

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

**Proje No: 111M428**

Prof.Dr. Aşkiner GÜNGÖR  
Ozan ÇAPRAZ

OCAK 2013  
DENİZLİ

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Teknolojinin gelişmesiyle her geçen gün artan elektronik atık (e-atık) miktarı, çevre ve insan sağlığı üzerinde tehdit oluşturmaktadır. Günümüzde, giderek büyüyen e-atık problemine önlem almak için ülkeler 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 arttırmıştır.

E-atıkların geri kazanımı üç bakımından önemlidir. Bunlardan birisi e-atıkların içerdiği zehirli maddelerin çevrenin sürdürülebilirliği üzerinde ve insan sağlığı üzerinde yaratacağı olumsuz etkilerin minimize edilmesidir. İkincisi e-atıkların barındırdığı değerli metallerin taşıdığı ekonomik potansiyelin değere dönüştürülmesidir. Bir diğeri ise e-atıklardan elde edilen malzemelerle dünyada var olan sınırlı kaynaklara olan ihtiyacın azaltılmasıdır. E-atıkların geri kazanım sürecinde önemli süreçlerden birisi demontajdır.

Demontaj bir seri operasyon yoluyla kullanım süresini tamamlamış ürünlerden değerli parça ve malzemelerin metodik olarak elde edilmesini sağlar. Bu operasyonlar genellikle emek yoğun faaliyetleri kapsar ve bu yüzden maliyetlidir. Demontaj sistemlerinin mümkün olduğunca verimli, düşük maliyetli ve yüksek kapasiteli olması geri kazanım operasyonlarının ekonomisi açısından önemlidir.

TÜBİTAK tarafından desteklenen bu projede, e-atık demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi için ideal yerleşim planlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmış ve literatüre önemli katkılar sağlanmıştır.

Projenin hazırlanması aşamasından başlayarak, projenin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesine kadar geçen süreçte kararlı ve disiplinli çalışmalarından dolayı proje bursiyeri Ozan ÇAPRAZ'a ve projeye değerli görüşleri ile katkı sağlayan Pamukkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi ve Berlin Teknik Üniversitesi'nde doktora öğrencisi olan Olcay POLAT'a teşekkür ederim.

Ayrıca, projenin 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 SARIK'a ve Türkiye tesisi çevre mühendisi Sayın Arzu KARABACAK'a ve tüm Exitcom Recycling personeline proje ekibi olarak teşekkür ederiz.

Bu proje, 111M428 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bilimsel araştırma çalışmalarının yürütülmesinde her zaman ilk kaynak olan TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Projede elde edilen bulguların ve sonuçların hem teorik hem de uygulama alanına katkı sağlamasını dilerim.

Prof.Dr. Aşkıner GÜNGÖR  
Denizli, 2013

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ .....	ix
KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Projenin Amacı .....	1
1.2. Projenin Kapsamı.....	1
2. E-ATIK HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. E-atık Tanımı ve Kategorileri.....	5
2.2. E-atıkların İçerikleri .....	5
2.2.1. E-atıkların İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkisi.....	6
2.2.2. E-atıkların Ekonomik Potansiyeli .....	7
2.3. E-atıklar Üzerine Yasal Çerçeve .....	8
2.4. Genel Değerlendirme .....	9
3. ÜRÜN GERİ KAZANIMI VE DEMONTAJ .....	10
3.1. Montaj ve Demontaj Arasındaki Farklılıklar .....	12
3.2. Demontaj Sistemleri.....	13
3.2.1. Demontaj Çizelgeleme .....	13
3.2.2. Demontaj Sıralama.....	14
3.2.3. Demontaj Hat Dengeleme .....	14
3.2.4. Demontaj Sipariş Sistemi.....	14
4. E-ATIK DEMONTAJ SİSTEMLERİNDE YERLEŞİM PLANLAMASI.....	15
4.1. Mevcut Demontaj Yerleşim Yaklaşımları .....	15
4.2. Literatür Taraması: Demontaj Sistemlerinde Yerleşim Planlaması .....	16

5. MATERYAL VE YÖNTEM .....	22
5.1. Veri Toplama .....	22
5.1.1. Demontaj Süreçleri .....	22
5.1.1.1. Manuel Demontaj Süreci.....	24
5.1.1.2. Yığın Geri Dönüşüm Süreci.....	26
5.1.2. Ürün Analizi .....	28
5.1.2.1. Kişisel Bilgisayar (PC).....	28
5.1.2.2. CRT TV ve CRT monitör .....	29
5.1.2.3. LCD TV ve monitör .....	30
5.2. Önerilen Yerleşim Alternatifleri ve İlişkili Simülasyon Modelleri .....	32
5.2.1. Senaryo–1: Tek Demontaj İş İstasyonu .....	33
5.2.1.1. Senaryo–1(a): Tek Demontaj İş İstasyonu (+1) .....	34
5.2.1.2. Senaryo–1 Simülasyon Modeli.....	34
5.2.2. Senaryo–2: Sınıflandırma .....	35
5.2.2.1. Senaryo–2 Simülasyon Modeli.....	38
5.2.3. Senaryo–3: Hat Yerleşimi – Yakınsak Malzeme Akışı .....	39
5.2.3.1. Senaryo–3(a): Hat Yerleşimi – Yakınsak Malzeme Akışı (+1) .....	40
5.2.3.2. Senaryo–3 Simülasyon Modeli.....	40
5.2.4. Senaryo–4: Hat Yerleşimi – İraksak Malzeme Akışı.....	42
5.2.4.1. Senaryo–4 Simülasyon Modeli.....	42
5.2.5. Senaryo–5: Hat Yerleşimi – İraksak ve Yakınsak Malzeme Akışı .....	44
5.2.5.1. Senaryo–5 Simülasyon Modeli.....	44
6. SİMÜLASYON SONUÇLARI .....	45
6.1. Senaryo–1 Simülasyon Sonuçları .....	45
6.1.1. Senaryo–1(a) Simülasyon Sonuçları .....	48
6.2. Senaryo–2 Simülasyon Sonuçları .....	48
6.3. Senaryo–3 Simülasyon Sonuçları .....	51
6.3.1. Senaryo–3(a) Simülasyon Sonuçları .....	53

6.4. Senaryo–4 Simülasyon Sonuçları .....	54
6.5. Senaryo–5 Simülasyon Sonuçları .....	56
6.6. Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	58
6.6.1. Bileşen Miktarı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	58
6.6.2. Demontajı Yapılan Toplam Atık Sayısı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması.	60
6.6.3. Toplam Gelir Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	60
6.6.4. Katma Yaratmayan Aktiviteler Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	61
6.6.5. Genel Karşılaştırma .....	61
6.6.6. Sonuçların İstatistiksel Analizi .....	62
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
8. KAYNAKLAR.....	67

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 ABD’de elektronik ürün satışları (1984–2006) (EPA, 2008).....	3
Şekil 2 Dünya’da 1000 kişi başına bilgisayar ve cep telefonu sayısı (BAKER VD., 2004).....	3
Şekil 3 Türkiye’de e-atık toplama miktarı (2006–2009).....	4
Şekil 4 THIERRY VD. (1995) geri kazanım seçenekleri.....	10
Şekil 5 Yeniden üretim tesislerinde bir birimin ürünün akışı.....	11
Şekil 6 E-atık demontaj sistemlerinin karakteristikleri.....	15
Şekil 7 Mevcut demontaj yerleşim biçimleri (OPALIĆ VD., 2010).....	16
Şekil 8 HESSELBACH VE WESTERNHAGEN (1999) esnek demontaj sistemi yerleşimi.....	17
Şekil 9 Electrocycling demontaj sistemi yerleşimi (SCHARKE, 2003).....	18
Şekil 10 Sony manuel demontaj hattı yerleşimi (SCHARKE, 2003).....	19
Şekil 11 Coolrec manuel demontaj hattı yerleşimi (SCHARKE, 2003).....	19
Şekil 12 Tüketici ürünleri demontaj tesisi yerleşimi (OPALIĆ VD., 2010).....	20
Şekil 13 Demontaj sistemlerini planlama adımları (SELIGER VE KERNBAUM, 2007).....	22
Şekil 14 Paydaş firma mevcut tesis yerleşim planı.....	23
Şekil 15 Paydaş firmada geri dönüşüm süreçleri.....	23
Şekil 16 E-atıkların tesise girişinden sonra depolanması ve sınıflandırılması.....	24
Şekil 17 İş istasyonlarında demontaj operasyonları ve iş istasyonu çevresinde yer alan e-atıklar.....	24
Şekil 18 E-atıkların demontajından elde edilen bileşenler ve sınıflandırma kutuları.....	25
Şekil 19 Konteynırlar içerisinde yer alan plastik çıktılar.....	25
Şekil 20 Paydaş firmada yığın geri dönüşüm süreci ve elde edilen bileşen tipleri.....	26
Şekil 21 Konveyör operatörü ve kırıcı yükleme bandı.....	26
Şekil 22 Zincirli kırıcı ve manuel ayrıştırma bandı.....	27
Şekil 23 Miknatıs ve NE ayırıcı.....	27
Şekil 24 Depolama alanında e-atık çıktıları.....	27
Şekil 25 PC’nin bileşenleri ve konumları (CFER).....	28
Şekil 26 CRT monitör bileşenleri ve konumları (CFER).....	29

Şekil 27 LCD monitör bileşenleri ve konumları (KIM VD., 2009) .....	30
Şekil 28 LCD modül bileşenleri ve konumları.....	31
Şekil 29 Senaryo–1: tek demontaj iş istasyonu.....	33
Şekil 30 Senaryo–1’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	34
Şekil 31 Senaryo–1’de sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	35
Şekil 32 Senaryo–2: sınıflandırma .....	36
Şekil 33 PC için demontaj operatörü öğrenme eğrisi .....	37
Şekil 34 CRT TV ve monitör için demontaj operatörü öğrenme eğrisi .....	37
Şekil 35 LCD TV ve monitör için demontaj operatörü öğrenme eğrisi .....	38
Şekil 36 Senaryo–2’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	38
Şekil 37 Senaryo–2’de PC grubu için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	39
Şekil 38 Senaryo–3: Hat Yerleşimi – Yakınsak Malzeme Akışı.....	40
Şekil 39 Senaryo–3’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	41
Şekil 40 Senaryo–3’de sınıflandırma operatörü için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	41
Şekil 41 Senaryo–4: Hat yerleşimi – İraksak malzeme akışı.....	42
Şekil 42 Senaryo–4’de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	43
Şekil 43 Senaryo–4’de kapalı döngü hat için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü) .....	43
Şekil 44 Senaryo–5: hat yerleşimi: İraksak ve yakınsak malzeme akışı.....	44
Şekil 45 Senaryo–1’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%).....	46
Şekil 46 Senaryo–1’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı – (%) .....	47
Şekil 47 Senaryo–1 ve senaryo–1(a)’da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarları .....	48
Şekil 48 Senaryo–2’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%).....	49
Şekil 49 Senaryo–1 ve senaryo–2’de e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarları .....	50
Şekil 50 Senaryo–2’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı – (%) .....	50
Şekil 51 Senaryo–3’de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%).....	52
Şekil 52 Senaryo–3’de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı – (%) .....	52

Şekil 53 Senaryo–1 ve senaryo–3(a)'da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarları .....	53
Şekil 54 Senaryo–4'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%).....	55
Şekil 55 Senaryo–4'de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı – (%) .....	55
Şekil 56 Senaryo–5'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%).....	57
Şekil 57 Senaryo–5'de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı – (%) .....	57
Şekil 58 Bileşen miktarı için senaryoların karşılaştırılması.....	58
Şekil 59 Demontajı yapılan toplam atık sayısı için senaryoların karşılaştırılması .....	60
Şekil 60 Toplam gelir için senaryoların karşılaştırılması.....	60
Şekil 61 Katma değer yaratmayan süreler için senaryoların karşılaştırılması.....	61



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1 EU WEEE direktiflerine göre e-atık kategorileri (EU, 2002a).....	5
Tablo 2 Üç ana e-atık kategorisi için malzeme bileşenleri – (%) (AMOYAW-OSEI VD., 2011)6	
Tablo 3 Dünya’da kalan doğal kaynak stokları (RELLER VE GRAEDEL, 2007) .....	8
Tablo 4 Montaj ve demontaj aktivitelerinin operasyonel ve teknik farklılıkları .....	12
Tablo 5 PC demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	28
Tablo 6 CRT TV ve monitör demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	29
Tablo 7 LCD TV ve monitör demontajından elde edilen bileşenler ağırlıkları ve birim satış fiyatları .....	31
Tablo 8 Senaryo–1 için tekrar sayısının yeterliliği .....	46
Tablo 9 Senaryo–2 için tekrar sayısının yeterliliği .....	49
Tablo 10 Senaryo–3 için tekrar sayısının yeterliliği .....	51
Tablo 11 Senaryo–4 için tekrar sayısının yeterliliği .....	54
Tablo 12 Senaryo–5 için tekrar sayısının yeterliliği .....	56
Tablo 13 Senaryolarda elde edilen bileşen miktarları .....	59
Tablo 14 Değerlendirme kriterlerine göre senaryoların karşılaştırılması .....	61
Tablo 15 Toplam gelir için tek örneklem Kolmogrov Smirnov testi sonuçları .....	63
Tablo 16 İşlenen atık miktarı için tek örneklem Kolmogrov Smirnov testi sonuçları.....	63
Tablo 17 Toplam gelir için Kruskal-Wallis H testi sonuçları .....	63
Tablo 18 İşlenen atık miktarı için Kruskal-Wallis H testi sonuçları.....	64

**KISALTMALAR DİZİNİ**

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

## ÖZET

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 projede e-atık geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahip olan demontaj sistemleri için ideal yerleşim tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Projenin 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 sayılarla ifade 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.

Çalışma, e-atık demontaj sistemlerinin alternatif yerleşimlerini simülasyon modelleri ile test ederek mevcut literatürün geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çalışma, demontaj sistemlerinde bulunan e-atıkların barındırdığı yapısal belirsizlikler nedeni ile demontaj sürelerini bulanık olarak ele almakta, demontaj işlemlerinde ise öğrenme etkisini de dikkate alarak önerilen modellerin kalitesini artırmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** E-Atık; Geri Kazanım; Demontaj; Yerleşim Planlaması; Simülasyon

## **ABSTRACT**

Recycling 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 project is to design ideal layout for disassembly systems which carries a crucial role in e-waste recycling process. In the first phase of the project, e-waste disassembly systems and processes were closely investigated and necessary 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 considered to be fuzzy numbers in order to handle the structural uncertainty and variability of e-waste products. The results of the simulation models were compared according to 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.

The study contributes to the advancement of the related literature by providing simulation analysis of proposed alternative e-waste disassembly layout plans. In addition, the study provides improved simulation models by taking into account the fuzzy operation times of disassembly activities and learning curve effects on disassembly times.

**Keywords:** E-waste; WEEE; Recycling; Disassembly; Layout Planning; Simulation

## 1. GİRİŞ

Küreselleşme ve beraberinde getirdiği tüketime dayalı ekonomik büyüme modeli hem üretimi hem de buna bağlı olarak tüketimi hızla artmıştır ki bu artış dünya çapında genişleyerek devam etmektedir. Teknolojik gelişmelerle de hayatımızın her alanında çok çeşitli elektronik ve elektronik ürünler (EEE) yer almıştır. Bu ürünlerin gerek teknolojik yenilikler gerekse moda baskıları nedeni ile ürün yaşam süreleri gün geçtikçe kısaltılmakta ve ürünler birkaç ay ile birkaç yıl arasında kullanım dışı kalarak atık (e-atık) haline gelmektedir. Teknolojinin sürekli gelişmesi ve her geçen gün yeni ürünlerin insanların kullanımına sunulması ile e-atıkların gelecekte daha da artacağına kesin gözü ile bakılmaktadır. UNEP (2006) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, dünya üzerinde yıllık 20 ile 50 milyon ton arasında e-atık üretilmekte ve her yıl % 5 ile % 8 arasında bir artış göstermektedir.

Oluşan e-atıkların yönetilmesi ve mümkünse geri kazanılması önemli konulardan birisi haline gelmiştir. E-atıkların yönetilmesi temelde üç amaç için gereklidir: (1) E-atıkların barındırdığı altın, gümüş paladyum gibi değerli elementlerin ve ekonomik değer taşıyan diğer malzeme bileşenlerinin elde edilerek ekonomik değer yaratılması (WIDMER VD., 2005). (2) E-atıkların içlerinde barındırdığı zararlı malzeme bileşenlerinin çevresel problemlere dönüşmeden ve insan sağlığına zarar vermeden yönetilmesi (CUI VE FORSSBERG, 2003; COBBING, 2008). (3) E-atıklardan elde edilecek olan metal, plastik vb. malzemelerle dünyanın sınırlı doğal kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkı sağlanması. Bu amaçların gerçekleşmesine yönelik gerekli iklim gün geçtikte daha da uygun hale gelmektedir. Yani toplumlar bilinçlenmeye, bu alana yönelik yatırım yapan şirketler çoğalmaya ve en önemlisi süreci teşvik eden yasa ve yönetmelikler hazırlamaya ve uygulanmaya başlanmıştır.

E-atıkların geri kazanımında kullanılan farklı seçenekler sunulmuştur: yeniden kullanım, onarım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf. Demontaj, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf gibi çeşitli geri kazanım operasyonlarında başlıca gerçekleştirilen bir faaliyettir. Demontaj, geri kazanılabilir ürünleri, gerek parçalayarak, gerekse parçalamadan alt parçalarına (veya bileşenlerine) ayırma sürecidir. 1990'ların sonlarında literatürde tanımlanmış olan demontaj sistemleri içerisinde çizelgeleme, sıralama, hat dengeleme, sipariş sistemi gibi çeşitli konuları barındırmaktadır ve bu çalışma alanları güncel araştırmalarla geliştirilmektedir.

### 1.1. Projenin Amacı

E-atıklar üzerinde hazırlanan yönetmelikler nedeniyle günümüzde atık sahalarına ve geri dönüşüm tesislerine gönderilen e-atık miktarını arttırmıştır ve gelecekte daha da arttıracaktır. Bu nedenle daha verimli, daha düşük maliyetli ve daha yüksek kapasite çalışan demontaj sistemlerinin tasarlanması gereklidir. Bu düşünce altında, bu projede e-atık demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi için ideal yerleşim planlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Kocaeli ilinde bulunan bir e-atık geri kazanım tesisi ile görüşülmüş, proje kapsamında işbirliği desteği sağlanmıştır.

### 1.2. Projenin Kapsamı

Projenin kapsamında, e-atık demontaj sistemlerinde yerleşimi etkileyebilecek operasyonel yaklaşımlar altında alternatif yerleşim planları önerilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen başlıca işlemler sırasıyla şu şekildedir: Projede 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 geliştirilmiştir. Simülasyon sistemlerin planlanması, tasarımı ve kontrolünde etkili bir araçtır ve geliştirilen alternatif yerleşim planlarının demontaj sistemleri üzerindeki etkisinin test edilmesi amacıyla ayrık olaylı benzetim kullanılmıştır. Simülasyon modelleri ARENA 10.0 kullanılarak geliştirilmiştir. Demontaj sistemlerine getirilen ürünlerin barındırdığı değişkenlik ve yapısal belirsizlikler, sistem içerisinde kullanılan pek çok kavramın bulanıklık olmasına neden olur. Bu noktada projede bulanık mantık kavramı kullanılmış ve üretilen simülasyon modellerinde işlem süreleri bulanık sayılarla ifade edilmiştir. Proje, bu yönüyle özgündür ve literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır. Projenin son aşamasında ise, geliştirilen simülasyon modelleri farklı performans ölçülerine dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır.

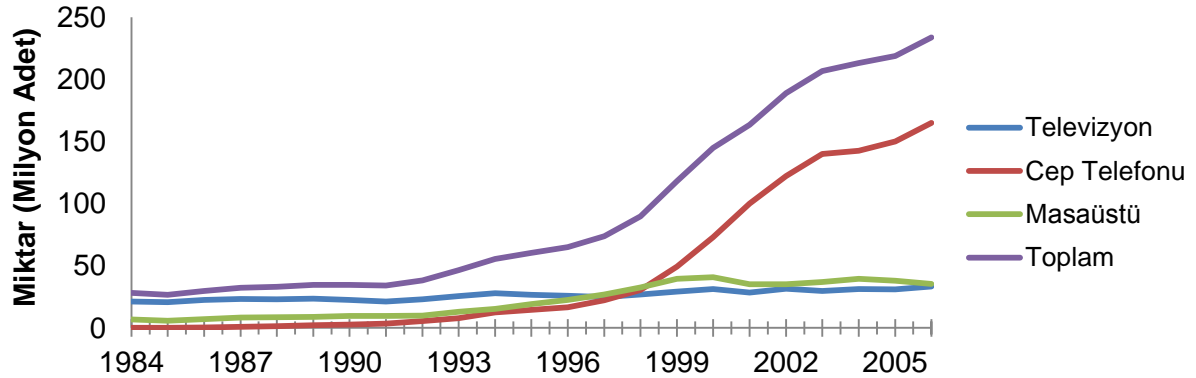
Projenin kapsamı, demontaj sistemlerinin yerleşimlerin tasarımı ile sınırlandırılmıştır. Tersine lojistik, üretim planlama, demontaj çizelgeleme, demontaj sıralama ve demontaj hat dengeleme gibi ürün geri kazanımında önemli diğer problemler projenin dışında bırakılmıştır.

Projenin geri kalan bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır: İkinci bölümde, e-atıkların tanımı verilmiş ve e-atıkların ekonomi, çevre ve sağlık 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 verilmiştir. Literatürde yer alan demontaj problemleri ile ilgili bir taramada bu bölümde yer almaktadır. Dördüncü bölümde, proje 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 tanımlanmış ve e-atık demontaj sistemlerinde yerleşimi etkileyebilecek operasyonel yaklaşımlar altında alternatif yerleşim planları hazırlanmıştır. Hazırlanan yerleşim planların detayları ve ARENA 10.0 programında hazırlanan simülasyon modelleri sunulmuştur. Elde edilen simülasyon çıktıları farklı performans kriterlerine göre dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır ve yorumlanmıştır. Son bölümde ise sonuçlar ve gelecek çalışma önerileri sunulmuştur.

## 2. E-ATIK HAKKINDA GENEL BİLGİLER

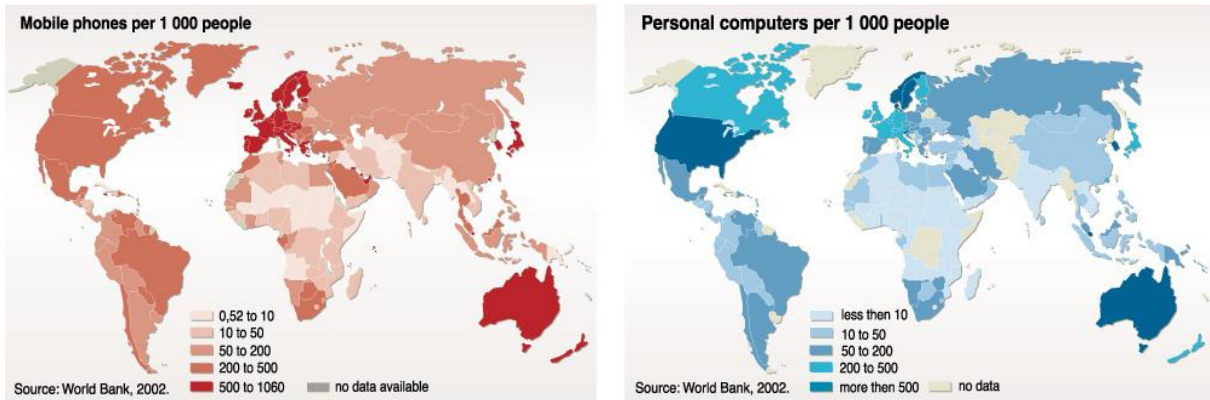
Günümüzde, dünya üzerinde 7,023 milyar civarında insanın yaşadığı tahmin edilmektedir (USCB, 2012). Birleşmiş Milletler (UN) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, dünya nüfusu her yıl ortalama % 1,2 oranında artmaktadır ve 2050 yılında yaklaşık 12,8 milyar insana ulaşacağı öngörülmüştür (UN, 2003). 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 1'de sunulmuştur (EPA, 2008). ABD'de 1984 yılında cep telefonu satışı 0,11 milyon adet iken, bu rakam 2006 yılında 165,1 milyon adete çıkmıştır. Masaüstü bilgisayar satışları ise 1984 yılından 2006 yılına %56,81 oranında bir artış göstermiştir.



