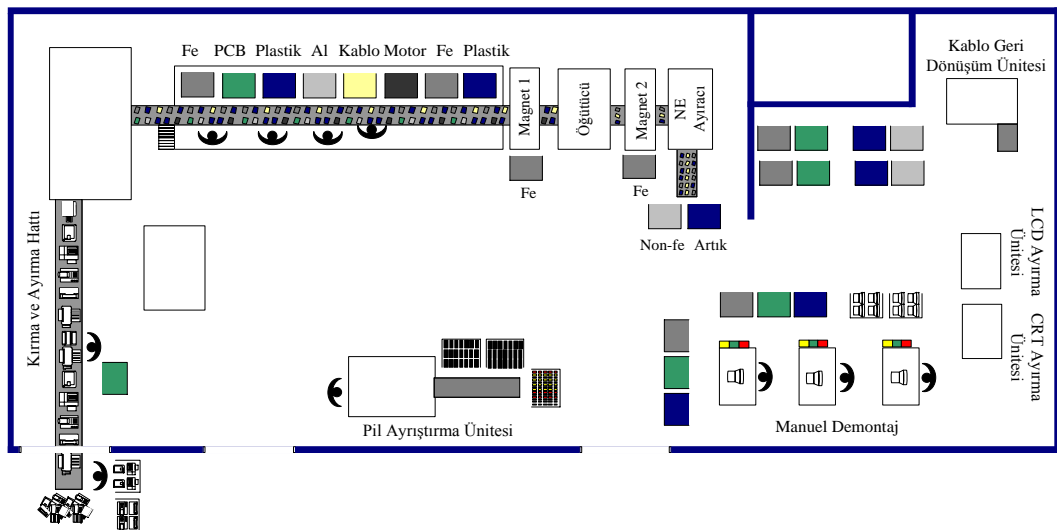
Çalışmanın ilk aşamasında, gerek literatürdeki çalışmalardan elde edilen bilgiler gerekse paydaş firmadan elde veriler ışığında, e-atık demontaj sistemlerinin yerleşim planları ile e-atık demontaj süreçleri yakından irdelenmiş ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden sonra, yerleşim planlaması probleminin temel prensiplerine ve demontaj sistemlerinin kendi doğasına has durumlar ve ihtiyaçlara dayanarak geliştirilen yerleşim alternatifleri önerilmiştir. Önerilen alternatif yerleşim planlarının demontaj sistemleri üzerindeki etkisinin test edilmesi amacıyla ayırık olaylı benzetim kullanılmış ve bu alternatifler ARENA 10.0 simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon modellerinde işlem süreleri bulanık olarak elde edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, geliştirilen simülasyon modelleri farklı performans ölçülerine dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır.

## 5.1 Veri Toplama

Geliştirilen simülasyon modellerinde kullanılmak üzere gerekli demontaj süreçleri, elde edilen bileşen tipleri ve ağırlıkları, satış fiyatları alt bölümlerde açıklanmıştır.

### 5.1.1 Demontaj Süreçleri

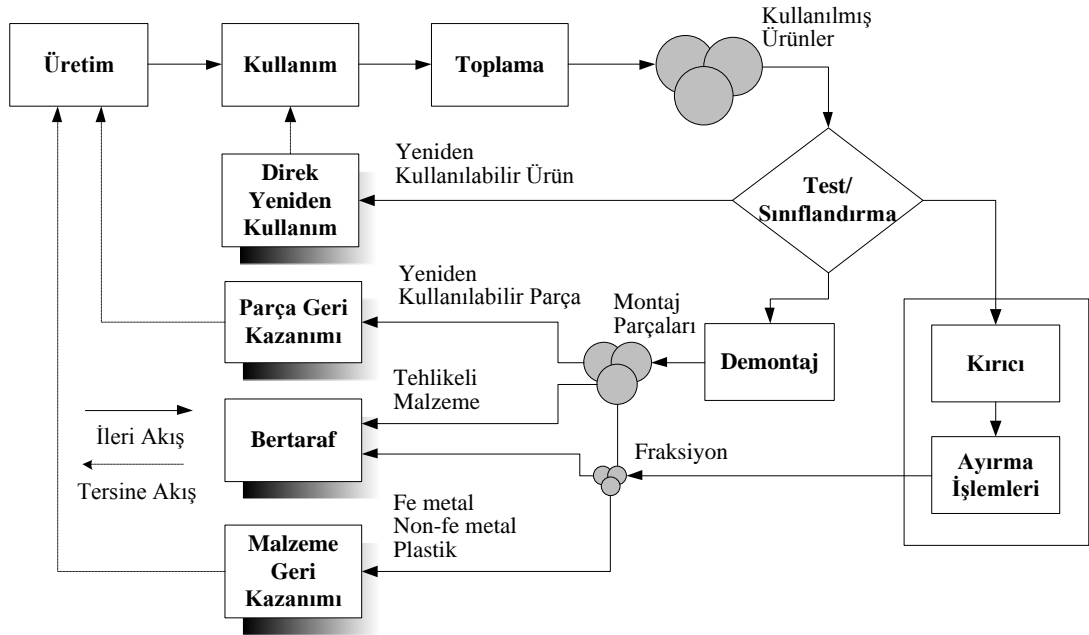
Literatürdeki e-atık demontaj tesislerinin yerleşim planları bir önceki bölümde tanımlanmıştır. Bu bölümde ise, paydaş firmanın mevcut tesisinin yerleşim planı ve e-atıkların demontajı ile ilgili süreçler incelenmiştir. Paydaş firmanın mevcut tesisinin (Türkiye) yerleşim planı Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Paydaş firma tesis yerleşim planı

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere, firmanın geri dönüşüm operasyonlarının yönetilmesi için sahip olduğu kaynaklar; 3 adet manüel demontaj iş istasyonu, 1 adet kırıcı, 3 veya 4 adet manüel ayırma operatörü, 2 adet mıknatıslı ayırıcı, 1 adet öğütücü, 1 adet NE ayırıcıdır.

Paydaş firmada WEEE direktifleri kapsamında oluşturulan 10 kategori içerisinde 2. kategori, küçük ev aletleri, 3.kategori, IT ve telekomünikasyon ekipmanları ve 4.kategori, tüketici ekipmanları firmaya kabul edilmekte ve farklı süreçlerle geri dönüşümü sağlanmaktadır. Bu atıkların geri dönüşümü çok aşamalı bir süreçtir ve demontaj, boyut küçültmeve ayrıştırma işlemlerinden oluşmaktadır. Paydaş firmada işleyen süreçler Şekil 5.3’de sunulmuştur.



Şekil 5.3 : Paydaş firmada geri dönüşüm süreçleri

Şekil 5.3’de görüldüğü üzere e-atıkların işlenmesi için 2 farklı seçenek vardır:

- 1) E-atık tamamen manüel olarak demontaj edilir. Genellikle içerisinde yüksek değerli maddeler ihtiva eden atıklar bu kapsamda işlenir.
- 2) E-atık direk kırıcıya gönderilir. İçerisinde tehlikeli madde bulundurmayan ve düşük değerli maddeler ihtiva eden atıklar direkt kırıcıya gönderilir.

Firmada geri dönüşüm süreci, kullanımı süresini tamamlamış EEE’lerin (evlerden, iş yerlerinden veya belediyelerden) toplanması ile başlar ve daha sonra bu e-atıklar mavi konteynırlar içerisinde geri dönüşüm tesisine teslim edilir (Bakınız Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : E-atıkların tesise girişinden sonra depolanması ve sınıflandırılması

Bir sonraki aşama test ve sınıflandırma işlemlerini kapsamaktadır Sınıflandırma süreci sırasında, yazıcı, faks makinesi, fotokopi makinesi gibi kartuş içeren ya da cep telefonu gibi batarya içeren atıkların içerisinde bu tehlikeli maddeler arındırılır.

#### 5.1.1.1 Manuel Demontaj Süreci

Demontaj, geri kazanım süreçlerinde gerçekleştirilen ilk aşamadır ve tehlikeli maddelerin kaldırılması veya yeniden kullanılabilir parçaların elde edilmesine izin verdiği için bu süreçte önemli bir role sahiptir.



Şekil 5.5 : İş istasyonlarında demontaj operasyonları ve iş istasyonu çevresinde yer alan e-atıklar

Demontaj süreci, e-atıkların depodan demontaj alanına taşınması ile başlar. Hangi e-atığın demontajının yapılacağına dair bir sıralama bulunmamaktadır. Genellikle hangi e-atık depo içerisinde fazla miktarda bulunursa ya da elde edilen bileşen miktarının ihracatı ile ilgili kritik bir miktar varsa, o ilgili e-atığın demontajı yapılır.

Eski e-atıklar iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda bulunur (Bakınız Şekil 5.5). Demontaj operatörleri, e-atıkları paletlerden kendi iş istasyonlarına taşırlar. Birden fazla operatör her biri kendi bir iş istasyonunda paralel olarak çalışır ve e-

atıkları demonte ederek elde ettiği bileşenleri (güç kaynağı, kablo, PCB, CPU, plastik vb.) iş istasyonunun çevresindeki ve altındaki kutulara yerleştirir (Bakınız Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : E-atıkların demontajından elde edilen bileşenler ve sınıflandırma kutuları  
Kutular dolduğu zaman, taşıyıcı görevi üstlenen bir forklift gelir ve ilgili kutuyu alarak geri dönüşüm tesisinin depolama alanına taşır. Geleneksel üretim sistemlerinin aksine, depolarda tutulan e-atıklardan elde edilen bileşenler için herhangi bir termin tarihi yoktur. Elde edilen, bileşenler daha ileriki işlemler için herhangi bir zaman diliminde, yurt içinde ve yurt dışında bulunan uzman tesislere gönderilir. Ancak, genellikle taşıma maliyetlerinin azaltılması için konteynırların dolması beklenir.

Elde edilen CRT tüpleri ise, önceleri firmanın içerisinde yer alan CRT işleme üniteleriyle işlenirken, şuanda firma cam geri dönüşüm firmaları ile yapılan özel anlaşmalarla CRT tüplerini tesislerinde işlemek yerine direk cam geri dönüşüm firmalarına göndermektedir. Plastik kapaklar ise fazla yer kapladığı için konteynırlar içerisinde kırıcılar tarafından kırılırlar (Bakınız Şekil 5.7).



Şekil 5.7 : Konteynırlar içerisinde yer alan plastik çıktıları

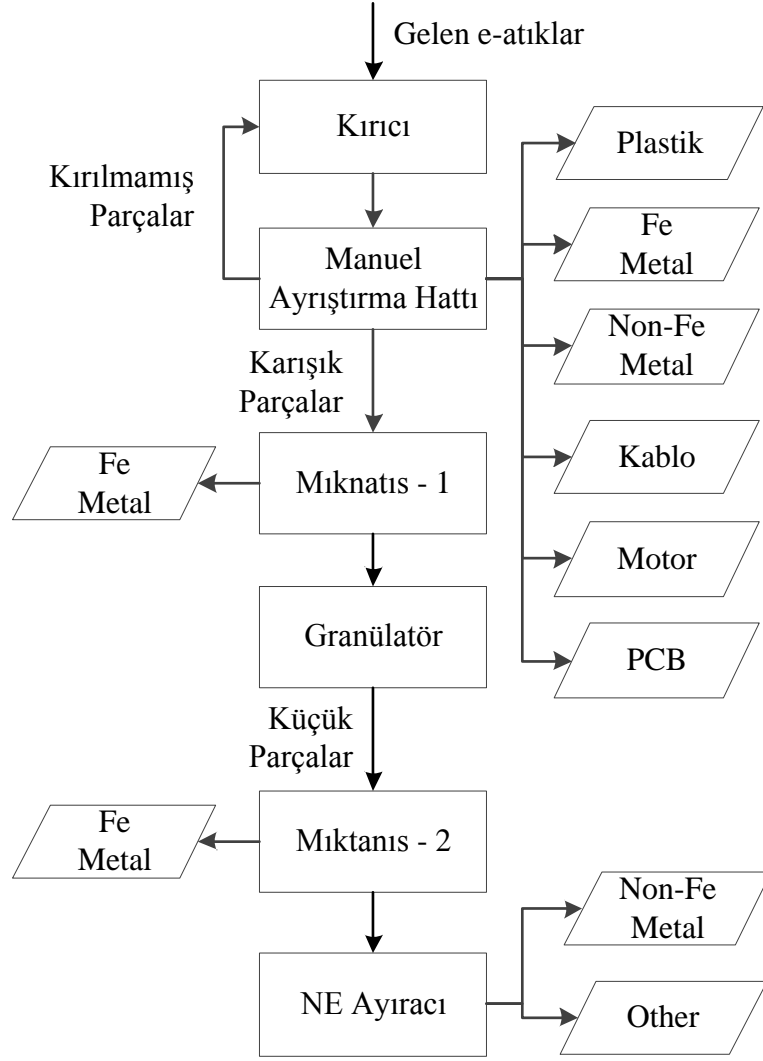
### 5.1.1.2 Yığın Geri Dönüşüm Süreci

Yığın geri dönüşüm, imkanlar dahilinde bir veya birden fazla adım ile atıklardan bileşen ve malzemelerin toplu olarak ayrıştırıldığı ekipman yoğun bir süreçtir (Stuart ve Christina, 2003). Yığın geri dönüşüm sürecinde, başlangıçta atıklar karışık büyük bileşenlere parçalanır ve daha sonra elde edilen bu parçalar bir veya birden fazla alt süreç yardımıyla bileşenlerine ayrılır. Parçalama sürecinde, atık ilk olarak büyük kırıcılar yardımıyla büyük parçalara bölünür ve daha sonra granülatör ile daha küçük parçalara ayrılır (Sodhi ve diğ., 1999). Bileşenlerin ayrıştırılmasında ise bileşenlerin manyetik, elektrostatik, yoğunluk, görsellik veya diğer özelliklere göre çeşitli ayrıştırma yöntemleri bulunmaktadır. Manyetik özelliklere göre ayrıştırmada, demir içermeyen metallere (non-fe metallere) demir içeren metalleri ayırmak (fe metallere) için mıknatıs kullanılır. Demir içermeyen metallere ayrıştırılmasında ise genellikle endüksiyon akımı, elektrostatik, hava, suda yüzdürme veya merkezkaç kuvveti gibi özellikler kullanılır (Williams, 2006). Bir geri dönüşüm firması, malzemelerin ayrıştırılması için sahip olduğu geri dönüşüm alt yapısı ve teknolojisi doğrultusunda yığın geri dönüşüm süreçlerinde bu yöntemlerden uygun olanları kullanılır.

Literatürde yer alan bazı çalışmalar farklı atık tipleri için; otomobil atıkları (Williams ve diğ., 2007; Simic ve Dimitrijevic, 2012), kağıt atıklar (Pati ve diğ., 2008), endüstriyel atıklar (Tang ve diğ., 2008) ve e-atıklar (Penev ve de Ron, 1996; Krikke ve diğ., 1998, 1999; Sodhi ve diğ., 1999; Sodhi ve Reimer, 2001; Spengler ve diğ., 2003; Stuart ve Christina, 2003; Rios ve Stuart, 2004; Teunter, 2006; Shih ve Lee, 2007; Renteria ve diğ., 2010; Renteria ve Alvarez, 2012); yığın geri dönüşüm süreçlerinin optimizasyonu problemi üzerine eğilmişlerdir. Bu çalışmaların amacı genellikle toplam gelir ve/veya geri dönüşüm oranının maksimize edilmesi veya negatif çevresel etkilerin minimize edilmesidir.

Paydaş firmanın mevcut yığın geri dönüşüm sürecinde, radyo setleri, kamera, elektrik süpürgesi gibi düşük değerli atıklar manuel demontajı maliyetli olduğu için direkt olarak yığın halinde boyut küçültme ve ardından ayrıştırma operasyonlarında işlenmeye gönderilir. Kırıcı ve ayrıştırma operasyonlarından önce, yazıcı, faks makinesi, fotokopi makinesi gibi kartuş içeren ya da cep telefonu gibi batarya içeren atıkların içerisinden bu tehlikeli maddeler çıkarılır. Firmada uygulanan kırıcı ve ayırma sürecinde uygulanan adımlar Şekil 5.8'de verilmiştir.





Şekil 5.8 : Paydaş firmada yığın geri dönüşüm süreci ve elde edilen bileşen tipleri  
Kırıcıya gönderilecek olan e-atıklar, hattın başına yerleştirilmiş bir konveyör operatör tarafından hatta yerleştirilir (Bakınız Şekil 5.9).



Şekil 5.9 : Konveyör operatörü ve kırıcı yükleme bandı

Bu atıklar, kırıcıda küçük parçalara bölünür ve kırıcıdan çıkan parçalar manüel toplama hattında operatörler tarafından toplama kutularında biriktirilir. Daha sonra kalan karışık parçalar sırasıyla 1.mıknatıs; fe metallerin ayrılması, öğütücü; parçaların daha küçük parçalar haline dönüştürülmesi, 2.mıknatıs küçük fe metallerin ayrılması ve NE ayırıcından; nonfe metallerin ayrılması, geçer ve bileşenler kutularda toplanır. Literatürde kırıcı operasyonlarından sonra farklı ayırma operasyonları vardır. Detaylı bilgi için Kang ve Schoenung (2005), Williams (2006) ve Cui ve Zhang (2008) tarafından yapılan araştırmalar incelenebilir. Plastik, metal gibi malzemeler, yurt içi ve dışındaki eritme ve dökme tesislerine gönderilir.



Şekil 5.10 : Zincirli kırıcı ve manuel ayırma bandı



Şekil 5.11 : Mıknatıs ve NE ayırıcı



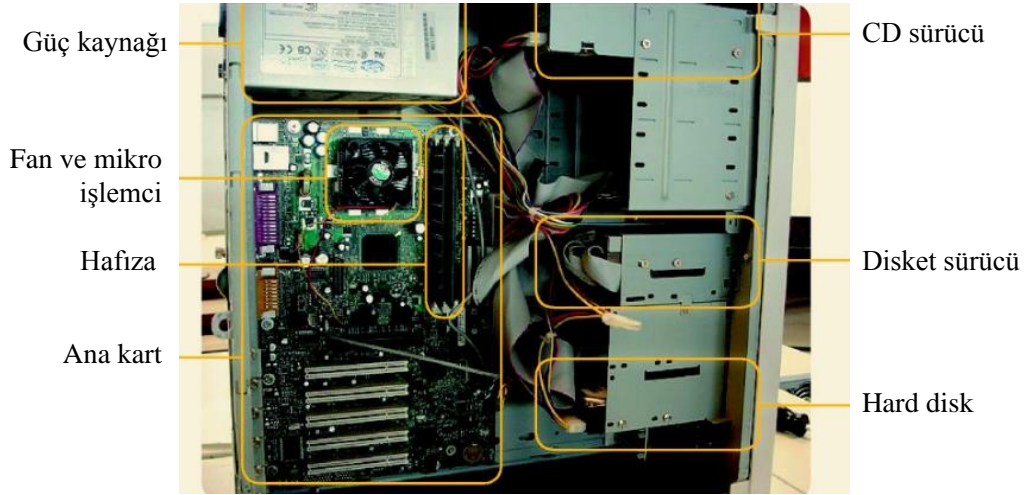
Şekil 5.12 : Depolama alanında e-atık çıktıları

## 5.1.2 Ürün Analizi

Bir e-atık geri kazanım tesisinde sıklıkla karşılaşılan PC, CRT TV, CRT monitör, LCD TV ve monitör için ürün analizleri literatüre ve paydaş firmaya bağlı olarak yapılmış ve böylece yerleşim planlaması analizlerinin daha sağlıklı gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

### 5.1.2.1 Kişisel Bilgisayar (PC)

Bir kişisel bilgisayarın (PC) bileşenleri, üreticisine ve kullanıcıya bağlı olarak değişebilir fakat genellikle çoğu bilgisayarda temel olarak benzer parçalar bulunmaktadır: güç kaynağı, fan, CPU, hafıza, PCB, ana kart, CD ve disket sürücü ve hard disk (CFER, 2013) (Bakınız Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : PC'nin bileşenleri ve konumları (CFER, 2013)

Bir PC'nin demontajı yan panellerin kaldırılması ile başlar. Yan paneller genellikle fe metal ya da plastiktir. Daha sonra erişim kolaylığına göre, hard disk, hafıza, PCB, fan vb. sökülür. Genellikle, hard disk, disk sürücü ve CD sürücülerin kaldırılmadan önce kabloları kesilir ve PCB'den ilk olarak CPU ve fan sökülür. Paydaş firmadan elde edilen bilgiler altında, bir PC'nin demontajından sonra elde edilen bileşenler ve satış fiyatları Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablo 5.1'de görülebileceği üzere bir PC'nin temelde ortalama ağırlığı yaklaşık ortalama 9,7 kilogram ve demontaj operasyonlarından elde edilen temel bileşenlerin satışından elde edilen gelir ortalama 8,13 € olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan tüm PC'lerin aynı tür PC'yi ifade ettiği düşünülmüş ve aynı temel bileşenlere ve bileşen ağırlıklarına sahip olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, satış fiyatlarının planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir.

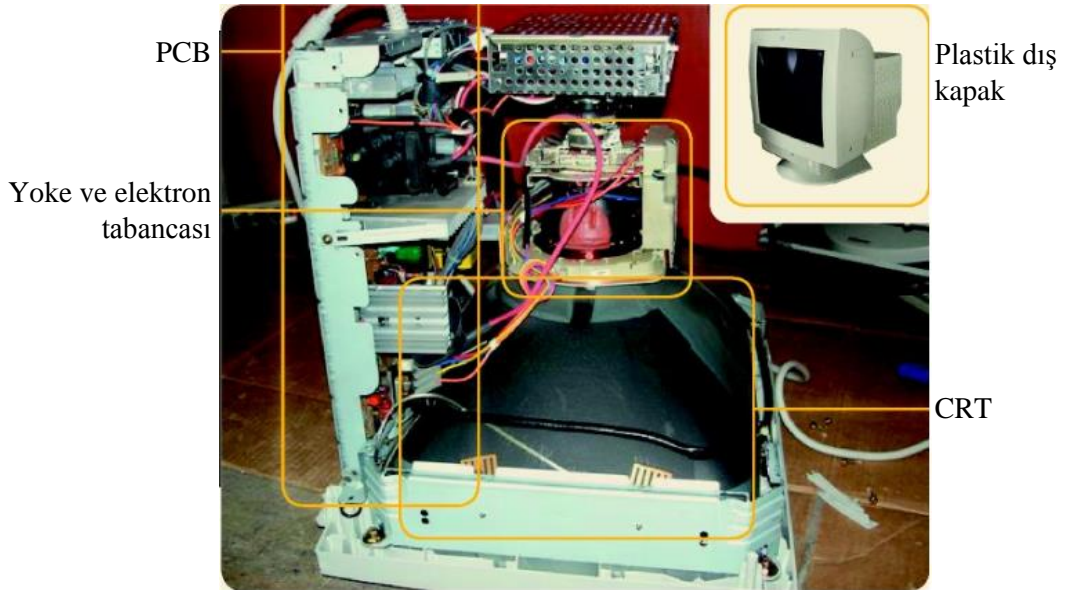


Tablo 5.1 : PC demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları

BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI(€/KG)
PCB Kat I	0,908	5,80 €
İşlemci	0,024	22,00 €
Hafıza	0,036	5,00 €
CD Sürücü	0,862	0,31 €
Disk Sürücü	0,374	0,31 €
Güç Kaynağı	1,320	0,37 €
Kablo	0,178	2,45 €
Hoparlör	0,040	0,07 €
Hard disk	0,498	0,80 €
Plastik	0,338	0,10 €
Metal	5,110	0,08 €

### 5.1.2.2 CRT TV ve Monitör

Bir çok CRT TV ve monitör, temel olarak benzer bileşenleri içermektedir. Bir CRT monitör veya TV genellikle baskı devre kartları, boyunduruk, elektron tabancası, plastik dış kapak ve bir adet CRT tüpten meydana gelmektedir (CFER, 2013) (Bakınız Şekil 5.14).



Şekil 5.14 : CRT monitör bileşenleri ve konumları (CFER, 2013)

Bir CRT monitörün demontajı elektrik kablosunun kesilmesi ve dış kapağın kaldırılması ile başlar. Metal başlığın çıkarılmasından sonra boyunduruk ve elektron tabancası elde edilir. Boyunduruk çıkarılmasının ardından, CRT tüpü çıkarılır. Son olarak, kablolar kesilerek PCB elde edilir. CRT TV ve monitör demontajından elde edilen temel bileşenler Tablo 5.2 ve 5.3’de verilmiştir.

Paydaş firma önceleri elde edilen CRT tüplerini kendi tesislerinde ayrıştırmaktayken, şimdi ise yapılan özel anlaşmalar gereğince CRT tüplerini direkt cam geri dönüşüm firmalarına işlenmek üzere göndermektedir.

Tablo 5.2 : CRT TV demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları

BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI(€/KG)
CRT Tüpü	25,102	-0,07 €
Saptırıcı	0,782	1,13 €
PCB Kat III	1,306	0,45 €
Metal	0,350	0,15 €
Plastik	5,136	0,13 €
Elektron Silahı	0,034	0,15 €
Kablo	1,538	1,35 €

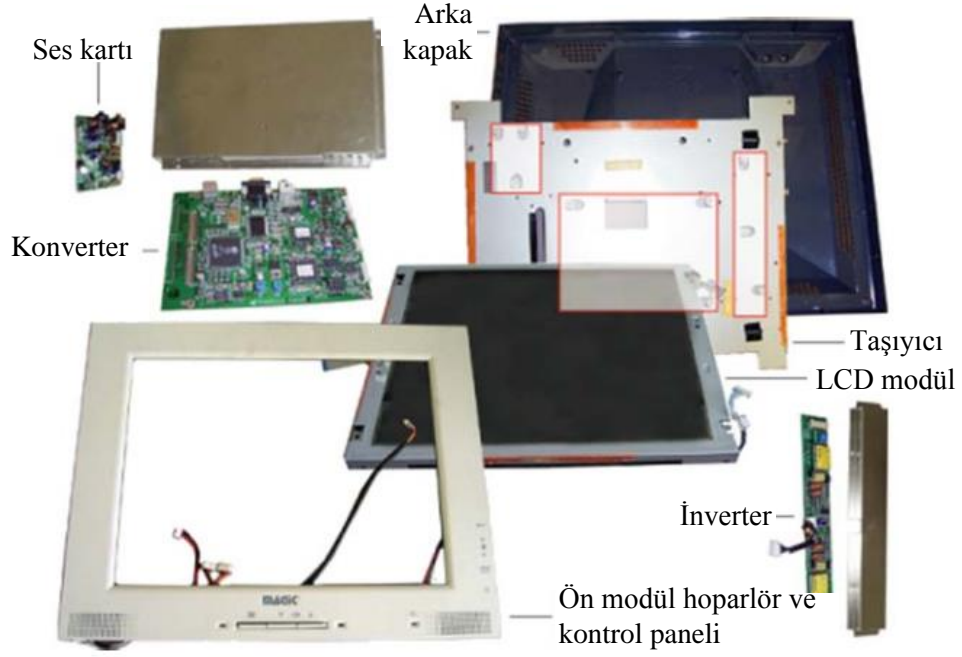
Tablo 5.3 : CRT monitör demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları

BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI(€/KG)
CRT Tüpü	8,934	-0,07 €
Saptırıcı	0,788	1,13 €
PCB Kat III	1,810	0,45 €
Metal	0,832	0,15 €
Plastik	2,710	0,13 €
Elektron Silahı	0,030	0,15 €
Kablo	0,910	1,35 €

Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de görüldüğü üzere, bir CRT TV ağırlığı temelde ortalama 34,4 kilogram iken, bir CRT monitör ağırlığı ise temelde ortalama 16,01 kilogramdır. Bir CRT TV’den elde edilen temel bileşenlerin satışından elde edilen gelir ortalama 2,47 € olarak ve bir CRT monitörden elde edilen temel bileşenlerin satışından edilen gelir ise ortalama 2,77 € olarak tespit edilmiştir. Tablolarda pozitif değerler bileşenlerin satış fiyatını ifade ederken, negatif değerler ise bileşenlerin bertaraf maliyetini ifade etmektedir. Bu noktada satış fiyatlarının ve bertaraf maliyetlerinin planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada ele alınan tüm CRT TV ve monitörlerin aynı tür CRT TV ve monitörleri ifade ettiği düşünülmüş ve aynı temel bileşenlere ve bileşen ağırlıklarına sahip olduğu varsayılmıştır.

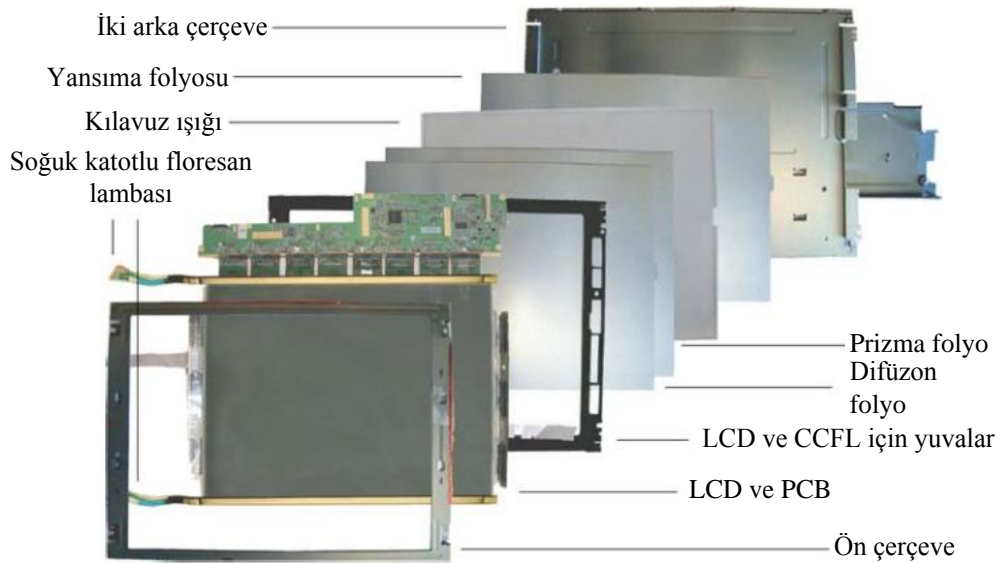
### 5.1.2.3 LCD TV ve Monitör

Birçok LCD TV ve monitör, temel olarak benzer bileşenleri içermektedir. Genellikle bir LCD TV ve monitör; plastik dış kapak, PCB’ler, LCD modülü, CCFL arka ışık ve taşıyıcıdan oluşur (Kim ve diğ., 2009a) (Bakınız Şekil 5.15 ve 5.16)



Şekil 5.15 : LCD monitör bileşenleri ve konumları (Kim ve diğ., 2009a)

LCD monitörün demontajı, arka plastik kapağın kaldırılması ile başlar. Daha sonra içerisinden sırasıyla, konverter, inverter ve ses kartı gibi PCB'ler demonte edilir. Ön parçadan ise, soğuk katotlu arka ışığın (CCFL), LCD modülü ve taşıyıcı çıkarılır (Kim ve diğ., 2009a). LCD monitör içerisinde, WEEE direktifleri (EU, 2002b) tarafından yasaklanan LCD modülleri demontaj yoluyla çıkarılmak zorundadır. Ayrıca, EU WEEE direktifleri gereğince, LCD modülü içerisinde CCFL'nin çıkarılması zorunludur.



Şekil 5.16 : LCD modül bileşenleri ve konumları (Kim ve diğ., 2009a)

LCD TV ve monitör demontajından elde edilen temel bileşenler Tablo 5.4 ve 5.5’de verilmiştir. Buna göre, bir LCD TV ağırlığı temelde ortalama 7,2 kilogram iken, bir LCD monitör ağırlığı ise temelde ortalama 4,6 kilogramdır. Bir LCD TV’den elde edilen temel bileşenlerin satışından elde edilen gelir ortalama 4,34 € olarak ve bir LCD monitörden elde edilen temel bileşenlerin satışından edilen gelir ise ortalama 3,34 € olarak tespit edilmiştir. Burada satış fiyatlarının planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada ele alınan tüm LCD TV ve monitörlerin aynı tür LCD TV ve monitörleri ifade ettiği düşünülmüş ve aynı temel bileşenlere ve bileşen ağırlıklarına sahip olduğu varsayılmıştır.

Tablo 5.4 : LCD TV demontajından elde edilen bileşenler ağırlıkları ve birim satış fiyatları

<b>BİLEŞEN</b>	<b>AĞIRLIK (KG)</b>	<b>SATIŞ FİYATI(€/KG)</b>
Renkli Plastik	0,812	0,30 €
Siyah Plastik	0,875	0,35 €
Beyaz Plastik	0,041	0,35 €
Panel	0,553	0,50 €
Folyo	0,106	0,25 €
CCFL arka ışık	0,849	0,60 €
PCB Kat I	0,054	7,50 €
PCB Kat II	0,276	3,00 €
PCB Kat III	0,334	1,50 €
Hoparlör	0,195	0,10 €
Kablo	0,077	1,50 €
Alüminyum	0,392	1,50 €
Metal	2,663	0,19 €

Tablo 5.5 : LCD monitör demontajından elde edilen bileşenler ağırlıkları ve birim satış fiyatları

<b>BİLEŞEN</b>	<b>AĞIRLIK (KG)</b>	<b>SATIŞ FİYATI(€/KG)</b>
Renkli Plastik	0,964	0,30 €
Siyah Plastik	0,030	0,35 €
Beyaz Plastik	0,078	0,35 €
Panel	0,520	0,50 €
Folyo	0,138	0,25 €
CCFL arka ışık	1,144	0,60 €
PCB Kat I	0,050	7,50 €
PCB Kat II	0,074	3,00 €
PCB Kat III	0,232	1,50 €
Hoparlör	0,014	0,10 €
Kablo	0,070	1,50 €
Alüminyum	0,560	1,50 €
Metal	0,754	0,19 €

## 5.2 Önerilen Yerleşim Alternatifleri ve İlişkili Simülasyon Modelleri

Veri toplama ve analiz işlemlerinden sonra, yerleşim planlaması probleminin temel prensiplerine ve demontaj sistemlerinin kendi doğasına has durumlar ve ihtiyaçlara dayanarak alternatif yerleşim planları geliştirilmiştir. Geliştirilen yerleşim planlarının amacı, mevcut sisteme göre katma değer yaratmayan malzeme taşıma aktivitelerinde harcanan süresinin azaltılmasını, operatörlerin boş bekleme sürelerinin minimize edilmesini ve dolayısı ile operatörlerin daha hızlı çalışmasını sağlamaktır.

Simülasyon ile modelleme, verilen şartlar kümesi altında sistem davranışlarını daha iyi anlamak için sayısal deneyler gerçekleştirerek mevcut veya önerilen bir sistemin bilgisayar ortamında modelinin tasarlanması ve hazırlanması sürecidir. Simülasyon sadece bir modelleme aracı değil, aynı zamanda bir çalışmada kullanılan bir karar verme yöntemidir. Simülasyon modelleri, üretim sistemleri, dağıtım ağları, otoyol sistemleri, süpermarket zincirleri ve hizmet sistemleri gibi bir çok karmaşık sistemin modellenmesine izin verir ve bu amaçla kullanılan başlıca yöntemlerden bir tanesidir (Kelton ve diğ., 2004). Dolayısıyla, simülasyon ile modelleme yaklaşımı e-atıkların özel karakteristikleri ele alındığında mevcut ve önerilen sistem davranışlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasına imkân verir (Hesselbach ve Westernhagen, 1999; Ranky ve diğ., 2003; Herrmann ve diğ., 2005). Bu bölümde, geliştirilen alternatif yerleşim planlarının demontaj sistemleri üzerindeki etkisinin test edilmesi amacıyla simülasyon yöntemi kullanılmış ve simülasyon modelleri, ARENA 10.0 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında incelenen simülasyon modelleri, zamanla değişen yapıya sahip oldukları için dinamik, rassal girdi unsurları içerdikleri için stokastik ve sistemin durumu belli bir zaman aralığında sonlu sayıda zaman noktasında değiştiği için kesikli-olay simülasyonu olarak nitelendirilebilir.

Demontaj sistemlerine getirilen ürünlerin çeşitliliği ve bu ürünlerin barındırdığı yapısal değişkenlikler, sistem içerisinde kullanılan pek çok kavramın belirsizlik taşımaya neden olur. Örneğin, bir ürün üzerindeki bir parçanın bozulması nedeniyle demontaj operasyonları her zaman başarılı bir şekilde tamamlanamayabilir veya demontaj sistemine getirilen atıkların yapısında ve kalitesinde yüksek derecede belirsizlik vardır. Böylesine durumlarda, kullanılan girdilerin toplanması simülasyon ile modelleme ve analiz işlemlerinde yaşanan en zor problemlerden bir tanesidir.

Bu belirsizliklerin üstesinden gelmek için, mevcut sistemde yer alan operatörler verilerin elde edilmesinde değerli bir kaynak olabilir. Eğer operatör sistem hakkında bilgi sahibi ise, sistemde girdi olarak kullanılabilir bazı tahminleri elde etmek mümkündür. Örneğin; herhangi bir operasyon için operatörlerden en kısa, en yaygın ve en uzun işlem süreleri elde edilebilir ve bu değer simülasyon modellerinde üçgenel dağılım olarak kullanılabilir (Chung, 2003).

Bu tez çalışmasında da, demontaj sistemine gelen ürünlerin çeşitliliği ve yapısal değişkenlikler ele alındığında, sistemde demontaj işlem zamanlarının gözlem yoluyla elde edilmesi uygulayıcı için hem zor hem de vakit alıcı bir işlemdir. Bu nedenle, bu belirsizlik dolayısıyla bulanıklık durumları altında, ürünlerin demontaj işlem süreleri operatörlerin ilgili ürün üzerindeki kişisel tecrübesi ile yaklaşık ortalama değerler olarak elde edilmiştir. Modellerde ise bu ortalama değerler; en kısa işlem süresi, yaygın işlem süresi ve en uzun işlem süresi olarak belirlenmiş ve üçgenel dağılım şeklinde tanımlanmıştır.

Simülasyon modellerinde, performans kriterlerinin hesaplanabilmesi için belirli bir sürede çalıştırılması gerekmektedir. Bu durumda, simülasyon modelleri haftada 5 gün, günde 8 saat olmak üzere 1 yıllık planlama periyodunda çalıştırılmıştır. Simülasyon modellerinin doğruluğu, hazırlanan bu modellerin daha basit ve daha küçük alt modellerinin aşamalı olarak istenen doğruluklarının test edilmesi ile sağlanmıştır. Tüm alt modellerin doğru çalıştıkları tespit edildikten sonra bütünsel modelin doğruluğu test edilmiştir.

Alternatifler için modellerin yaratılmasından sonra, model ve alternatiflerin güvenilir olarak karşılaştırılabilmesi için her bir alternatifin tekrar sayısının bulunması gereklidir. Tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta minimum 10 tekrar çalıştırılmalıdır (Chung, 2003). Tekrar sayısı belirlenirken sabit örneklem büyüklüğü yöntemi ve bağıl hata formülü kullanılmıştır. Bağıl hata tekrar sayısının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Akcan, 2010):

$$n_r^*(\gamma) = \min \left\{ i \geq n : \frac{t_{i-1, 1-\alpha/2} S(n) / \sqrt{i}}{|\bar{X}(n)|} \leq \gamma' \right\} \quad (5.1)$$

$\gamma' = \frac{\gamma}{1 + \gamma}$  düzeltilmiş bağıl hata olmak üzere yukarıdaki formüle;

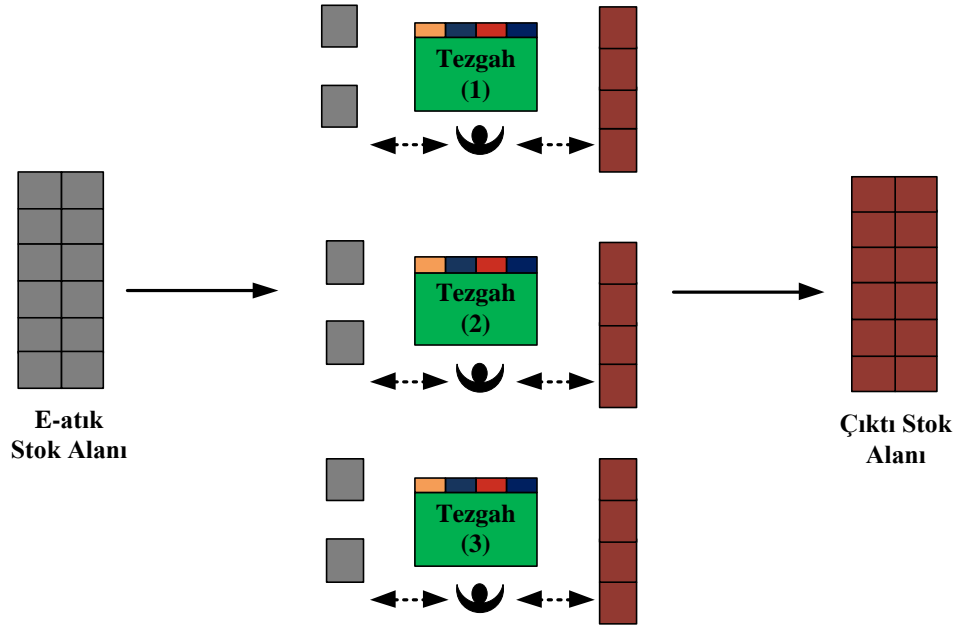
$n$	= Başlangıçta yapılan tekrar sayısı
$i$	= Gerekli tekrar sayısı
$\overline{X}(n)$	= Başlangıçta yapılan $n$ tekrarın ortalaması
$S(n)$	= Başlangıçta yapılan $n$ tekrarın standart sapması
$\alpha$	= Önem düzeyi
$\gamma$	= Bağlı hata değeri

Daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için hem önem düzeyi hem de bağlı hata değerinin % 1-5 arasında olması tercih edilmelidir.  $i = n$  için değerler yerine koyulduğunda bulunan değer düzeltilmiş bağlı hata değerinden küçük veya eşitse başlangıç tekrar sayısı yeterlidir. Aksi takdirde  $i$  değerini arttırarak formülde yeni değerler hesaplanır ve gerekli tekrar sayısı bulunur (Akcan, 2010).

Önerilen yerleşim alternatiflerinin simülasyon modellerinde kullanılmak üzere aşağıda tanımlanan varsayımlar yapılmıştır: (1) Simülasyon modellerinde kullanılmak üzere, demontaj operatörü sayısı, ürün detayları ve operasyon zamanları gibi verilere ihtiyaç vardır. Bu verilerin bazıları paydaş firmadan, bazıları ise literatürdeki araştırmalardan elde edilmiştir; (2) Demontaj işleminde kullanılan ekipmanların planlama dönemi boyunca bozulmadan var olduğu varsayılmıştır; (3) Planlama döneminde yeteri kadar e-atık stoku bulunduğu ve işlem görmesi için sürekli sisteme gönderildiği varsayılmıştır; (4) Planlama aşamasında referans olarak seçilen e-atık tiplerinin malzeme temel bileşenleri ve depoda bulunan miktarları tüm modeller için eşittir; (5) Aynı gruptaki e-atıklar için (örneğin, 17'' monitör ile 19'' monitör) işlem süreleri aynı kabul edilmiştir; (6) Aynı gruptaki e-atıklardan (örneğin, 17'' monitör ile 19'' monitör) elde edilen temel malzeme miktarları aynı kabul edilmiştir; (7) Elde edilen bileşenler sınıflandırma kutularında depolanır ve belirli bir hacme ulaştıkça forkliftler yardımıyla depolara gönderilir; (8) Tüm simülasyon modellerinde sınıflandırma kutuları eşit hacimlidir; (9) Demontaj operasyonları için tüm parametreler, forklift araçlarının sayısı ve hızı (sistemde 1 adet forklift bulunmaktadır) ve konveyör hızları simülasyon modellerinde farklılık göstermemektedir; (10) Operatörler çok çeşitli ürünlerin demontajı ile yüzleşmektedirler. Sonuç olarak demontaj operasyonu sonucunda elde edilen malzemelerin doğru bir şekilde sınıflandırıldığı varsayılmıştır.

### 5.2.1 Senaryo-1: Tek Demontaj İş İstasyonu

Günümüzde birçok demontaj tesisi bu yerleşim şeklini kullanmaktadır. Ele alınan sistemde birbirinden bağımsız 3 tane manuel demontaj iş istasyonu vardır ve PC, CRT TV ve monitör ile LCD TV ve monitörün manuel demontajı yapılmaktadır. Çeşitli e-atıkların demontajına izin veren esnek bir yapıya sahiptir. Bu senaryo alternatif senaryolarla karşılaştırılmak üzere, referans senaryo olarak seçilmiştir. Senaryo-1 için demontaj yerleşim planını gösteren şematik bir diyagram Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17 : Senaryo-1: tek demontaj iş istasyonu

E-atıklar, kutular içerisinde iş istasyonlarına ayrı ayrı teslim edilir. Demontaj tesisi konveyör sistemine sahip değildir. E-atıklar iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda depolanır. İş istasyonlarında demontaj operasyonları için özel ekipmanlar kullanılır. Operatör sırasıyla e-atıkları kutulardan alır, iş istasyonuna getirir, demontajını yapar. Bu sistemde, yer alan iş istasyonlarında operatörler paralel olarak çalışırlar. Operatörlerin her bir hem bağımsız olarak farklı ürünleri hem de hepsi aynı ürün grubunun demontajını yapabilir. Her bir iş istasyonunda, demontaj operasyonlarından sonra, demonte edilen bileşenler çıktı kutularında sınıflandırılırlar. Kutular demonte edilmiş ve ayrılmış bileşenlerle dolduğu zaman, bir forklift gelir ve dolu çıktı kutularını alır, depoya götürür.