Şekil 1 ABD'de elektronik ürün satışları (1984–2006) (EPA, 2008)

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

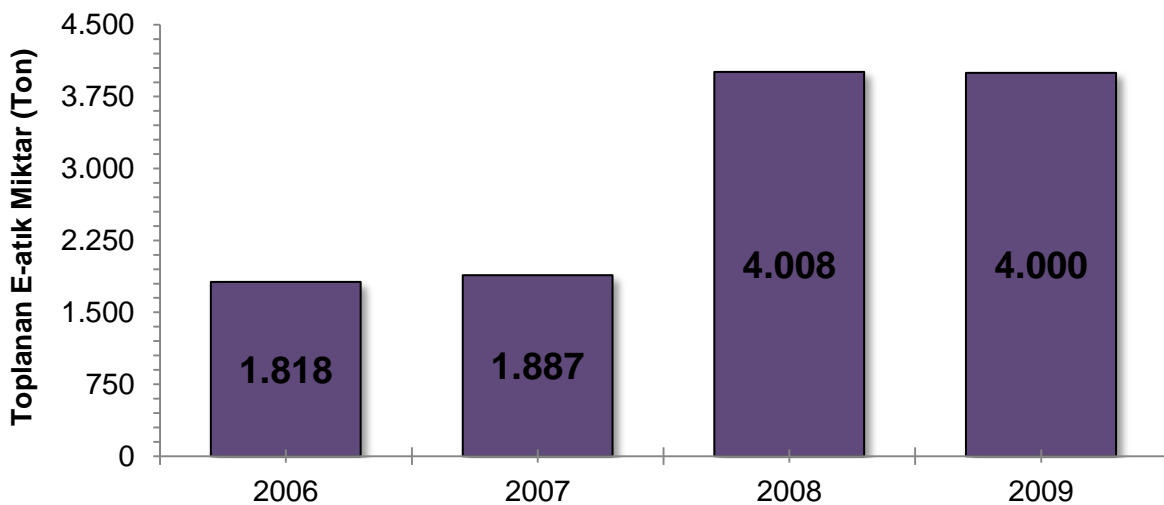


Şekil 2 Dünya'da 1000 kişi başına bilgisayar ve cep telefonu sayısı (BAKER VD., 2004)

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. Dolayısıyla 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 Programına (UNEP) göre, dünya üzerinde yıllık 20 ile 50 milyon ton arasında e-atık üretilmekte ve her yıl % 5 ile % 8 arasında bir artış göstermektedir (UNEP, 2006) ve en fazla e-atık Avrupa, Amerika ve Avustralya'da üretilmektedir (ROBINSON, 2009). 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 VD., 2007). EPA, 2007 yılında 140 milyon cep telefonun, 26,9 milyon televizyonun ve 41,1 milyon bilgisayarın (29,9 milyon masaüstü ve 12 milyon dizüstü) kullanılmayacak durumda olacağını tahmin etmiştir (EPA, 2009). 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).

Türkiye'de, 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 itibarıyla bu rakam 4.000 tona ulaşmıştır (Şekil 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 BAKANLIĞI, 2011).



Şekil 3 Türkiye'de e-atık toplama miktarı (2006–2009)



## 2.1. E-atık Tanımı ve Kategorileri

AEEE veya e-atık, kullanıcısına herhangi bir değer yaratmayan ve çeşitli formlarda elektrikli ve elektronik ürünleri kapsayan genel bir terim olarak tanımlanır (WIDMER VD., 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 projede, AEEE ve e-atık terimleri eş anlamlıdır.

2002/96/EC WEEE direktifine (EU, 2002a) göre e-atıkları oluşturan elektrikli ve elektronik ürünler Tablo 1'de sunulduğu üzere 10 kategoriden oluşmaktadır. Tablo 1'de listelenen on kategori içinde 1 ve 4 numaralı kategoriler arasında yer alan e-atıkların oluşum miktarı, üretilen tüm e-atıkların hemen hemen % 95'ini oluşturmaktadır (WIDMER VD., 2005).

Tablo 1 EU WEEE direktiflerine göre e-atık kategorileri (EU, 2002a)

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.)	Medical Equipment
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 yapılardır. E-atıkların içerikleri genellikle beş grupta toplanmıştır (WIDMER VD., 2005):

- Demir içeren metaller (fe metal),
- Demir içermeyen metaller (non-fe metal),
- Cam,
- Plastik,
- Diğerleri.

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 VD., 2007). Üç ana e-atık kategorisi için ortalama malzeme yapısı Tablo 2'de sunulmuştur (AMOYAW-OSEI VD., 2011).

Tablo 2 Üç ana e-atık kategorisi için malzeme bileşenleri – (%) (AMOYAW-OSEI VD., 2011)

MALZEME	BÜYÜK EV ALETLERİ (%)	KÜÇÜK EV ALETLERİ (%)	İCT 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 içerdikleri maddeler, e-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 (polikorlu bifenil) 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,
- içerisinde 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.**

Tehlikeli elementler, e-atıklar içerisinde baskılı devre kartları (PCB), alev geciktiricili plastikler, kapasitörler, bataryalar, sıvı kristal, cıvalı anahtarlar, CRT ve dirençler içerisinde bulunurlar. Tehlikeli elementler e-atıklar içerisinde düşük miktarlarda bulunmalarına rağmen, e-atıkların kontrolsüz bir şekilde işlenmesi durumunda insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi problemlere neden olabilirler (WILKINSON VD., 2001).

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 Plastikler:** Düşük sıcaklıklarda yanınca zehirli gazlar çıkarır.
- **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 içerisinde Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Platin (Pt) gibi önemli miktarda değerli metalleri barındırır (WIDMER VD., 2005). Değerli metallerin yüksek miktarı eğlence ve tüketici ekipmanlarının yanı sıra ofis, bilgi ve iletişim ekipmanlarının ana bileşeni olan PCB'lerde bulunur (AMOYAW-OSEI VD., 2011). Bir ton PCB'nin içerisinde 520 gr gümüş ve 68 g altın ve bir ton DVD oynatıcının içerisinde 700 gr gümüş ve 100 gr altın bulunabilir (HUISMAN VD., 2007). Günümüzde her bir kişisel bilgisayarlar 1 gram altın içermektedir. 1 ton e-atık yaklaşık olarak 0,2 ton bakır içerir (WIDMER VD., 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 kaynakları kullanmaktadır. Şu bir gerçektir ki, içerisinde bulunduğumuz Dünya'da kaynaklarımız sınırsız değildir ve tüketim hızına bağlı olarak gün geçtikçe azalmaktadır. RELLER VE GRAEDEL (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, günümüzün evrensel tüketim oranları varsayıldığından nadir bulunan ve bilgisayar ve televizyonların sıvı kristal ekranlarının (LCD) yapımında kullanılan indiyumun stoklarının 13 yıl sonra tükeneceğini belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3 Dünya’da kalan doğal kaynak stokları (RELLER VE GRAEDEL, 2007)

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 (WEEE) (EU, 2002a) ve 2002/95/EC sayılı Bazı Zararlı Maddelerin Kullanılmasının Sınırlandırılması Direktifi (RoHS) (EU, 2002b) yayımlamıştır.

Bahse konu WEEE Direktifi, 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 (EU, 2002a). RoHS direktifi ise, elektrikli ve elektronik ürünlerin bazı tehlikeli madde içeriklerinin azaltılmasını teminen yayınlanmıştır. 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 (EU, 2002b).

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 BAKANLIĞI, 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 istemem toplama noktalarına getirmekle ve yenisi alırken eskisini bayiler götürmekle yükümlüdürler.” Bu taslak yönetmelikte, 2018 yılına kadar en az 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

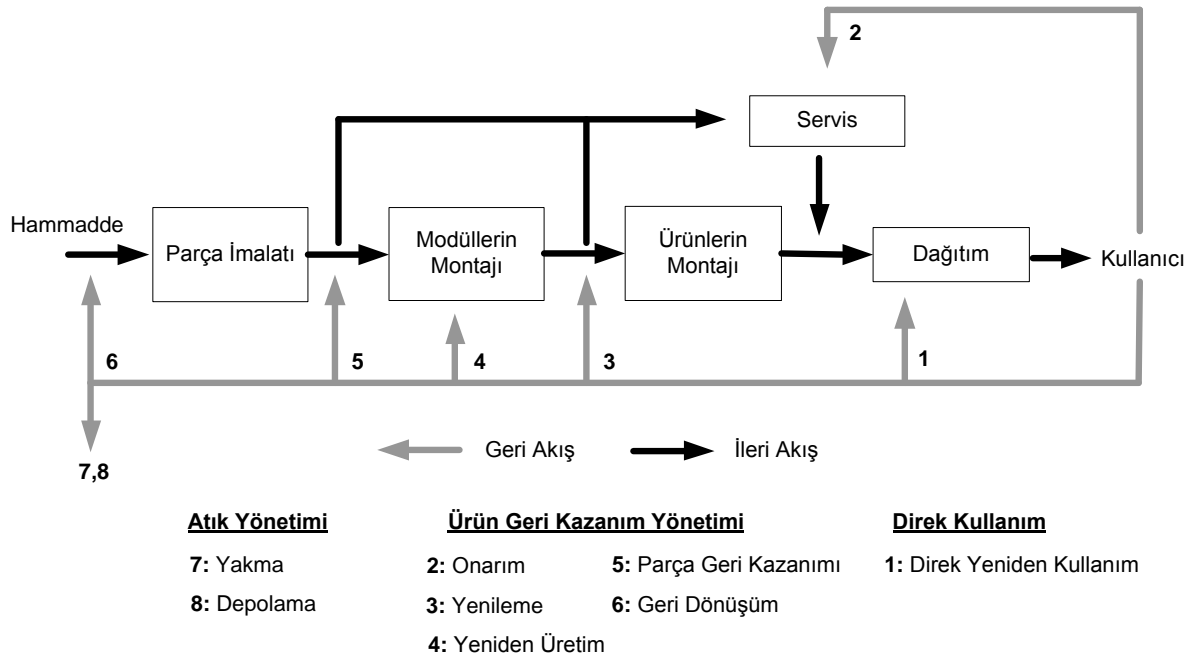
E-atıkların içerdiği cıva, kurşun, arsenik, kadmiyum, selenyum gibi zehirli elementler nedeniyle çevrenin sürdürülebilirliği üzerinde yaratacağı olumsuz etkileri vardır. Diğer taraftan, e-atıkları ilerinden barındırdıkları altın, gümüş gibi değerli metaller nedeniyle ekonomik potansiyele sahiptir. Ayrıca 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 evre 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. ÜRÜN GERİ KAZANIMI 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)

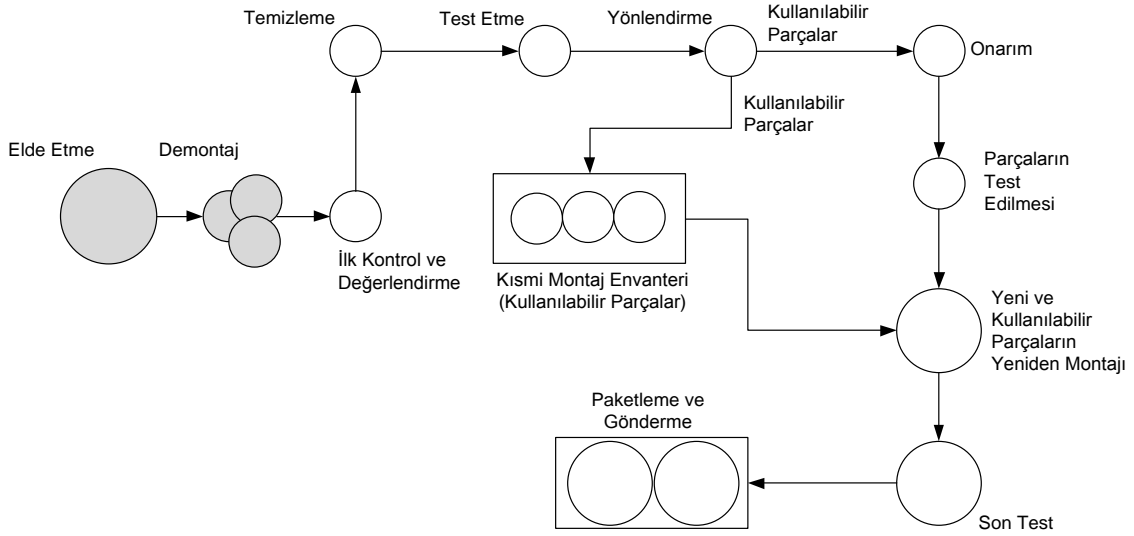
Ürün geri kazanımı, depolara gönderilen atık miktarını minimize etmek amacıyla geri dönüşüm veya yeniden üretim yoluyla atık ürünlerden malzeme ve parçaların elde edilmesini amaçlamaktadır (CUI VE ZHANG, 2008; MCGOVERN VE GUPTA, 2010). E-atıkların geri kazanımında kullanılan farklı seçenekler sunulmuştur. THIERRY VD. (1995) geri kazanım seçeneklerini, onarım, yenileme, yeniden üretim, parça geri kazanımı ve geri dönüşüm olarak incelemiştir. FLEISCHMANN VD. (1997) geri kazanımı, malzeme geri kazanımı ve katma değer geri kazanımı olarak sınıflandırmıştır. 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 seçeneklerin, direkt yeniden kullanım, onarım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve bertaraf olarak belirtmiştir.



Şekil 4 THIERRY VD. (1995) geri kazanım seçenekleri

Şekil 4'de THIERRY VD. (1995) tarafından belirtilen geri kazanım seçenekleri verilmiştir. **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 operasyonların gerçekleştirerek yapılan bir işlemdir. **Yeniden üretim**; kullanılmış bir ürünü yeni ürünün benzer kalitesine ulaştırmak için gerekli demontaj, sınıflandırma ve yenileme operasyonlarını gerçekleştirerek yapılan yenileme çalışmalıdır. **Bertaraf** ise kullanılmış ürünlerin atık sahasında depolanmasını veya yakılmasını tanımlar (ILGIN VE GUPTA, 2010).

Demontaj, bir ürünün yaşam öncesi dönemi (tasarım periyodu (design for disassembly) ve yaşam döngüsü analizi (life cycle analysis)); 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 ürün geri kazanımının tüm aşamaları ile etkileşim içindedir (MCGOVERN VE GUPTA, 2010). Demontaj operasyonları, atıktan istenen malzemelerin ve parçaların seçilerek ayrılmasına imkan verdiği için ürün geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahiptir (GUNGOR VE GUPTA, 1999; ILGIN VE GUPTA, 2010). Yeniden üretim süreçlerindeki akış Şekil 5’de verilmiştir (GUNGOR VE GUPTA, 1999).



Şekil 5 Yeniden üretim tesislerinde bir birimin ürünün akışı

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, 2010).

Tanımlamak gerekirse **demontaj**, kullanılmış ürünlerden 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 (destructive), gerekse parçalamadan (non-destructive) parçalarına, alt parçalarına veya bileşenlerine ayrılmasıdır (TEUNTER, 2006).

Demontaj operasyonları; manuel, otomatik veya her ikisinin kombinasyonu şeklinde gerçekleştirilebilir (WILLIAMS, 2006). Demontaj operasyonlarında, eğer ürün tamamen demontaj olacaksa tam demontaj (complete disassembly) ya da sadece bazı parçalar ve alt takımlar kaldırılacaksa kısmi demontaj (partial disassembly) olarak adlandırılır (GUNGOR VE GUPTA, 1999).

### 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 4'de verilmiştir (BRENNAN VD., 1994; GUNGOR VE GUPTA, 1999).

Tablo 4 Montaj ve demontaj aktivitelerinin operasyonel ve teknik farklılıkları

<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 operasyonları, montaj operasyonlarının tam tersi olarak düşünmek mantıklı gibi görülmese de, karmaşık yapıya sahip ürünler için montaj sistemleri ve demontaj sistemlerinin operasyonel karakteristikleri oldukça farklıdır. Demontaj sistemleri, genellikle yüksek esnek yapıya sahiptir. Sistemlerin esnekliği, değişkenlik ve yapısal belirsizlikler üstesinden gelebilmek için gereklidir (GUNGOR VE GUPTA, 1999).

Demontaj sistemlerinde yaşanan en zor problem, ürün ya da parçanın bozulması nedeniyle her zaman demontaj operasyonlarının başarılı olarak tamamlanabilmesidir. 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. Bu durum gibi, montaj sistemlerinden farklı olarak demontaj sistemlerinde bir çok problem ortaya çıkmaktadır. Örneğin, demontaj sistemlerinde talepler 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 ıraksaktır. 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, 2010).

### 3.2. Demontaj Sistemleri

Demontaj sistemlerinde operasyonlar; demontaj operatörleri tarafından çekiç, tornavida, kerpeten gibi demontaj araçlarını kullanarak genellikle manuel iş istasyonlarında veya bir demontaj hattında gerçekleştirilir (SCHARKE, 2003) ve bu nedenle demontaj süreçleri genellikle emek yoğun ve bu nedenle maliyetli süreçlerdir (STUART VE CHRISTINA, 2003). Demontaj sistemlerinde operasyonlar; otomobiller, elektronik ürünler ve tüketici aletleri gibi farklı ürünler üzerinde gerçekleştirilir (ILGIN VE GUPTA, 2011).

E-atık demontaj sistemlerinde operasyonlar, demonte olacak parça veya birimlerin depolama alanından iş istasyonlarına taşınması işlemi ile başlar. Parçaların taşınması için genellikle forklift kullanılmaktadır. Operatörler, öncelikli olarak olası yeniden kullanım için bozulmadan değerli parçalar ve tehlikeli bileşenlerin (çipler, hafızalar, sabit diskler) demontajını yaparlar. Elde edilen bileşenler görsel olarak kontrol edildikten sonra kutular içerisinde sınıflandırılır (OPALIĆ VD., 2010).

1990'ların sonlarında literatürde tanımlanmış olan demontaj sistemleri üzerinde problemleri 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, projenin hedef okuyucu kitlesine fayda sağlayacağı düşüncesi ile alt bölümlerde sunulmuştur.

#### 3.2.1. Demontaj Çizelgeleme

Demontaj çizelgeleme, montaj sistemlerinde parti büyüklüğü probleminin bir tersine çalışan versiyonu olarak bilinmektedir (GUPTA VE TALEB, 1994). İlk olarak GUPTA VE TALEB (1994), çeşitli parçaların talebini karşılamak için bir ürünün demontajı için miktar ve zamanını belirlemesi için bir algoritma sunmuşlardır. LEE VD. (2001), demontaj sistemlerinde planlama ve çizelgeleme problemlerinin literatür araştırmasını sunmuşlardır.

Genel olarak demontaj çizelgeleme problemi kapasiteli ve kapasitesiz olmak üzere gruplanabilir (ILGIN VE GUPTA, 2010). *Kapasitesiz durumlar* için (GUPTA VE TALEB, 1994; TALEB VE GUPTA, 1997; TALEB VD., 1997; KIM VD., 2003; LEE VD., 2004; LEE VE XIROUCHAKIS, 2004; KIM VD., 2006a; BARBA-GUTIERREZ VD., 2008; KIM VD., 2009) ve *kapasiteli durumlar* için ise (MEACHAM VD., 1999; LEE VD., 2002; KIM VD., 2006b; KIM VD., 2006c) çalışmaları incelenebilir.

### 3.2.2. Demontaj Sıralama

Demontaj sıralama, bir ürünün demontajı için gerekli operasyonların en iyi sıralamasının belirlenmesi problemidir (ILGIN 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; KAEBERNICK VD., 2000; TORRES VD., 2003; DONG VD., 2006; LI VD., 2006), *olay tabanlı düşünme* (CBR) (ZEID VD., 1997; VEERAKAMOLMAL VE GUPTA, 2002), *petri ağları* (MOORE VD., 1998; ZUSSMAN VE ZHOU, 1999; ZHA VE LIM, 2000; ZUSSMAN VE ZHOU, 2000; MOORE VD., 2001; TANG VD., 2001; RAI VD., 2002; TIWARI VD., 2002; KUMAR VD., 2003; SINGH VD., 2003; GAO VD., 2004; TANG VE ZHOU, 2006; GROCHOWSKI VE TANG, 2009), *matematiksel programlama teknikleri* (LAMBERT, 1999, 2006, 2007), *meta sezgisel yöntemler* (SEO VD., 2001; LI VD., 2005; GONZALEZ VE ADENSO-DIAZ, 2006; KONGAR VE GUPTA, 2006a; REVELIOTIS, 2007; SHIMIZU VD., 2007; HUI VD., 2008; TRIPATHI VD., 2009), *sezgisel yöntemler* (GUNGOR VE GUPTA, 1997, 1998; KUO, 2000; ERDOS VD., 2001; GUNGOR VE GUPTA, 2001a; MASCLE VE BALASOIU, 2003; SARIN VD., 2006; ADENSO-DIAZ VD., 2008; LAMBERT VE GUPTA, 2008) ve *yapay sinir ağları* (HUANG VD., 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, 2010). Demontaj hatları, ilk defa GUNGOR VE GUPTA (2002) tarafından montaj hattı davranışlarından ayrılmıştır, MCGOVERN VE GUPTA (2004) demontaj hattı dengeleme problemini matematiksel olarak modellemiştir ve MCGOVERN VE GUPTA (2006) resmen tanımlanmıştır. GUNGOR VE GUPTA (2001b) ve GUNGOR VE GUPTA (2002), demontaj hattı dengeleme algoritmasının ilk örneğini sunmuşlardır.

Literatürde demontaj hatlarının dengelenmesi probleminin çözümü için *metasezgisel yaklaşımlar* (AGRAWAI VE TIWARI, 2007; MCGOVERN VE GUPTA, 2007a, 2007b) ve *matematiksel modeller* (ALTEKIN VD., 2008; KOC VD., 2009) kullanılmıştır.

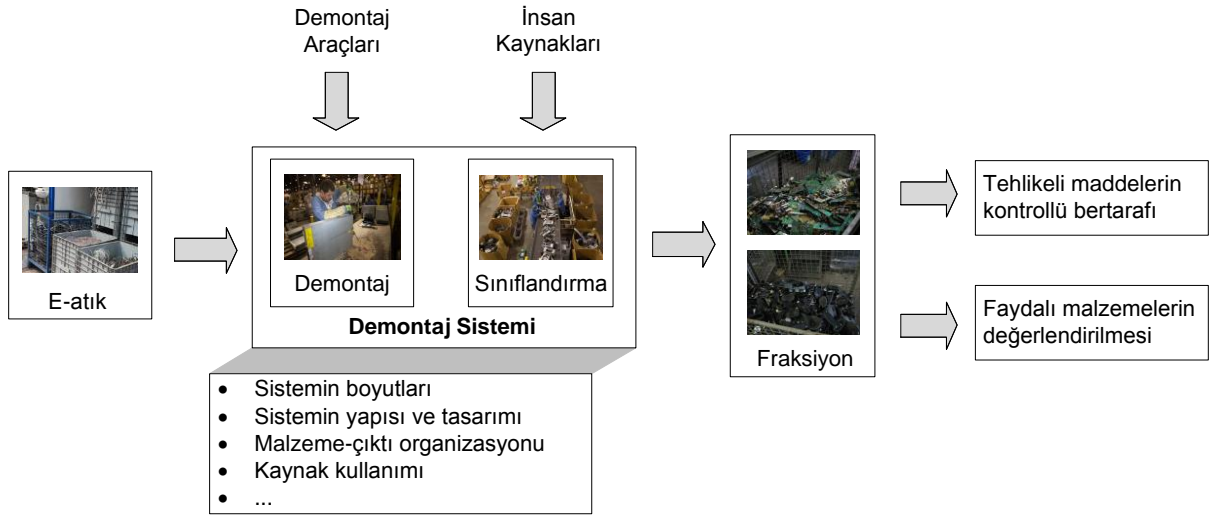
### 3.2.4. Demontaj Sipariş Sistemi

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) durumları altında bu problemin çözümü bulunmaya çalışılmıştır.

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

E-atıklar üzerinde hazırlanan yönetmeliklerin de etkisi ile (EU, 2002a, 2002b; T.C. ÇEVRE VE ORMAN BAKANLIĞI, 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).

Demontaj sistemlerinin yerleşimleri; genellikle iş istasyonunun sayısı, iş istasyonları arasındaki bağlantıların türü ve iş istasyonlarının konumlarının düzenlenmesi ile planlanır (HESSELBACH VE WESTERNHAGEN, 1999). Şekil 6 demontaj sistemlerinin süreç akışı ve sistem karakteristiklerini göstermektedir. Demontaj sistemlerinin çalışması için önemli ve gerekli kaynaklar demontaj araçları ve insan kaynaklarıdır. E-atıklar, e-atık tesislerinde işlemlere tabi tutulur ve bileşen formunda sistemden ayrılırlar.