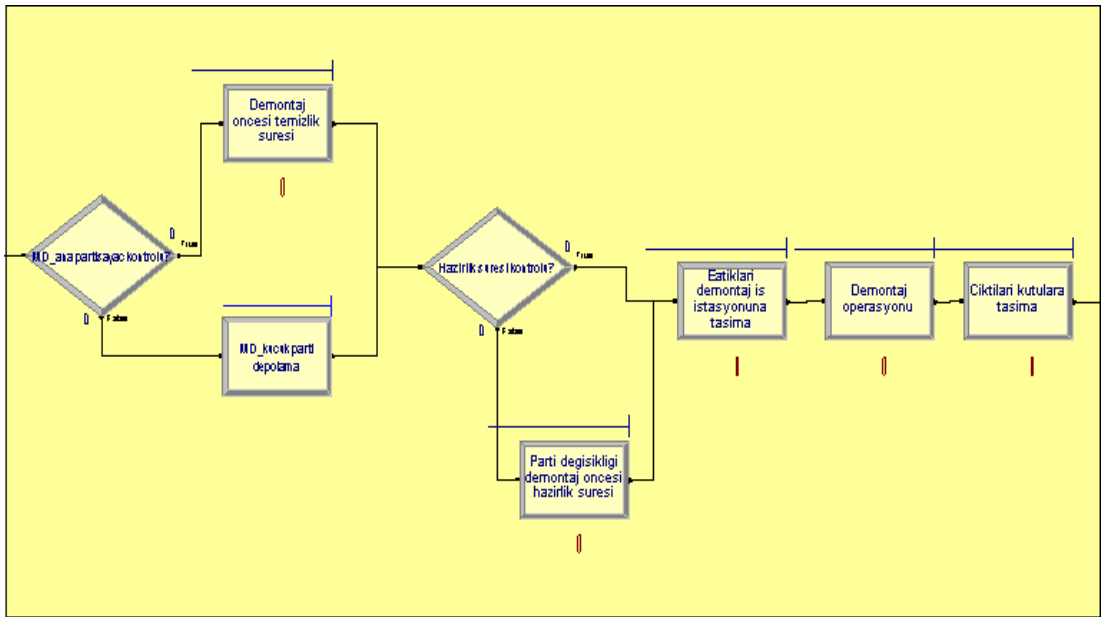




Üretim sistemlerine benzer olarak, ürün grupları değiştiğinde uygulanan gerekli ekipman ve donanımların üretim için hazır hale getirilmesi için ihtiyaç duyulan hazırlık süresi, demontaj sistemlerinde de uygulanmaktadır. Ayrıca, her yeni partide iş istasyonlarına getirilen e-atıkların demontaj işlemine başlamadan önce iş istasyonlarının temizlenmesi ve dağınıkların giderilmesi için belirli bir temizlik süresine ihtiyaç vardır.

Senaryo-1 için simülasyon modelinin çalışma prensibinin ARENA 10.0 programında ara yüzü Şekil 5.19’da sunulmuştur. Simülasyon modelinde, operatörlere-atıkları iş istasyonlarının yanına yerleştirilen kutulardan alır ve demontaj işleminden sonra elde edilen bileşenleri iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutulara bırakır. Her iş istasyonunda, demontajdan sonra, demonte edilen bileşenler çıktı kutularında sınıflandırılırlar. Simülasyon modelinde bu aktiviteler “process” modülleri ile tanımlanmıştır. Prosesler içerisinde ise, operatörlerin e-atıkları alma ve taşıma aktiviteleri “transfer” süresi olarak belirlenmiştir.

Operatörler paralel olarak çalışmaktadır. Kutular demonte edilmiş ve ayrılmış bileşenlerle dolduğu zaman, talep edilen bir forklift gelir ve dolu çıktı kutularını alır. Operatörler yanlarına konumlandırılmış kutulardaki e-atıkların demontajını tamamladıkları zaman ise, forklift yeni bir e-atık kutusunu getirir. Böylece sistem içerisine planlama dönemi boyunca sürekli bir e-atık beslemesi vardır.



Şekil 5.19 : Senaryo-1’de sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)



yeni bir e-atık kutusunu getirir. Sistem içerisine planlama dönemi boyunca sürekli bir e-atık beslemesi vardır.

Bu senaryoda, özel e-atık tiplerinin üzerinde uzmanlaşma ile demontaj operasyonu daha hızlı ve daha kolay yapılabilir. Bu durumda, öğrenme eğrisi kullanılarak demontaj sürelerinin yeniden düzenlenmesi beklenebilir. Özel e-atık tiplerinin bir istasyonda işlenmesi ile iş istasyonlarındaki dağınıklık azaltılabilir ve operatörler demontaj operasyonlarından elde edilen bileşenlerin sınıflandırılmasında daha az bileşen türü ile başa çıkmak zorundadır. Böylece, sınıflandırma operasyonları için gerekli çaba ve sürenin azaltılması sağlanabilir.

Özel e-atık tiplerinin üzerinde uzmanlaşma sonucunda, öğrenme eğrisi kullanılarak demontaj sürelerinin yeniden düzenlenmiştir.

### 5.2.2.1 Öğrenme Eğrisi

Operatörler bir işi yaparken tecrübe kazanırlar ve ilgili işi ileride daha hızlı yapabilirler. Bir öğrenme eğrisi, bir görevi gerçekleştirirken bir gelişim oranını içeren bir görevin kümülatif tekrarlamalarının fonksiyonu olarak, örneğin; zaman veya maliyetteki azalma, azalan bir trende sahip grafikte tanımlanabilir. Tablo 5.6 çeşitli endüstri ve görevler için ortalama öğrenme eğrisinde eğimleri göstermektedir (NASA, 2008).

Tablo 5.6 : Çeşitli endüstrilerde öğrenme eğrisi eğimi (NASA, 2008)

ENDÜSTRİ	ORAN	ENDÜSTRİ	ORAN
Uzay endüstrisi	% 85	Karmaşık makine araçları	% 75-85
Elektronik üretimi	% 90-95	Talaşlı imalat ve pres	% 90-95
Tekrarlı elektronik işlemler	% 75-85	Tekrarlı kaynak işlemleri	% 90
Hammadde	% 93-96	Satın alınan parçalar	% 85-88

İki çeşit öğrenme eğrisi vardır: kümülatif ortalama modeli ve birim zaman modelidir. Kümülatif ortalama modeli ya da Wright modeli T.P. Wright tarafından 1936 yılında geliştirilmiştir. Birim zaman (veya maliyet) veya Crawford modeli ise, Stanford araştırma grubu tarafından geliştirilmiştir. İki yaklaşım arasındaki ana farklılık, isimlerinden de belli olduğu gibi, kümülatif ortalama modeli, bir referans değer için tüm eğrinin ortalama birim değerini hesaplarken, birim zaman modeli, özel bir noktada birim değeri hesaplar. Log-lineer model, Stanford-B modeli, De Jong modeli, S eğrisi modeli gibi kullanılan diğer öğrenme eğrisi modelleridir (NASA, 2008).

Öğrenme eğrisi modelleri ve uygulamaları hakkında detaylı bilgi için Anzanello ve Fogliatto (2011) tarafından yapılan araştırma çalışması incelenebilir. Bu tez çalışmasında operatörlerin öğrenme eğrisi, kümülatif ortalama modeli (T.P. Wright, geleneksel yaklaşımı) kullanılarak oluşturulmuştur (Wright, 1936):

$$Y_x = A \times X^b \quad (5.2)$$

$Y_x$  = Bir Y ürününün x. birimini üretmek için gereken ortalama zaman

$A$  = 1. Birimin üretilmesi için harcanan zaman

$X$  = Kümülatif üretim miktarı

$b$  =  $\log r / \log 2$

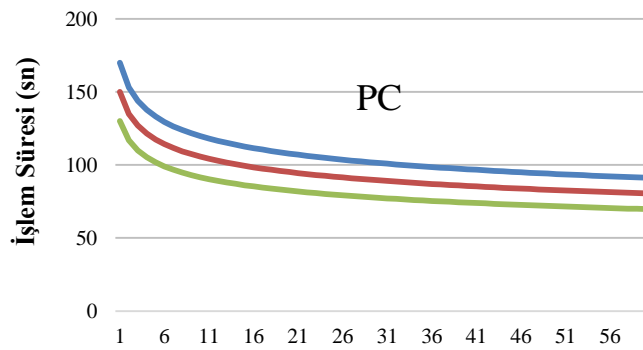
$r$  = Öğrenme hızı

$1-r$  = Gelişim oranı

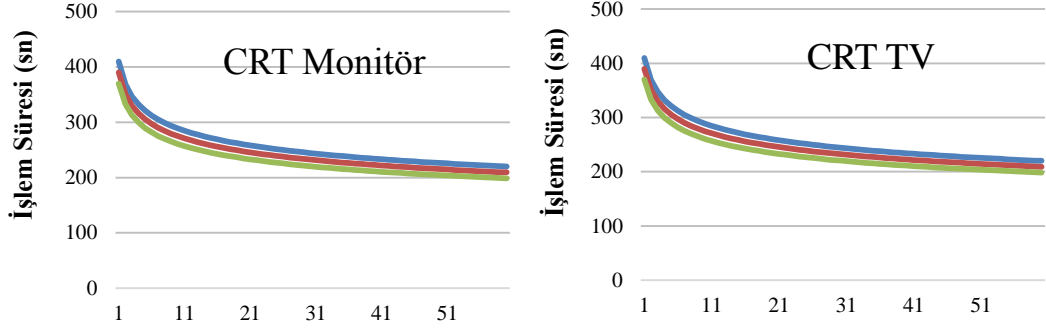
Bu tez çalışmasında operatörlerin öğrenme eğrisi, kümülatif ortalama modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuç olarak,  $P_i$ :  $i$ . e-atık tipi için manuel demontaj süresini temsil etmek üzere, demontaj süreleri üçgensel sayılarla ( $P_{1i}, P_{2i}, P_{3i}$ ) şeklinde ifade edilmiştir. Öğrenme eğrisini de etkisi hesaba katarak elde edilen yeni zamanlar eşitlik 5.3'de verildiği gibi hesaplanır.

$$Y_x = (A \times X_1^b, A \times X_2^b, A \times X_3^b) \quad (5.3)$$

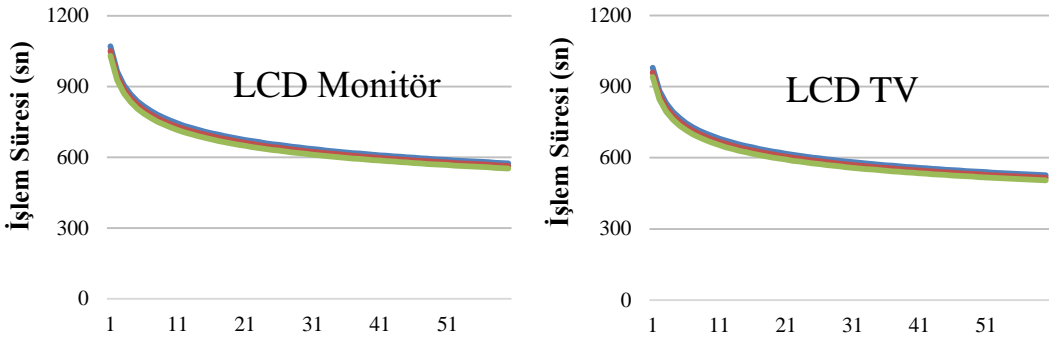
PC, CRT TV ve monitör ve LCD TV ve monitör için operatörlerin % 90 (0,9) öğrenme hızı ile çalıştığı varsayımı altında öğrenme eğrisinin uygulanması ile demontaj işlem sürelerinin değişimi Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.21 : PC için demontaj operatörü öğrenme eğrisi



Şekil 5.22 : CRT TV ve monitör için operatör öğrenme eğrisi



Şekil 5.23 : LCD TV ve monitör için demontaj operatörü öğrenme eğrisi

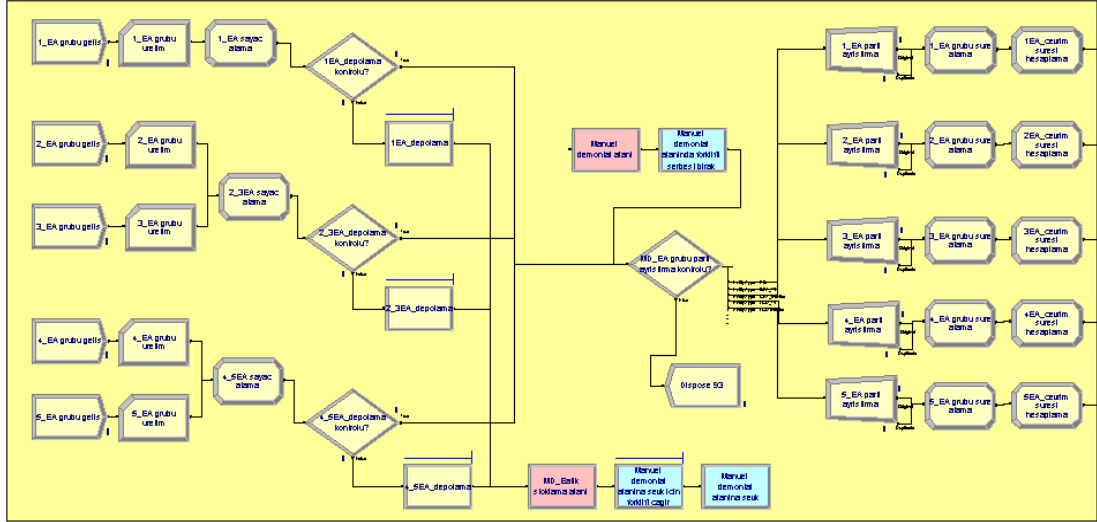
### 5.2.2.2 Senaryo-2 Simülasyon Modeli

Senaryo-2 için demontaj operasyonları, ARENA 10.0 programı kullanılarak modellenmiştir. E-atıklar üç gruba sınıflandırılmıştır:

- 1) Kişisel bilgisayar (PC),
- 2) CRT TV ve monitör,
- 3) LCD TV ve monitör.

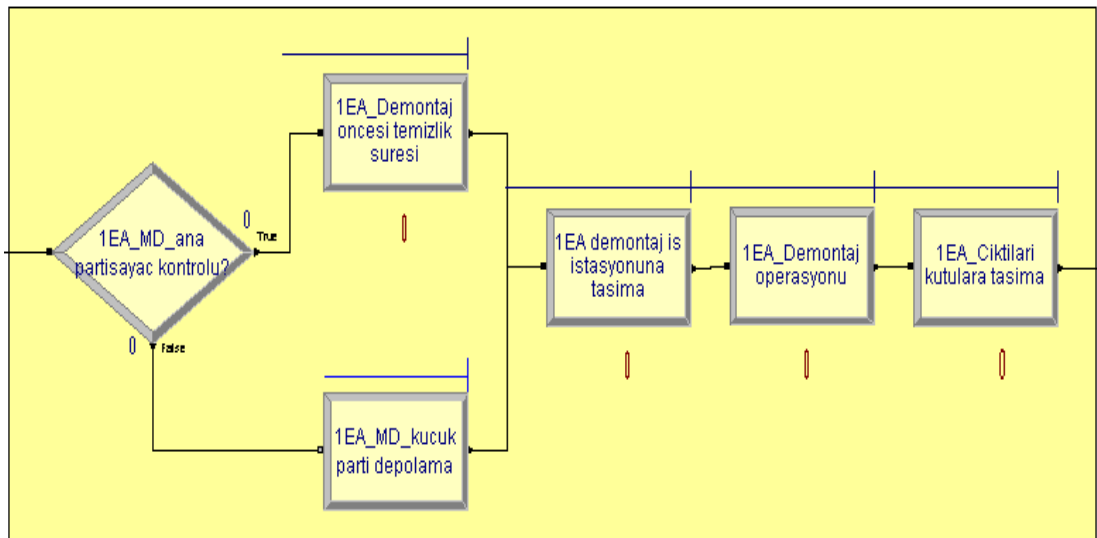
Gruplanan e-atıklar, atandıkları iş istasyonuna rassal olarak gönderilir ve forklift ile iş istasyonlarına taşınır. Dolayısıyla sistemde, planlama dönemi boyunca ilgili iş istasyonlarına sürekli bir e-atık beslemesi vardır (Bakınız Şekil 5.24).

Bu senaryoda, bir iş istasyonunun kendisine atanmış ürün grubunun demontaj işlemini gerçekleştireceği için ihtiyaç duyduğu özel araçlar iş istasyonunda mevcuttur ve bir hazırlık süresinin uygulanmasına gerek kalmamaktadır. Ancak, her yeni partide iş istasyonlarına getirilen e-atıkların demontaj işlemine başlamadan önce iş istasyonlarının temizlenmesi ve dağınıkların giderilmesi için belirli bir temizlik süresine ihtiyaç vardır.



Şekil 5.24 : Senaryo-2'de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)

Gruplandırılan e-atıklar sisteme, demontaj işleminden sorumlu olan iş istasyonlarına forkliftler ile taşınmaktadır. Demontaj operatörleri ilgili e-atıkları iş istasyonlarının yanına yerleştirilen kutulardan alır ve demontaj işleminden sonra elde edilen bileşenleri iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutulara bırakır. Her bir iş istasyonunda, demontaj operasyonlarından sonra, demonte edilen bileşenler çıktı kutularında sınıflandırılır. Bu durumda, her bir operatör için simülasyon modelinde bu aktiviteler “process” modülleri ile tanımlanmıştır. Prosesler içerisinde ise, operatörlerin e-atıkları alma ve taşıma aktiviteleri “transfer” süresi olarak belirlenmiştir. Senaryo-2'de simülasyon modelinin çalışma prensibi Şekil 5.25'de verilmiştir.

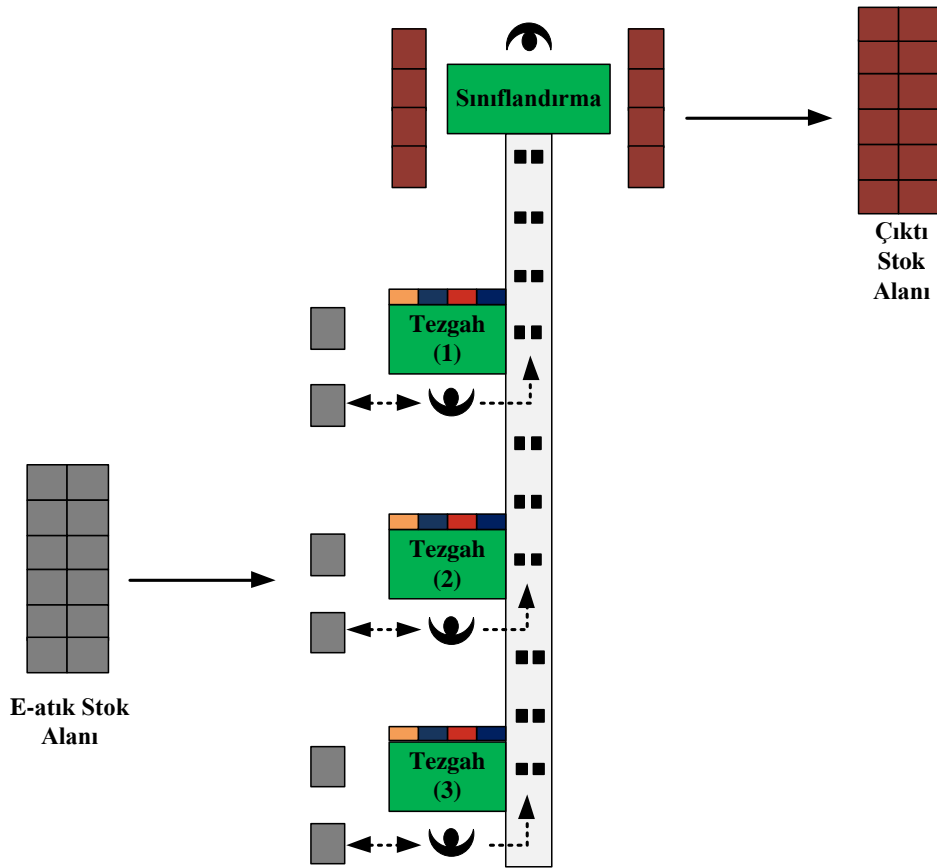


Şekil 5.25 : Senaryo-2'de PC grubu için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

Kutular demonte edilmiş ve ayrılmış bileşenlerle dolduğu zaman, talep edilen bir forklift gelir ve dolu çıktı kutularını alır. Operatörler, yanlarına konumlandırılmış kutulardaki e-atıkların demontajını tamamladıkları zaman, forklift yeni bir sınıflandırılmış e-atık kutusunu ilgili iş istasyonuna getirir.

### 5.2.3 Senaryo-3: Hat Yerleşimi - Yakınsak Malzeme Akışı

Bu senaryoda, demontaj operasyonlarından elde edilen bileşenlerin taşınması için düz bir hat yerleşimi düşünülmüştür. Sistemde, operatör iş istasyonunun yanında bulunan kutulardan e-atıkları alır, demontajını yapar ve bileşenleri yan tarafta bulunan konveyör hat üzerine bırakır. Hattın sonunda merkezi sınıflandırma operatörü çıkan demontaj bileşenlerini sınıflandırır ve çıktı kutularına yerleştirir. Yakınsak malzeme akışının sağlandığı hat yerleşimi için e-atıkların demontajında yerleşimi gösteren şematik bir diyagram Şekil 5.26'da verilmiştir.



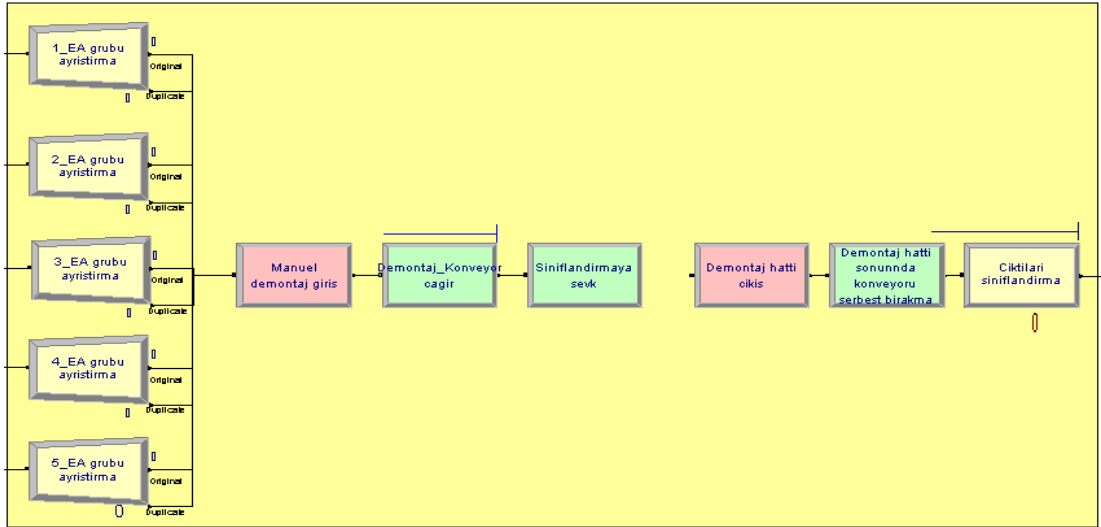
Şekil 5.26 : Senaryo-3: Hat Yerleşimi - Yakınsak Malzeme Akışı

Demontajı tamamlanan atıklardan elde edilen bileşenlerin taşınması için bir konveyör hattı uygulanması, operatörün harcadığı katma değersiz süreleri azaltılıp ve böylece demontaj için harcanan toplam zamanı arttırılabilir.





Sistemde, demontaj operasyonlarından önce iş istasyonlarında ürün grupları değiştiğinde bir hazırlık süresi ve her yeni partide bir temizlik süresine ihtiyaç vardır. E-atıklar istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda depolanır. Operatörler, iş istasyonunun yanında bulunan kutulardan e-atıkları alırlar, e-atıkların demontajını yaparlar ve bileşenleri iş istasyonlarının yan tarafta bulunan konveyör üzerine bırakırlar. Operatörler yanlarına konumlandırılmış kutulardaki e-atıkların demontajını tamamladıkları zaman, forklift yeni bir e-atık kutusunu getirir. Simülasyon modelinde, alma, demontaj ve taşıma aktiviteleri “process” modülleri ile tanımlanmıştır. Prosesler içerisinde ise, operatörlerin e-atıkları alma ve taşıma aktiviteleri “transfer” süresi olarak belirlenmiştir. Bileşenler hat üzerinde taşınır ve hattın sonunda merkezi sınıflandırma operatörü çıkan demontaj parçalarını sınıflandırma kutulara yerleştirir. Sistemde, bileşenlerin taşınması “station”, “access”, “convey” ve “exit” modülleri kullanılarak modellenmiştir. Sınıflandırma operatörü faaliyetlerini “process” modülü göstermektedir. Sistemde planlama dönemi boyunca sürekli bir e-atık beslemesi vardır (Bakınız Şekil 5.28).

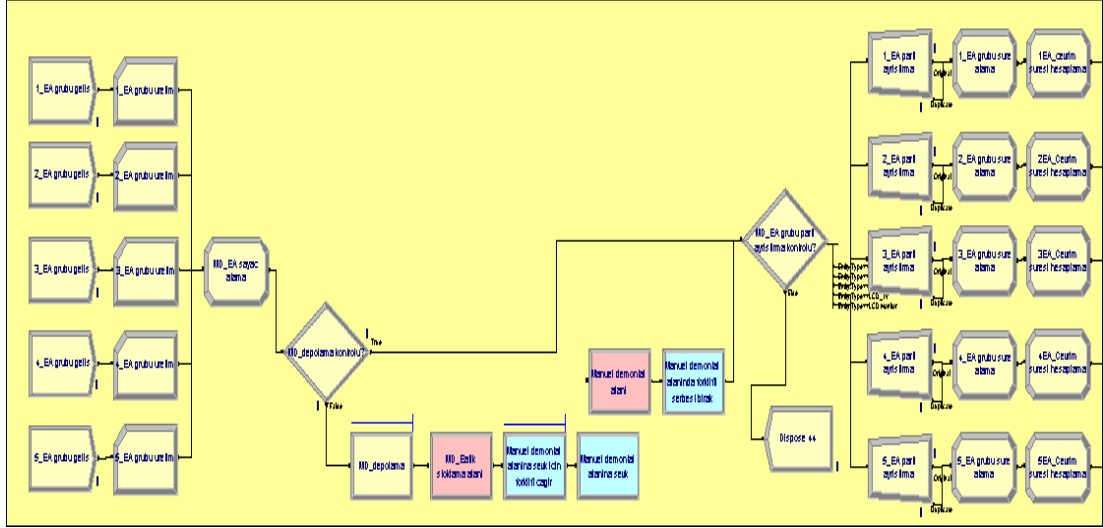


Şekil 5.28 : Senaryo-3’de sınıflandırma operatörü için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

#### 5.2.4 Senaryo-4: Hat Yerleşimi - Iraksak Malzeme Akışı

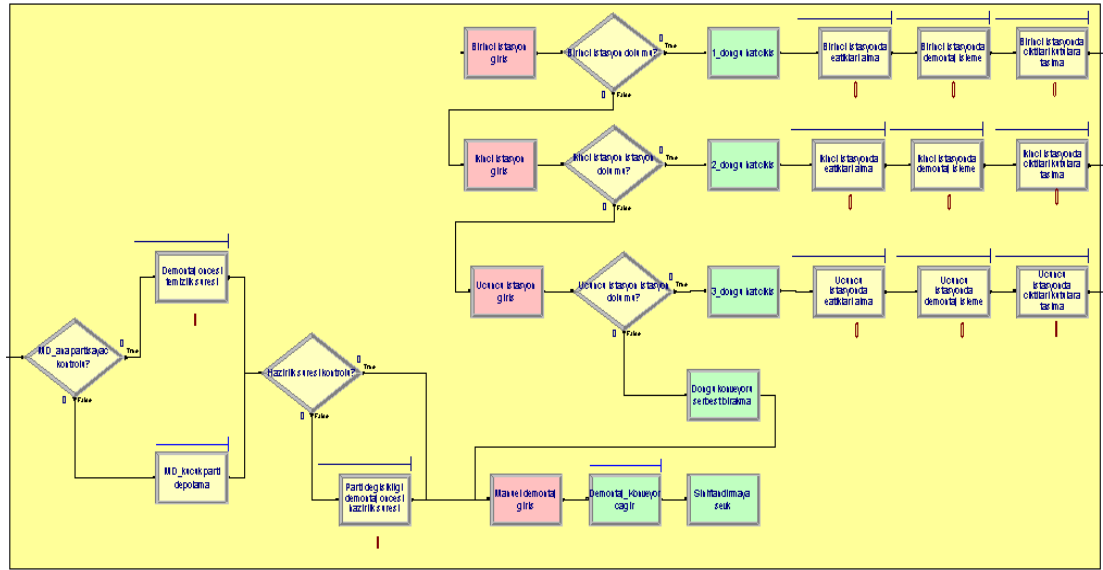
Bu yerleşimde, e-atıklar sisteme bir konveyör üzerinden girer ve iş istasyonlarından bileşen formunda ayrılır. Operatör sürekli dönen bir kapalı döngü hat üzerinde e-atıkları alır, demontajını yapar ve demontaj sonrası elde ettiği bileşenleri iş istasyonunun yanındaki kutulara taşır. Kutular dolduğu zaman bir forklift tarafından sınıflandırma alanına taşınır.





Şekil 5.30 : Senaryo-4’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)

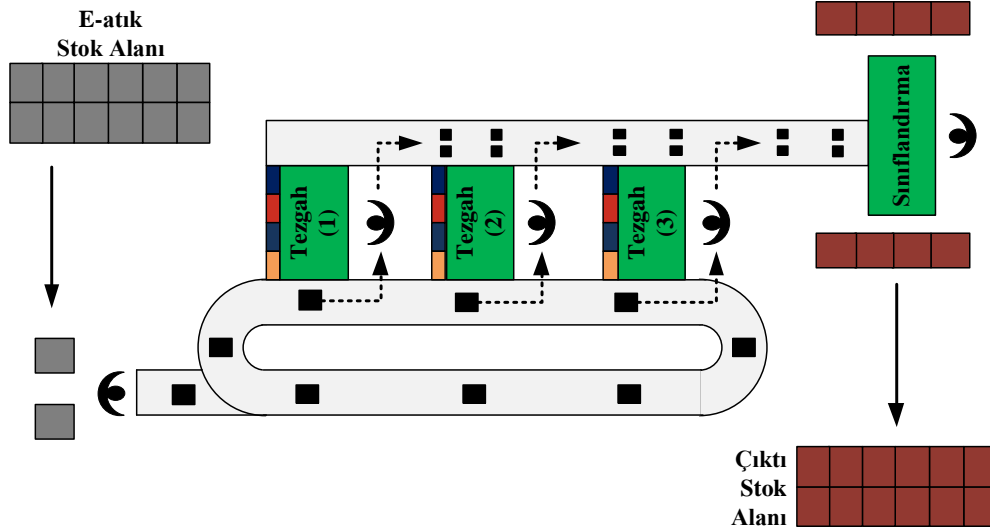
E-atıklar istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda depolanır. E-atıklar kapalı döngü konveyör bandı üzerinde sisteme girerler ve konveyör üzerinde iş istasyonlarına taşınır. E-atıkların konveyör ile iş istasyonlarına taşınması, “station”, “access”, “convey” ve “exit” modülleri kullanılarak modellenmiştir. Operatör, dönen hat üzerinde e-atıkları alır, demontajını yapar ve yanındaki kutulara taşır. Simülasyon modelinde, operatörlerin demontaj ve bileşenleri taşıma aktiviteleri “process” modülleri ile tanımlanmıştır. Kutular dolduğu zaman bir forklift tarafından sınıflandırma alanına taşınır. Kapalı döngü hat üzerine, yükleme operatörü tarafından planlama dönemi boyunca sürekli bir ürün beslemesi vardır (Bakınız Şekil 5.31).



Şekil 5.31 : Senaryo-4’de kapalı döngü hat için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

### 5.2.5 Senaryo-5: Hat Yerleşimi - Iraksak ve Yakınsak Malzeme Akışı

Bu yerleşim planı, Opalić ve diğ. (2004) ve Opalić ve diğ. (2010) tarafından hazırlanan tüketici ekipmanları demontaj tesisi konseptinden esinlenerek hazırlanmıştır. Senaryo-5’de e-atıkların demontajı için yerleşim planını gösteren şematik bir diyagram Şekil 5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.32 : Senaryo-5: hat yerleşimi: iraksak ve yakınsak malzeme akışı

Bu yerleşim planında, biri e-atıkların iş istasyonlarına biri de bileşenler sınıflandırma operatörlerine taşınmasını sağlayan ve paralel çalışan iki hattın meydana gelmiştir. İş istasyonlarında operatörler sürekli bir dairesel konveyör hattı ile beslenir. Böylece, planlama dönemi boyunca operatörlerin harcadığı katma değersiz süreler; e-atıkların iş istasyonlarına taşınması işlemi kapalı döngü hat ile ve bileşenlerin taşınması ise düz hat ile giderilmeye çalışılmıştır. Bu yerleşim planı ile, malzeme taşıma verimliliğinin ve dolayısıyla operatörlerin demontaj hızının artırılması planlanmıştır.

#### 5.2.5.1 Senaryo-5 Simülasyon Modeli

Bu durumda hazırlanan simülasyon modeli, senaryo-3’ün bileşenlerin taşınması için hat yerleşimi mantığının ve senaryo-4’ün operatörlerin kapalı döngü dairesel konveyör hattı ile beslenmesi mantığının kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Simülasyon modelinde e-atıklar sınıflandırılmış kutular içerisinde sisteme rastgele giriş yapmaktadır ve forklift ile iş istasyonlarına taşınmaktadır. Diğer senaryo simülasyonlarına benzer olarak, iş istasyonlarından ürün grupları değiştiğinde bir hazırlık süresi ve her yeni partide bir temizlik süresine ihtiyaç vardır.

## 6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Potansiyel yerleşim alternatifleri ARENA 10.0 simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Hazırlanan simülasyon modelleri, haftada 5 gün ve günde 8 saat olmak üzere 1 yıllık planlama periyodunda çalıştırılmıştır. Simülasyon modelleri başlangıçta 10 tekrarlı çalıştırılmış ve tekrar sayıları test edilmiştir. Sonuç olarak, simülasyon modellerinin sonuçları grafikler, tablolar ve sözel ifadelerle tartışılmış ve karşılaştırılmıştır.

### 6.1 Senaryo-1 Simülasyon Sonuçları

Bu senaryo, tek manuel demontaj iş istasyonlarında operasyonların paralel olarak yürütüldüğü yerleşim planıdır ve referans senaryo olarak belirlenmiştir. Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, operatörlerin kaynak kullanım oranları ortalama % 96 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma ihtiyaçlarını karşılayacak kapasiteye sahiptir.

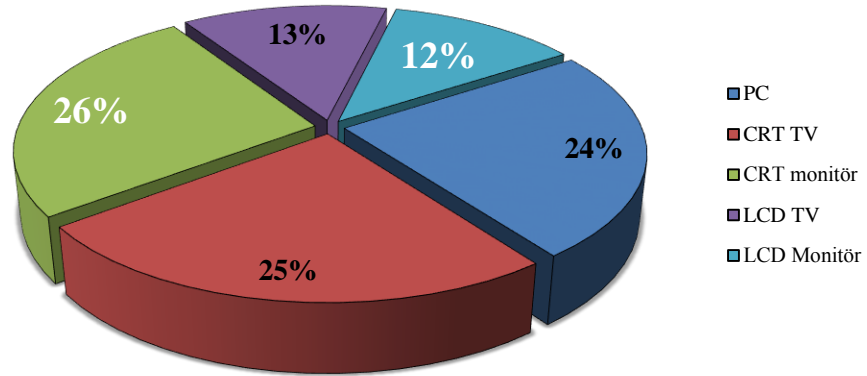
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri, kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Bağlı hata ( $\gamma$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 6.1 : Senaryo-1 için tekrar sayısının yeterliliği

TEKRAR SAYISI	1.OPERATÖR	2.OPERATÖR	3.OPERATÖR
1. Tekrar	0,9580465	0,9580367	0,9580081
2. Tekrar	0,9555201	0,9555539	0,9554749
3. Tekrar	0,9571801	0,9571475	0,9571523
4. Tekrar	0,9553134	0,9552917	0,9552836
5. Tekrar	0,9581302	0,9581151	0,9581224
6. Tekrar	0,9584886	0,9585305	0,9585205
7. Tekrar	0,9592724	0,9592840	0,9592759
8. Tekrar	0,9568951	0,9569143	0,9569361
9. Tekrar	0,9565899	0,9565929	0,9566246
10. Tekrar	0,9571828	0,9572665	0,9572184
$\bar{X}(n)$	0,9572619	0,9572733	0,9572617
$S(n)$	0,0012625	0,0012652	0,0012724
$\gamma'$	0,0196078	0,0196078	0,0196078
$n_r^*(\gamma)$	0,0009435	0,0009454	0,0009508

Tablo 6.1’de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan modelin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Simülasyon modelinde, e-atıklar demontaj sisteme rassal olarak giriş yapmaktadır. Senaryo-1’de toplam 35.721 adet e-atık işlenmiştir. Sistemde, e-atıklar bazında ortalama olarak; 8.558 adet PC, 8.921 adet CRT TV, 9.263 adet CRT monitör, 4.666 adet LCD TV, 4.313 adet LCD monitörün işlendiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.1, senaryo-1 için planlama döneminde işlem gören e-atıkların yüzde dağılımı göstermektedir. Sonuçlara göre, işlenen toplam e-atığın % 24’ü kişisel bilgisayar; % 25’i CRT televizyon; % 26’sı CRT monitör; % 13’ü LCD televizyon ve % 12’si LCD monitörden oluşmaktadır.



Şekil 6.1 : Senaryo-1’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

Firmanın toplam geliri, demontaj operasyonları sonunda elde edilen bileşenlerin miktarı ve satış fiyatlarının çarpımı ile elde edilir. Eşitlik (6.1) bir e-atık türü için toplam gelirin formülünü göstermektedir.

$$TG = \sum_{i=1}^n A_{ji} \times S_i \quad (6.1)$$

$i$  = bileşen türü (PCB, plastik, metal vs.)

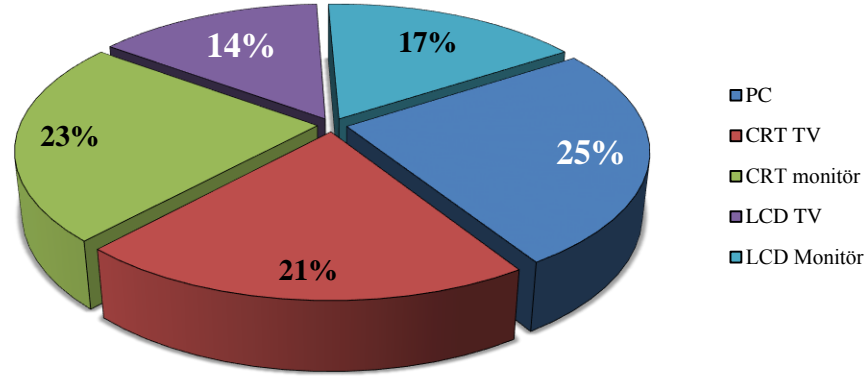
$j$  = e-atık türü (PC, CRT TV ve monitör, LCD TV ve monitör)

$A_{ij}$  =  $i$ . üründen elde edilen  $j$ . bileşen miktarı

$S_i$  =  $i$ . bileşenin satış fiyatı

Senaryo-1’de 35.721 adet e-atığın işlenmesi sonucunda ortalama olarak 625.265 kg geri dönüştürülebilir bileşen elde edilmiştir. Planlama dönemi boyunca bileşenlerin

satışından elde edilen toplam gelir ise ortalama 174.204 Euro olarak belirlenmiştir. Şekil 6.2, senaryo-1 için planlama döneminde elde edilen gelirin e-atık bazında yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, elde edilen toplam gelirin, % 25'i kişisel bilgisayar; % 21'i CRT televizyon; % 23'ü CRT monitör; 14'ü LCD televizyon ve % 17'si LCD monitörün demontajından elde edilmiştir.



Şekil 6.2 : Senaryo-1'de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%)

Senaryo-1 yerleşim planında katma değer yaratmayan aktiviteler, operatörün e-atıkları sınıflandırma kutularından alma ve elde ettikleri bileşenleri sınıflandırma kutularına taşıma işlemleridir. Bu durumda demontaj iş istasyonunun yanında konumlandırılmış e-atıklar demonte olmak için beklerken, operatör malzeme taşıma aktiviteleri iş istasyonu zamanını verimsiz olarak değerlendirmektedir.

Simülasyon modeli sonucunda, bir e-atığın taşınması için ortalama 59,99 saniye ve e-atığın demontajından elde edilen bileşenlerin sınıflandırma kutularına taşınması için geçen süre ortalama 59,97 saniye olarak tespit edilmiştir. Bu durumda bir e-atığın demontajı için harcanan katma değersiz süre atık başına 119,96 saniye olarak hesaplanmıştır. Planlama dönemi boyunca sistemde 35.721 e-atığın manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan katma değersiz süre ise 1190,30 saat olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile katma değersiz süreler, 1 yıllık dönemde, toplam çalışma süresinin yaklaşık % 56'sını oluşturmaktadır.

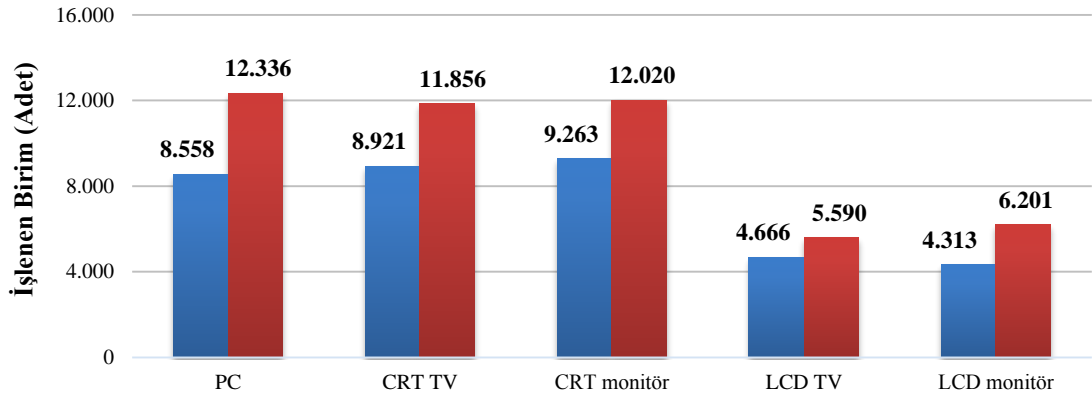
### 6.1.1 Senaryo-1(a) Simülasyon Sonuçları

Senaryo-1 için üzerinde manuel demontaj operatörü sayısının bir arttırılması sonucu sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, operatörlerin kaynak kullanım oranları % 96 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma hareketlerine yetecek kapasiteye sahiptir. Başlangıçta 10 tekrarlı çalıştırılan modelin tekrar sayısının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Manuel demontaj operatörü sayısının artmasıyla birlikte, iş istasyonlarında işlem gören e-atık sayısı ortalama 35.721 birimden yaklaşık olarak % 34'lük bir artış ile ortalama 48.004 birime yükselmiştir. Bu durum, bileşen satışından elde edilen gelire yansımıştır. Bileşen satışından elde edilen gelir senaryo-1'de ortalama 174.204 Euro iken, senaryo-1(a)'da bu rakam yaklaşık % 28'lik bir artışla 224.398 Euro'ya yükselmiştir. Şekil 6.3, planlama dönemi boyunca senaryo-1 ve senaryo-1(a)'da işlenen ortalama e-atık miktarlarını göstermektedir.



Şekil 6.3 : Senaryo-1 ve senaryo-1(a)'da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarlarının karşılaştırılması

## 6.2 Senaryo-2 Simülasyon Sonuçları

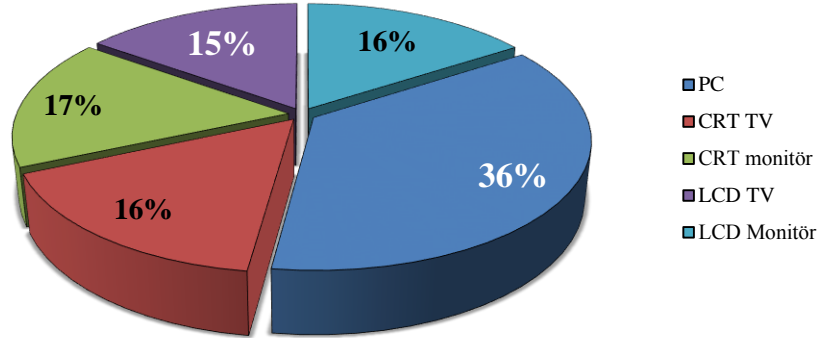
Senaryo-2'de sistem içerisinde farklı e-atık grupları oluşturulmuş ve simülasyon modelleri çalıştırılmıştır. Bu durumda, operatörlerin sürekli aynı ürünün demontajını yapmasıyla, öğrenme eğrisi faktörü ile ürünlerin daha hızlı demontajını yapması beklenebilir. Manuel demontajı yapılan e-atıkların grupları; (1) Kişisel bilgisayar (PC) demontajı, (2) CRT TV ve monitör demontajı ve (3) LCD TV ve monitör demontajı. Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, operatörlerin kaynak kullanım oranları % 91-94 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma ihtiyaçlarını karşılayacak kapasiteye sahiptir.

Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatör kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Bağlı hata ( $\gamma$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 6.2 : Senaryo-2 için tekrar sayısının yeterliliği

TEKRAR SAYISI	1.OPERATÖR	2.OPERATÖR	3.OPERATÖR
1. Tekrar	0,9329144	0,9410404	0,9188271
2. Tekrar	0,9329436	0,9407947	0,9195077
3. Tekrar	0,9310195	0,9406893	0,9184568
4. Tekrar	0,9330528	0,9412827	0,9202341
5. Tekrar	0,9319007	0,9401713	0,9189944
6. Tekrar	0,9330956	0,9415907	0,9176444
7. Tekrar	0,9327407	0,9414309	0,9193702
8. Tekrar	0,9325861	0,9411397	0,9187042
9. Tekrar	0,9315768	0,9407437	0,9177476
10. Tekrar	0,9326075	0,9410596	0,9204985
$\bar{X}(n)$	0,9324438	0,9409943	0,9189985
$S(n)$	0,0007053	0,0004123	0,0009417
$\gamma'$	0,0196078	0,0196078	0,0196078
$n_r^*(\gamma)$	0,0005411	0,0003134	0,0007331

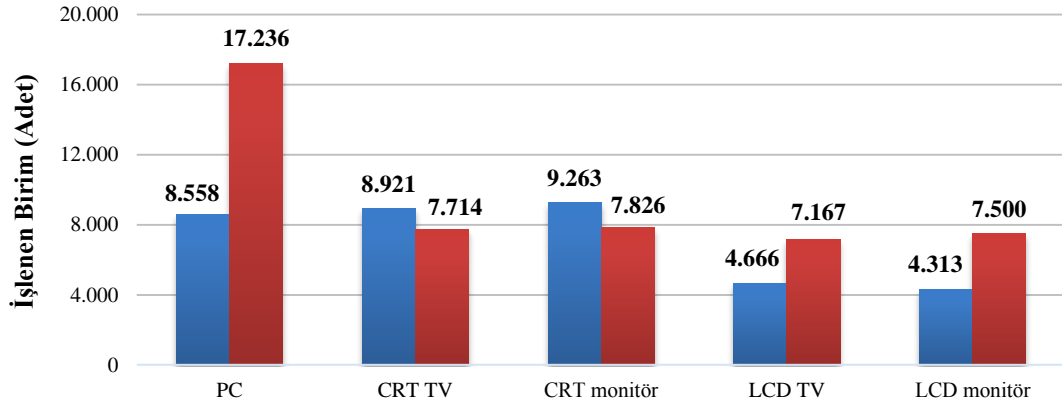
Tablo 6.2'de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan modelin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.4 : Senaryo-2'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

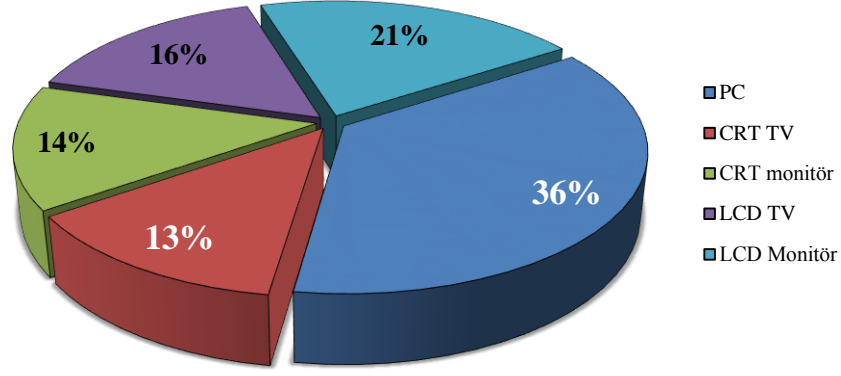
Senaryo-2 için simülasyon modelinin çalıştırılması durumunda toplam 47.444 adet e-atık işlenmiştir. E-atıklar bazında ortalama olarak; 17.236 adet PC, 7.714 adet CRT TV, 7.826 adet CRT monitör, 7.167 adet LCD TV, 7.500 adet LCD monitörün işlendiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.4, senaryo-2 için planlama döneminde işlem gören e-atıkların yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, toplam işlenen e-atığın % 36'sı kişisel bilgisayar; % 16'sı CRT televizyon; % 17'si CRT monitör; % 15'i LCD televizyon ve % 16'sı LCD monitörden oluşmaktadır.

Özel e-atık tiplerinin üzerinde tekrarlı işlemlerin artması ve bunun sonucunda uzmanlaşma ile demontaj operasyonun daha hızlı yapılır. Seçim işlemi sonucunda aynı süre zarfında demontaj hızının düşmesiyle daha fazla atık işlenmiştir. Buna göre, senaryo-1'e kıyasla, birinci grup olan PC'lerin toplam demontaj olan miktarı 2 katına çıkmış yani yaklaşık % 100'lük bir artış sağlamıştır. İkinci grup CRT TV ve monitörlerin toplam demontaj miktarları % 17'lik bir azalma görülmüştür. Üçüncü grup LCD TV ve monitörlerin toplam işlenen miktarlarında yaklaşık % 63'lük bir artış görülmektedir. Sonuç olarak, toplam işlenen e-atık miktarı ise senaryo-1'de 35.721 adet iken, senaryo-2'de bu rakam 47.444 adete yükselmiştir. Böylece toplam işlenen e-atık miktarında yaklaşık % 33'lük bir artış gözlemlenmiştir (Bakınız Şekil 6.5).



Şekil 6.5 : Senaryo-1 ve senaryo-2'de e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarlarının karşılaştırılması

E-atıkların gruplandırılması kararının alınması sonucunda, bileşen satışında elde edilen gelir ortalama % 39'lük bir artış göstermektedir. Toplam gelirdeki bu artışın ana nedeni, içerisinde değerli madde ve bileşenleri içeren PC'lerin demonte olan sayısının artışına bağlanabilir. Diğer bir ifade ile, bölüm 5.1.2.'de tanımlandığı üzere PC'lerin demontajından elde edilen gelir, içerisinde tehlikeli madde ihtiva eden ve çevresel ve yasal nedenlerle işlenmek zorunda olan diğer dört e-atık türünden daha fazladır. Bu durum, elde edilen toplam gelire yansımıştır. 47.444 adet e-atığın işlenmesi sonucunda ortalama olarak 691.317 kg geri dönüştürülebilir bileşen elde edilmiştir. Planlama dönemi boyunca bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ise ortalama 242.028 Euro olarak belirlenmiştir. Şekil 6.6, planlama dönemi boyunca elde edilen gelirin e-atık bazında yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, toplam gelirin, % 36'sı kişisel bilgisayar; % 13'i CRT televizyon; % 14'ü CRT monitör; 16'sı LCD televizyon ve % 21'i LCD monitörden elde edilmiştir.



Şekil 6.6 : Senaryo-2’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%)

Simülasyon modeli sonucunda, bir e-atığın taşınması için ortalama 59,99 saniye ve e-atığın demontajından elde edilen bileşenlerin sınıflandırma kutularına taşınması için geçen süre ortalama 60,01 saniyedir. Bu durumda bir e-atığın demontajı için gerekli olan katma değersiz süre ürün başına 120 saniyedir. Planlama dönemi boyunca sistemde 47.444 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan katma değersiz süre ise 1581,47 saat olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile katma değersiz süreler, 1 yıllık planlama döneminde, toplam çalışma süresinin yaklaşık % 75’ini oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, senaryo-2’deki yerleşim planında, e-atıkların sınıflandırılarak sisteme alınması ve uzmanlaşmanın sağlanması ile demontaj hızı artırılmış ve bunun sonucunda demontaj süresinin düşmesiyle daha fazla atık işlenmiştir. Ancak, senaryo-1’e benzer olarak, operatörlerin birimlerin demontajı için, e-atıkların kaldırılması ve yerleştirilmesi gibi malzeme yükleme aktiviteleri ile zamanın çoğunu harcadığı tespit edilmiştir.

### 6.3 Senaryo-3 Simülasyon Sonuçları

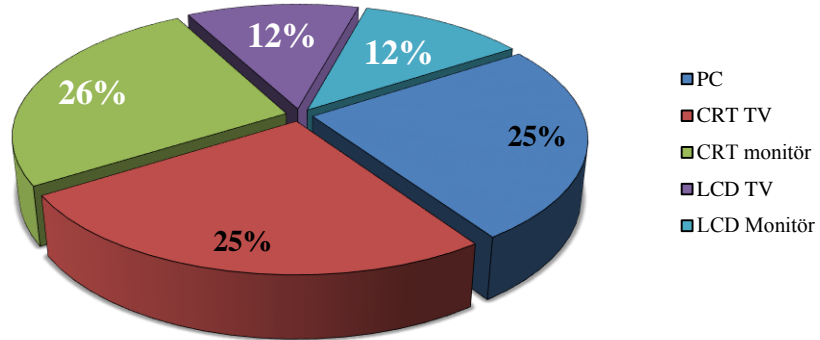
Demontajı tamamlanan bileşenlerin taşınması için bir konveyör uygulayarak, operatörün harcadığı katma değersiz süreleri azaltılıp ve böylece demontaj için harcanan toplam zamanın artırılması amaçlanmıştır. Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, demontaj operatörlerin kaynak kullanım oranları % 96 ve sınıflandırma operatörünün kaynak kullanım oranı ise % 54 civarında belirlenmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma ihtiyaçlarını karşılayacak kapasiteye sahiptir.

Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatör kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Bağlı hata ( $\gamma$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 6.3 : Senaryo-3 için tekrar sayısının yeterliliği

TEKRAR SAYISI	1.OPERATÖR	2.OPERATÖR	3.OPERATÖR	SINIFLANDIRMA
1. Tekrar	0,9597431	0,9597837	0,9597338	0,5470229
2. Tekrar	0,9592603	0,9592794	0,9592893	0,5510422
3. Tekrar	0,960846	0,9608201	0,9608349	0,5274098
4. Tekrar	0,9595741	0,9595482	0,9595625	0,5418829
5. Tekrar	0,9593000	0,9592368	0,9592625	0,5303506
6. Tekrar	0,9607794	0,9607618	0,9607311	0,5342830
7. Tekrar	0,9593603	0,9593515	0,9593646	0,5464839
8. Tekrar	0,9605305	0,9605038	0,9605186	0,5370331
9. Tekrar	0,9595442	0,9595316	0,9595221	0,5467939
10. Tekrar	0,9594834	0,9594718	0,9594887	0,5404318
$\bar{X}(n)$	0,9598421	0,9598289	0,9598308	0,5402734
$S(n)$	0,0006257	0,0006223	0,0006164	0,0078567
$\gamma'$	0,0196078	0,0196078	0,0196078	0,0196078
$n_r^*(\gamma)$	0,0004663	0,0004638	0,0004594	0,0104027

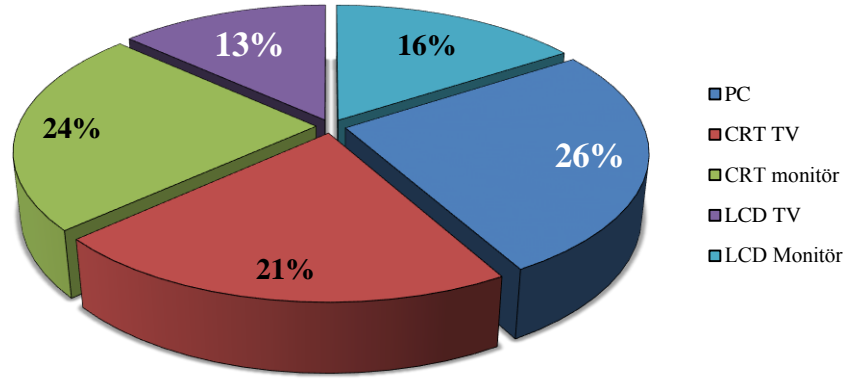
Tablo 6.3'de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan modelin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.7 : Senaryo-3'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

Senaryo-3 için simülasyon modelinin çalıştırılması durumunda toplam 40.353 adet e-atık işlenmiştir. E-atıklar bazında ortalama olarak; 9.954 adet PC, 10.323 adet CRT TV, 10.530 adet CRT monitör, 4.864 adet LCD TV, 4.682 adet LCD monitörün işlendiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.7, senaryo-3 için planlama döneminde işlem gören e-atıkların yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, toplam işlenen e-atığın % 25'i kişisel bilgisayar; % 25'i CRT televizyon; % 26'sı CRT monitör; % 12'si LCD televizyon ve % 12'si LCD monitörden oluşmaktadır.

40.353 adet e-atığın işlenmesi sonucunda ortalama olarak 715.302 kg geri dönüştürülebilir bileşen elde edilmiştir. Planlama dönemi boyunca bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ise ortalama 196.109 Euro olarak belirlenmiştir. Şekil 6.8, senaryo-3 için planlama dönemi boyunca elde edilen ortalama gelirin e-atık bazında yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, elde edilen toplam gelirin, % 26'sı kişisel bilgisayar; % 21'i CRT televizyon; % 24'ü CRT monitör; % 13'ü LCD televizyon ve % 16'sı LCD monitörün demontajından elde edilmiştir.



Şekil 6.8 : Senaryo-3’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%)

Simülasyon modeli sonucunda, bir e-atığın taşınması için ortalama 59,91 saniye ve e-atığın demontajından elde edilen bileşenlerin kutulara taşınması için geçen süre ortalama 30,01 saniyedir. Bu durumda bir e-atığın demontajı için gerekli olan katma değersiz süre atık başına ortalama 89,92 saniyedir. Planlama dönemi boyunca sistemde 40.353 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan katma değersiz süre ise 1007,9 saat olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile katma değersiz süreler, 1 yıllık planlama döneminde, toplam çalışma süresinin yaklaşık % 48’ini oluşturmaktadır.

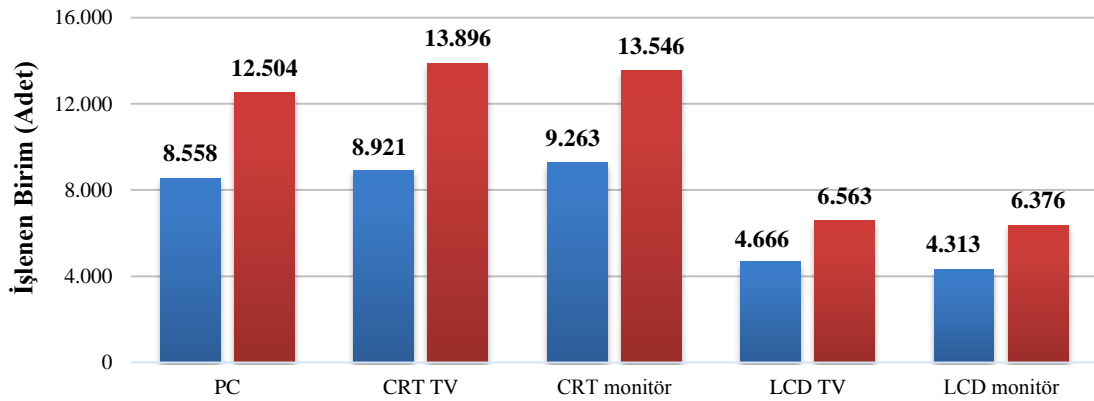
Sonuç olarak, katma değersiz sürelerin azaltılması sonucunda demontaj hızı artırılmış ve bunun sonucunda demontaj süresinin düşmesiyle daha fazla e-atık işlenmiştir. Senaryo-1’e kıyasla birim başına e-atık taşımalarında harcanan katma değersiz süreler 120 saniyeden 90 saniye düşmüş ve böylece % 25’lik bir kazanç sağlanmıştır.

Konveyör hattı sonundaki sınıflandırma operatörünün kapasitesi % 54 civarında bulunmuştur ve bu durum kabul edilebilir bir oranı göstermektedir. Ancak demontaj iş istasyonu sayısının artması durumunda sınıflandırma alanına gelen karmaşık parçaların ayrıştırılması problem yaratabilir. Bu nedenle demontaj iş istasyonu sayılarının artırılması ile gerekli sınıflandırma operatörünün sayısı hesaplanmalıdır.

### 6.3.1 Senaryo-3(a) Simülasyon Sonuçları

Senaryo-3 için üzerinde manuel demontaj operatörü sayısının bir arttırılması sonucu sistem performansı ve hat sonundaki sınıflandırma operatörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, operatörlerin kaynak kullanım oranları % 96 ve sınıflandırma operatörü kullanım oranı % 71 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma hareketlerine yetecek kapasiteye sahiptir. Başlangıçta çalıştırılan simülasyon modelinin, 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Manuel demontaj operatörü sayısının artmasıyla birlikte, referans senaryo-1’de iş istasyonlarında işlem gören e-atık sayısı 35.721 birimden yaklaşık olarak % 48’lük bir artış ile 52.884 birime yükselmiştir. Bileşen satışından elde edilen gelir senaryo-1’de ortalama 174.204 Euro iken, senaryo-3(a)’da bu rakam yaklaşık % 41’lik bir artışla 245.357 Euro’ya yükselmiştir. İşlenen e-atık miktarlarının e-atık tiplerine göre değişimi Şekil 6.9’da verilmiştir



Şekil 6.9 : Senaryo-1 ve senaryo-3(a)’da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarlarının karşılaştırılması

Sınıflandırma operatörünün kaynak kullanım oranı % 71 civarında tespit edilmiştir. Bu senaryo için bu oran kabul edilebilir. Ancak bu sonuç gösteriyor ki, daha fazla demontaj operatörlü kapasite artışlarında sınıflandırma operatörünün sayısında artışa gidilmelidir. Aksi durumda, sınıflandırma alanına gelen karmaşık parçaların ayrıştırılması problem yaratabilir ve darboğazlara neden olabilir.

#### 6.4 Senaryo-4 Simülasyon Sonuçları

Demontajı tamamlanan bileşenlerin taşınması için bir konveyör hattı uygulayarak, operatörün harcadığı katma değersiz süreler azaltılıp demontaj için harcanan toplam zaman arttırılması amaçlanmıştır. Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, demontaj operatörlerin kaynak kullanım oranları % 87 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma ihtiyaçlarını karşılayacak kapasiteye sahiptir.

Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatör kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Bağlı hata ( $\gamma$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

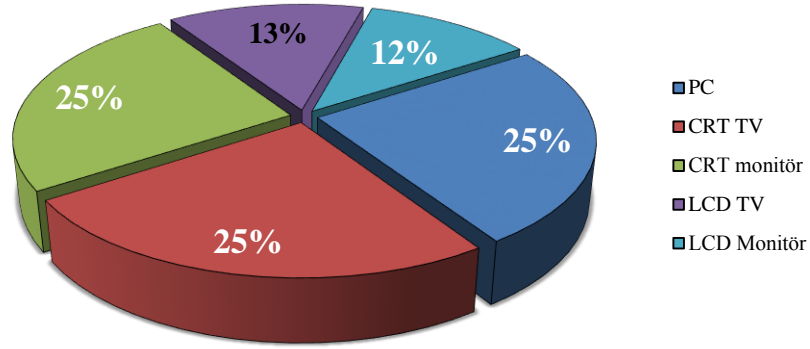
Tablo 6.4 : Senaryo-4 için tekrar sayısının yeterliliği

TEKRAR SAYISI	1.OPERATÖR	2.OPERATÖR	3.OPERATÖR
1. Tekrar	0,9342	0,9342	0,9342
2. Tekrar	0,9309	0,9309	0,9309
3. Tekrar	0,9333	0,9332	0,9332
4. Tekrar	0,9321	0,9321	0,9321
5. Tekrar	0,9355	0,9354	0,9354
6. Tekrar	0,9312	0,9312	0,9312
7. Tekrar	0,9317	0,9317	0,9317
8. Tekrar	0,9341	0,9341	0,9341
9. Tekrar	0,9341	0,9341	0,9342
10. Tekrar	0,9318	0,9318	0,9317
$\bar{X}(n)$	0,9329	0,9329	0,9329
$S(n)$	0,0015	0,0015	0,0015
$\gamma'$	0,0196	0,0196	0,0196
$n_r^*(\gamma)$	0,0012	0,0018	0,0012

Tablo 6.4'de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan modelin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

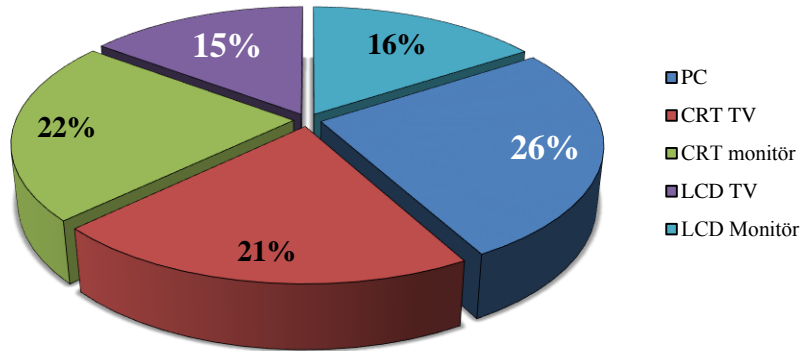
Senaryo-4 için simülasyon modelinin çalıştırılması durumunda toplam 38.363 adet e-atık işlenmiştir. E-atıklar bazında ortalama olarak; 9.549 adet PC, 9.602 adet CRT TV, 9.559 adet CRT monitör, 5.202 adet LCD TV, 4.451 adet LCD monitörün işlendiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.10, senaryo-4 için planlama döneminde işlem gören e-atıkların yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, toplam işlenen e-atığın %25'i kişisel bilgisayar; % 25'i CRT televizyon; % 25'i CRT monitör; % 13'ü LCD televizyon ve % 12'si LCD monitörden oluşmaktadır.





Şekil 6.10 : Senaryo-4'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

38.363 adet e-atığın işlenmesi sonucunda ortalama olarak 669.045 kg geri dönüştürülebilir bileşen elde edilmiştir. Planlama dönemi boyunca bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ise ortalama 187.126 Euro olarak belirlenmiştir. Şekil 6.11, senaryo-4 için planlama dönemi boyunca elde edilen gelirin e-atık bazında yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, elde edilen toplam gelirin, % 26'sı kişisel bilgisayar; % 21'i CRT televizyon; % 22'si CRT monitör; % 15'i LCD televizyon ve % 16'sı LCD monitörün demontajından elde edilmiştir.



Şekil 6.11 : Senaryo-4'de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%)

Simülasyon modeli sonucunda, bir e-atığın iş istasyonuna taşınması için ortalama 59,97 saniye ve e-atığın demontajından elde edilen bileşenleri sınıflandırma kutularına taşınması için ortalama 4,99 saniye gerekli olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda bir e-atığın demontajı için gerekli olan katma değersiz süre ürün başına 64,96 saniyedir. Planlama dönemi boyunca sistemde 38.363 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan katma değersiz süre ise 692,24 saat olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile katma değersiz süreler, 1 yıllık dönemde, toplam çalışma süresinin yaklaşık % 33'ünü oluşturmaktadır.