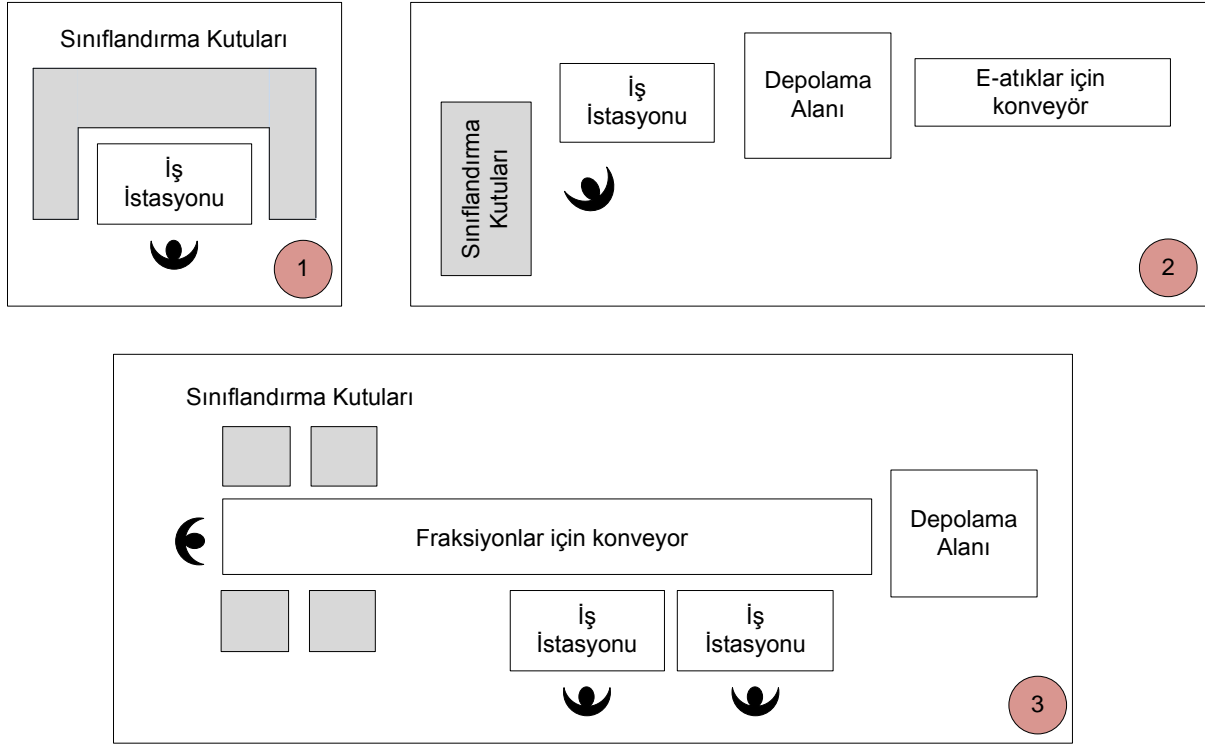
Şekil 6 E-atık demontaj sistemlerinin karakteristikleri

Demontaj sistemlerinde yerleşim değişiklikleri ile (OPALIĆ VD., 2010):

- Malzemelerin etkili taşınması sağlanabilir ve dolayısıyla demontaj hızı artırılabilir.
- Demontaj süresince ekipman taşınma mesafesi minimuma indirilebilir.
- Benzer parçalar özel iş istasyonlarında demonte edilerek iş istasyonlarında ekipman dağınıklığı minimuma indirilebilir.
- Demonte olan ekipmanların daha doğru sınıflandırılması sağlanabilir.

##### 4.1. Mevcut Demontaj Yerleşim Yaklaşımları

Literatürde veya faaliyet gösteren yeniden üretim veya geri dönüşüm tesislerinde çeşitli demontaj hatları veya demontaj hücreleri bulunmaktadır. OPALIĆ VD. (2010) mevcut demontaj yerleşim yaklaşımlarını 3 farklı biçimde sınıflandırmışlardır (Şekil 7):



Şekil 7 Mevcut demontaj yerleşim biçimleri (OPALIĆ VD., 2010)

Şekil 7'de 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.

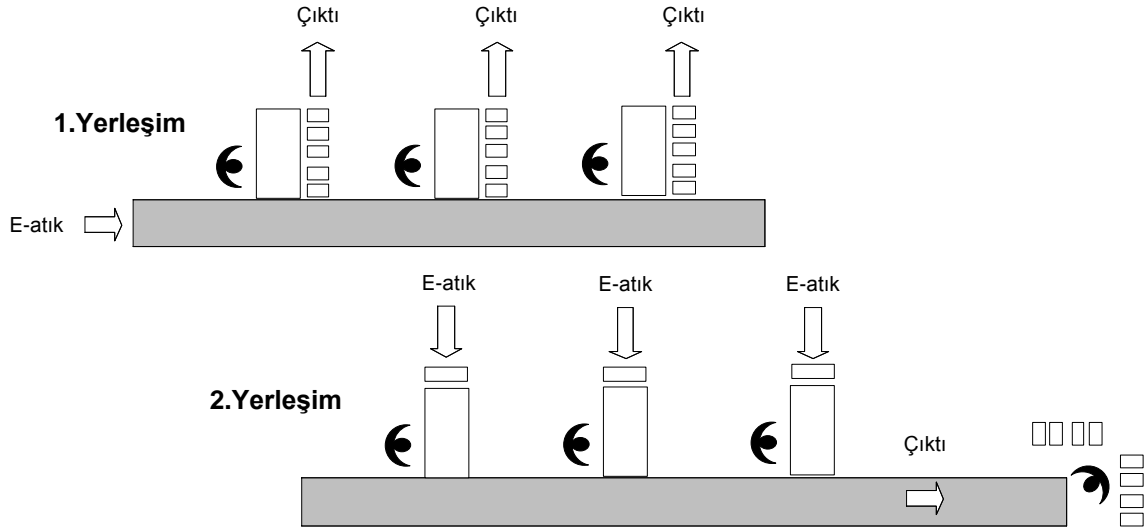
İkinci yerleşim biçiminde, atıklar konveyör üzerinde depolama ve sınıflandırma alanına gelir. İlk yerleşimin aksine ürünler demontaj için sınıflandırılırlar ve sıralanırlar. Operatörler, depolama alanından ürünleri alır, demontajını yapar ve demonte olmuş parçaları çıktı önlerinde bulunan sınıflandırma kutularına koyar. Malzeme yükleme zamanı birinci yerleşimden daha azdır çünkü atıklar iş istasyonlarına daha yakın konumda bulunurlar. Demontaj işleminden elde edilen bileşenlerin sınıflandırma kutularına taşınması için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır.

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 yetenekli bir operatör farklı kutulara demontaj parçalarını sınıflandırır. Bu yerleşimde demontaj parçalarının taşınması için bir konveyör hattı uygulanması, demontaj zamanını artırır, maliyetleri düşürür ve kaldırma hareketlerini azaltır.

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

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

HESELBACH VE WESTERNHAGEN (1999), ürünlerin farklı karakteristiklerine dayanarak hiyerarşik kümeleme analizi ile e-atıkları farklı ürün ailelerine ayrılmış ve esnek demontaj sistemleri üretmişlerdir (Şekil 8).



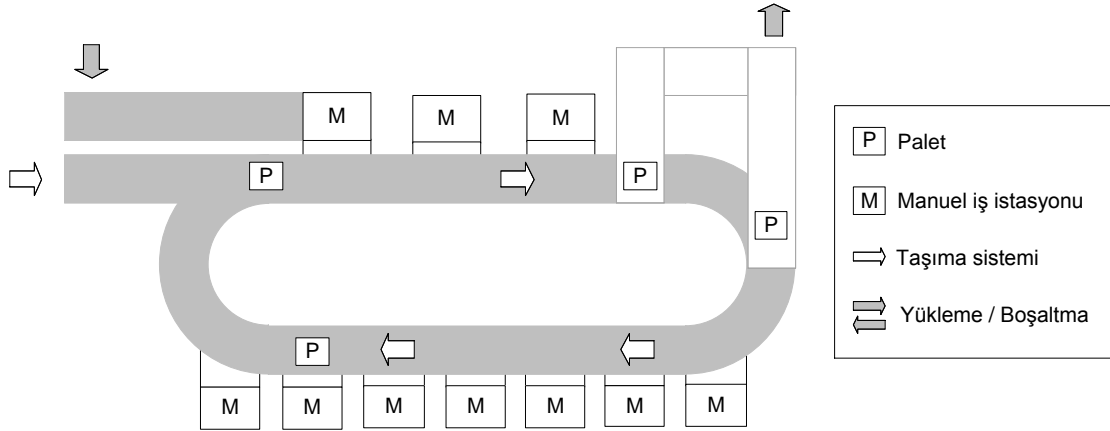
Şekil 8 HESSELBACH VE WESTERNHAGEN (1999) esnek demontaj sistemi yerleşimi

İlk yerleşimde sistem, ıraksak malzeme akışı ile karakterize edilir. E-atıklar yürüyen bant üzerinde sisteme girerler ve iş istasyonlarından bileşen formunda ayrılırlar. Bu tip sistem yerleşim TV setleri ve monitörler gibi homojen ve karmaşık ürünleri işlemek için önerilmiştir. İkinci yerleşimde ise, yakınsak malzeme akışı ile aynı yerleşimi gösterir. 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 bileşenler sahip heterojen ürünlerin işlenmesi için önerilmiştir.

LIMAYE VE CAUDILL (1999) geri dönüşüm tesisleri için bilgisayar destekli yaklaşımlar geliştirmiş ve küçük bir ürün geri dönüşümü yapan elektronik işletmesinde uygulamışlardır. Demontaj faaliyetlerinin 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 (SCHARKE, 2003):

- *Electrocyling, 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 (Şekil 9).



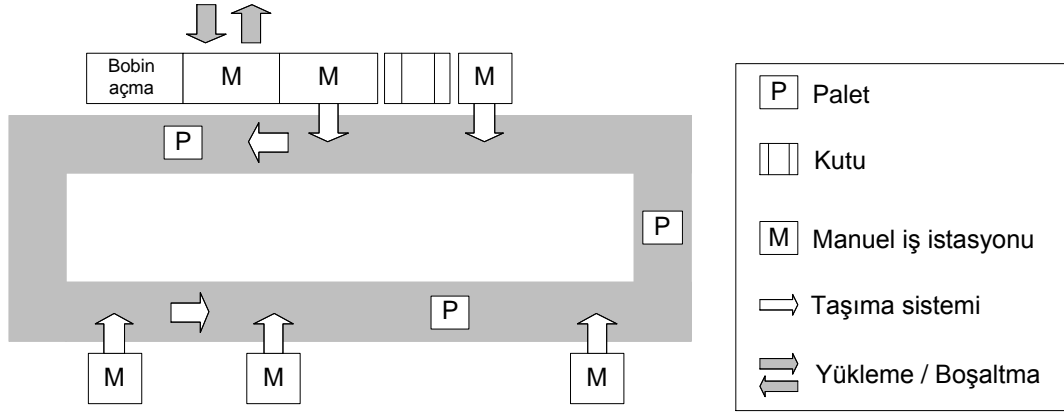
Şekil 9 Electrocyling demontaj sistemi yerleşimi (SCHARKE, 2003)

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.

Sistem, 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. Demontajdan 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. Sistemin modülerliği, küçük bir çaba ile işçilerinin pozisyonun değişimine izin verir (Şekil 10).

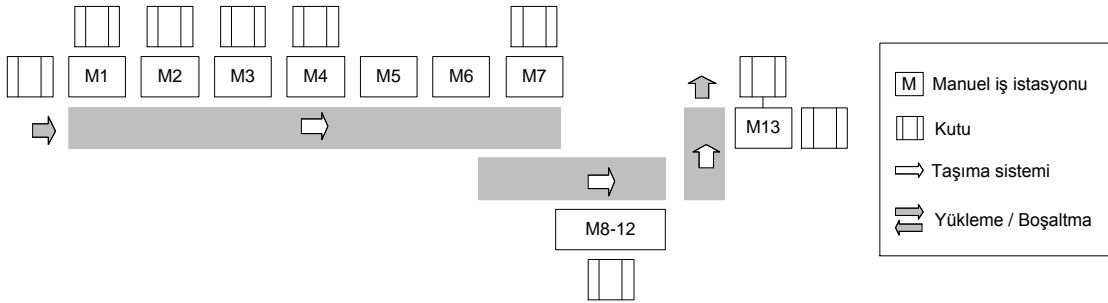
Sistem, bir test istasyonu, bir yükleme ve boşaltma istasyonu ile dört demontaj hücrenin beraber bağlantısını sağlayan otomatik bir taşıma sisteminden oluşur. Sistemin yapısı döngüsel ve sayısal olarak kontrol edilir. 1. istasyon; yükleme, test etme ve arka kapağın demontajı ile tüpün havalandırılması 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.



Şekil 10 Sony manuel demontaj hattı yerleşimi (SCHARKE, 2003)

Palet üzerindeki bir bilgi taşıyıcı, ürünle ilgili “ürün demonte oldu” ya da “ürün demonte olmadı” türünde durumu kaydeder. Bilgi taşıyıcı bitmiş ürünü işaret edene kadar paletler hat üzerinde döner. Sistem yapısı, farklı iş istasyonlarında farklı işleme zamanlarına olanak sağlar. Paletler iş istasyonlarında civatalar ile sabitlenir ve direkt iş masası olarak kullanılır. Karmaşık proses planlama ve kontrolü yoktur.

- *Manuel Demontaj Hattı, Coolrec b.v., Eindhoven, Hollanda:* Manuel demontaj hattı, hurda buzdolaplarının demontajını yapmak ve malzemelerin yeniden kullanımını kolaylaştırmak için tasarlanmıştır. Hat, öncelikli olarak buzdolaplarında bulunan çevreye zararlı freon gazının bertarafına odaklanmıştır. Sistemde planlama ve kontrol yaklaşımları kullanılmamaktadır. Demontaj operatörleri çok çeşitli buzdolaplarının demontajını yaparlar. Hat, 13 iş istasyonundan oluşur (Şekil 11).



Şekil 11 Coolrec manuel demontaj hattı yerleşimi (SCHARKE, 2003)

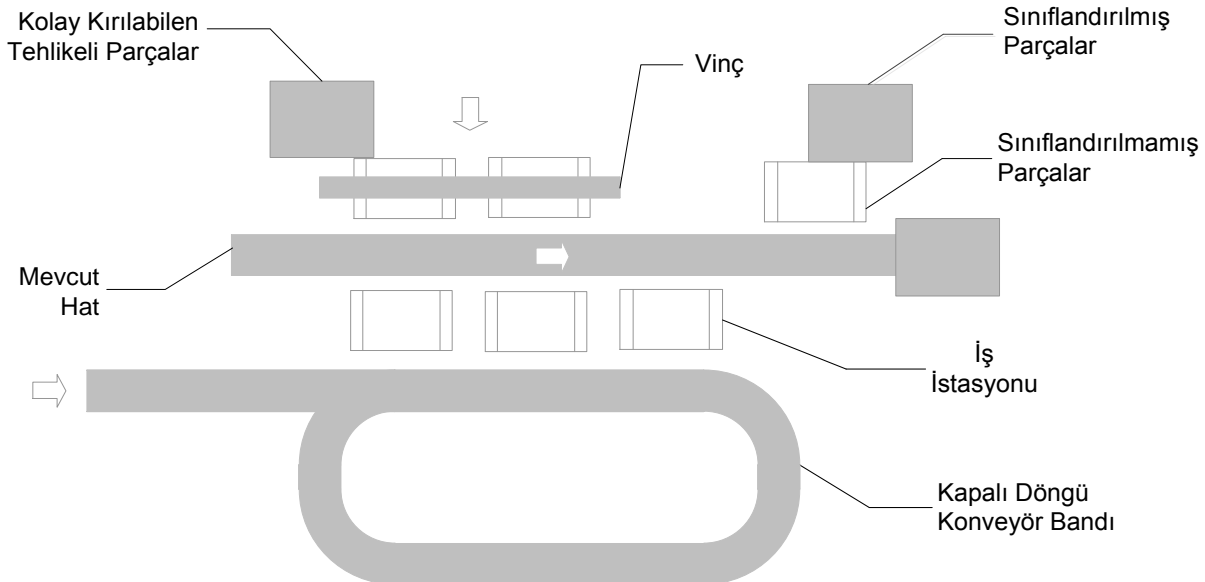
Buzdolapları konteynırlarda teslim edilir ve iş istasyonlarının içine beslenir. 1. operatör içerideki sabitlenmiş malzemeleri ve buzdolabı kapağını kaldırır. 2 numaralı operatör, bir pompa ile freon gazını alır. Daha sonra, 3-13. iş istasyonlarında diğer parçalar buzdolabından çıkarılır.

- *Manuel Demontaj Hattı, Mirec b.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.

BAIK VD. (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 çıktılarından mevcut sistemin çıktılarından 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 VD. (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 VD. (2010)'nin tüketici elektronikleri için özel demontaj yerleşimi Şekil 12'de verilmiştir.



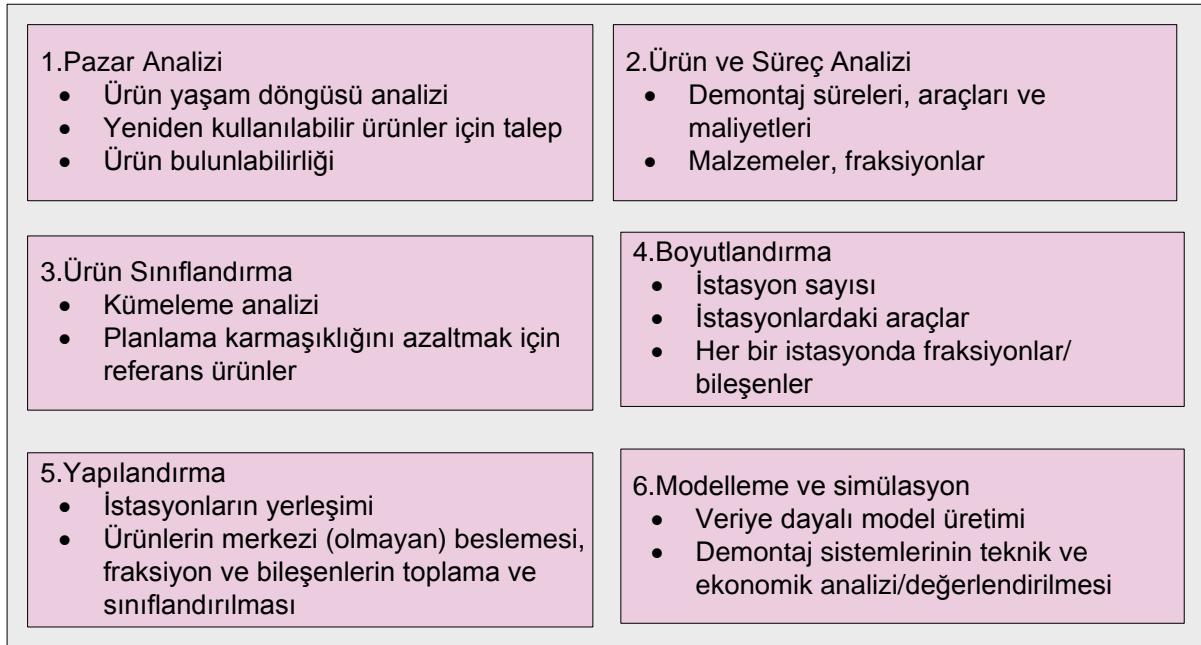
Şekil 12 Tüketici ürünleri demontaj tesisi yerleşimi (OPALIĆ VD., 2010)



Yazarların bilgisi dâhilinde yukarıda özetlenen çalışmalar dışında literatürde başka çalışma bulunmamaktadır. Önerilen projede 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 ölçülerine dayanarak istatistiksel testlerle kıyaslanmıştır. Demontaj sistemlerine getirilen ürünlerin barındırdığı değişkenlik ve yapısal belirsizlikler, projede demontaj işlem sürelerinin bulanık sayılarla ifade edilmesiyle yönetilmiştir. Proje, bu yönüyle de özgündür ve literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır.

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu projede, e-atık demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi için ideal yerleşim planlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla projenin mimarisi Şekil 13'de verildiği gibi yapılandırılmıştır.



Şekil 13 Demontaj sistemlerini planlama adımları (SELIGER VE KERNBAUM, 2007)

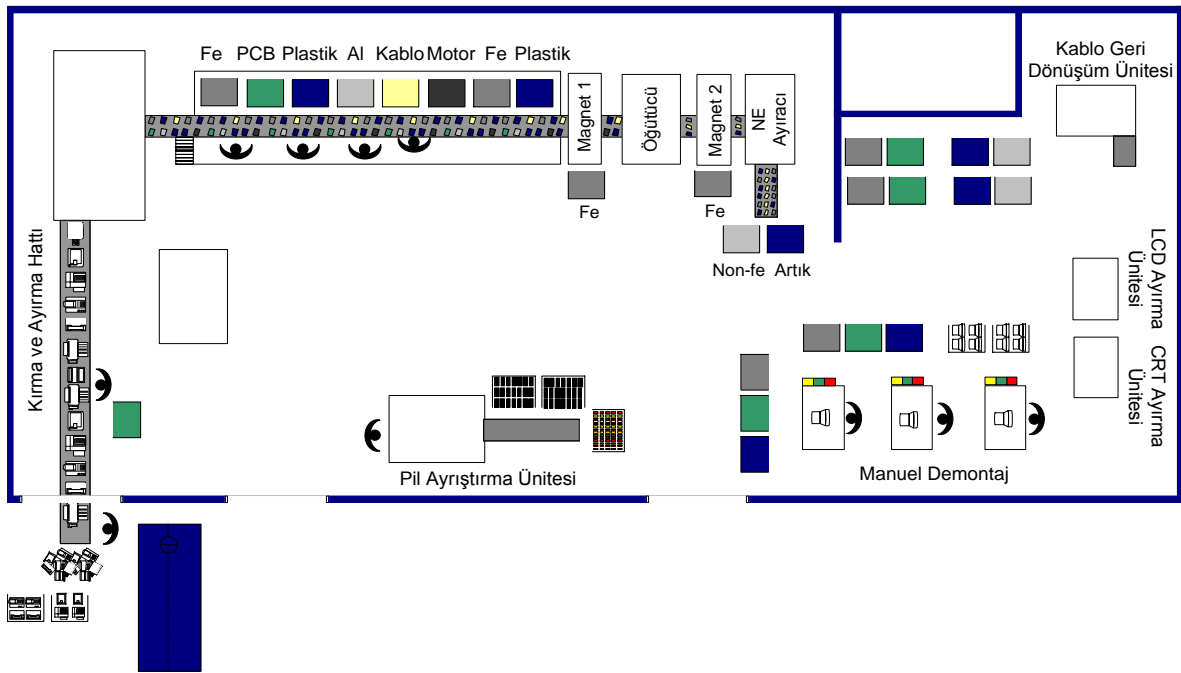
Projenin ilk aşamasında, gerek literatürdeki çalışmalardan elde edilen bilgiler gerekse paydaş firmadan elde veriler ışığında, e-atık demontaj sistemlerinin yerleşim planları ile e-atık demontaj süreçleri yakından irdelenmiş ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden sonra, yerleşim 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 sayılarla ifade edilmiştir. Projenin 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 malzeme ve bileşen tipleri ve ağırlıkları, bileşen satış fiyatları alt bölümlerde açıklanmıştır.

#### 5.1.1. Demontaj Süreçleri

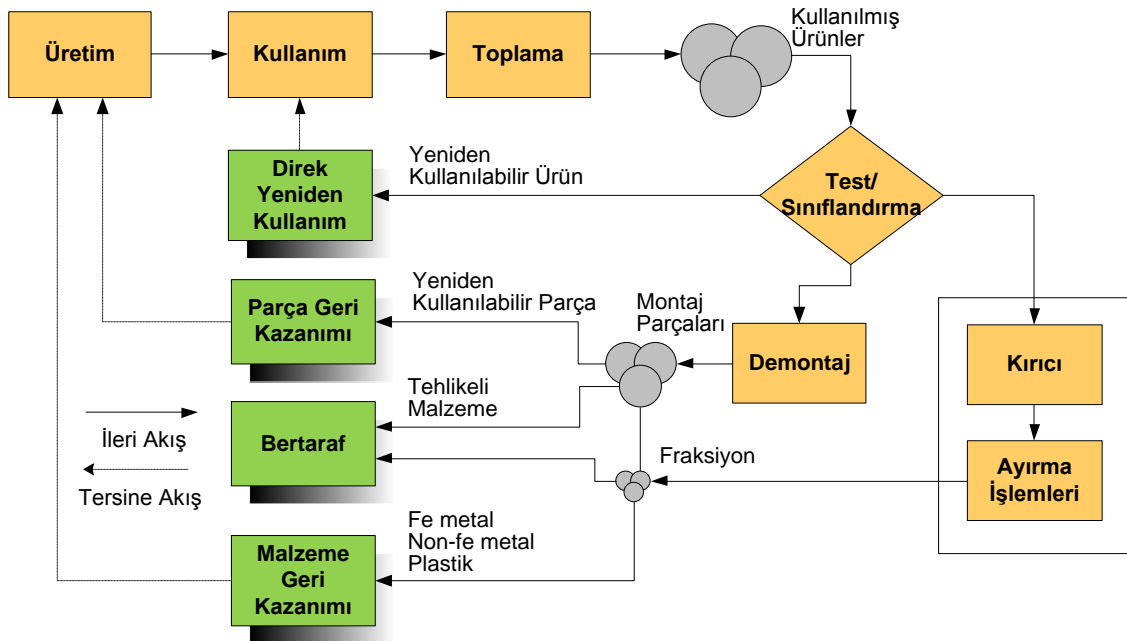
Literatürdeki e-atık demontaj tesislerinin yerleşim planları bir önceki bölümde tanımlanmıştır. Bu bölümde ise, paydaş firmanın mevcut tesisinin yerleşim planı ve e-atıkların demontajı ile ilgili süreçler incelenmiştir. Paydaş firmanın mevcut tesisinin (Türkiye) yerleşim planı Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14 Paydaş firma mevcut tesis yerleşim planı

Şekil 14'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 küçültme ve ayrıştırma işlemlerinden oluşmaktadır. Paydaş firmada işleyen süreçler Şekil 15'de sunulmuştur.



Şekil 15 Paydaş firmada geri dönüşüm süreçleri

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. Bir sonraki aşama test ve sınıflandırma işlemlerini kapsamaktadır (Şekil 16). Ayrıca sınıflandırma süreci sırasında, yazıcı, faks makinesi, fotokopi makinesi gibi kartuş içeren ya da cep telefonu gibi batarya içeren atıkların içerisinde bu tehlikeli maddeler arındırılır.



Şekil 16 E-atıkların tesise girişinden sonra depolanması ve sınıflandırılması

Şekil 15'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.

#### 5.1.1.1. Manuel Demontaj Süreci

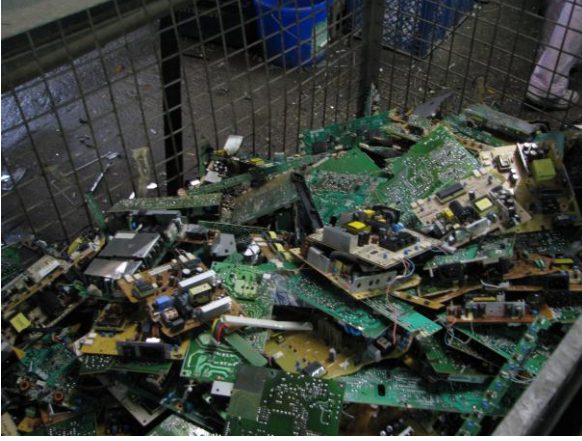
Demontaj, geri kazanım süreçlerinde gerçekleştirilen ilk aşamadır ve tehlikeli maddelerin kaldırılması veya yeniden kullanılabilir parçaların elde edilmesine izin verdiği için bu süreçte önemli bir role sahiptir.



Şekil 17 İş istasyonlarında demontaj operasyonları ve iş istasyonu çevresinde yer alan e-atıklar

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

Eski e-atıklar iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda bulunur (Şekil 17). 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 (Şekil 18).



Şekil 18 E-atıkların demontajından elde edilen bileşenler ve sınıflandırma kutuları

Bu 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.

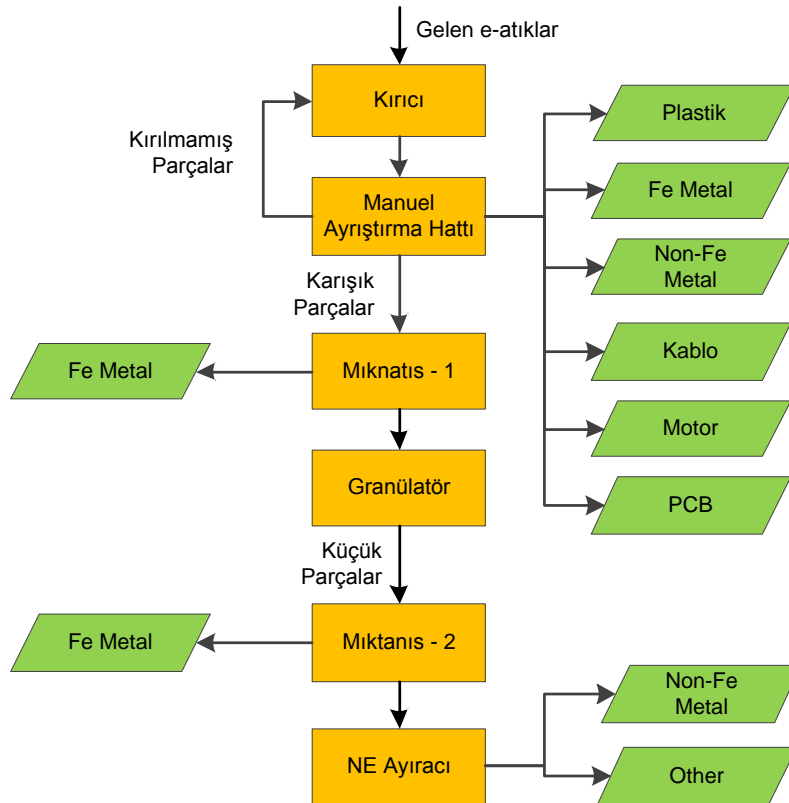
Elde edilen CRT tüpleri, önceleri firmanın içerisinde yer alan CRT işleme üniteleriyle işlenirken, şuanda firma cam geri dönüşüm firmaları ile yapılan özel anlaşmalarla CRT tüplerini tesislerinde işlememekte ve direk cam geri dönüşüm firmalarına göndermektedir. Plastik kapaklar ise fazla yer kapladığı için konteynırlar içerisinde kırıcılar tarafından kırılırlar (Şekil 19).



Şekil 19 Konteynırlar içerisinde yer alan plastik çıktıları

### 5.1.1.2. Yiğın Geri Dönüşüm Süreci

Paydaş firmasının mevcut durumunda radyo setleri, kamera, elektrik süpürgesi gibi düşük değerli atıklar manüel demontajı maliyetli olduğu için direkt olarak yiğın 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 içerisinde bu tehlikeli maddeler çıkarılır. Firmada uygulanan kırıcı ve ayırma sürecinde uygulanan adımlar Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20 Paydaş firmada yiğın geri dönüşüm süreci ve elde edilen bileşen tipleri

Kırıcıya gönderilecek olan e-atıklar, hattın başına yerleştirilmiş bir konveyör operatörü tarafından hatta yerleştirilir (Şekil 21).



Şekil 21 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 22 Zincirli kırıcı ve manuel ayrıştırma bandı



Şekil 23 Mıknatıs ve NE ayırıcı



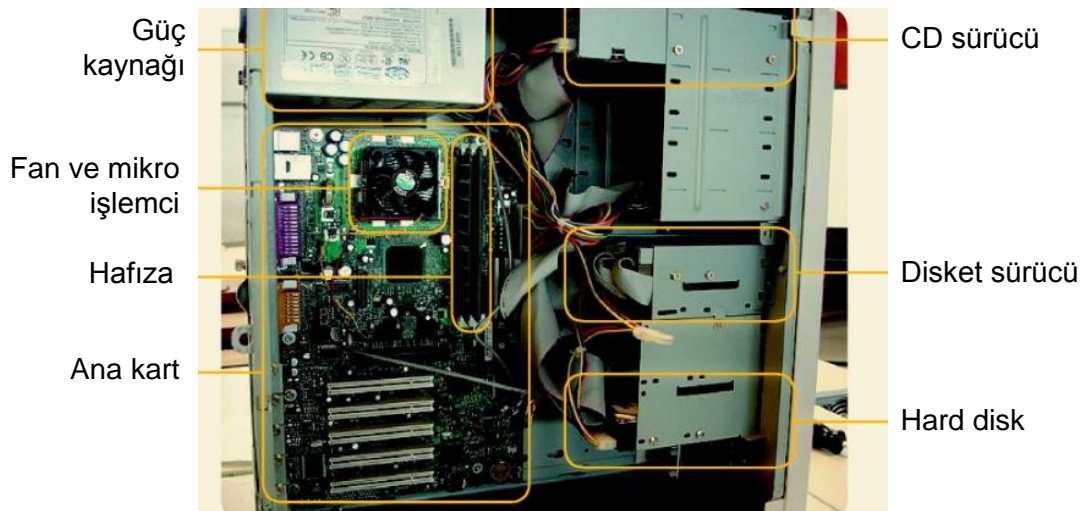
Şekil 24 Depolama alanında e-atık çıktıları

## 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 bu sayede 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 ve genellikle çoğu bilgisayarda temel olarak benzer parçalar bulunmaktadır: güç kaynağı, fan, CPU, hafıza, PCB, ana kart, CD ve disket sürücü ve hard disk (CFER) (Şekil 25).



Şekil 25 PC'nin bileşenleri ve konumları (CFER)

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'de verilmiştir.

Tablo 5 PC demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları

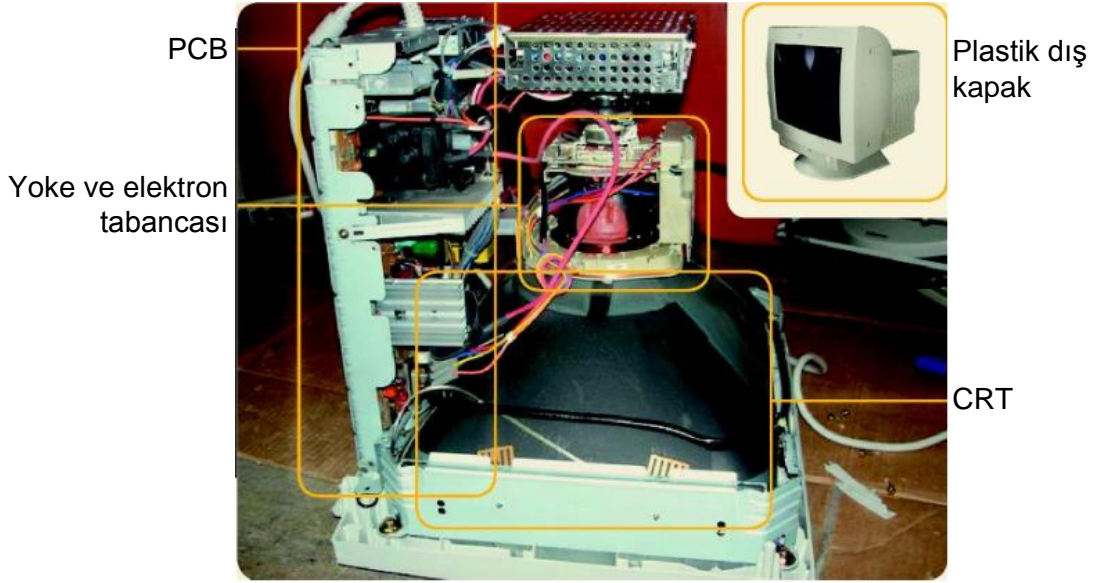
BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI (€/KG)
PCB Kat I	0,908	5,80 €
İşlemci	0,024	22,00 €
Hafıza	0,036	5,00 €
CD Sürücü	0,862	0,31 €
Disk Sürücü	0,374	0,31 €
Güç Kaynağı	1,320	0,37 €
Kablo	0,178	2,45 €
Hoparlör	0,040	0,07 €
Hard disk	0,498	0,80 €
Plastik	0,338	0,10 €
Metal	5,110	0,08 €



Buna göre Tablo 5 görüldüğü üzere, bir PC'nin ortalama ağırlığı yaklaşık ortalama 9,7 kilogram ve elde edilen 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 bileşenlere ve bileşen ağırlıklarına sahip olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, satış fiyatlarının planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir.

### 5.1.2.2. CRT TV ve CRT monitör

Çoğu Bir CRT TV ve monitörün, temel olarak benzer bileşenleri içermektedir. Bir CRT monitör veya televizyon; baskı devre kartları, boyunduruk, elektron tabancası, plastik dış kapak ve bir adet CRT tüpten meydana gelmektedir (CFER) (Şekil 26).



Şekil 26 CRT monitör bileşenleri ve konumları (CFER)

Bir CRT monitörün demontajı elektrik kablusunun 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 bileşenler Tablo 6'de verilmiştir.

Tablo 6 CRT TV ve monitör demontajından elde edilen bileşen ağırlıkları ve birim satış fiyatları

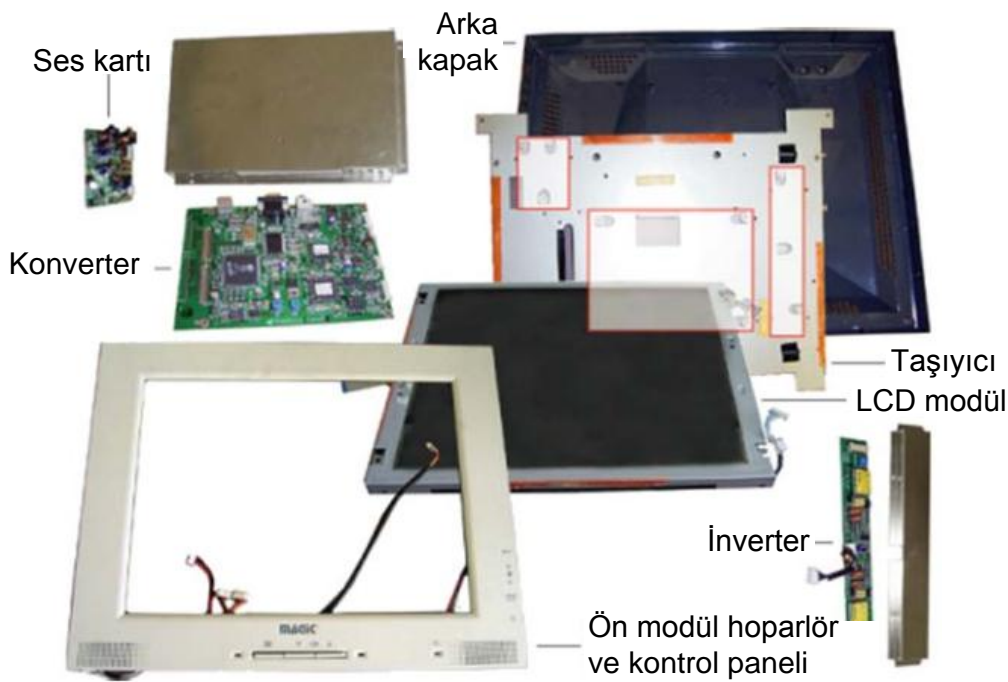
BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI (€/KG)	BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI (€/KG)
CRT Tüpü	25,102	-0,07 €	CRT Tüpü	8,934	-0,07 €
Saptırıcı	0,782	1,13 €	Saptırıcı	0,788	1,13 €
PCB Kat III	1,306	0,45 €	PCB Kat III	1,810	0,45 €
Metal	0,350	0,15 €	Metal	0,832	0,15 €
Plastik	5,136	0,13 €	Plastik	2,710	0,13 €
Elektron Silahı	0,034	0,15 €	Elektron Silahı	0,030	0,15 €
Kablo	1,538	1,35 €	Kablo	0,910	1,35 €

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 6'da görüldüğü üzere, bir CRT televizyon ağırlığı ortalama 34,4 kilogram iken, bir CRT monitör ağırlığı ise ortalama 16,01 kilogramdır. Bir CRT TV'den elde edilen bileşenlerin satışından elde edilen gelir ortalama 2,47 € olarak ve bir CRT monitörden elde edilen bileşenlerin satışından elde edilen gelir ise ortalama 2,77 € olarak tespit edilmiştir. Burada satış fiyatlarının planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan tüm CRT TV ve monitörlerin aynı tür CRT TV ve monitörleri ifade ettiği düşünülmüş ve aynı bileşenlere ve bileşen ağırlıklarına sahip olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, satış fiyatlarının planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir.

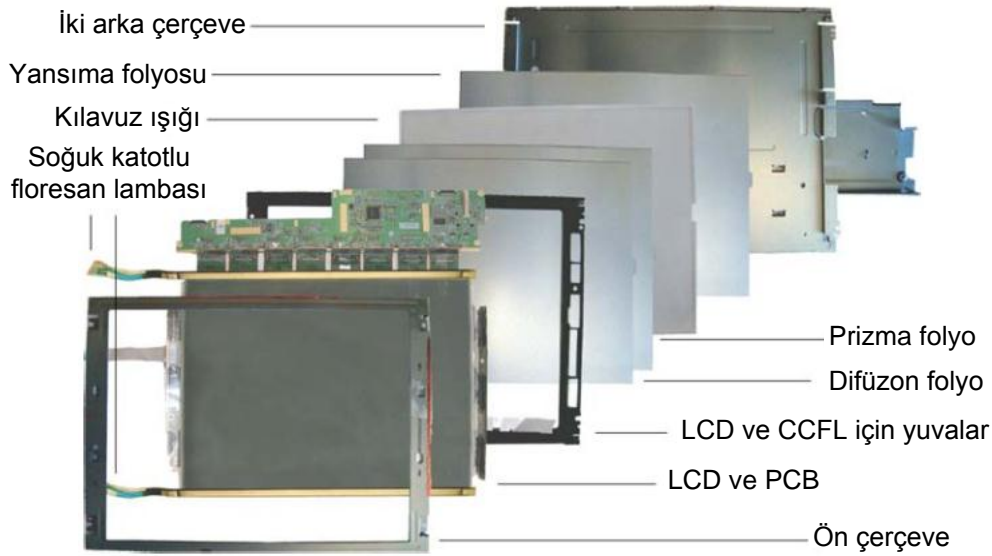
### 5.1.2.3. LCD TV ve monitör

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 VD., 2009) (Şekil 27).



Şekil 27 LCD monitör bileşenleri ve konumları (KIM VD., 2009)

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, CCFL arka ışık, LCD modülü ve taşıyıcı çıkarılır (KIM VD., 2009). LCD monitör içerisinde, WEEE direktifleri (EU, 2002a) tarafından yasaklanan LCD modülleri demontaj yoluyla çıkarılmak zorundadır. Ayrıca LCD modülü içerisinden soğuk katotlu arka ışığın (CCFL) çıkarılması zorunludur. LCD TV ve monitör demontajından elde edilen bileşenler Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 28 LCD modül bileşenleri ve konumları

Buna göre Tablo 7 görüldüğü üzere, bir LCD TV ağırlığı ortalama 7,2 kilogram iken, bir LCD monitör ağırlığı ise ortalama 4,6 kilogramdır. Bir LCD TV'den elde edilen bileşenlerin satışından elde edilen gelir ortalama 4,34 € olarak ve bir LCD monitörden elde edilen bileşenlerin satışından elde edilen gelir ise ortalama 3,34 € olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan tüm LCD TV ve monitörlerin aynı tür LCD TV ve monitörleri ifade ettiği düşünülmüş ve ağırlıklarına sahip olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, satış fiyatlarının planlanan dönem boyunca değişmediği kabul edilmiştir.

Tablo 7 LCD TV ve monitör demontajından elde edilen bileşenler ağırlıkları ve birim satış fiyatları

BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI (€/KG)	BİLEŞEN	AĞIRLIK (KG)	SATIŞ FİYATI (€/KG)
Renkli Plastik	0,812	0,30 €	Renkli Plastik	0,964	0,30 €
Siyah Plastik	0,875	0,35 €	Siyah Plastik	0,030	0,35 €
Beyaz Plastik	0,041	0,35 €	Beyaz Plastik	0,078	0,35 €
Panel	0,553	0,50 €	Panel	0,520	0,50 €
Folyo	0,106	0,25 €	Folyo	0,138	0,25 €
CCFL arka ışık	0,849	0,60 €	CCFL arka ışık	1,144	0,60 €
PCB Kat I	0,054	7,50 €	PCB Kat I	0,050	7,50 €
PCB Kat II	0,276	3,00 €	PCB Kat II	0,074	3,00 €
PCB Kat III	0,334	1,50 €	PCB Kat III	0,232	1,50 €
Hoparlör	0,195	0,10 €	Hoparlör	0,014	0,10 €
Kablo	0,077	1,50 €	Kablo	0,070	1,50 €
Alüminyum	0,392	1,50 €	Alüminyum	0,560	1,50 €
Metal	2,663	0,19 €	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 planlarını 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, karmaşık sistemlerin yerleşim planlarının tespit edilmesi için kullanılan başlıca yöntemlerden bir tanesidir. Simülasyon, e-atıkların özel karakteristikleri altında sistem davranışlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasına imkân verir (HESSELBACH VE WESTERNHAGEN, 1999). 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.

Projede hazırlanan 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 barındırdığı değişkenlik ve yapısal belirsizlikler, sistem içerisinde kullanılan pek çok kavramın bulanık olmasına neden olur. Bu noktada projede bulanık mantık kavramında yararlanılmış ve simülasyon modellerinde demontaj işlem süreleri üçgensel bulanık sayılarla ifade edilmiştir. Sonuç olarak,  $\tilde{P}_i$ ,  $i$ . e-atık tipi için manuel demontaj süresini temsil etmek üzere, demontaj süreleri bulanık üçgensel sayılarla  $(P_{1i}, P_{2i}, P_{3i})$  şeklinde ifade edilmiştir.

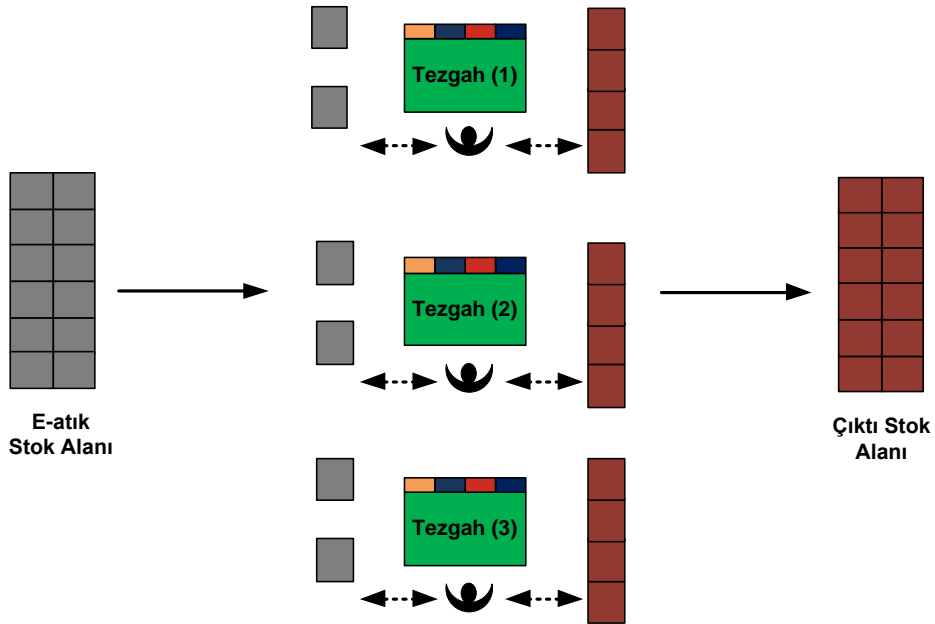
Simülasyon modellerinde kullanılmak üzere aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Simülasyon modelleri haftada 5 gün, günde 8 saat olmak üzere 1 yıllık planlama periyodunda çalıştırılmıştır.
- 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.
- Demontaj işleminde kullanılan ekipmanların planlama dönemi boyunca bozulmadan var olduğu varsayılmıştır.
- Planlama döneminde yeteri kadar e-atık stoku bulunduğu ve işlem görmesi için sürekli sisteme gönderildiği varsayılmıştır.
- Planlama aşamasında referans olarak seçilen e-atık tiplerinin malzeme bileşenleri ve depoda bulunan miktarları tüm modeller için eşittir.
- Aynı gruptaki e-atıklar için (örneğin (17" monitör ile 19" monitör) işlem süreleri aynı kabul edilmiştir. Aynı gruptaki e-atıklardan (örneğin (17" monitör ile 19" monitör) elde edilen malzeme miktarları aynı kabul edilmiştir.

- Elde edilen bileşenler sınıflandırma kutularında depolanır ve belirli bir hacme ulaşıncaya forkliftler yardımıyla depolara gönderilir.
- Sistemde 1 adet forklift bulunmaktadır.
- Tüm simülasyon modellerinde sınıflandırma kutularının hacimleri eşit varsayılmıştır.
- Demontaj operasyonları için tüm parametreler, forklift araçlarının sayısı ve hızı, konveyör hızları, operatör hızları ve forkliftlerin kutuları boşaltılma hızları simülasyonlarda farklılık göstermemektedir.
- Operatörler çok çeşitli ürünlerin manuel demontajı ile yüzleşmektedirler ve demontaj sonucunda elde edilen malzemeleri doğru olarak 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 29’da verilmiştir.



Şekil 29 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 için kullanılır. Operatör sırasıyla e-atıkları kutulardan alır, iş istasyonuna getirir, demontajını yapar. Bu sistemde, yer alan iş istasyonlarında operatörler paralel olarak çalışırlar. Operatörlerin her biri 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.