Bu durumda, sürekli dönen hat üzerinde e-atıkların demontajı tamamlayan operatörler, hat üzerinde bir sonraki e-atığı iş istasyonuna alabilmesi için bir bekleme zamanı ortaya çıkmıştır ve e-atık başına ortalama 11,82 saniye olarak belirlenmiştir. Planlama dönemi boyunca sistemde 38.363 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan bekleme süresi 126 saat olarak belirlenmiştir. Bu durumda 1 yıllık yani 2112 saatlik planlama periyodunda, bekleme süresi toplam çalışma süresinin yaklaşık % 6'sını oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, malzeme taşıma ve boşaltma zamanı diğer senaryolardan daha azdır. Senaryo-1'e kıyasla, katma değersiz sürelerin azaltılması ve bunun sonucunda demontaj hızı artırılması ile daha fazla e-atık işlenmiştir. Ayrıca, birim başına e-atık taşımalarında harcanan katma değersiz süreler 120 saniyeden 65 saniyeye düşmüş ve böylece % 46'lık bir kazanç sağlanmıştır.

### 6.5 Senaryo-5 Simülasyon Sonuçları

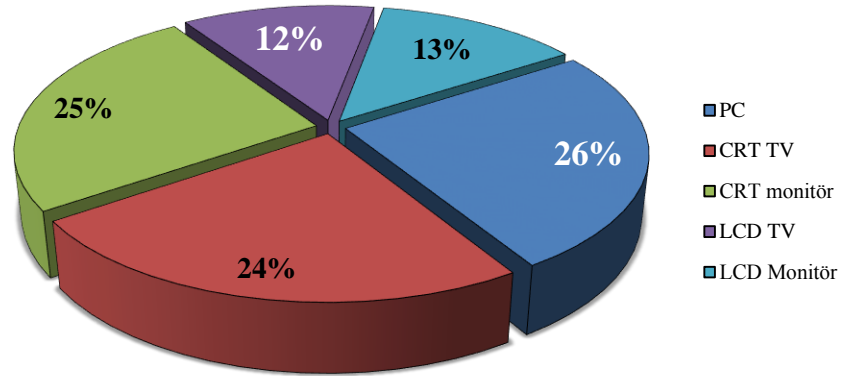
Bu yerleşim şeklinde, e-atıkların iş istasyonlarına taşınması işlemi kapalı döngü hat ile; ve bileşenlerin taşınması ise düz hat ile giderilmeye çalışılmıştır ve malzeme taşıma verimliliğinin artırılması planlanmıştır. Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, demontaj operatörlerin kaynak kullanım oranları % 87 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma hareketlerine yetecek kapasiteye sahiptir.

Tablo 6.5 : Senaryo-5 için tekrar sayısının yeterliliği

TEKRAR SAYISI	1.OPERATÖR	2.OPERATÖR	3.OPERATÖR	SINIFLANDIRMA
1. Tekrar	0,9597431	0,9597837	0,9597338	0,5470229
2. Tekrar	0,9592603	0,9592794	0,9592893	0,5510422
3. Tekrar	0,960846	0,9608201	0,9608349	0,5274098
4. Tekrar	0,9595741	0,9595482	0,9595625	0,5418829
5. Tekrar	0,9593000	0,9592368	0,9592625	0,5303506
6. Tekrar	0,9607794	0,9607618	0,9607311	0,5342830
7. Tekrar	0,9593603	0,9593515	0,9593646	0,5464839
8. Tekrar	0,9605305	0,9605038	0,9605186	0,5370331
9. Tekrar	0,9595442	0,9595316	0,9595221	0,5467939
10. Tekrar	0,9594834	0,9594718	0,9594887	0,5404318
$\bar{X}(n)$	0,9598421	0,9598289	0,9598308	0,5402734
$S(n)$	0,0006257	0,0006223	0,0006164	0,0078567
$\gamma'$	0,0196078	0,0196078	0,0196078	0,0196078
$n_r^*(\gamma)$	0,0004663	0,0004638	0,0004594	0,0104027

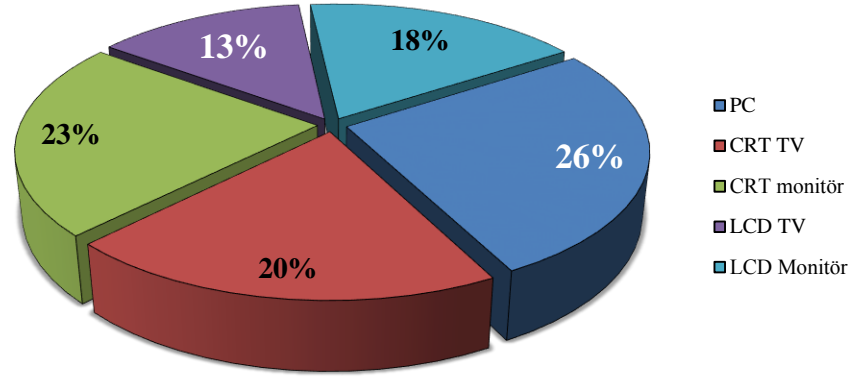
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatör kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Bağlı hata ( $\gamma$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır. Tablo 6.5’de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan modelin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Senaryo-5 için simülasyon modelin sonucunda toplam 41.353 adet e-atık işlenmiştir. E-atıklar bazında ortalama olarak; 10.322 adet PC, 9.853 adet CRT TV, 10.926 adet CRT monitör, 4.980 adet LCD TV, 5.272 adet LCD monitörün işlendiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.12, senaryo-5 için planlama döneminde işlenen e-atıkların yüzde dağılımlarını vermektedir. Sonuçlara göre, işlenen toplam e-atığın % 26’sı kişisel bilgisayar; % 24’ü CRT televizyon; % 25’i CRT monitör; % 12’si LCD televizyon ve % 13’ü LCD monitörden oluşmaktadır.



Şekil 6.12 : Senaryo-5’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

41.353 adet e-atığın işlenmesi sonucunda ortalama olarak 704.265 kg geri dönüştürülebilir bileşen elde edilmiştir. Planlama dönemi boyunca bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ise ortalama 199.447 Euro olarak belirlenmiştir. Şekil 6.13, senaryo-5 planlama dönemi boyunca elde edilen gelirin e-atık bazında yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, elde edilen toplam gelirin, % 26’sı kişisel bilgisayar; % 20’si CRT televizyon; % 23’ü CRT monitör; 13’ü LCD televizyon ve % 18’i LCD monitörün demontajından elde edilmiştir.



Şekil 6.13 : Senaryo-5’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%)

Simülasyon modeli sonucunda, bir e-atığın taşınması için ortalama 29,98 saniye ve e-atığın demontajından elde edilen bileşenleri sınıflandırma kutularına taşınması için geçen süre ortalama 4,99 saniyedir. Bu durumda bir e-atığın demontajı için gerekli olan katma değersiz süre ürün başına 34,97 saniyedir. Planlama dönemi boyunca sistemde 41.353 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan katma değersiz süre ise 401,7 saat olarak belirlenmiştir. Bu durumda 2112 saatlik planlama periyodunda, katma değersiz süreler toplam çalışma süresinin yaklaşık % 19,02’sini oluşturmaktadır.

Bu durumda, dönen hat üzerinde e-atıkların demontajı tamamlayan operatörler, hat üzerinde bir sonraki e-atığı iş istasyonuna alabilmesi için bir bekleme zamanı ortaya çıkmıştır ve e-atık başına ortalama 11,82 saniye olarak belirlenmiştir. Planlama dönemi boyunca sistemde 41.353 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan bekleme süresi 135,78 saat olarak belirlenmiştir. Bu durumda 1 yıllık yani 2112 saatlik planlama periyodunda, bekleme süresi toplam çalışma süresinin yaklaşık % 6,43’ünü oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, malzeme taşıma ve boşaltma zamanı diğer senaryolardan daha azdır. Bunun sonucunda, katma değersiz sürelerin azaltılmış ve sonucunda demontaj hızı arttırılmış ve bunun sonucunda demontaj süresinin düşmesiyle daha fazla atık işlenmiştir. Senaryo-1’e kıyasla birim başına e-atık taşımalarda harcanan katma değersiz süreler 120 saniyeden 35 saniyeye düşmüş ve böylece % 71’lik bir kazanç sağlanmıştır.

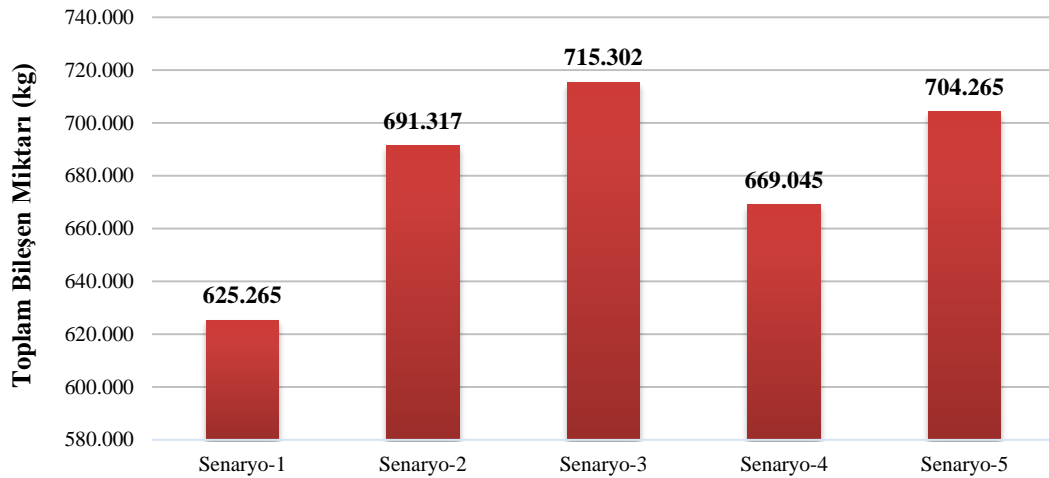
## 6.6 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, senaryo analizlerinden elde edilen sonuçların farklı performans kriterlerine dayanan analizleri yer almaktadır:

- 1) Demontajdan elde edilen geri kazanılabilir bileşen miktarı,
- 2) Demontajı yapılan toplam atık sayısı,
- 3) Bileşen satışından elde edilen toplam gelir,
- 4) Katma değer yaratmayan aktiviteler.

### 6.6.1 Bileşen Miktarı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.14, bir yıllık planlama dönemi içerisinde elde edilen ortalama bileşen miktarını göstermektedir. Elde edilen bileşen miktarı, demonte edilen ürün miktarı ve ürün tipine göre değişmektedir. Referans senaryo-1 ile kıyasla, elde edilen geri dönüştürülebilir malzeme miktarında senaryo-2’de % 9 oranında, senaryo-3’de % 14 oranında, senaryo-4’de % 6,5 oranında ve senaryo-5’de % 12 oranında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 6.14 : Bileşen miktarı için senaryoların karşılaştırılması

Tablo 6.6 planlama periyodu sonunda senaryolar ve e-atıklar bazında demontajdan elde edilen temel bileşenlerin miktarlarını göstermektedir.

Tablo 6.6 : Temel bileşen miktarları açısından senaryoların detaylı karşılaştırılması

	<b>BİLEŞEN</b>	<b>AĞIRLIK (KG)</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>
<b>PC</b>	PCB Kat I	0,908	7770,21	15650,29	9038,232	8670,492	9381,456
	İşlemci	0,024	205,38	413,664	238,896	229,176	247,968
	Hafıza	0,036	308,07	620,496	358,344	343,764	371,952
	CD Sürücü	0,862	7376,565	14857,43	8580,348	8231,238	8906,184
	Disk Sürücü	0,374	3200,505	6446,264	3722,796	3571,326	3864,168
	Güç Kaynağı	1,320	11295,9	22751,52	13139,28	12604,68	13638,24
	Kablo	0,178	1523,235	3068,008	1771,812	1699,722	1839,096
	Hoparlör	0,040	342,3	689,44	398,16	381,96	413,28
	Hard disk	0,498	4261,635	8583,528	4957,092	4755,402	5145,336
	Plastik	0,338	2892,435	5825,768	3364,452	3227,562	3492,216
Metal	5,110	43728,83	88075,96	50864,94	48795,39	52796,52	
<b>CRT TV</b>	CRT Tüpü	25,102	223937,5	193636,8	259127,9	241031,9	247320
	Saptırıcı	0,782	6976,3	6032,348	8072,586	7508,842	7704,733
	PCB Kat III	1,306	11650,96	10074,48	13481,84	12540,34	12867,5
	Metal	0,350	3122,385	2699,9	3613,05	3360,735	3448,41
	Plastik	5,136	45818,77	39619,1	53018,93	49316,39	50602,95
	Elektron Silahı	0,034	303,3174	262,276	350,982	326,4714	334,9884
	Kablo	1,538	13720,65	11864,13	15876,77	14768,03	15153,3
<b>CRT Monitör</b>	CRT Tüpü	8,934	82759,22	69918,38	94071,45	85399,21	91984,46
	Saptırıcı	0,788	7299,559	6166,967	8297,325	7532,413	8113,248
	PCB Kat III	1,810	16766,75	14165,24	19058,58	17301,61	18635,76
	Metal	0,832	7707,149	6511,315	8760,627	7953,005	8566,272
	Plastik	2,710	25103,81	21208,73	28535,22	25904,62	27902,16
	Elektron Silahı	0,030	277,902	234,783	315,888	286,767	308,88
	Kablo	0,910	8429,694	7121,751	9581,936	8698,599	9369,36
<b>LCD TV</b>	Renkli Plastik	0,964	4497,928	6909,181	4688,992	5014,439	4800,72
	Siyah Plastik	0,030	139,977	215,016	145,923	156,051	149,4
	Beyaz Plastik	0,078	363,9402	559,0416	379,3998	405,7326	388,44
	Panel	0,520	2426,268	3726,944	2529,332	2704,884	2589,6
	Folyo	0,138	643,8942	989,0736	671,2458	717,8346	687,24
	CCFL arka ışık	1,144	5337,79	8199,277	5564,53	5950,745	5697,12
	PCB Kat I	0,050	233,295	358,36	243,205	260,085	246,6667
	PCB Kat II	0,074	345,2766	530,3728	359,9434	384,9258	368,52
	PCB Kat III	0,232	1082,489	1662,79	1128,471	1206,794	1155,36
	Hoparlör	0,014	65,3226	100,3408	68,0974	72,8238	69,72
	Kablo	0,070	326,613	501,704	340,487	364,119	348,6
	Alüminyum	0,560	2612,904	4013,632	2723,896	2912,952	2788,8
	Metal	0,754	3518,089	5404,069	3667,531	3922,082	3754,92
<b>LCD Monitör</b>	Renkli Plastik	0,812	3500,8	6087,662	3800,548	3612,81	4279,269
	Siyah Plastik	0,875	3775,4	6565,175	4098,661	3896,196	4614,932
	Beyaz Plastik	0,041	175,3994	305,0081	190,4176	181,0114	214,4028
	Panel	0,553	2382,988	4143,861	2587,026	2459,233	2912,891
	Folyo	0,106	458,6263	797,5213	497,8952	473,3003	560,6106
	CCFL arka ışık	0,849	3661,822	6367,67	3975,358	3778,984	4476,098
	PCB Kat I	0,054	234,3451	407,5109	254,4104	241,8431	286,4562
	PCB Kat II	0,276	1188,978	2067,555	1290,782	1227,02	1453,37
	PCB Kat III	0,334	1442,013	2507,567	1565,482	1488,151	1762,672
	Hoparlör	0,195	842,4922	1465,039	914,6288	869,4482	1029,836
	Kablo	0,077	333,5464	580,0155	362,1056	344,2184	407,7168
	Alüminyum	0,392	1689,298	2937,578	1833,94	1743,348	2064,945
	Metal	2,663	11485,79	19973,03	12469,23	11853,28	14039,87

\* S1: Senaryo-1; S2: Senaryo-2; S3: Senaryo-3; S4: Senaryo-4; S5: Senaryo-5

### 6.6.2 İşlenen Toplam Atık Sayısı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 6.7, planlama dönemi içerisinde referans olarak seçilen e-atıklar için demonte edilen e-atıkların sayısını göstermektedir. İşlenen e-atık miktarı, e-atığın ortalama demontaj süresi ve demontaj hızına bağlı olarak değişmektedir. Referans senaryo-1 ile kıyasla, geri dönüştürülebilir malzemeleri elde etmek için işlenen e-atık miktarı senaryo-2’de % 25 oranında, senaryo-3’de % 13 oranında, senaryo-4’de % 7 oranında ve senaryo-5’de % 14 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

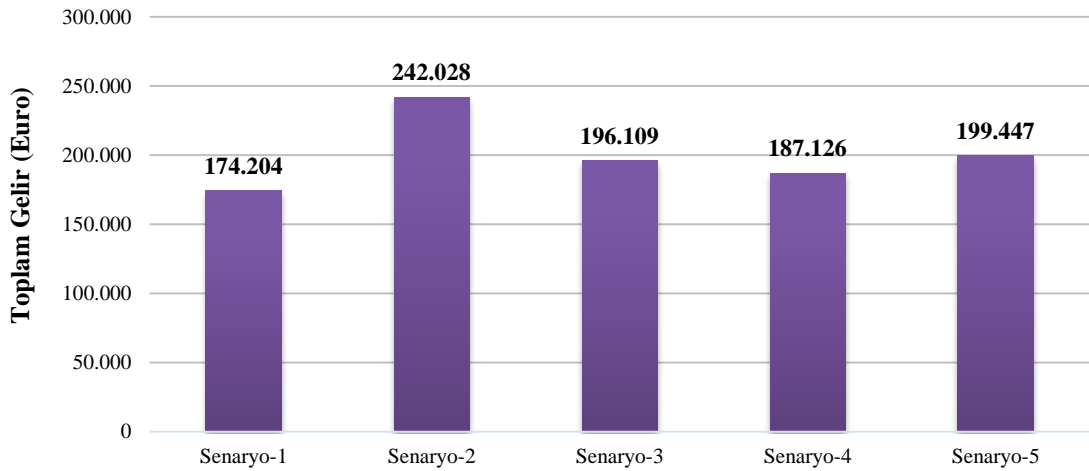
Tablo 6.7 : Demontajı yapılan toplam atık sayısı için senaryoların karşılaştırılması

Senaryo	E-atık Türü					Toplam
	PC	CRT TV	CRT Monitör	LCD TV	LCD Monitör	
S1	8.558	8.921	9.263	4.666	4.313	35.721
S2	17.326	7.714	7.826	7.167	7.500	47.444
S3	9.954	10.323	10.530	4.864	4.682	40.353
S4	9.549	9.602	9.559	5.202	4.451	38.363
S5	10.322	9.853	10.926	4.980	5.272	41.353

\* S1: Senaryo-1; S2: Senaryo-2; S3: Senaryo-3; S4: Senaryo-4; S5: Senaryo-5

### 6.6.3 Toplam Gelir Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.15, bir yıllık planlama dönemi içerisinde geri dönüştürülebilir malzemelerin satışı ve tehlikeli atıkların bertaraf maliyetini dikkate alarak toplam gelirinin senaryo bazında değişimini göstermektedir. Toplam gelir, işlenen e-atık sayısı, elde edilen bileşen miktarı ve bileşen satış fiyatına göre değişmektedir. Referans senaryo-1 ile kıyasla, ortalama olarak bileşen satışından elde edilen toplam gelir, senaryo-2’de % 39 oranında, senaryo-3’de % 13 oranında, senaryo-4’de % 7,5 ve senaryo-5’de % 14,5 oranında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 6.15 : Toplam gelir için senaryoların karşılaştırılması

Tablo 6.8 : Toplam gelir açısından senaryoların detaylı karşılaştırılması

	BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	S1	S2	S3	S4	S5
PC	PCB Kat I	0,908	45067,22	90771,68	52421,75	50288,85	54412,44
	İşlemci	0,024	4518,36	9100,608	5255,712	5041,872	5455,296
	Hafıza	0,036	1540,35	3102,48	1791,72	1718,82	1859,76
	CD Sürücü	0,862	2286,735	4605,803	2659,908	2551,684	2760,917
	Disk Sürücü	0,374	992,1566	1998,342	1154,067	1107,111	1197,892
	Güç Kaynağı	1,320	4179,483	8418,062	4861,534	4663,732	5046,149
	Kablo	0,178	3731,926	7516,62	4340,939	4164,319	4505,785
	Hoparlör	0,040	23,961	48,2608	27,8712	26,7372	28,9296
	Hard disk	0,498	3409,308	6866,822	3965,674	3804,322	4116,269
	Plastik	0,338	289,2435	582,5768	336,4452	322,7562	349,2216
	Metal	5,110	3498,306	7046,077	4069,195	3903,631	4223,722
CRT TV	CRT Tüpü	25,102	-16123,5	-13941,8	-18657,2	-17354,3	-17807
	Saptırıcı	0,782	7883,219	6816,553	9122,022	8484,991	8706,348
	PCB Kat III	1,306	5242,932	4533,516	6066,828	5643,153	5790,375
	Metal	0,350	468,3578	404,985	541,9575	504,1103	517,2615
	Plastik	5,136	5956,44	5150,483	6892,461	6411,131	6578,384
	Elektron Silahı	0,034	45,49761	39,3414	52,6473	48,97071	50,24826
	Kablo	1,538	18522,88	16016,58	21433,64	19936,84	20456,96
CRT Monitör	CRT Tüpü	8,934	-5958,66	-5034,12	-6773,14	-6148,74	-6622,88
	Saptırıcı	0,788	8248,502	6968,673	9375,977	8511,627	9167,97
	PCB Kat III	1,810	7545,038	6374,358	8576,361	7785,725	8386,092
	Metal	0,832	1156,072	976,6973	1314,094	1192,951	1284,941
	Plastik	2,710	3263,495	2757,135	3709,579	3367,601	3627,281
	Elektron Silahı	0,030	41,6853	35,21745	47,3832	43,01505	46,332
	Kablo	0,910	11380,09	9614,364	12935,61	11743,11	12648,64
LCD TV	Renkli Plastik	0,964	1349,378	2072,754	1406,698	1504,332	1440,216
	Siyah Plastik	0,030	48,99195	75,2556	51,07305	54,61785	52,29
	Beyaz Plastik	0,078	127,3791	195,6646	132,7899	142,0064	135,954
	Panel	0,520	1213,134	1863,472	1264,666	1352,442	1294,8
	Folyo	0,138	160,9736	247,2684	167,8115	179,4587	171,81
	CCFL arka ışık	1,144	3202,674	4919,566	3338,718	3570,447	3418,272
	PCB Kat I	0,050	1749,713	2687,7	1824,038	1950,638	1850
	PCB Kat II	0,074	1035,83	1591,118	1079,83	1154,777	1105,56
	PCB Kat III	0,232	1623,734	2494,185	1692,707	1810,191	1733,04
	Hoparlör	0,014	6,53226	10,03408	6,80974	7,28238	6,972
	Kablo	0,070	489,9195	752,556	510,7305	546,1785	522,9
	Alüminyum	0,560	3919,356	6020,448	4085,844	4369,428	4183,2
	Metal	0,754	668,4369	1026,773	696,8309	745,1956	713,4348
LCD Monitör	Renkli Plastik	0,812	1050,24	1826,299	1140,164	1083,843	1283,781
	Siyah Plastik	0,875	1321,39	2297,811	1434,531	1363,669	1615,226
	Beyaz Plastik	0,041	61,38979	106,7528	66,64616	63,35399	75,04098
	Panel	0,553	1191,494	2071,931	1293,513	1229,617	1456,446
	Folyo	0,106	114,6566	199,3803	124,4738	118,3251	140,1527
	CCFL arka ışık	0,849	2197,093	3820,602	2385,215	2267,39	2685,659
	PCB Kat I	0,054	1757,588	3056,332	1908,078	1813,823	2148,422
	PCB Kat II	0,276	3566,934	6202,665	3872,346	3681,06	4360,11
	PCB Kat III	0,334	2163,02	3761,351	2348,223	2232,227	2644,008
	Hoparlör	0,195	84,24922	146,5039	91,46288	86,94482	102,9836
	Kablo	0,077	500,3196	870,0233	543,1584	516,3276	611,5752
	Alüminyum	0,392	2533,947	4406,367	2750,91	2615,022	3097,418
	Metal	2,663	2182,3	3794,876	2369,154	2252,123	2667,575

\* S1: Senaryo-1; S2: Senaryo-2; S3: Senaryo-3; S4: Senaryo-4; S5: Senaryo-5



#### 6.6.4 Katma Yaratmayan Aktiviteler Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 6.9, planlama dönemi içerisinde bir ürün başına harcanan ortalama katma değersiz süreleri göstermektedir. Manuel demontaj operasyonlarından elde edilen sonuçlara göre bir e-atık için katma değersiz süreler ortalama olarak senaryo-1’de 120 saniye, senaryo-2’de 120 saniye, senaryo-3’de 90 saniye, senaryo-4’de 77 (65+12) saniye ve son olarak senaryo-5’de 47 (35+12) saniye olarak belirlenmiştir. Referans senaryo-1 ile kıyasla, bir e-atık için katma değer yaratmayan aktivitelere harcanan süreler senaryo-2’de % 0, senaryo-3’de % 25 oranında, senaryo-4’de % 46 oranında ve senaryo-5’de % 71 oranında bir kazanç gözlemlenmiştir.