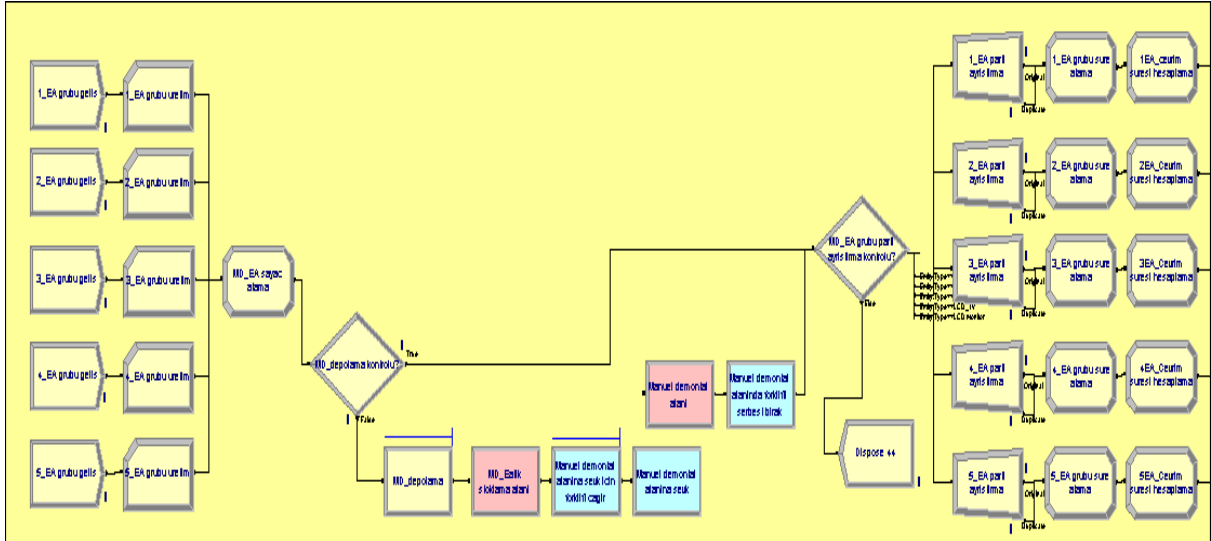
Bu yerleşimde, herhangi bir taşıma sistemi olmadığı için demontaj operatörleri e-atıkları iş istasyonlarının yanına yerleştirilen kutulardan almak ve demontaj işleminden sonra elde edilen bileşenleri iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutulara bırakmak için süre harcarlar ki bu süreler katma değer yaratmayan sürelerdir. Ayrıca operatörlerin karşılaşabilecekleri e-atık türü çeşitliliğinin fazlalığı demontaj süresini ve verimliliği olumsuz etkilemektedir.

### 5.2.1.1. Senaryo–1(a): Tek Demontaj İş İstasyonu (+1)

Bu alternatif senaryoda, kaynak sayısının artırılmasının sistem çıktıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Senaryo–1 üzerinde manuel demontaj iş istasyonlarına 1 operatör daha ilave edilmesiyle sistemin çıktı performansı incelenmiştir. Senaryo–1(a)'nın simülasyon modeli, senaryo–1 için hazırlanan simülasyon modelinde operatör sayısının bir artışı ile sağlanmıştır.

### 5.2.1.2. Senaryo–1 Simülasyon Modeli

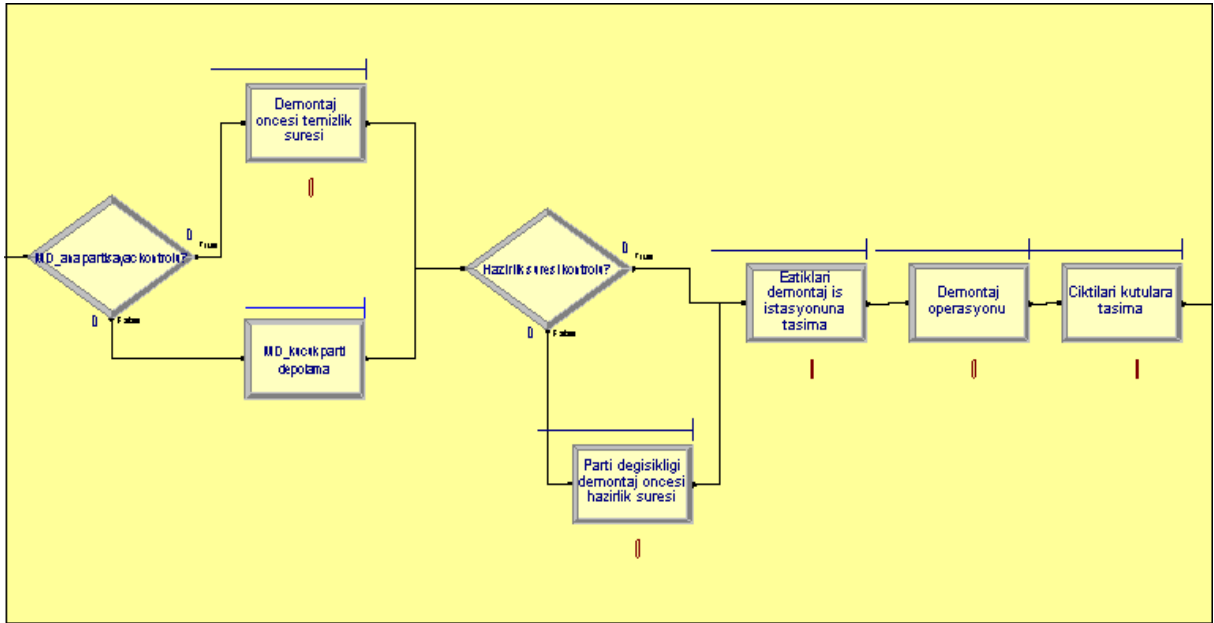
Senaryo–1 için demontaj operasyonları, ARENA 10.0 programı kullanılarak modellenmiştir. Bölüm 5.1.1.1.'de açıklandığı üzere, demontaj sisteminde, hangi e-atığın demonte edileceğine dair herhangi bir sıralama bulunmamaktadır. Bu nedenle, hazırlanan simülasyon modelinde e-atıklar sınıflandırılmış kutular içerisinde türlerine göre sisteme rastgele giriş yapmaktadır ve forklift ile iş istasyonlarına taşınmaktadır (Şekil 30).



Şekil 30 Senaryo–1'de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)

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.

Şekil 31, senaryo–1 için simülasyon modelinin çalışma prensibinin ARENA 10.0 programında ara yüzünü göstermektedir. Simülasyon modelinde, operatörler e-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 doluğu 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 içerisinde planlama dönemi boyunca sürekli bir e-atık beslemesi vardır.



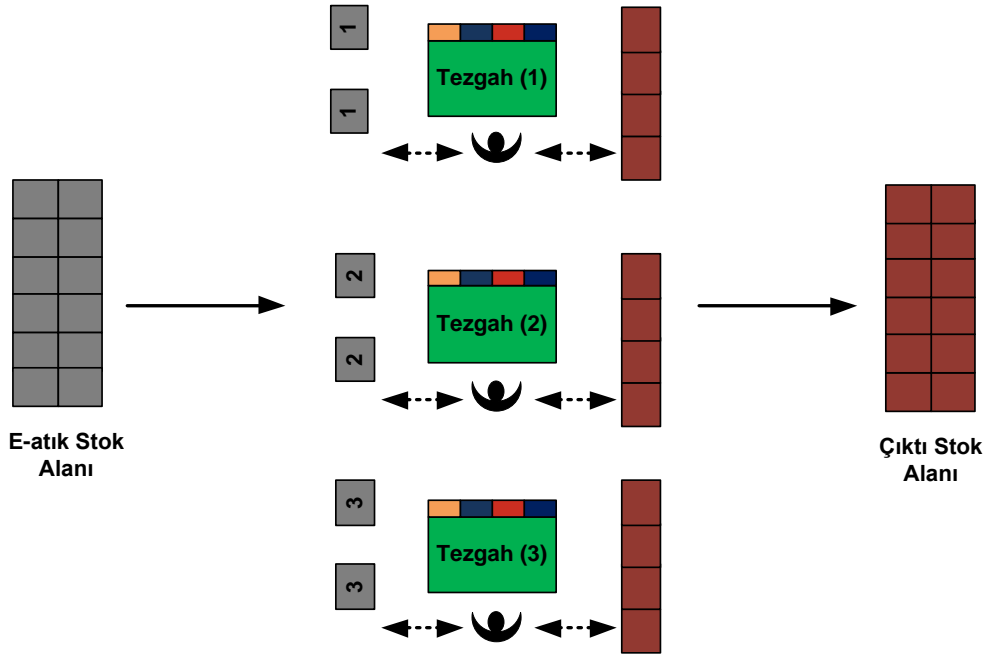
Şekil 31 Senaryo–1’de sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

Mevcut ve bundan sonraki senaryoların simülasyon modellerinde, tüm operatörlerin aynı seviyede yetkinliklere sahip olduğu ve e-atıkların manuel demontajı konusunda tecrübeli oldukları varsayılmıştır. Çünkü tecrübesiz operatörlerin çalıştırılması durumunda demontaj işlem süreleri büyük farklılıklar göstereceği için planlama işlemlerinde yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkarabilir.

### 5.2.2. Senaryo–2: Sınıflandırma

Bu bölümde, demonte edilecek benzer e-atıkların gruplara ayrılmasının sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Senaryo–2’de, senaryo–1 üzerinde 3 farklı e-atık grubu oluşturulmuştur (Şekil 32):

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



Şekil 32 Senaryo-2: sınıflandırma

Gruplandırılmış e-atıklar, demontaj iş istasyonlarına bir forklift ile taşınır. Demontaj sistemi konveyöre sahip değildir. Demontaj operatörleri gruplara ayrılmış e-atıkları iş istasyonlarının yanına yerleştirilen kutulardan alır ve demontaj işleminden sonra elde edilen bileşenleri iş istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutulara bırakır. Demontaj operatörleri paralel olarak çalışır ve farklı e-atıkların demontajını yaparlar. Her bir iş istasyonunda, demontaj operasyonlarından sonra, demonte edilen bileşenler çıktı kutularında sınıflandırılırlar. 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 e-atık kutusunu getirir. Sistem içerisinde 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. Ayrıca, 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. Bu projede operatörlerin öğrenme eğrisi, **kümülatif ortalama modeli** kullanılarak oluşturulmuştur.

Kümülatif ortalama modeli (T.P. Wright, geleneksel yaklaşım);

$$Y_x = A * X^b \quad (1)$$



$\bar{Y}$  = Bir Y ürününün x. birimini üretmek için gereken ortalama zaman

A = 1. birimin üretilmesi için harcanan zaman

X = Kümülatif üretim miktarı

b =  $\log r / \log 2$

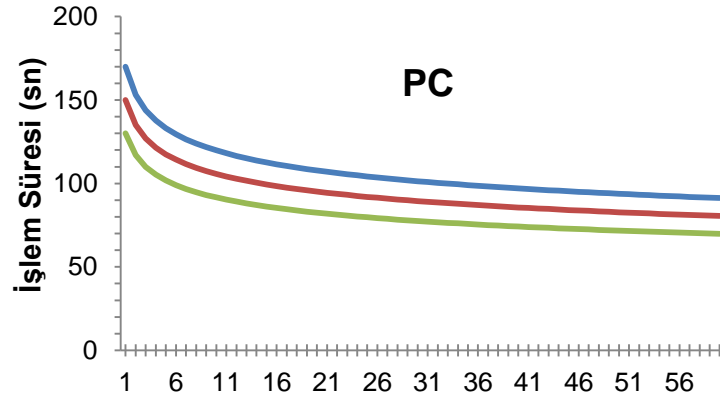
r = Öğrenme hızı

$1-r$  = Gelişim oranı

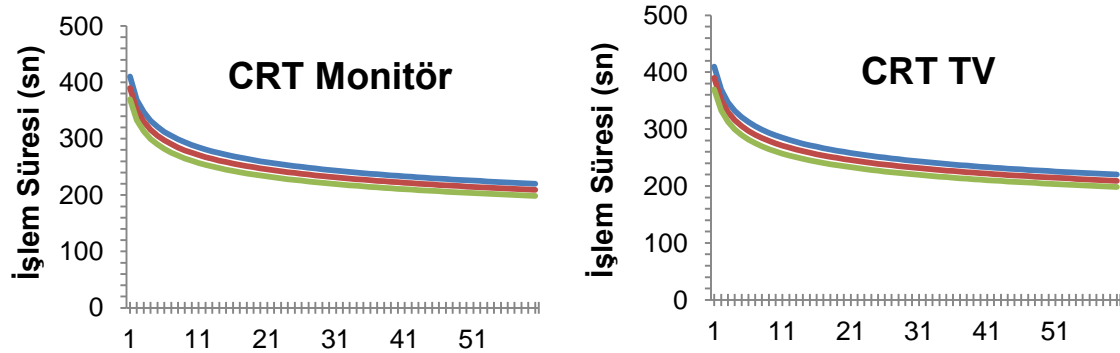
Demontaj işlem zamanları bulanık sayılarla ifade edildiği için, öğrenme eğrisinin de etkisi hesaba katılarak elde edilen zamanlar bulanık olarak eşitlik (2) verildiği gibi hesaplanır.

$$\tilde{Y}_x = (A_l * X_l^b, A_m * X_m^b, A_u * X_u^b) \quad (2)$$

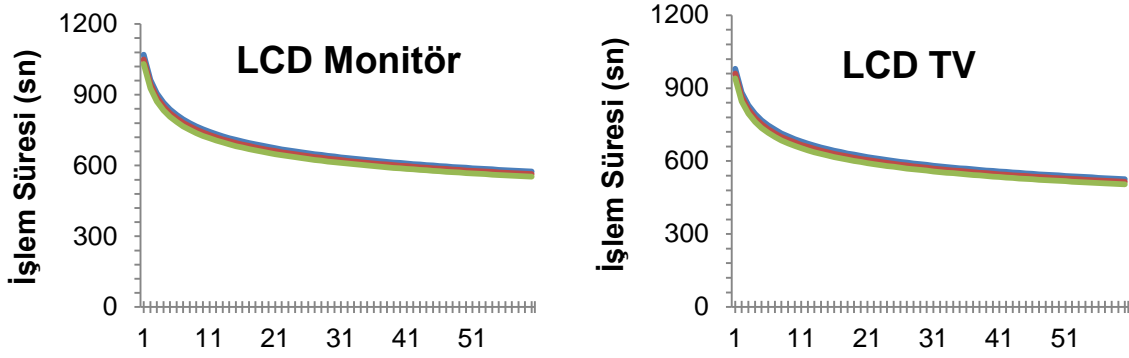
PC, CRT TV ve monitör ve LCD TV ve monitör için operatörlerin % 90 (0,9) öğrenme hızı ile çalıştığı varsayımı altında öğrenme eğrisinin uygulanması ile demontaj işlem sürelerinin değişimi Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35'de verilmiştir.



Şekil 33 PC için demontaj operatörü öğrenme eğrisi



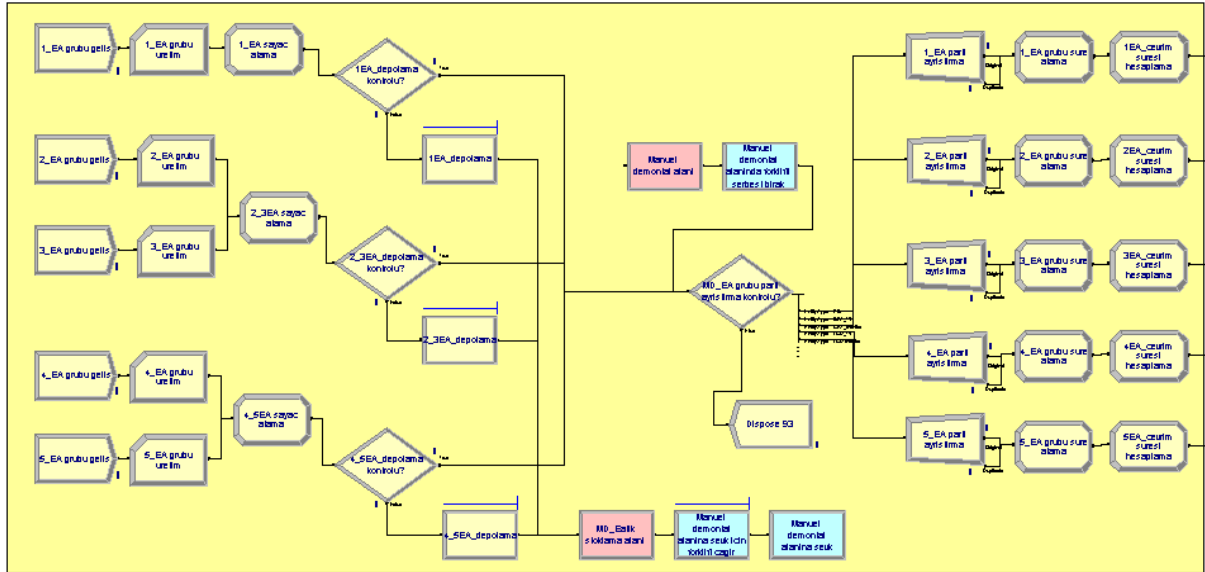
Şekil 34 CRT TV ve monitör için demontaj operatörü öğrenme eğrisi



Şekil 35 LCD TV ve monitör için demontaj operatörü öğrenme eğrisi

### 5.2.2.1. Senaryo–2 Simülasyon Modeli

Senaryo–1 için demontaj operasyonları, ARENA 10.0 programı kullanılarak modellenmiştir. E-atıklar üç gruba sınıflandırılmıştır: (1) kişisel bilgisayar (PC), (2) CRT TV ve monitör ve (3) LCD TV ve monitör. Bu modelde, gruplanan e-atıklar, atandığı iş istasyonuna rassal olarak demontaj işlemi için gönderilir ve forklift ile iş istasyonlarına taşınmaktadır. Dolayısıyla sistemde, planlama dönemi boyunca ilgili iş istasyonlarına sürekli bir e-atık beslemesi vardır (Şekil 36).

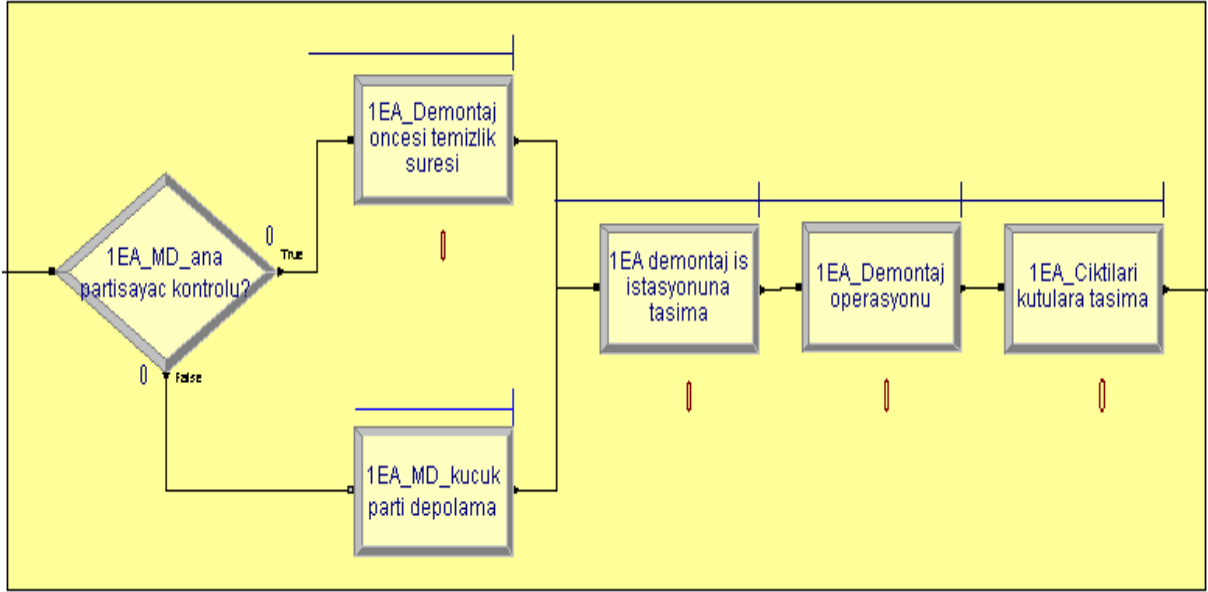


Şekil 36 Senaryo–2'de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)

Bu senaryoda, bir iş istasyonunun kendisine atanmış ürün grubunu demontaj işlemi gerçekleştirdiği için ihtiyaç duyulan 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.

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 sınıflandırılırlar. 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 37’de verilmiştir. 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.

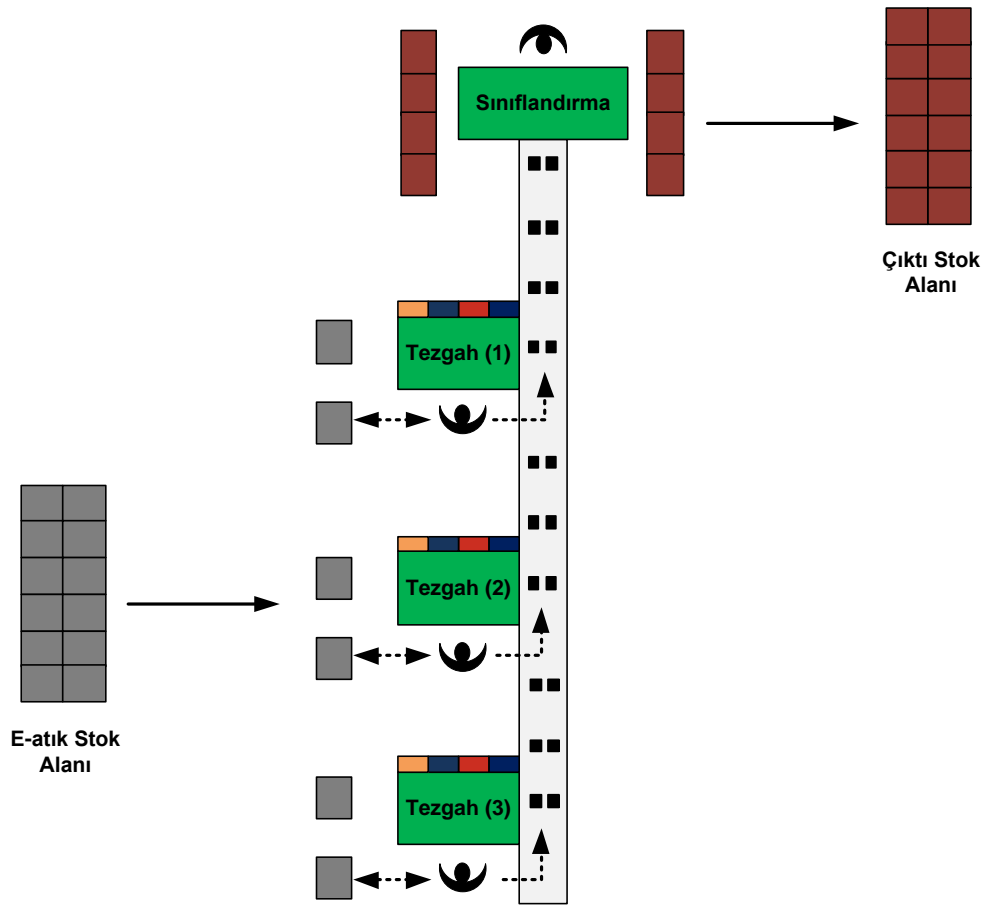


Şekil 37 Senaryo–2’de PC grubu için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

### 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 alırlar, demontajını yaparlar ve bileşenleri yan tarafta bulunan konveyör hat üzerine bırakırlar. Hattın sonunda merkezi sınıflandırma operatörü çıkan demontaj bileşenlerini sınıflandırır ve çıktı kutularına yerleştirir. 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 artırılabilir. Konveyörün sonunda sınıflandırma alanına gelen karmaşık parçaların ayrıştırılması problem yaratabilir. Bu durumda özel eğitilmiş operatörlerin kullanılması gereklidir. Ayrıca, konveyörün sonunda çıktı kutularına demontaj parçalarını yerleştiren operatör aşırı yüklenebilir.

Bu yerleşim planının yukarıda tanımlanan senaryo–1 ve senaryo–2’den ayrılan tarafı, demonte edilen bileşenler hattın sonunda ek bir merkezi sınıflandırma operatörü tarafından sınıflandırma kutularında toplanır. Sisteme konveyör ilave edilerek taşıma miktarları azaltılmaya çalışılmıştır. Yakınsak malzeme akışının sağlandığı hat yerleşimi için e-atıkların demontajında yerleşimi gösteren şematik bir diyagram Şekil 38’de verilmiştir.



Şekil 38 Senaryo-3: Hat Yerleşimi – Yakınsak Malzeme Akışı

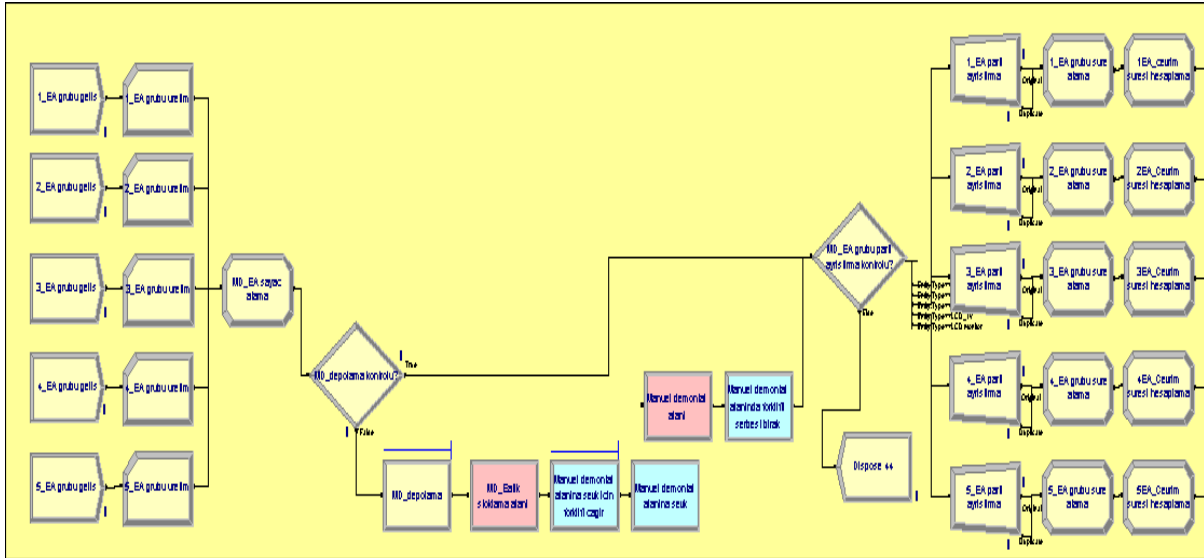
### 5.2.3.1. Senaryo-3(a): Hat Yerleşimi – Yakınsak Malzeme Akışı (+1)

Senaryo-3’de, merkezi sınıflandırma operatörünün kapasite kullanım oranı önemlidir. Demontaj iş istasyonu sayılarının artırılması sonucunda sınıflandırma alanına gelen karmaşık parçaların ayrıştırılması darboğazlara yaratabilir ve bu durum sistem içinde problem neden olabilir. Bu nedenle demontaj iş istasyonu sayılarının artırılması ile gerekli sınıflandırma operatörü sayısı hesaplanmalıdır.

Bu senaryoda üzerinde manuel demontaj iş istasyonlarına 1 operatör daha ilave edilmesiyle, sınıflandırma operatörü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Senaryo-3(a)’nın simülasyon modeli, senaryo-3 için hazırlanan simülasyon modelinde operatör sayısının bir artışı ile sağlanmıştır.

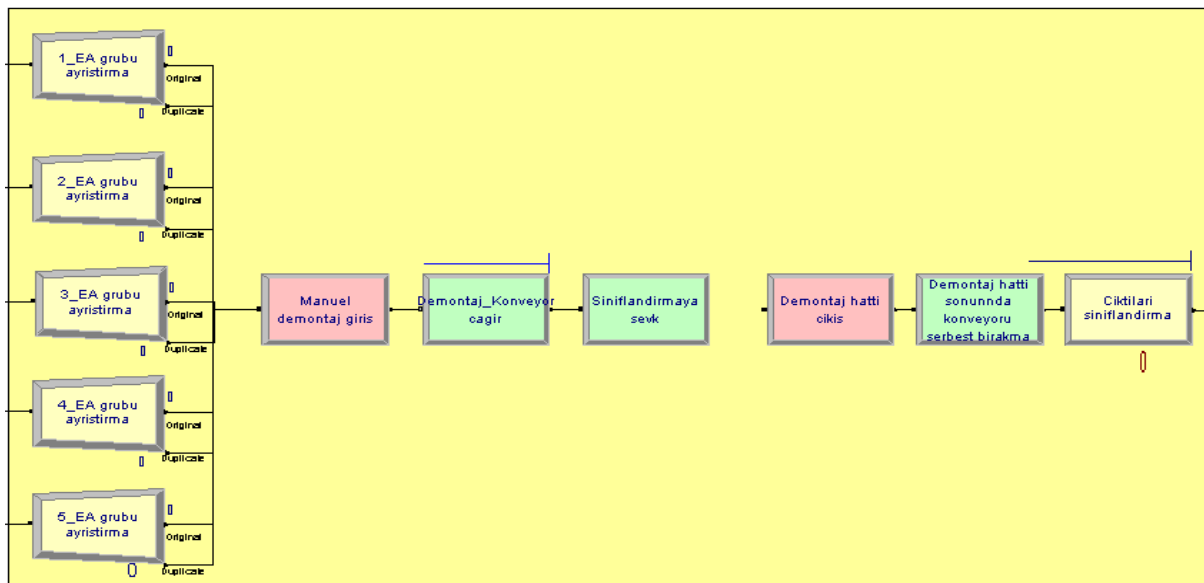
### 5.2.3.2. Senaryo-3 Simülasyon Modeli

Senaryo-3 için demontaj operasyonları, ARENA 10.0 programı kullanılarak modellenmiştir. E-atıklar senaryo-1’de olduğu gibi kutular içerisinde rassal giriş yapmaktadır ve forklift ile iş istasyonlarına taşınmaktadır. Sistemde, planlama dönemi boyunca ilgili iş istasyonlarına sürekli bir e-atık beslemesi vardır (Şekil 39).



Şekil 39 Senaryo-3'de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)

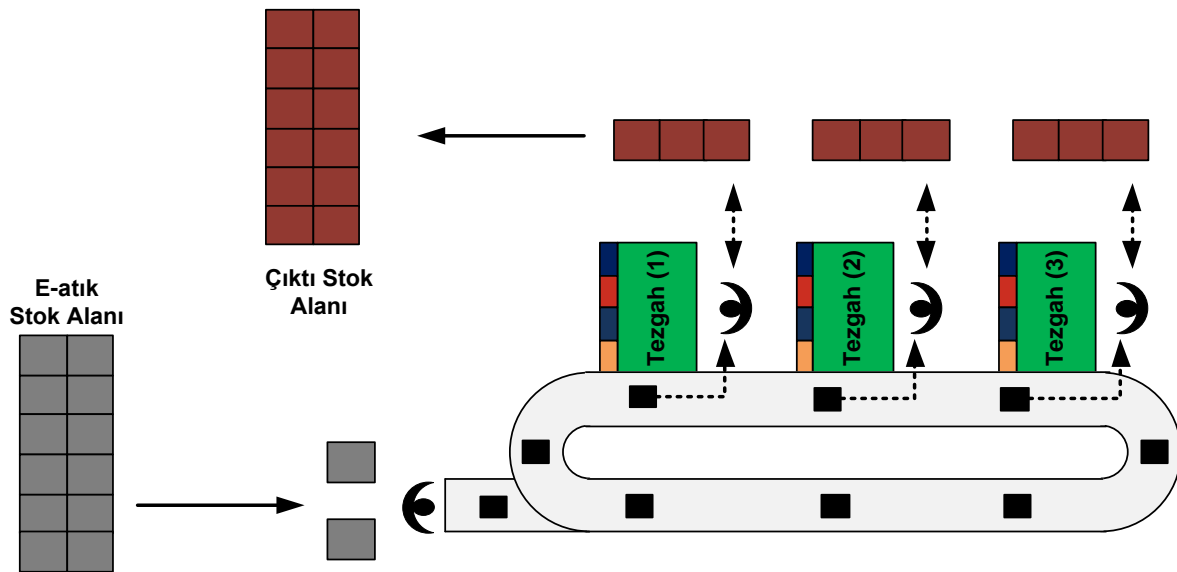
Sistemde, demontaj operasyonlarından önce iş istasyonlarında ürün grupları değiştiğinde bir hazırlık süresi ve her yeni partide bir temizlik süresine ihtiyaç vardır. E-atıklar istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda depolanır. Operatörler, iş istasyonunun yanında bulunan kutulardan e-atıkları alırlar, e-atıkların demontajını yaparlar ve bileşenleri iş istasyonlarının yan tarafta bulunan konveyör üzerine bırakırlar. Operatörler yanlarındaki 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 taşınırlar ve hattın sonunda merkezi sınıflandırma operatörü çıkan demontaj parçalarını sınıflandırır 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 (Şekil 40).



Şekil 40 Senaryo-3'de sınıflandırma operatörü için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

#### 5.2.4. Senaryo–4: Hat Yerleşimi – İraksak Malzeme Akışı

Bu yerleşimde, e-atıklar sisteme bir konveyör üzerinden girerler ve iş istasyonlarından bileşen formunda ayrılırlar. 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. Bu yerleşim planında, atık taşınması ve kaldırılması için operatör tarafından harcanan çaba tanımlanan diğer senaryolara göre daha azdır. Bu yerleşimle iş istasyonlarında malzeme akışı hafifletilebilir ve kolaylaştırılabilir. Ancak burada e-atıkların taşınması için kullanılan kapalı döngü hattın hızı önemli bir durumdur (Şekil 41).



Şekil 41 Senaryo–4: Hat yerleşimi – İraksak malzeme akışı

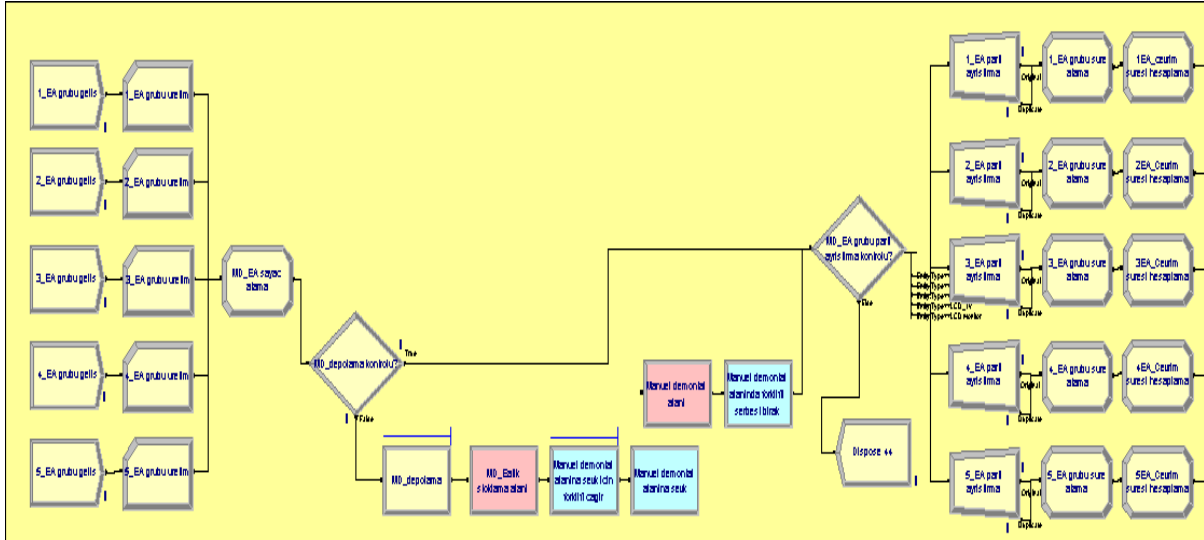
Bu senaryonun diğer senaryolardan farkı, e-atıkların iş istasyonlarına taşınması için bir kapalı döngü konveyör hattı uygulayarak, operatörün harcadığı katma değersiz süreler azaltılıp ve böylece e-atıkların demontajı için harcanan toplam zaman artırılabilir. Ancak bu yerleşimde, dönen hat üzerinde e-atıkların demontajı tamamlayan operatörler, hat üzerinde bir sonraki e-atığı iş istasyonuna alabilmesi için bir bekleme zamanı ortaya çıkabilir. Bu durum sistemde yaşanan temel problemdir. Bu nedenle, hattın üzerinde dönen ürün sayısı ve hat üzerinde çalışan iş istasyonu sayısı önemlidir. Ayrıca bu sistemin kurulumu için firmanın gerekli yerleşim alanlarına sahip olması gereklidir.

##### 5.2.4.1. Senaryo–4 Simülasyon Modeli

Simülasyon modelinde e-atıklar sınıflandırılmış kutular içerisinde sisteme rastgele giriş yapmaktadır ve forklift ile iş istasyonlarına taşınmaktadır. E-atıkların sisteme rassal girişi ve forklift ile manuel demontaj iş istasyonlarına taşınması Şekil 42'deki gibi modellenmiştir.

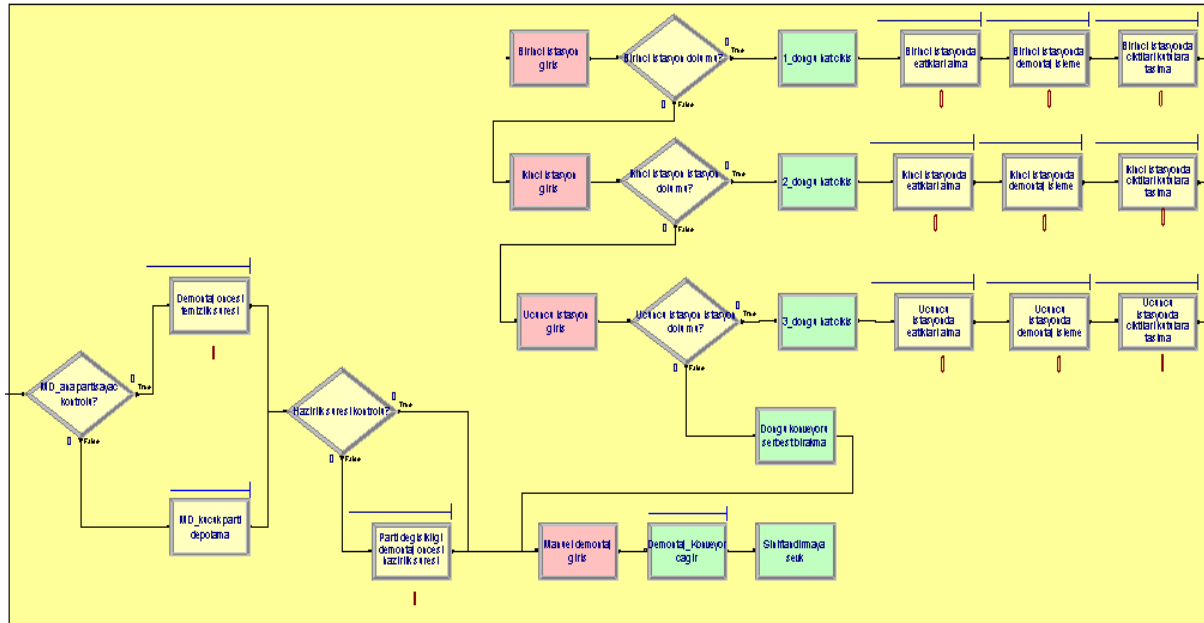
Sistemde, iş istasyonlarından ürün grupları değiştiğinde bir hazırlık süresi ve her yeni partide bir temizlik süresine ihtiyaç vardır. E-atıklar istasyonunun yanına yerleştirilmiş kutularda depolanır. E-atıklar kapalı döngü konveyör bandı üzerinde sistem girerler ve konveyör üzerinde iş istasyonlarına 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 üzerinde, bir yükleme operatörü tarafından planlama dönemi boyunca sürekli bir ürün beslemesi vardır (Şekil 43).



Şekil 42 Senaryo-4'de e-atıkların sisteme rassal girişi (ARENA 10.0 ara yüzü)

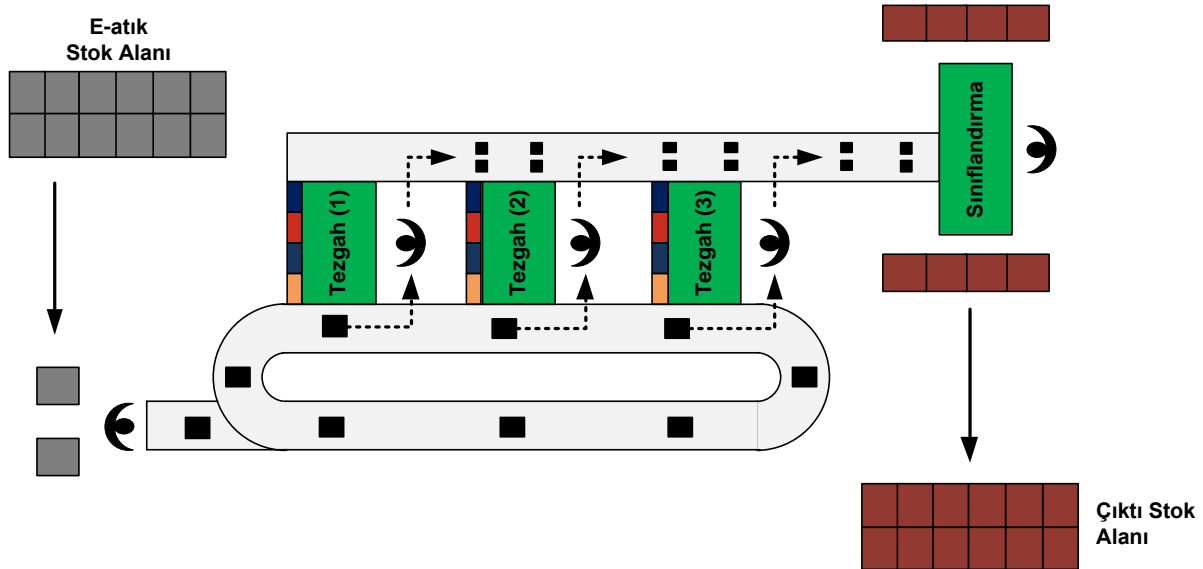
Her bir iş istasyonunda, demontaj operasyonlarından sonra, demonte edilen bileşenler çıktı kutularında sınıflandırılırlar. Kutular demonte edilmiş ve ayrılmış bileşenlerle dolduğu zaman, talep edilen bir forklift gelir ve dolu çıktı kutularını kaldırır.



Şekil 43 Senaryo-4'de kapalı döngü hat için sistemin çalışma prensibi (ARENA 10.0 ara yüzü)

### 5.2.5. Senaryo–5: Hat Yerleşimi – İraksak ve Yakınsak Malzeme Akışı

Bu yerleşim planı, (OPALIĆ VD., 2004, 2010) tarafından hazırlanan tüketici ekipmanları demontaj tesisi konseptinden esinlenerek hazırlanmıştır. Senaryo–5’de e-atıkların demontajı için yerleşim planını gösteren şematik bir diyagram Şekil 44’de verilmiştir.



Şekil 44 Senaryo–5: hat yerleşimi: ıraksak ve yakınsak malzeme akışı

Bu yerleşim planında, biri e-atıkların iş istasyonlarına biri de bileşenler sınıflandırma operatörlerine taşınmasını sağlayan ve paralel çalışan iki hattan 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. E-atıklar kapalı döngü konveyör hattı üzerinde sisteme girerler ve konveyör üzerinde iş istasyonlarına taşınır. Operatör, sürekli dönen hat üzerinde e-atıkları alır, demontajını yaparlar ve bileşenleri iş istasyonlarının yan tarafta bulunan konveyör üzerine bırakırlar. Kapalı döngü hat üzerinde, bir yükleme operatörü tarafından planlama dönemi boyunca sürekli bir ürün beslemesi vardır.



## 6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Potansiyel yerleşim alternatifleri ARENA 10.0 simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Hazırlanan simülasyon modelleri, haftada beş gün ve günde sekiz saat olmak üzere 1 yıllık planlama periyodunda çalıştırılmıştır. Simülasyon modelleri başlangıçta 10 tekrarlı çalıştırılmış ve tekrar sayıları test edilmiştir. Sonuç olarak, 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.

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 (AKCAN, 2010):

$$n_r^*(\gamma) = \min \left\{ i \geq n : \frac{t_{i-1, 1-\alpha/2} S(n) / \sqrt{i}}{|\bar{X}(n)|} \leq \gamma' \right\} \quad (3)$$

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

$n$  = Başlangıçta yapılan tekrar sayısı

$i$  = Gerekli tekrar sayısı

$\bar{X}(n)$  = Başlangıçta yapılan  $n$  tekrarın ortalaması

$S(n)$  = Başlangıçta yapılan  $n$  tekrarın standart sapması

$\alpha$  = Önem düzeyi

$\gamma$  = Bağıl hata değeri

Daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için hem önem düzeyi hem de bağıl hata değerinin %1-%5 arasında olması tercih edilmelidir.  $i = n$  içi değerleri yerine koyulduğunda bulunan değer düzeltilmiş bağıl 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).

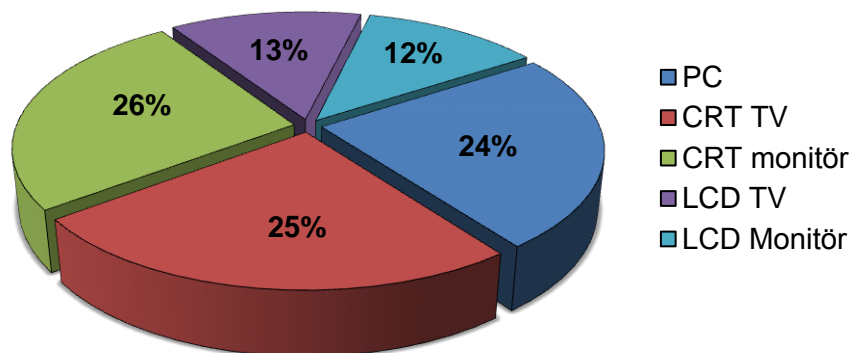
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri, kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Bağlı hata ( $\gamma$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 8 Senaryo-1 için tekrar sayısının yeterliliği

Tekrar Sayısı	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	0,959284	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 8'de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan simülasyonun modelinin 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 45, 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 TV ve %12'si LCD monitörden oluşmaktadır.



Şekil 45 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 (4) bir e-atık türü için toplam gelirin formülünü göstermektedir.

$$TG = \sum_{i=1}^n A_{ji} * S_i \quad (4)$$

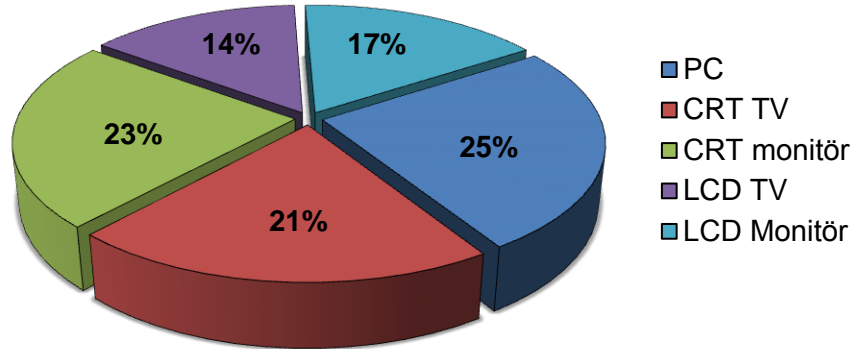
$i$  = bileşen türü (PCB, plastik, metal vs.)

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

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

$S_i$  =  $i$ . bileşenin satış fiyatı

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 46, 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'sü CRT monitör; 14'ü LCD televizyon ve % 17'si LCD monitörün demontajından elde edilmiştir.



Şekil 46 Senaryo-1'de toplam gelirin e-atıkların türlerine göre dağılımı – (%)

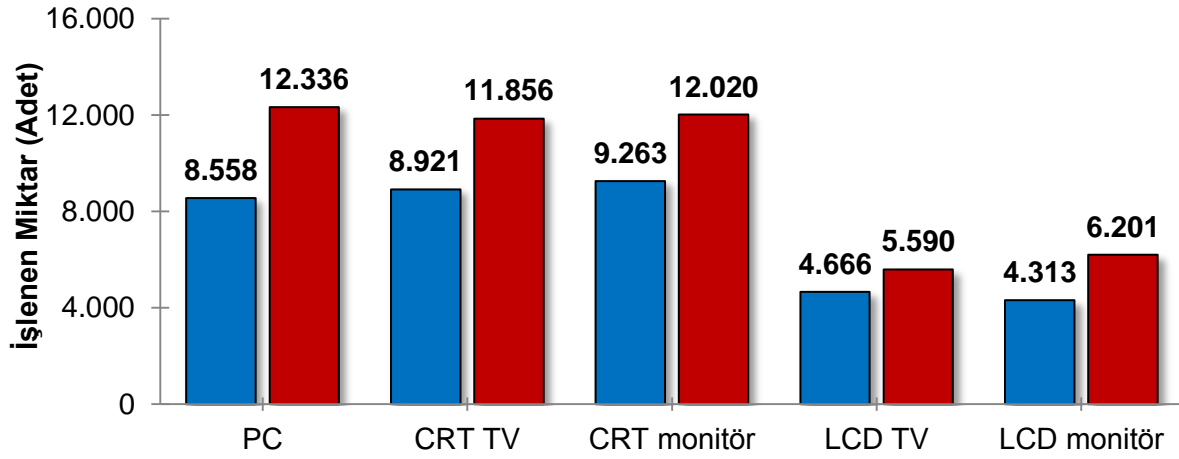
Senaryo-1 yerleşim planında katma değer yaratmayan aktiviteler, operatörün e-atıkları sınıflandırma kutularından alma ve elde ettikleri bileşenleri sınıflandırma kutularına taşıma işlemleridir. Bu durumda iş istasyonunun yanında konumlandırılmış e-atıklar demonte olmak için beklerken, operatör malzeme 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-atık 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 artırılması 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. Sistemin durağan duruma ulaşması için başlangıçta çalıştırılan 10 tekrar yeterli olarak belirlenmiştir.