Tablo 6.9 : Katma değer yaratmayan süreler için senaryoların karşılaştırılması

SENARYO	S1	S2	S3	S4	S5
Katma Değer Yaratmayan Süreler	120 sn	120 sn	90 sn	77 sn	47 sn

\* S1: Senaryo-1; S2: Senaryo-2; S3: Senaryo-3; S4: Senaryo-4; S5: Senaryo-5

#### 6.6.5 Genel Karşılaştırma

İşletme süreçlerinde ana amaç fonksiyonu toplam gelir fonksiyonunun maksimize edilmesi ya da maliyet fonksiyonunun minimize edilmesidir. İşletme süreçlerine benzer olarak, geri dönüşüm süreçlerinde de, amaç firmanın toplam gelirinin (bileşen satışından elde edilen gelir – tehlikeli maddelerin bertaraf maliyeti) maksimuma ulaştırılmasıdır (Renteria ve diğ., 2010). Diğer taraftan, e-atıklar üzerinde Dünya ve Türkiye’de hazırlanan yönetmelikler günümüzde atık sahalarına ve geri dönüşüm tesislerine gönderilen e-atık miktarını arttırmıştır ve gelecekte daha da arttıracaktır. Dolayısıyla, geri dönüşüm tesislerinin amacı bir taraftan firmanın rekabetçi piyasada ayakta kalabilmesi için maksimum geliri elde ederken, diğer taraftan e-atıkların çevre ve insan sağlığı üzerindeki negatif etkileri nedeniyle maksimum miktarda atık işlemektir. Farklı değerlendirme kriterlerine göre elde edilen simülasyon sonuçları Tablo 6.10’da sunulmuştur (1 en iyi ve 5 en kötü sıralamayı göstermektedir).

Tablo 6.10 : Değerlendirme kriterlerine göre senaryoların karşılaştırılması

DEĞERLENDİRME KRİTERİ	AMAÇ FONKSİYONU	SENARYOLARIN KIYASLANMASI				
		1	2	3	4	5
Bileşen Miktarı	Maks.	S3	S5	S2	S4	S1
Demonte Edilen Ürün	Maks.	S2	S5	S3	S4	S1
Toplam Gelir	Maks.	S2	S5	S3	S4	S1
Katma Değersiz Süre	Min.	S5	S4	S3	S2	S1

\* S1: Senaryo-1; S2: Senaryo-2; S3: Senaryo-3; S4: Senaryo-4; S5: Senaryo-5

Tüm bunları dikkate alarak, en fazla e-atık işleyen ve en fazla gelir elde eden yerleşim planı en iyi yerleşim alternatifi olarak belirlenmelidir. Bu kapsamda, Tablo 6.10'da sunulan veriler incelendiğinde, çalışmada ele alınan PC, CRT TV ve monitör, LCD TV ve monitör e-atıklarının işlenmesi için 3 manuel demontaj iş istasyonu için alternatif senaryolar arasında en iyi sonucu senaryo-2'nin verdiği görülmektedir. İkinci en iyi alternatif olarak senaryo-5 seçilmiştir. Senaryo-1 yerleşimi, referans senaryo, tüm değerlendirme kriterleri için en kötü sonucu vermiştir.

Senaryo-2' de, demonte edilecek e-atıkların sınıflandırılarak gruplara ayrılmıştır: (1) PC demontajı, (2) CRT TV ve monitör demontajı ve (3) LCD TV ve monitör demontajı. Bu senaryoda, benzer işlerin tekrarlanmasıyla operasyonel seviyede özel e-atık tiplerinin üzerinde uzmanlaşma ile demontaj operasyonu daha hızlı ve daha kolay yapılabileceği düşünülmüştür. Operatörler demontaj operasyonlarından elde edilen bileşenlerin sınıflandırılmasında daha az bileşen türü ile başa çıkmak zorundadır. Böylece, sınıflandırma operasyonları için gerekli çaba ve sürenin azaltılması sağlanabilir. Özel e-atık tiplerinin bir istasyonda işlenmesi ile iş istasyonlarındaki dağınıklık azaltılabilir.

Senaryo-2, sadece bir yerleşim alternatifi olarak değil atıkların sınıflandırılması düşüncesi ile operasyonel seviyede bir kararı da kapsamaktadır. Böylesine bir kararın uygulanamayacağı e-atık demontaj sistemleri için, toplam gelir ve toplam işlenen atık sayısı kriterleri açısından en iyi yerleşimin Senaryo-5 olduğu görülebilir.

Senaryo-5'de atık başına malzeme taşıma aktiviteleri için katma değer yaratmayan aktivitelere harcanan sürenin diğer senaryolardan daha az olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu durumda iş istasyonu sayısının 3 olmasından dolayı dönen hat üzerinde demontajı tamamlayan operatörler için boş beklemler meydana gelmekte ve bu durum sistem performansı üzerinde bir etki yaratmaktadır. Bu nedenle, hattın üzerinde dönen ürün sayısı ve hat üzerinde çalışan iş istasyonu sayısı önemlidir. Ayrıca bu sistemin kurulumu için firma gerekli yerleşim alanlarına sahip olmalıdır.

#### **6.6.6 Sonuçların İstatistiksel Analizi**

Çalışmanın son aşamasında, geliştirilen simülasyon modelleri farklı performans ölçülerine dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır.

İkiden fazla grubun ortalamalarını karşılaştırırken tek yönlü varyans analizi (ANOVA testi) uygulanır. Ancak, ANOVA testi bir parametrik testtir ve bu nedenle değerlendirmeye alınacak verilerin normal dağılıma sahip olması gereklidir. Bu durumda, senaryolara göre toplam gelir ve işlenen atık miktarı verilerinin normal dağılıma uygunluğu SPSS 16.0 programında tek örneklem Kolmogrov Smirnov testi kullanılarak belirlenmiştir.

$H_0$  : Örneklem serisi normal dağılımlı ana kütlede gelmektedir.

$H_1$  : Örneklem serisi normal dağılımlı ana kütlede gelmemektedir.

Tek örneklem Kolmogrov Smirnov testi sonucunda, elde edilen tablonun Assymp. Sig. ( $p$  değeri) satırındaki değerlerin istatistiksel anlamlılık hesaplamalarında sınır değeri kabul edilen 0,05'den büyük olması durumunda  $H_0$  hipotezi kabul edilir ve bu durum incelenen faktörlerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Bu değer 0,05'den küçük olması durumunda  $H_0$  hipotezi reddedilir.

Tablo 6.11 : Toplam gelir için tek örneklem K-S testi sonuçları

KOLMOGOROV-SMIRNOV Z	ASYMP. SIG. ( $p$ )
1,489	0,024

Tablo 6.11'de görüldüğü üzere,  $p$  değeri 0,024 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den küçük olduğu veriler normal dağılım göstermemektedir ( $p=0,024$ ;  $p<0,05$ ). Veriler normal dağılıma sahip olmadığı için, toplam gelir için deney sonuçlarının karşılaştırılmasında ANOVA testinin parametrik olmayan karşılığı Kruskal-Wallis H testi uygulanmıştır.

Tablo 6.12 : İşlenen toplam atık miktarı için tek örneklem K-S testi sonuçları

KOLMOGOROV-SMIRNOV Z	ASYMP. SIG. ( $p$ )
1,260	0,084

Tablo 6.12'de görüldüğü üzere,  $p$  değeri 0,084 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den büyük olduğu tespit edilmiştir ( $p=0,084$ ;  $p>0,05$ ). Ancak verilerin normal dağılım gösterebilmesi için aynı zamanda grup varyanslarının homojen bir dağılım göstermesi gerekmektedir. Varyanslar heterojen dağılım gösterirken parametrik varyans analizlerinin yapılması ve sonuçların yorumlanması hatalı sonuçlar meydana getirebilir.

Tablo 6.13 : İşlenen toplam atık miktarı için varyansların homojenliği testi sonuçları

LEVENE İSTATİSTİĞİ	df 1	df 2	SIG.(p)
4,083	4	45	0,007

Varyansların homojenliği testi sonucunda,  $p$  değeri; eğer  $p > 0,05$  ise varyanslar homojen dağılmıştır, eğer  $p < 0,05$  ise varyanslar homojen dağılmamıştır. Tablo 6.13’da görüldüğü üzere,  $p$  değeri 0,007 olarak tespit edilmiştir. Bu değer 0,05’den küçük olduğu veriler homojen dağılmamıştır ( $p=0,007$ ;  $p < 0,05$ ) ve dolayısıyla normal dağılım göstermemektedir. Veriler normal bir dağılım göstermediği için, işlenen toplam atık miktarı için deney sonuçlarının karşılaştırılmasında ANOVA testinin parametrik olmayan karşılığı Kruskal-Wallis H testi uygulanmıştır

Elde edilen verilere SPSS 16.0 programında Kruskal-Wallis H testi uygulayarak firmanın toplam gelirleri arasında anlamlı bir farkın olup olmadığı test edilmiştir.

$H_0$  : Toplam gelir için senaryolar arasında anlamlı bir fark yoktur.

$H_1$  : Toplam gelir için senaryolar arasında anlamlı bir fark vardır.

Tablo 6.14 : Toplam gelir için Kruskal-Wallis H testi sonuçları

SENARYO	n	SIRA ORTALAMASI	Kİ-KARE	sd	ASYMP. SIG. (p)
1	10	5,50	45,441	4	0,000
2	10	45,50			
3	10	27,40			
4	10	15,60			
5	10	33,50			

Kruskal-Wallis H testi sonucunda, çıktılarda dikkat edilecek değerler, ki-kare ( $\chi^2$ ) değeri ve Asymp. Sig.(p) değeridir.  $p < 0,05$  ise anlamlı bir fark vardır,  $p > 0,05$  ise anlamlı bir fark yoktur. Tablo 6.14 incelendiğinde, senaryolar için % 95 güvenirlilik düzeyinde istatistiksel olarak bir farkın olduğu belirlenmiştir ( $\chi^2 = 45,441$ ;  $p = 0,000$ ;  $p < 0,05$ ). Grupların sıra ortalamaları dikkate alındığında bu farkın senaryo-2’nin toplam gelire etkisinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

Elde edilen verilere SPSS 16.0 programında Kruskal-Wallis H testi uygulayarak işlenen toplam atık miktarları arasında anlamlı bir farkın olup olmadığı test edilmiştir.

$H_0$  : İşlenen atık miktarı için senaryolar arasında anlamlı bir fark yoktur.

$H_1$  : İşlenen atık miktarı için senaryolar arasında anlamlı bir fark vardır.

Tablo 6.15 : İşlenen toplam atık miktarı için Kruskal-Wallis H testi sonuçları

SENARYO	n	SIRA ORTALAMASI	Kİ-KARE	sd	ASYMP. SIG. (p)
1	10	5,60	44,445	4	0,000
2	10	45,50			
3	10	29,30			
4	10	15,60			
5	10	31,50			

Tablo 6.15 incelendiğinde, senaryolar için % 95 güvenirlilik düzeyinde istatistiksel olarak bir farkın olduğu belirlenmiştir ( $\chi^2 = 44,445$ ;  $p = 0,000$ ;  $p < 0,05$ ). Grupların sıra ortalamaları dikkate alındığında bu farkın senaryo-2'nin toplam gelire etkisinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, e-atık geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahip olan demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi amacıyla ideal yerleşim planlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, Kocaeli’de bulunan bir e-atık geri kazanım tesisi ile görüşülmüş, tez çalışması kapsamında işbirliği desteği sağlanmıştır. Tez çalışmasında e-atık demontaj süreçleri yakından irdelenerek, mevcut yerleşim, geliştirilecek alternatif yerleşimler ve yerleşimi etkileyecek operasyonel yaklaşımlar için modeller geliştirilmiş ve simülasyon modelleri ile analiz edilmiştir. Bu çalışma, demontaj sistemlerinin yerleşimlerinin tasarımı ile sınırlandırılmıştır. Tersine lojistik, üretim planlama, demontaj çizelgeleme, demontaj sıralama ve demontaj hat dengeleme gibi ürün geri kazanımında önemli diğer problemler çalışmanın dışında bırakılmıştır.

Çalışmada, veri toplama, simülasyon ve çok değişkenli veri analizi teknikleri kullanılmıştır. Potansiyel yerleşim alternatifleri, yerleşim planlaması probleminin temel prensiplerine ve demontaj sistemlerinin kendi doğasına has durumlar ve ihtiyaçlara dayanarak geliştirilmiştir. Geliştirilen yerleşim alternatifleri simülasyon araçları kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Modellerde, e-atıkların çeşitliliği ve yapısal değişkenliği nedeni ile oluşan belirsizlik ortamında, demontaj süreleri bulanık olarak elde edilmiştir.

Hazırlanan yerleşim alternatifleri, haftada beş gün ve günde sekiz saat olmak üzere 1 yıllık planlama periyodunda ARENA 10.0 simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon modelleri başlangıçta 10 tekrar çalıştırılmış ve tekrar sayıları test edilmiştir. Modellerinin sonuçları, demontaj operasyonlarından elde edilen geri kazanılabilir bileşen miktarı, demontajı yapılan toplam atık sayısı, bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir ve katma değer yaratmayan aktivitelere harcanan zaman gibi farklı performans ölçütlerine göre kıyaslanmıştır.

Çalışmada ele alınan veriler, iş istasyonu sayısı ve diğer durumlar altında simülasyon sonuçlarına göre en fazla e-atık işleyen ve en fazla gelir elde eden yerleşim planı senaryo-2: sınıflandırma senaryosu olarak belirlenmiştir. Referans senaryo-1 ile kıyasla simülasyon sonuçlarına göre geri dönüştürülebilir malzemeleri elde etmek için işlenen e-atık miktarı senaryo-2’de % 25 oranında ve bileşenlerin satışından elde edilen toplam gelir senaryo-2’de % 39 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Geliştirilen simülasyon modellerinin sonuçları arasında istatistiksel bir farkın olup olmadığını test etmek için farklı performans ölçülerine dayanarak ANOVA testinin parametrik olmayan karşılığı Kruskal-Wallis H testi uygulanmış ve senaryolar arasında anlamlı bir fark tespit edilmiştir.

Günümüzde birçok demontaj tesisi Senaryo-1 olarak tanımlanan yerleşimi kullanmaktadır. Bu yerleşim planında, operatör demonte edilecek birimlerin demontajı için, e-atıkların kaldırılması ve yerleştirilmesi gibi malzeme yükleme aktiviteleri ile zamanın çoğunu harcamaktadır, böylece planlama dönemi boyunca operatörlerin malzeme taşıma aktiviteleri için harcadıkları zaman, mevcut demontaj süreçlerine harcadıkları zamandan daha yüksek olmaktadır. Senaryo-2 olarak ifade edilen ve sınıflandırılmış e-atıkların sisteme alınmasını talep eden senaryo, analizler sonucunda en iyi senaryo olarak belirlenmiştir. Ancak daha önce vurgulandığı gibi Senaryo-2’de katma değer yaratmayan süreler örneğin Senaryo-5’e göre yüksek olsa da karlılığı daha yüksektir çünkü sınıflandırmanın getirdiği karı yüksek e-atıkların demontajı daha fazla yapılmaktadır ve öğrenme etkisi demontaj süresini kısaltmaktadır. Dolayısı ile Senaryo-2, sadece bir yerleşim alternatifi olarak değil atıkların sınıflandırılması düşüncesi ile operasyonel seviyede bir kararı da kapsamaktadır. Böylesine bir kararın uygulanamayacağı e-atık demontaj sistemleri için, toplam gelir ve toplam işlenen atık sayısı kriterleri açısından en iyi yerleşimin Senaryo-5 olduğu görülebilir. Katma değer yaratmayan aktivitelere harcanan sürenin diğer senaryolardan daha az olduğu Senaryo-5’te iş istasyonu sayısının 3 olmasından dolayı dönen hat üzerinde demontajı tamamlayan operatörler için boş beklemler meydana geldiği ve bu durumun sistem performansı üzerinde bir etki yarattığı bilinmelidir. Bu durumun giderilmesi için hattın üzerinde dönen ürün sayısı ve hat üzerinde çalışan iş istasyonu sayısının optimize edilmesi gerekir. Ayrıca bu sistemin kurulumu için firma gerekli yerleşim alanlarına sahip olmalıdır.

Demontaj, geri kazanımda kullanılan en önemli süreçlerden birisidir. Demontaj, geri kazanılabilir ürünleri, gerek parçalayarak, gerekse parçalamadan alt parçalarına ayırma sürecidir. Demontaj sistemleri içerisinde çizelgeleme, sıralama, hat dengeleme, sipariş sistemi ve yerleşim planlaması vb. farklı konuları barındırır. Bu çalışma alanları güncel araştırmalarla geliştirilmektedir. Demontaj sistemlerinde yerleşim planlaması problemi, zaman, para ve iş gücü gibi kaynakların kullanımını optimize eden demontaj sistemlerine olan ihtiyaçların giderek artması nedeniyle, son yıllarda demontaj literatüründe çalışılmaya başlanan konulardan bir tanesi haline gelmiştir. Yukarıdaki bölümde sunulan literatür taramasında elde edilen bilgiler sonucunda, demontaj sistemlerinin yerleşim planlaması konusunda yapılan çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir. Hazırlanan bu tez çalışması, e-atık demontaj sistemlerinin alternatif yerleşimlerini simülasyon modelleri ile test ederek literatürün geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.



## KAYNAKLAR

- Adenso-Díaz, B., García-Carbajal, S., Gupta, S.M.,** A path-relinking approach for a bi-criteria disassembly sequencing problem, *Computers & Operations Research*, **35**(12): 3989-3997, (2008).
- Agrawal, S., Tiwari, M.K.,** A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem, *International Journal of Production Research*, **46**(6): 1405-1429, (2007).
- Akcan, S.,** *Hastane Sistemlerinde Çoklu Malzeme Durumu için Simülasyon Meta-modellemeye Dayalı Stok Optimizasyonu*, (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, (2010).
- Altekin, F.T., Kandiller, L., Ozdemirel, N.E.,** Profit-oriented disassembly-line balancing, *International Journal of Production Research*, **46**(10): 2675-2693, (2008).
- Amoyaw-Osei, Y., Agyekum, O.O., Pwamang, J.A., Mueller, E., Fasko, R., Schlupe, M.,** *Ghana e-Waste Country Assessment*, Green Advocacy and Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Accra, Ghana, (2011).
- Anzanello, M.J., Fogliatto, F.S.,** Learning curve models and applications: Literature review and research directions, *International Journal of Industrial Ergonomics*, **41**(5): 573-583, (2011).
- Baker, E., Bournay, E., Harayama, A., Rekacewicz, P.,** *Vital Waste Graphics*, United Nations Environment Programme, (2004).
- Barba-Gutiérrez, Y., Adenso-Díaz, B., Gupta, S.M.,** Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly, *International Journal of Production Economics*, **111**(2): 741-751, (2008).
- Brennan, L., Gupta, S.M., Taleb, K.N.,** Operations Planning Issues in an Assembly/Disassembly Environment, *International Journal of Operations & Production Management*, **14**(9): 57-67, (1994).
- Brindley, F., Angel, J.,** *Tipping Point: Australia's E-waste Crisis*, Total Environment Centre and Environment Victoria, (2008).
- CFER,** *Implementation Guide for Information Technology Equipment Disassembly and Sorting Centres*,  
<<http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/minerals-metals/files/pdf/mms-smm/busi-indu/rad-rad/pdf/cfe-imp-eng.pdf>>,  
Centres de Formation en Entreprise et Recuperation, (29/04/2013).
- Chung, C.A.,** *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*, ed. Hamid R. Parsaei, CRC Press, Boca Raton, Florida, (2003).
- Cobbing, M.,** *Toxic Tech: Not in Our Backyard. Uncovering the Hidden Flows of e-Waste*, Greenpeace International, Amsterdam, (2008).
- Cui, J., Forssberg, E.,** Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, **99**(3): 243-263, (2003).

- Cui, J., Zhang, L.,** Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review, *Journal of Hazardous Materials*, **158**(2-3): 228-256, (2008).
- Dong, T., Zhang, L., Tong, R., Dong, J.,** A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **30**(5-6): 507-520, (2006).
- EC,** *Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles.*, **L 269**, Official Journal of the European Communities, (2000).
- EEA,** *Waste from electrical and electronic equipment (WEEE) - Quantities, Dangerous, Substances and Treatment Methods*, European Environment Agency, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, Copenhagen, (2003).
- EPA,** *Electronics waste management in the United States*, US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington, DC, (2008).
- EPA,** *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Detailed Tables and Figures for 2008*, US Environmental Protection Agency, Office of Resource Conservation and Recovery, Washington, DC, (2009).
- Erdos, G., Kis, T., Xirouchakis, P.,** Modelling and evaluating product end-of-life options, *International Journal of Production Research*, **39**(6): 1203-1220, (2001).
- EU,** *Directive 2002/95/EC of the European Parliament and Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment*, **L 37**, Official Journal of the European Union, (2002a).
- EU,** *Directive 2002/96/EC of the European parliament and of the council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, **L 37**, Official Journal of the European Union, (2002b).
- Eugster, M., Fu, H.,** *E-waste assessment in P.R. China - a case study in Beijing*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), St.Gallen, Switzerland and Beijing, China, (2004).
- Finlay, A., Liechti, D.,** *e-Waste Assessment South Africa*, Openresearch and Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Johannesburg, South Africa, (2008).
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.A.E.E., Van Wassenhove, L.N.,** Quantitative models for reverse logistics: A review, *European Journal of Operational Research*, **103**(1): 1-17, (1997).
- Gao, M., Zhou, M.C., Tang, Y.,** Intelligent decision making in disassembly process based on fuzzy reasoning Petri nets, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, **34**(5): 2029-2034, (2004).
- Garraway, E., Ott, D.,** *e-Waste Assessment in Trinidad & Tobago: A situational analysis of e-waste management and generation with special emphasis on personal computers*, Egarr & Associates and Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Trinidad and Tobago, (2010).
- González, B., Adenso-Díaz, B.,** A scatter search approach to the optimum disassembly sequence problem, *Computers & Operations Research*, **33**(6): 1776-1793, (2006).