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 47 planlama dönemi boyunca senaryo–1 ve senaryo–1(a)'da işlenen ortalama e-atık miktarlarını göstermektedir.



Şekil 47 Senaryo–1 ve senaryo–1(a)'da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarları

### 6.2. Senaryo–2 Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde 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
- (3) LCD TV ve monitör demontajı.

Simülasyon modelinin çalıştırılması sonucunda, operatörlerin kaynak kullanım oranları % 91 ile % 94 civarında tespit edilmiştir. Sistemde bir adet forklift bulunmaktadır ve bu forklift taşıma ihtiyaçlarını karşılayacak kapasiteye sahiptir.

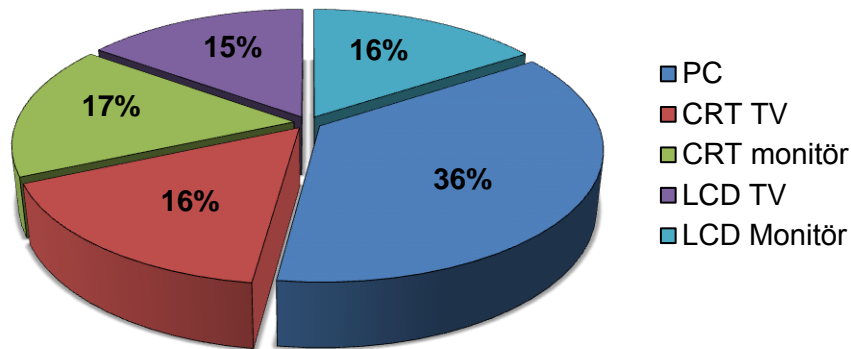
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatör kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Düzeltilmiş bağıl hata ( $\gamma'$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak her bir düzey için gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 9 Senaryo–2 için tekrar sayısının yeterliliği

Tekrar Sayısı	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 9'da görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan simülasyonun modelinin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

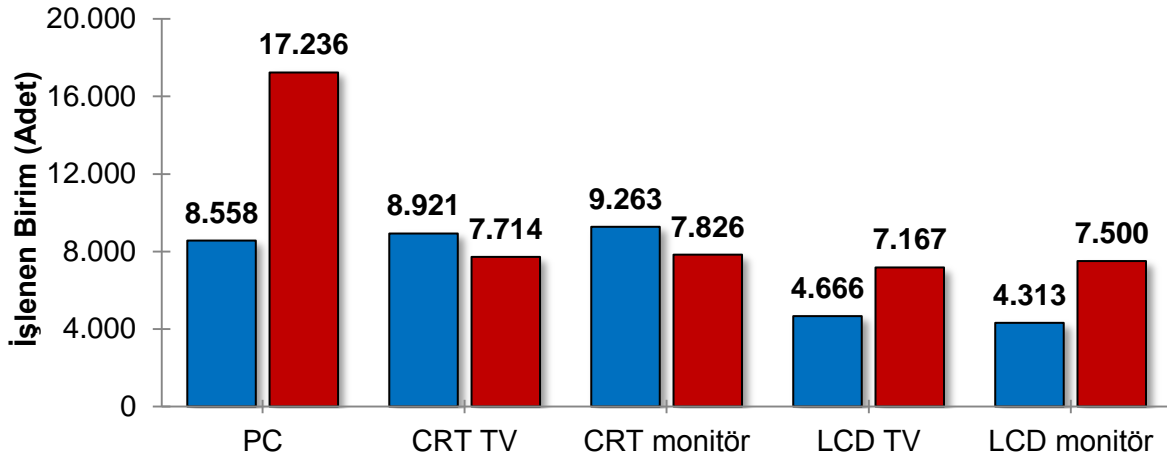
Senaryo–2 için simülasyon modelinin çalıştırılması durumunda toplam **47.444 adet** e-atık işlenmiştir. E-atıklar bazında ortalama olarak; **17.236 adet** PC, **7.714 adet** CRT TV, **7.826 adet** CRT monitör, **7.167 adet** LCD TV, **7.500 adet** LCD monitörün işlendiği gözlemlenmiştir. Şekil 48, senaryo–2 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.



Şekil 48 Senaryo–2'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

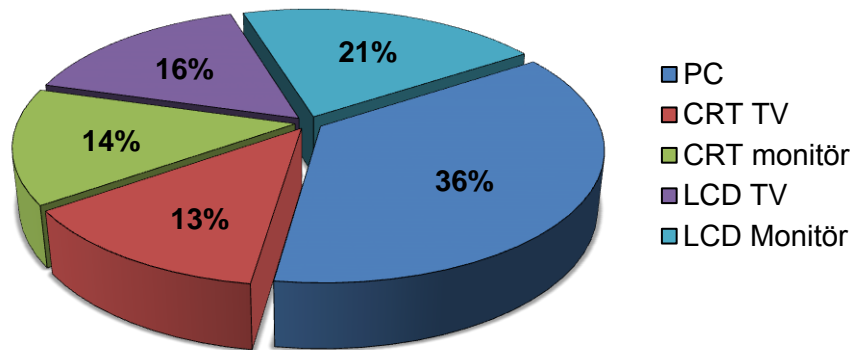
Özel e-atık tiplerinin üzerinde tekrarlı işlemlerin artması ve bunun sonucunda uzmanlaşma ile demontaj operasyonun daha hızlı yapılır. Seçim işlemi sonucunda aynı süre zarfında

demontaj hızının düşmesiyle daha fazla atık işlenmiştir. Buna göre, 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 olan miktarları % 17'lik bir azalma görülmüştür. Üçüncü grup LCD TV ve monitörlerin toplam işlenen miktarlarında ise 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'e** yükselmiştir. Böylece toplam işlenen e-atık miktarında yaklaşık % 33'lük bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 49).



Şekil 49 Senaryo-1 ve senaryo-2'de e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarları

E-atıkların gruplandırılması kararının alınması sonucunda, bileşen satışında elde edilen gelir ortalama %39'luk 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 50 planlama dönemi boyunca elde edilen gelirin e-atık bazında yüzde dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, elde edilen toplam gelirin, % 36'sı kişisel bilgisayar; % 13'i CRT televizyon; %14'si CRT monitör; 16'sı LCD televizyon ve % 21'i LCD monitörün demontajından elde edilmiştir.



Şekil 50 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 dönemde, 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.

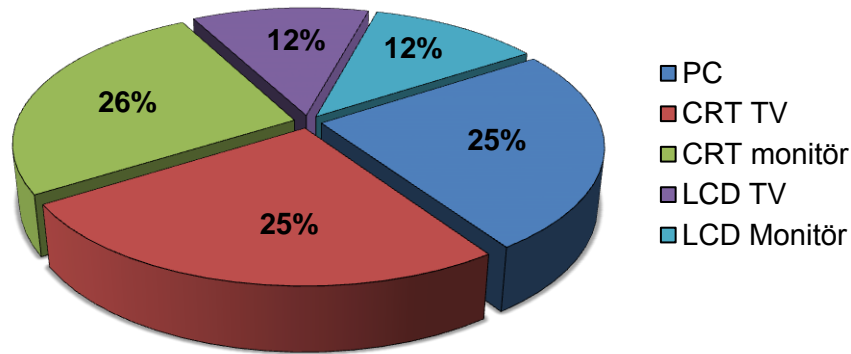
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri, operatörlerin kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Düzeltilmiş bağıl hata ( $\gamma'$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 10 Senaryo-3 için tekrar sayısının yeterliliği

Tekrar Sayısı	1.Operatör	2.Operatör	3.Operatör	Sınıflandırma
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	0,9593	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

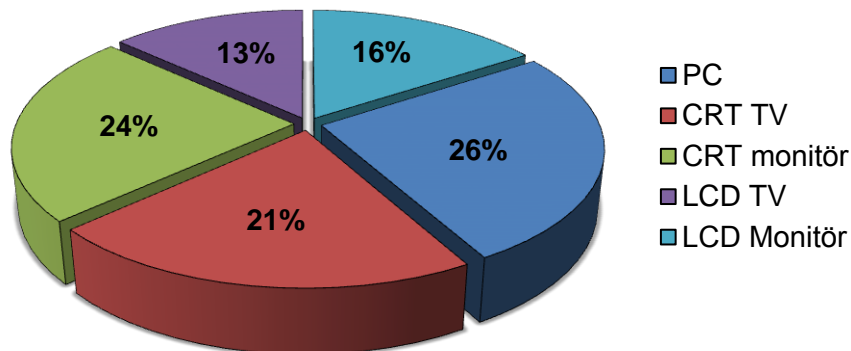
Tablo 10'da görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan simülasyonun modelinin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

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 51, 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.



Şekil 51 Senaryo-3'de işlem gören toplam e-atıkların türlerine göre dağılımı - (%)

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 52, 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 52 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 sınıflandırma kutularına taşınması için geçen süre ortalama 30,01 saniyedir. Bu durumda bir e-atığın demontajı için gerekli olan katma değersiz süre ürün 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 dönemde, toplam çalışma süresinin yaklaşık % 48'ini oluşturmaktadır.

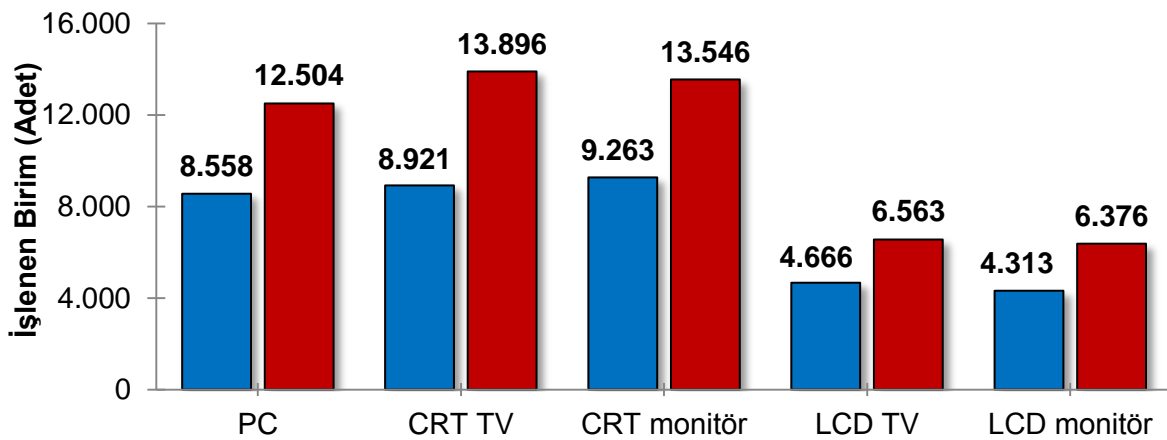
Sonuç olarak, katma değersiz sürelerin azaltılması sonucunda demontaj hızı artırılmış ve bunun sonucunda demontaj süresinin düşmesiyle daha fazla e-atık işlenmiştir. Senaryo 1'e kıyasla birim başına e-atık taşımalarında harcanan katma değersiz süreler 120 saniyeden 90 saniye düşmüş ve böylece % 25'lik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

Konveyör hattı sonundaki sınıflandırma operatörünün kapasitesi % 54 civarında bulunmuştur ve bu durum kabul edilebilir bir oranı göstermektedir. Ancak demontaj iş istasyonu sayılarının artırılması sonucunda sınıflandırma alanına gelen karmaşık parçaların ayrıştırılması problem yaratabilir ve darboğazlara neden olabilir. 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 artırılması 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. Sistemin durağan duruma ulaşması için başlangıçta çalıştırılan 10 tekrar yeterli olarak belirlenmiştir.

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–3'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 53'de verilmiştir



Şekil 53 Senaryo–1 ve senaryo–3(a)'da e-atık türlerine göre ortalama işlem gören atık miktarları

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.

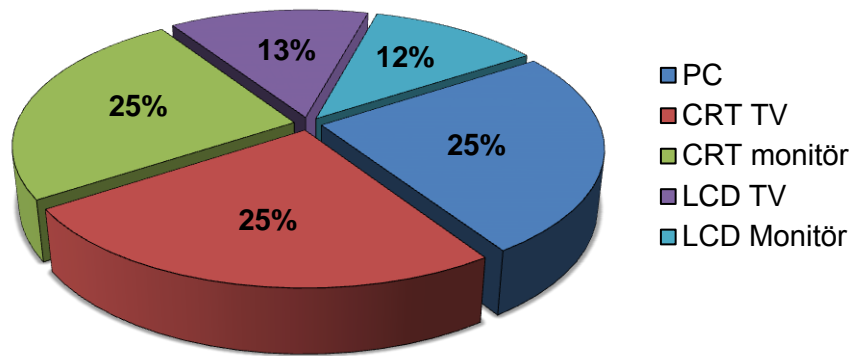
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatörlerin kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Düzeltilmiş bağıl hata ( $\gamma'$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 11 Senaryo–4 için tekrar sayısının yeterliliği

Tekrar Sayısı	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

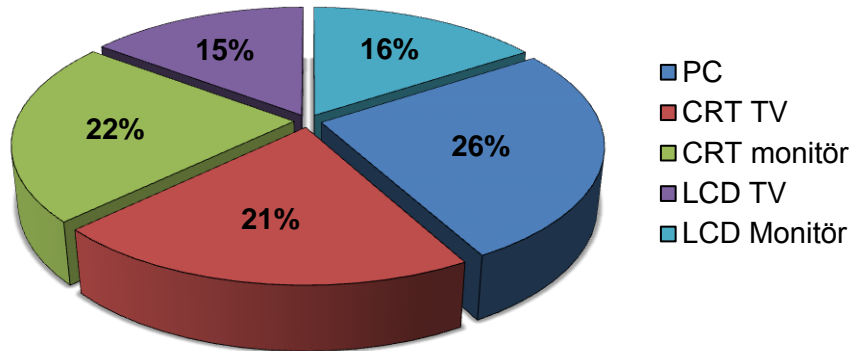
Tablo 11'de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan simülasyonun modelinin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

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 54, 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 54 Senaryo-4'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

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 55, 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 55 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 taşımalarda harcanan katma değersiz süreler 120 saniyeden 65 saniye düşmüş ve böylece % 54'lük 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.

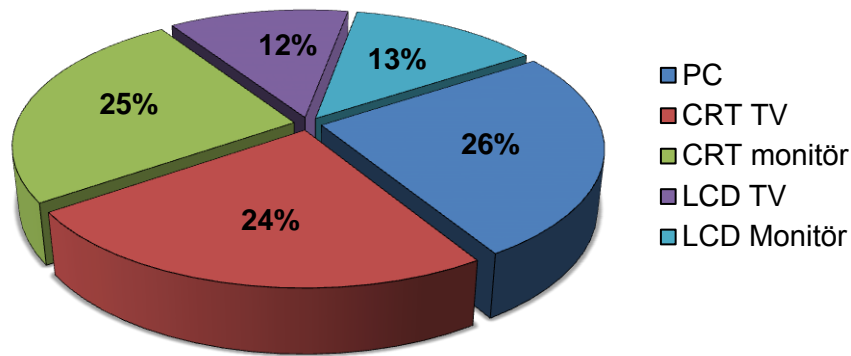
Modelde tekrar sayısının belirlenmesi için başlangıçta 10 tekrar yapılmış ve performans kriteri olarak operatörlerin kaynak kullanım oranı seçilmiştir. Düzeltilmiş bağlı hata ( $\gamma'$ ) değeri 0,02 ve önem düzeyi ( $\alpha$ ) 0,05 alınarak gerekli tekrar sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 12 Senaryo–5 için tekrar sayısının yeterliliği

Tekrar Sayısı	1.Operatör	2.Operatör	3.Operatör	Sınıflandırma
1. Tekrar	0,933	0,933	0,9331	0,5763
2. Tekrar	0,9313	0,9313	0,9313	0,5885
3. Tekrar	0,9348	0,9348	0,9348	0,558
4. Tekrar	0,9316	0,9316	0,9316	0,6027
5. Tekrar	0,9329	0,9329	0,9329	0,5824
6. Tekrar	0,9332	0,9332	0,9332	0,5775
7. Tekrar	0,9314	0,9314	0,9313	0,5725
8. Tekrar	0,9327	0,9327	0,9327	0,5732
9. Tekrar	0,9349	0,935	0,9349	0,5622
10. Tekrar	0,9336	0,9337	0,9337	0,5763
$\bar{X}(n)$	0,9329	0,9330	0,9329	0,5770
$S(n)$	0,0013	0,0013	0,0013	0,0126
$\gamma'$	0,0196	0,0196	0,0196	0,0196
$n_r^*(\gamma)$	0,0010	0,0010	0,0010	0,0158

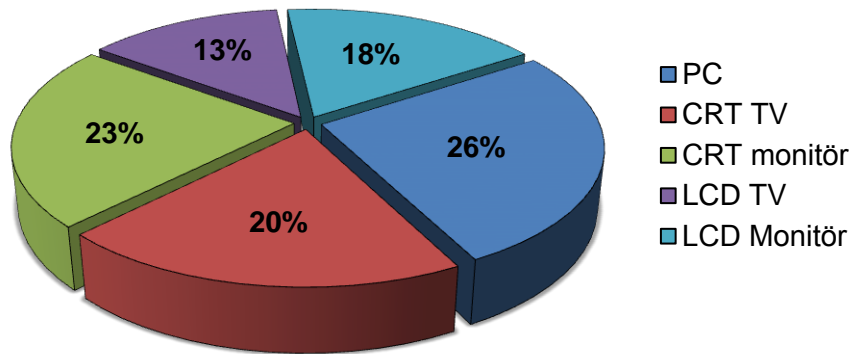
Tablo 12'de görüldüğü üzere,  $n_r^*(\gamma) < \gamma'$  olduğu için başlangıçta çalıştırılan simülasyonun modelinin 10 tekrarlı çalıştırılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Senaryo–5 için simülasyon modelin sonucunda toplam **40.733 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 56, 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 56 Senaryo-5'de işlem gören toplam e-atıkların türlere göre dağılımı - (%)

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 57, 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 57 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 40.733 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan katma değersiz süre ise 395,68 saat olarak belirlenmiştir. Bu durumda 2112 saatlik planlama periyodunda, katma değersiz süreler toplam çalışma süresinin yaklaşık % 18,7'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 40.733 e-atık manuel demontaj yoluyla işlenmesi için yaratılan bekleme süresi 133,74 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. 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 taşımalarında harcanan katma değersiz süreler 120 saniyeden 35 saniyeye düşmüş ve böylece % 71'lik bir kazanç sağlanmıştır.

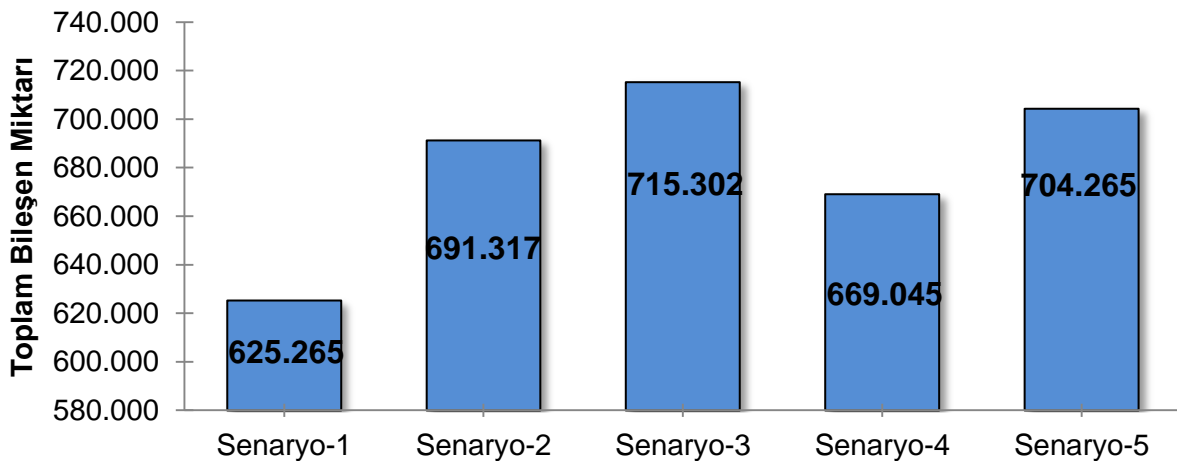
## 6.6. Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

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

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

### 6.6.1. Bileşen Miktarı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 58, 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 ve senaryo-5'de %12 oranında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 58 Bileşen miktarı için senaryoların karşılaştırılması

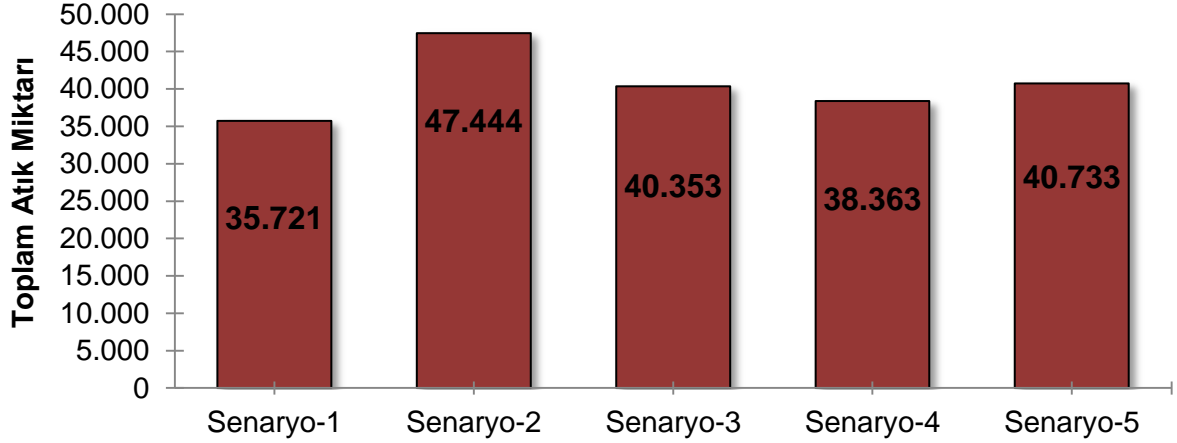
Tablo 13 planlama periyodu sonunda senaryolar ve e-atıklar bazında demontajdan elde edilen bileşen miktarlarını göstermektedir.

Tablo 13 Senaryolarda elde edilen bileşen miktarları

	Bileşen	Ağırlık (kg)	S1	S2	S3	S4	S5
PC	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
CRT TV	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
CRT Monitör	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
LCD TV	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
LCD Monitör	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

### 6.6.2. Demontajı Yapılan Toplam Atık Sayısı Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

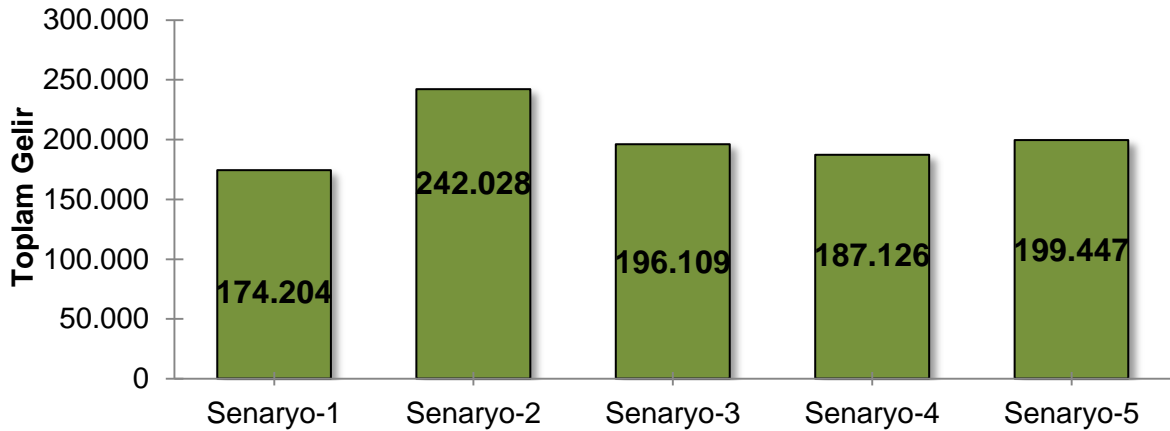
Şekil 59'da planlama dönemi içerisinde referans olarak seçilen e-atıklar için demonte edilen e-atıkların sayısını göstermektedir. İşlenen e-atık miktarı, e-atığın ortalama demontaj süresi ve demontaj hızına bağlı olarak değişmektedir. Referans senaryo-1 ile kıyasla, geri dönüştürülebilir malzemeleri elde etmek için işlenen e-atık miktarı senaryo-2'de %25 oranında, senaryo-3'de %13 oranında, senaryo-4'de %7 ve senaryo-5'de %14 oranında bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 59 Demontajı yapılan toplam atık sayısı için senaryoların karşılaştırılması

### 6.6.3. Toplam Gelir Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 60, 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.