- Grenchus, E., Keene, R., Nobs, C.,** Demanufacturing of Information Technology Equipment, *Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, San Francisco, California, May 5-7: 157-160, (1997).
- Grochowski, D.E., Tang, Y.,** A machine learning approach for optimal disassembly planning, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **22**(4): 374-383, (2009).
- Gungor, A., Gupta, S.M.,** An evaluation methodology for disassembly processes, *Computers & Industrial Engineering*, **33**(1-2): 329-332, (1997).
- Gungor, A., Gupta, S.M.,** Disassembly Sequence Planning for Products with Defective Parts in Product Recovery, *Computers & Industrial Engineering*, **35**(1-2): 161-164, (1998).
- Gungor, A., Gupta, S.M.,** Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, *Computers & Industrial Engineering*, **36**(4): 811-853, (1999).
- Gupta, S.M., Taleb, K.N.,** Scheduling disassembly, *International Journal of Production Research*, **32**(8): 1857-1866, (1994).
- Güngör, A., Gupta, S.M.,** Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm, *International Journal of Production Research*, **39**(3): 481-509, (2001a).
- Güngör, A., Gupta, S.M.,** A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures, *International Journal of Production Research*, **39**(7): 1427-1467, (2001b).
- Güngör, A., Gupta, S.M.,** Disassembly line in product recovery, *International Journal of Production Research*, **40**(11): 2569-2589, (2002).
- Herrmann, C., Luger, T., Ohlendorf, M.,** SiDDatAS - Analysis and Economic Evaluation of Alternative Disassembly System Configurations, *Eco Design 2005: Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, 12-14 December: 210-215, (2005).
- Hesselbach, J., Westernhagen, K.V.,** Disassembly simulation for an effective recycling of electrical scrap, *Proceedings of the First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, 1-3 February: 582-585, (1999).
- Huang, H.-H., Wang, M.H., Johnson, M.R.,** Disassembly sequence generation using a neural network approach, *Journal of Manufacturing Systems*, **19**(2): 73-82, (2000).
- Hui, W., Dong, X., Guanghong, D.,** A genetic algorithm for product disassembly sequence planning, *Neurocomputing*, **71**(13-15): 2720-2726, (2008).
- Huisman, J., Magalini, F., Kuehr, R., Maurer, C., Ogilvie, S., Poll, J., Delgado, C., Artim, E., Szlezak, J., Stevels, A.,** *2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)-Final Report*, United Nations University, (2007).
- Ilgin, M.A., Gupta, S.M.,** Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, *Journal of Environmental Management*, **91**(3): 563-591, (2010).
- Ilgin, M.A., Gupta, S.M.,** Recovery of sensor embedded washing machines using a multi-kanban controlled disassembly line, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **27**(2): 318-334, (2011).

- Inderfurth, K., Langella, I.**, Heuristics for solving disassemble-to-order problems with stochastic yields, *OR Spectrum*, **28**(1): 73-99, (2006).
- Kaebnick, H., O'Shea, B., Grewal, S.S.**, A Method for Sequencing the Disassembly of Products, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **49**(1): 13-16, (2000).
- Kang, H.-Y., Schoenung, J.M.**, Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options, *Resources, Conservation and Recycling*, **45**(4): 368-400, (2005).
- Kaya, M.**, *Küresel Elektronik Atık (e-atık) Pazarı 2009'da 11 Milyar Doları Gececek*, [http://www.turcek.org.tr/pages.php?page=bilgi\\_bankasi&id=137&item=0,137](http://www.turcek.org.tr/pages.php?page=bilgi_bankasi&id=137&item=0,137), (29/04/2013).
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.**, *Simulation with Arena*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, (2004).
- Kim, H.J., Kernbaum, S., Seliger, G.**, Emulation-based control of a disassembly system for LCD monitors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **40**(3-4): 383-392, (2009a).
- Kim, H.J., Lee, D.H., Xirouchakis, P.**, A Lagrangean heuristic algorithm for disassembly scheduling with capacity constraints, *Journal of the Operational Research Society*, **57**(10): 1231-1240, (2006a).
- Kim, H.J., Lee, D.H., Xirouchakis, P.**, Two-phase heuristic for disassembly scheduling with multiple product types and parts commonality, *International Journal of Production Research*, **44**(1): 195-212, (2006b).
- Kim, H.J., Lee, D.H., Xirouchakis, P., Kwon, O.K.**, A branch and bound algorithm for disassembly scheduling with assembly product structure, *Journal of the Operational Research Society*, **60**(3): 419-430, (2009b).
- Kim, H.J., Lee, D.H., Xirouchakis, P., Züst, R.**, Disassembly Scheduling with Multiple Product Types, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **52**(1): 403-406, (2003).
- Kim, J.-G., Jeon, H.-B., Kim, H.-J., Lee, D.-H., Xirouchakis, P.**, Disassembly scheduling with capacity constraints: Minimizing the number of products disassembled, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **220**(9): 1473-1481, (2006c).
- Koc, A., Sabuncuoglu, I., Erel, E.**, Two exact formulations for disassembly line balancing problems with task precedence diagram construction using an AND/OR graph, *IIE Transactions*, **41**(10): 866-881, (2009).
- Kongar, E., Gupta, S.M.**, A Multi-Criteria Decision Making Approach for Disassembly-to-Order Systems, *Journal of Electronics Manufacturing*, **11**(02): 171-183, (2002).
- Kongar, E., Gupta, S.M.**, Disassembly sequencing using genetic algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **30**(5-6): 497-506, (2006a).
- Kongar, E., Gupta, S.M.**, Disassembly to order system under uncertainty, *Omega*, **34**(6): 550-561, (2006b).
- Kongar, E., Gupta, S.M.**, Solving the disassembly-to-order problem using linear physical programming, *International Journal of Mathematics in Operational Research*, **1**(4): 504-531, (2009).

- Krikke, H.R., van Harten, A., Schuur, P.C.,** On a medium-term product recovery and disposal strategy for durable assembly products, *International Journal of Production Research*, **36**(1): 111-139, (1998).
- Krikke, H.R., van Harten, A., Schuur, P.C.,** Business case Roteb: recovery strategies for monitors, *Computers & Industrial Engineering*, **36**(4): 739-757, (1999).
- Kumar, S., Kumar, R., Shankar, R., Tiwari, M.K.,** Expert Enhanced Coloured Stochastic Petri Net and its application in assembly/disassembly, *International Journal of Production Research*, **41**(12): 2727-2762, (2003).
- Kuo, T.C.,** Disassembly sequence and cost analysis for electromechanical products, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **16**(1): 43-54, (2000).
- Laissaoui, S.E., Rochat, D.,** *Technical report on the assessment of e-waste management in Morocco*, Moroccan Cleaner Production Center & Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Casablanca, Morocco, (2008).
- Lambert, A.J.D.,** Optimal disassembly of complex products, *International Journal of Production Research*, **35**(9): 2509-2524, (1997).
- Lambert, A.J.D.,** Linear programming in disassembly/clustering sequence generation, *Computers & Industrial Engineering*, **36**(4): 723-738, (1999).
- Lambert, A.J.D.,** Disassembly sequencing: A survey, *International Journal of Production Research*, **41**(16): 3721-3759, (2003).
- Lambert, A.J.D.,** Exact methods in optimum disassembly sequence search for problems subject to sequence dependent costs, *Omega*, **34**(6): 538-549, (2006).
- Lambert, A.J.D.,** Optimizing disassembly processes subjected to sequence-dependent cost, *Computers & Operations Research*, **34**(2): 536-551, (2007).
- Lambert, A.J.D., Gupta, S.M.,** Demand-Driven Disassembly Optimization for Electronic Products Package Reliability, *Journal of Electronics Manufacturing*, **11**(2): 121-135, (2002).
- Lambert, A.J.D., Gupta, S.M.,** Methods for optimum and near optimum disassembly sequencing, *International Journal of Production Research*, **46**(11): 2845-2865, (2008).
- Langella, I.M.,** Heuristics for demand-driven disassembly planning, *Computers & Operations Research*, **34**(2): 552-577, (2007).
- Lee, D.H., Kang, J.G., Xirouchakis, P.,** Disassembly planning and scheduling: Review and further research, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **215**(5): 695-709, (2001).
- Lee, D.H., Kim, H.J., Choi, G., Xirouchakis, P.,** Disassembly scheduling: Integer programming models, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **218**(10): 1357-1372, (2004).
- Lee, D.H., Xirouchakis, P.,** A two-stage heuristic for disassembly scheduling with assembly product structure, *Journal of the Operational Research Society*, **55**(3): 287-297, (2004).

- Lee, D.H., Xirouchakis, P., Züst, R.,** Disassembly Scheduling with Capacity Constraints, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **51**(1): 387-390, (2002).
- Li, J.R., Khoo, L.P., Tor, S.B.,** An object-oriented intelligent disassembly sequence planner for maintenance, *Computers in Industry*, **56**(7): 699-718, (2005).
- Li, J.R., Khoo, L.P., Tor, S.B.,** Generation of possible multiple components disassembly sequence for maintenance using a disassembly constraint graph, *International Journal of Production Economics*, **102**(1): 51-65, (2006).
- Limaye, K., Caudill, R.J.,** System simulation and modeling of electronics demanufacturing facilities, *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Danvers, Massachusetts, 11-13 May: 238-243, (1999).
- Magashi, A., Schluep, M.,** *e-Waste Assessment Tanzania*, Cleaner Production Centre of Tanzania and Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), (2011).
- Masclé, C., Balasoïu, B.A.,** Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **19**(5): 439-448, (2003).
- McGovern, S.M., Gupta, S.M.,** 2-opt heuristic for the disassembly line balancing problem, *Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing III*, Providence, Rhode Island, 29-30 October: 71-84, (2003).
- McGovern, S.M., Gupta, S.M.,** Deterministic hybrid and stochastic combinatorial optimization treatments of an electronic product disassembly line, *Applications of Management Science: In Productivity, Finance, and Operations*, ed. Kenneth D. Lawrence and Ronald K. Klimberg, **12**, Emerald Group Publishing Limited, 175-197, (2006).
- McGovern, S.M., Gupta, S.M.,** A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, **179**(3): 692-708, (2007a).
- McGovern, S.M., Gupta, S.M.,** Combinatorial optimization analysis of the unary NP-complete disassembly line balancing problem, *International Journal of Production Research*, **45**(18-19): 4485-4511, (2007b).
- McGovern, S.M., Gupta, S.M.,** *The Disassembly Line: Balancing and Modeling*, McGraw-Hill, New York, (2011).
- Meacham, A., Uzsoy, R., Venkatadri, U.,** Optimal disassembly configurations for single and multiple products, *Journal of Manufacturing Systems*, **18**(5): 311-322, (1999).
- Moore, K.E., Gungor, A., Gupta, S.M.,** A Petri net approach to disassembly process planning, *Computers & Industrial Engineering*, **35**(1-2): 165-168, (1998).
- Moore, K.E., Güngör, A., Gupta, S.M.,** Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships, *European Journal of Operational Research*, **135**(2): 428-449, (2001).
- NASA, 2008** *NASA Cost Estimating Handbook*, NASA Headquarters Cost Analysis Division, Washington, DC, (2008).
- Opalić, M., Kljajin, M., Vučković, K.,** Consumer Electronics Disassembly Line Layout, *Polimeri*, **25**: 20-22, (2004).

- Opalić, M., Kljajin, M., Vučković, K.,** Disassembly Layout in WEEE Recycling Process, *Strojarstvo: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, **52**: 51-58, (2010).
- Pati, R.K., Vrat, P., Kumar, P.,** A goal programming model for paper recycling system, *Omega*, **36**(3): 405-417, (2008).
- Penev, K.D., de Ron, A.J.,** Determination of a disassembly strategy, *International Journal of Production Research*, **34**(2): 495-506, (1996).
- Puckett, J., Smith, T.,** *Exporting harm: the high-tech trashing of Asia*, Basel Action Network (BAN) and Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), Seattle, (2002).
- Rai, R., Rai, V., Tiwari, M.K., Allada, V.,** Disassembly sequence generation: A Petri net based heuristic approach, *International Journal of Production Research*, **40**(13): 3183-3198, (2002).
- Ranky, P. G., Morales, L. C., Caudill, R. J.,** Lean disassembly line layout, and network simulation models, *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Boston, Massachusetts, 19-22 May: 36-41, (2003).
- Reller, A., Graedel, T.,** Earth's Natural Wealth: an Audit, *New Scientist*,(2605): 34–41, (2007).
- Renteria, A., Alvarez, E.,** Optimizing the Recycling Process of Electronic Appliances, *Environmental Issues in Supply Chain Management*, ed. Paulina Golinska and Carlos Andres Romano, Springer Berlin Heidelberg, 91-105, (2012).
- Renteria, A., Alvarez, E., Perez, J., del Pozo, D.,** A methodology to optimize the recycling process of WEEE: case of television sets and monitors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **54**(5-8): 789-800, (2010).
- Reveliotis, S.A.,** Uncertainty management in optimal disassembly planning through learning-based strategies, *IIE Transactions*, **39**(6): 645-658, (2007).
- Ridder, C., Schedit, L.G.,** Practical Experiences in the Sony Disassembly Evaluation Workshop, *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Oak Brook, Illinois, May 4-6: 94-98, (1998).
- Rios, P., Stuart, J.A.,** Scheduling selective disassembly for plastics recovery in an electronics recycling center, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, **27**(3): 187-197, (2004).
- Robinson, B.H.,** E-waste: An assessment of global production and environmental impacts, *Science of The Total Environment*, **408**(2): 183-191, (2009).
- Sarin, S., Sherali, H., Bhootra, A.,** A precedence-constrained asymmetric traveling salesman model for disassembly optimization, *IIE Transactions*, **38**(3): 223-237, (2006).
- Scharke, H.,** *Comprehensive Information Chain for Automated Disassembly of Obsolete Technical Appliances*, ed. Bernd Scholz-Reiter, **2**, GITO mbH - Verlag, Berlin, (2003).
- Seliger, G., Kernbaum, S.,** Planning for Remanufacturing and Recycling, *Sustainability in Manufacturing: Recovery of Resources in Product and Material Cycles*, ed. Günther Seliger, Springer, Berlin, 312-341, (2007).
- Seo, K.K., Park, J.H., Jang, D.S.,** Optimal Disassembly Sequence Using Genetic Algorithms Considering Economic and Environmental Aspects, *The*

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **18**(5): 371-380, (2001).
- Shih, L.-H., Lee, S.-C.**, Optimizing Disassembly and Recycling Process for EOL LCD-Type Products: A Heuristic Method, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, **30**(3): 213-220, (2007).
- Shimizu, Y., Tsuji, K., Nomura, M.**, Optimal disassembly sequence generation using a genetic programming, *International Journal of Production Research*, **45**(18-19): 4537-4554, (2007).
- Sim, E., Kim, H., Park, C., Park, J.**, Performance Analysis of Alternative Designs for a Vehicle Disassembly System Using Simulation Modeling, *Systems Modeling and Simulation: Theory and Applications*, ed. Doo-Kwon Baik, **3398**, Springer Berlin Heidelberg, 59-67, (2005).
- Simic, V., Dimitrijevic, B.**, Modelling production processes in a vehicle recycling plant, *Waste Management & Research*, **30**(9): 940-948, (2012).
- Singh, A.K., Tiwari, M.K., Mukhopadhyay, S.K.**, Modelling and planning of the disassembly processes using an enhanced expert Petri net, *International Journal of Production Research*, **41**(16): 3761-3792, (2003).
- Sodhi, M.S., Reimer, B.**, Models for recycling electronics end-of-life products, *OR Spektrum*, **23**: 97-115, (2001).
- Sodhi, M.S., Young, J., Knight, W.A.**, Modelling material separation processes in bulk recycling, *International Journal of Production Research*, **37**(10): 2239-2252, (1999).
- Spengler, T., Ploog, M., Schröter, M.**, Integrated planning of acquisition, disassembly and bulk recycling: a case study on electronic scrap recovery, *OR Spektrum*, **25**: 413-442, (2003).
- Stuart, J.A., Christina, V.**, New metrics and scheduling rules for disassembly and bulk recycling, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, **26**(2): 133-140, (2003).
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı**, *Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği (Taslak)*, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara, (2009).
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı**, *Özel Atık İstatistikleri (2003-2009)*, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara, (2011).
- Taleb, K.N., Gupta, S.M.**, Disassembly of multiple product structures, *Computers & Industrial Engineering*, **32**(4): 949-961, (1997).
- Taleb, K.N., Gupta, S.M., Brennan, L.**, Disassembly of complex product structures with parts and materials commonality, *Production Planning & Control*, **8**(3): 255-269, (1997).
- Tang, J., Liu, Y., Fung, R.Y.K., Luo, X.**, Industrial waste recycling strategies optimization problem: mixed integer programming model and heuristics, *Engineering Optimization*, **40**(12): 1085-1100, (2008).
- Tang, Y., Zhou, M.C.**, A systematic approach to design and operation of disassembly lines, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **3**(3): 324-329, (2006).
- Tang, Y., Zhou, M.C., Caudill, R.J.**, An integrated approach to disassembly planning and demanufacturing operation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17**(6): 773-784, (2001).
- TESİD**, *Elektronik Sanayii Almancağı*, **32**, Türkiye Elektronik Sanayicileri Derneği, İstanbul, (2011).



- Teunter, R.H.**, Determining optimal disassembly and recovery strategies, *Omega*, **34**(6): 533-537, (2006).
- Thierry, M., Salomon, M., Nunen, J.V., Wassenhove, L.V.**, Strategic Issues in Product Recovery Management, *California Management Review*, **37**: 114-135, (1995).
- Tiwari, M.K., Sinha, N., Kumar, P., Rai, R., Mukhopadhyay, S.K.**, A Petri Net based approach to determine the disassembly strategy of a product, *International Journal of Production Research*, **40**(5): 1113-1129, (2002).
- Torres, F., Puente, S.T., Aracil, R.**, Disassembly Planning Based on Precedence Relations among Assemblies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **21**(5): 317-327, (2003).
- Tripathi, M., Agrawal, S., Pandey, M.K., Shankar, R., Tiwari, M.K.**, Real world disassembly modeling and sequencing problem: Optimization by Algorithm of Self-Guided Ants (ASGA), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **25**(3): 483-496, (2009).
- TUIK**, *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları*, <<http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=10736>>, T.C. Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı, (29/04/2013).
- UN**, *World Population Prospects: The 2002 Revision*, United Nations Population Division, (2003).
- UNEP**, *Call for Global Action on E-waste*, United Nations Environment Programme, (2006).
- USCB**, *U.S. and World Population Clock*, <<http://www.census.gov/popclock/>>, United States Census Bureau, (04/05/2013).
- Veerakamolmal, P., Gupta, S.M.**, A case-based reasoning approach for automating disassembly process planning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **13**(1): 47-60, (2002).
- Waema, T., Mureithi, M.**, *E-waste Management in Kenya*, Kenya ICT Action Network (KICTANet), Nairobi, Kenya, (2008).
- Wasswa, J., Schlupe, M.**, *e-Waste assessment in Uganda: A situational analysis of e-waste management and generation with special emphasis on personal computers*, Uganda Cleaner Production Center and Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Kampala, Uganda and St.Gallen, Switzerland, (2008).
- Widmer, R., Lombard, R.**, *e-Waste assessment in South Africa, a case study of the Gauteng province*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA) and State Secretariat for Economical Affairs Switzerland (SECO), St.Gallen, Switzerland, (2005).
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H.**, Global perspectives on e-waste, *Environmental Impact Assessment Review*, **25**(5): 436-458, (2005).
- Wiendahl, H.P., Lorenz, B., Brückner, S.**, The necessity for flexible and modular structures in hybrid disassembly processes, *Production Engineering*, **5**: 71-76, (1998).
- Wiendahl, H.P., Scholz-Reiter, B., Bürkner, S., Scharke, H.**, Flexible disassembly systems-layouts and modules for processing obsolete products, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **215**(5): 723-732, (2001).

- Williams, J.A.S.**, A review of electronics demanufacturing processes, *Resources, Conservation and Recycling*, **47**(3): 195-208, (2006).
- Williams, J.A.S., Wongweragiat, S., Qu, X., McGlinch, J.B., Bonawi-tan, W., Choi, J.K., Schiff, J.**, An automotive bulk recycling planning model, *European Journal of Operational Research*, **177**(2): 969-981, (2007).
- Wright, T.P.**, Factors Affecting the Cost of Airplanes, *Journal of the Aeronautical Sciences (Institute of the Aeronautical Sciences)*, **3**(4): 122-128, (1936).
- Zeid, I., Gupta, S.M., Bardasz, T.**, A case-based reasoning approach to planning for disassembly, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **8**(2): 97-106, (1997).
- Zha, X.F., Lim, S.Y.E.**, Assembly/disassembly task planning and simulation using expert Petri nets, *International Journal of Production Research*, **38**(5): 3639-3676, (2000).
- Zussman, E., Zhou, M.C.**, A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **15**(1): 190-194, (1999).
- Zussman, E., Zhou, M.C.**, Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **16**(2): 171-179, (2000).

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Ozan ÇAPRAZ  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** Tire/İzmir - 23/08/1988  
**Lisans Üniversitesi:** Pamukkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

### Yayın Listesi:

- Supçiller, A.A., **Çapraz, O.**, AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması, *İstanbul Üniversitesi Ekonometri ve İstatistik e-Dergisi*, (13): 1-22, (2011).
- Supçiller, A.A., **Çapraz, O.**, AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması, *12. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması ve İstatistik Sempozyumu*, Özet Kitabı, 26-28 Mayıs, Denizli, (2011).
- **Çapraz, O.**, Güngör, A., E-atık Demontaj Sistemleri için Etkili Bir Yerleşim Planlaması, *31. Ulusal Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi*, Özet Kitabı, 5-7 Temmuz, Sakarya, (2011).
- Güngör, A., **Çapraz, O.**, Koyuncuoğlu, M.U., Bir Üniversite Yerleşkesinin Engelli Dostluğu Düzeyinin Tespiti, *17. Ulusal Ergonomi Kongresi*, Tam Metin (CD), 14-16 Ekim, Eskişehir, 292-302, (2011).