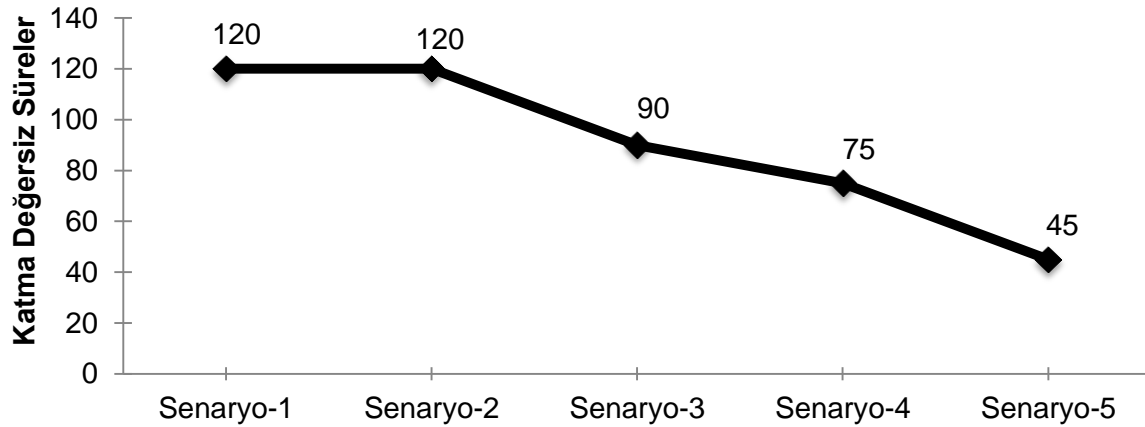


Şekil 60 Toplam gelir için senaryoların karşılaştırılması



#### 6.6.4. Katma Yaratmayan Aktiviteler Açısından Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 61, 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 75 (65+10) saniye ve son olarak senaryo-5'de 45 (35+10) saniye olarak belirlenmiştir. Referans senaryo-1 ile kıyasla, geri dönüştürülebilir malzemeleri elde etmek için işlenen e-atık miktarı senaryo-2'de %0 oranında, senaryo-3'de %25 oranında, senaryo-4'de %54 ve senaryo-5'de %71 oranında bir kazanç gözlemlenmiştir.



Şekil 61 Katma değer yaratmayan süreler için senaryoların karşılaştırılması

#### 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 gelirin (bileşen satışından elde edilen gelir-tehlikeli maddelerin bertaraf maliyeti) maksimuma ulaştırılmasıdır (RENTERIA VD., 2010). Diğer taraftan, e-atıklar üzerinde Dünya'da ve Türkiye'de hazırlanmış yönetmelikler günümüzde atık sahalarına ve geri dönüşüm tesislerine gönderilen e-atık miktarını artırmıştır 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 14'de sunulmuştur (1 en iyi ve 5 en kötü sıralamayı göstermektedir).

Tablo 14 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

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 14'de sunulan veriler incelendiğinde, projede 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 süre 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

Projenin 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 olarak bilinmektedir) satırındaki değerlerin istatistiksel anlamlılık hesaplamalarında sınır değeri kabul edilen 0,05'den büyük olması durumunda  $H_0$  hipotezi kabul edilir ve incelenen faktörlerin dağılımlarının normal olduğunu göstermektedir. Bu değerlerin 0,05'den küçük olması durumunda  $H_0$  hipotezi reddedilir.

Tablo 15 Toplam gelir için tek örneklem Kolmogrov Smirnov testi sonuçları

<b>Tek Örneklem Kolmogrov Smirnov Testi</b>	
Kolmogorov-Smirnov Z	1,489
Asymp. Sig. (p değeri)	0,024

Tablo 15'de görüldüğü üzere, Assymp.Sig. (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 16 İşlenen atık miktarı için tek örneklem Kolmogrov Smirnov testi sonuçları

<b>Tek Örneklem Kolmogrov Smirnov Testi</b>	
Kolmogorov-Smirnov Z	1,260
Asymp. Sig. (p değeri)	0,084

Tablo 16'da görüldüğü üzere, Assymp.Sig. (p) değeri 0,084 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den küçük olduğu veriler normal dağılım göstermemektedir ( $p=0,084$ ;  $p<0,05$ ). Veriler normal dağılıma sahip olmadığı için, işlenen toplam atık miktarları 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 17 Toplam gelir için Kruskal-Wallis H testi sonuçları

SENARYO	N	SIRA ORTALAMASI	Kİ-KARE	SD	ASYMP. SİG. (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 değer 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 17 incelendiğinde, senaryolar için %95 güvenlilik 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 18 İşlenen atık miktarı için Kruskal-Wallis H testi sonuçları

SENARYO	N	SIRA ORTALAMASI	Kİ-KARE	SD	ASYMP. SİG. (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 18 incelendiğinde, senaryolar için %95 güvenilirlik 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 ÖNERİLER

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. Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgiler, demontaj sistemlerinin yerleşim planlaması konusunda yapılan çalışmaların azlığı dikkat çekicidir.

Bu projede, e-atık demontaj sistemlerinin daha verimli çalışan sistemlere dönüştürülmesi için ideal yerleşim planlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Kocaeli'de bulunan bir e-atık geri kazanım tesisi ile görüşülmüş, proje kapsamında işbirliği desteği sağlanmıştır. Projede 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 proje, demontaj sistemlerinin yerleşimlerin tasarımı ile sınırlandırılmıştır. Tersine lojistik, üretim planlama, demontaj çizelgeleme, demontaj sıralama ve demontaj hat dengeleme gibi ürün geri kazanımında önemli diğer problemler projenin dışında bırakılmıştır.

Projede, e-atık demontaj tesisinden verilerin toplanması ve simülasyon, bulanık mantık ve çok değişkenli veri analizi tekniklerinin 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. Ayrıca, demontaj sistemlerinde getirilen ürünlerin çeşitliliği ve belirsizliği sistem içerisinde kullanılan pek çok kavramın bulanık olmasına neden olur. Bu noktada projede, bulanık mantık kavramı kullanılmış ve demontaj süreleri bulanık sayılarla ifade 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. 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.

Projede 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. İş 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.

Çalışma, e-atık demontaj sistemlerinin alternatif yerleşimlerini simülasyon modelleri ile test ederek mevcut literatürün geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çalışma, demontaj sistemlerinde bulunan e-atıkların barındırdığı yapısal belirsizlikler nedeni ile demontaj sürelerini bulanık olarak ele almakta, demontaj işlemlerinde ise öğrenme etkisini de dikkate alarak önerilen modellerin kalitesini artırmaktadır.

Projenin devamında yeni çalışmaların yapılması için girişimlere başlanmıştır. Bunlardan birisi projede önerilen yerleşim planlarının uygulamaya aktarılmasına yönelik sanayi ile ortak projelerin geliştirilmesine yöneliktir. Bir diğeri ise e-atıkların geri kazanımı ve tekrar kullanımının sağlanması için uygun altyapının geliştirilmesinde önemli konulardan birisi olan e-atık üretiminin doğru tahmin edilmesidir (KANG VE SCHOENUNG, 2006). E-atık miktarının tahmin edilmesi, atık akışının yönetilmesine ve dolayısıyla uygun geri dönüşüm alt yapısının geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Üretilen e-atık miktarının tahmin edilmesi ile ilgili Türkiye'de herhangi bir bilimsel çalışmanın bulunmaması gerekçesiyle, Türkiye'de üretilen e-atık miktarının tahmin edilmesi yeni bir proje fikri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu konuda e-atık üretiminin tahmin edilmesinde kullanılan yöntemleri içeren bir ön araştırma proje kapsamında yapılmış olup konunun detaylı araştırılmasına başlanmıştır.

## 8. KAYNAKLAR

- ADENSO-DIAZ, B., Garcia-Carbajal, S., Gupta, S.M., A path-relinking approach for a bi-criteria disassembly sequencing problem, *Computers & Operations Research*, Vol: 35, No: 12, 3989-3997, (2008).
- AGRAWAI, 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 (IJPR)*, Vol: 46, No: 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, (2010).
- ALTEKIN, F.T., Kandiller, L., Ozdemirel, N.E., Profit-oriented disassembly-line balancing, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 46, No: 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 Ghana & Empa Switzerland, Ghana, (2011).
- BAIK, D.-K., Sim, E., Kim, H., Park, C., Park, J., Performance Analysis of Alternative Designs for a Vehicle Disassembly System Using Simulation Modeling, ed: Doo-Kwon B., Vol: 3398, Springer Berlin Heidelberg, (2005).
- BAKER, E., Bournay, E., Harayama, A. , Rekacewicz, P., Vital Waste Graphics, Basel Convention, GRID Arendal, UNEP, DEWA Europe, (2004).
- BARBA-GUTIERREZ, Y., Adenso-Diaz, B., Gupta, S.M., Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly, *International Journal of Production Economics (IJPR)*, Vol: 111, No: 2, 741-751, (2008).
- BRENNAN, Louis, Gupta, S.M., Taleb, K.N., Operations Planning Issues in an Assembly/Disassembly Environment, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol: 14, No: 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, Centres de Formation en Enterprise et Recuperation,
- CHUNG, C.A., *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*, ed: Hamid R.P., CRC Press, (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*, Vol: 99, No: 3, 243-263, (2003).
- CUI, J., Zhang, L., Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review, *Journal of Hazardous Materials*, Vol: 158, No: 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*, Vol: 30, No: 5-6, 507-520, (2006).
- EEA, Waste from electrical and electronic equipment (WEEE) - Quantities, Dangerous, Substances and Treatment Methods, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, Copenhagen, (2003).
- EPA, Electronics waste management in the United States, 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 Office of Resource Conservation and Recovery Washington, DC, (2009).
- EPA, Municipal Solid Waste in the United States: 2009 Facts and Figures, United States Environmental Protection Agency, (2009).
- ERDOS, G., Kis, T., Xirouchakis, P., Modelling and evaluating product end-of-life options, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 39, No: 6, 1203-1220, (2001).
- EU, Directive 2002/96/EC of the European parliament and of the council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), *Official Journal of the European Union*, Vol: L37, 24-39, (2002a).
- 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, *Official Journal of the European Union*, Vol: L37, 19-23, (2002b).
- 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*, Vol: 103, No: 1, 1-17, (1997).
- GAO, M., Zhou, M.C., Tang, Y., Intelligent decision making in disassembly process based on fuzzy reasoning Petri nets, *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, Vol: 34, No: 5, 2029-2034, (2004).
- GONZALEZ, B., Adenso-Diaz, B., A scatter search approach to the optimum disassembly sequence problem, *Computers & Operations Research*, Vol: 33, No: 6, 1776-1793, (2006).
- GROCHOWSKI, D. E., Tang, Y., A machine learning approach for optimal disassembly planning, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol: 22, No: 4, 374-383, (2009).
- GUNGOR, A., Gupta, S.M., An evaluation methodology for disassembly processes, *Computers & Industrial Engineering*, Vol: 33, No: 1-2, 329-332, (1997).
- GUNGOR, A., Gupta, S.M., Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery, *Computers & Industrial Engineering*, Vol: 35, Vol: 1-2, 161-164, (1998).



- GUNGOR, A., Gupta, S.M., Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, *Computers & Industrial Engineering*, Vol: 36, No: 4, 811-853, (1999).
- GUNGOR, A., Gupta, S.M., Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 39, No: 3, 481-509, (2001a).
- GUNGOR, A., Gupta, S.M., A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 39, No: 7, 1427-1467, (2001b).
- GUNGOR, A., Gupta, S.M., Disassembly line in product recovery, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 40, No: 11, 2569-2589, (2002).
- GUPTA, S.M., Taleb, K.N., Scheduling disassembly, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 32, No: 8, 1857-1866, (1994).
- HESSELBACH, J., Westernhagen, K.V., Disassembly Simulation for an Effective Recycling of Electrical Scrap, *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 1999. Proceedings. EcoDesign '99: First International Symposium On, (1999), 582-585
- HUANG, H.-H., Wang, M.H., Johnson, M.R., Disassembly sequence generation using a neural network approach, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol: 19, No: 2, 73-82, (2000).
- HUI, W., Dong, X., Guanghong, D., A genetic algorithm for product disassembly sequence planning, *Neurocomputing*, Vol: 71, No: 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, AEA Technology, Gaiker, Regional Environmental Centre for Central and Eastern Europe, Delft University of Technology, for the European Commission, (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*, Vol: 91, No: 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*, Vol: 27, No: 2, 318-334, (2011).
- INDERFURTH, K., Langella, I., Heuristics for solving disassemble-to-order problems with stochastic yields, *OR Spectrum*, Vol: 28, No: 1, 73-99, (2006).
- KAEBERNICK, H., O'Shea, B., Grewal, S. S., A Method for Sequencing the Disassembly of Products, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol: 49, No: 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*, Vol: 45, No: 4, 368-400, (2005).

- KANG, H.-Y., Schoenung, J.M., Estimation of future outflows and infrastructure needed to recycle personal computer systems in California, *Journal of Hazardous Materials*, Vol: 137, No: 2, 1165-1174, (2006).
- KAYA, M., Küresel Elektronik Atık (e-atık) Pazarı 2009'da 11 Milyar Doları Geçecek, [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), 23.12.2012.
- KIM, H. J., Lee, D. H., Xirouchakis, P., Züst, R., Disassembly Scheduling with Multiple Product Types, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol: 52, No: 1, 403-406, (2003).
- KIM, H.J., Kernbaum, S., Seliger, G., Emulation-based control of a disassembly system for LCD monitors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol: 40, No: 3-4, 383-392, (2009).
- 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 (IJPR)*, Vol: 44, No: 1, 195-212, (2006a).
- KIM, H.J., Lee, D.H., Xirouchakis, P., A Lagrangean heuristic algorithm for disassembly scheduling with capacity constraints, *Journal of the Operational Research Society*, Vol: 57, No: 10, 1231-1240, (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*, Vol: 60, No: 3, 419-430, (2009).
- KIM, J.-G., Jeon, H.-B., Kim, H.-J., Lee, D.-H., Xirouchakis, P.I, Disassembly scheduling with capacity constraints: Minimizing the number of products disassembled, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol: 220, No: 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*, Vol: 41, No: 10, 866-881, (2009).
- KONGAR, E., Gupta, S.M., A Multi-Criteria Decision Making Approach for Disassembly-to-Order Systems, *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol: 11, No: 02, 171-183, (2002).
- KONGAR, E., Gupta, S.M., Disassembly sequencing using genetic algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol: 30, No: 5-6, 497-506, (2006a).
- KONGAR, E., Gupta, S.M., Disassembly to order system under uncertainty, *Omega*, Vol: 34, No: 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*, Vol: 1, No: 4, 504-531, (2009).
- 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 (IJPR)*, Vol: 41, No: 12, 2727-2762, (2003).

- KUO, T.C., Disassembly sequence and cost analysis for electromechanical products, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol: 16, No: 1, 43-54, (2000).
- LAMBERT, A.J.D., Optimal disassembly of complex products, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 35, No: 9, 2509-2524, (1997).
- LAMBERT, A.J.D., Linear programming in disassembly/clustering sequence generation, *Computers & Industrial Engineering*, Vol: 36, No: 4, 723-738, (1999).
- LAMBERT, A.J.D., Disassembly sequencing: A survey, *International Journal of Production Research*, Vol: 41, No: 16, 3721-3759, (2003).
- LAMBERT, A.J.D., Exact methods in optimum disassembly sequence search for problems subject to sequence dependent costs, *Omega*, Vol: 34, No: 6, 538-549, (2006).
- LAMBERT, A.J.D., Optimizing disassembly processes subjected to sequence-dependent cost, *Computers & Operations Research*, Vol: 34, No: 2, 536-551, (2007).
- LAMBERT, A.J.D., Gupta, S.M., Demand-Driven Disassembly Optimization for Electronic Products Package Reliability, *Journal of Electronics Manufacturing*, Vo: 11, No: 2, 121-135, (2002).
- LAMBERT, A.J.D., Gupta, S.M., Methods for optimum and near optimum disassembly sequencing, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 46, No: 11, 2845-2865, (2008).
- LANGELLA, I.M., Heuristics for demand-driven disassembly planning, *Computers & Operations Research*, Vol: 34, No: 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*, Vol: 215, No: 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*, Vol: 218, No: 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*, Vol: 55, No: 3, 287-297, (2004).
- LEE, D.H., Xirouchakis, P., Zust, R., Disassembly Scheduling with Capacity Constraints, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol: 51, No: 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*, Vol: 56, No: 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*, Vol: 102, No: 1, 51-65, (2006).
- LIMAYE, K., Caudill, R.J., System simulation and modeling of electronics demanufacturing facilities, *Electronics and the Environment*, 1999. ISEE -1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on, (1999), 238-243.

- MASCLE, C., Balasoiu, B.A., Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol: 19, No: 5, 439-448, (2003).
- MCGOVERN, S.M., Gupta, S.M., 2-opt heuristic for the disassembly line balancing problem, 71-84, (2004).
- MCGOVERN, S.M., Gupta, S.M., Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol: 30, No: 5-6, 481-496, (2006).
- MCGOVERN, S.M., Gupta, S.M., Combinatorial optimization analysis of the unary NP-complete disassembly line balancing problem, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 45, No: 18-19, 4485-4511, (2007a).
- MCGOVERN, S.M., Gupta, S.M., A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, Vol: 179, No: 3, 692-708, (2007b).
- MCGOVERN, S.M., Gupta, S.M., *The Disassembly Line: Balancing and Modeling*, McGraw-Hill Professional; 1 edition, (2010).
- MEACHAM, A., Uzsoy, R., Venkatadri, U., Optimal disassembly configurations for single and multiple products, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol: 18, No: 5, 311-322, (1999).
- MOORE, K.E., Güngör, A., Gupta, S.M., A Petri net approach to disassembly process planning, *Computers & Industrial Engineering*, Vol: 35, No: 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*, Vol: 135, No: 2, 428-449, (2001).
- OPALIĆ, M., Kljajin, M., Vučković, K., Consumer Electronics Disassembly Line Layout, *Polimeri*, Vol: 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*, Vol: 52, 51-58, (2010).
- PENEV, K.D., de Ron, A.J., Determination of a disassembly strategy, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 34, 2, 495-506, (1996).
- PUCKETT, J, Smith, T. , Exporting harm: the high-tech trashing of Asia The Basel Action Network., Silicon Valley Toxics Coalition, 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 (IJPR)*, Vol: 40, No: 13, 3183-3198, (2002).
- RELLER, A., Graedel, T, Earth's Natural Wealth: an Audit, *New Scientist*, 2605, 34-41, (2007).

- 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*, Vol: 54, No: 5-8, 789-800, (2010).
- REVELIOTIS, S.A., Uncertainty management in optimal disassembly planning through learning-based strategies, *IIE Transactions*, Vol: 39, No: 6, 645-658, (2007).
- ROBINSON, B.H., E-waste: An assessment of global production and environmental impacts, *Science of The Total Environment*, Vol: 408, No: 2, 183-191, (2009).
- SARIN, S., Sherali, H., Bhootra, A., A precedence-constrained asymmetric traveling salesman model for disassembly optimization, *IIE Transactions*, Vol: 38, No: 3, 223-237, (2006).
- SCHARKE, H., *Comprehensive Information Chain for Automated Disassembly of Obsolete Technical Appliances*, ed: Bernd S.-R., Gito, Germany, (2003).
- SELIGER, G., Kernbaum, S., *Sustainability in Manufacturing: Recovery of Resources in Product and Material Cycles*, ed: Günther S., Springer (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*, Vol: 18, No: 5, 371-380, (2001).
- SHIMIZU, Y., Tsuji, K., Nomura, M., Optimal disassembly sequence generation using a genetic programming, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol: 45, No: 18-19, 4537-4554, (2007).
- 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 (IJPR)*, Vol: 41, No: 16, 3761-3792, (2003).
- STUART, J.A., Christina, V. (2003). New Metrics and Scheduling Rules for Disassembly and Bulk Recycling. IEEE Transactions on Electronic Packaging Manufacturing. Vol: 26: 133-140.
- T.C. ÇEVRE VE ORMAN BAKANLIĞI, Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) Kontrolü Yönetmeliği (Taslak), Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, (2009).
- T.C. ÇEVRE VE ORMAN BAKANLIĞI, 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*, Vol: 32, No: 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*, Vol: 8, No: 3, 255-269, (1997).
- TANG, Y., Zhou, M.C., A systematic approach to design and operation of disassembly lines, *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, Vol: 3, No: 3, 324-329, (2006).

- TANG, Y., Zhou, M.C., Caudill, R.J., An integrated approach to disassembly planning and demanufacturing operation, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol: 17, No: 6, 773-784, (2001).
- TESİD, Elektronik Sanayii Almanığı, Türkiye Elektronik Sanayicileri Derneği, (2011).
- TEUNTER, R.H., Determining optimal disassembly and recovery strategies, *Omega*, Vol: 34, No: 6, 533-537, (2006).
- THIERRY, M., Salomon, M., Nunen, J.V., Wassenhove, L.V., Strategic issues in product recovery management, *California Management Review*, Vol: 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*, Vol: 40, No: 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*, Vol: 21, No: 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*, Vol: 25, No: 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 27/01/2012.
- 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, <http://www.census.gov/population/popclockworld.html>, United States Census Bureau, 24.12.2012.
- VEERAKAMOLMAL, P., Gupta, S.M., A case-based reasoning approach for automating disassembly process planning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol: 13, No: 1, 47-60, (2002).
- WIDMER, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H., Global perspectives on e-waste, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol: 25, No: 5, 436-458, (2005).
- WILKINSON, S., Duffy, N., Crowe, M., Waste from electrical and electronic equipment in Ireland: a status report, US Environmental Protection Agency (EPA), Ireland, (2001).
- WILLIAMS, J.A.S., A review of electronics demanufacturing processes, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol: 47, No: 3, 195-208, (2006).
- ZEID, I., Gupta, S.M., Bardasz, T., A case-based reasoning approach to planning for disassembly, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol: 8, No: 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 (IJPR)*, Vol: 38, No: 5, 3639-3676, (2000).
- ZUSSMAN, E., Zhou, M.C., A methodology for modeling and adaptive planning of disassembly processes, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol: 15, No: 1, 190-194, (1999).
- ZUSSMAN, E., Zhou, M.C., Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol: 16, No: 2, 171-179, (2000).

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. AŞKİNER GÜNGÖR
Proje No:	111M428
Proje Başlığı:	E-Atık Geri Kazanım Sistemlerinde Demontaj Tesis Yerleşim Planlaması
Proje Türü:	Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	PAMUKKALE Ü. MÜHENDİSLİK F. ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/11/2011 - 15/11/2012
Onaylanan Bütçe:	15420.0
Harcanan Bütçe:	12871.46
Öz:	<p>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 dünyanın limitli kaynaklarının verimli kullanımına yönelik katkısı bakımından önemlidir.</p> <p>Bu projede e-atık geri kazanım sürecinde önemli bir yere sahip olan demontaj sistemleri için ideal yerleşim tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Projenin 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 sayılarla ifade edilmiştir. Simülasyon modellerinin sonuçları, demontaj operasyonlarından elde edilen geri kazanılabilir bileşen miktarı, demontaj 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.</p> <p>Çalışma, e-atık demontaj sistemlerinin alternatif yerleşimlerini simülasyon modelleri ile test ederek mevcut literatürün geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çalışma, demontaj sistemlerinde bulunan e-atıkların barındırdığı yapısal belirsizlikler nedeni ile demontaj sürelerini bulanık olarak ele almakta, demontaj işlemlerinde ise öğrenme etkisini de dikkate alarak önerilen modellerin kalitesini artırmaktadır.</p>
Anahtar Kelimeler:	E-Atık; Geri Kazanım; Demontaj; Yerleşim Planlaması; Simülasyon
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır