

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
İŞLETME ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL KATI ATIK GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN
ÇEVRESEL VE EKONOMİK PERFORMANSA
ETKİSİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK BİR SİSTEM
DİNAMİĞİ MODELİ ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

Damla ÇEVİK AKA

**Enstitü Anabilim Dalı : İşletme
Enstitü Bilim Dalı : Üretim Yönetimi ve Pazarlama**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Samet GÜNER

EYLÜL-2022

Damla evik Aka tarafından hazırlanan “Endüstriyel Katı Atık Geri Dönüşümünün Çevresel ve Ekonomik Performansa Etkisini Belirlemeye Yönelik Bir Sistem Dinamiği Modeli Önerisi” başlıklı bu tez, 02/09/2022 tarihinde Sakarya Üniversitesi Lisansüstü Eğilim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Samet GÜNER

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erman COŞKUN

Bakırçay Üniversitesi

Doç. Dr. Özer UYGUN

Sakarya Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kamil TAŞKIN

Sakarya Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yılmaz

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

 SAKARYA ÜNİVERSİTESİ	T.C. SAKARYA ÜNİVERSİTESİ İŞLETME ENSTİTÜSÜ TEZ SAVUNULABİLİRLİK VE ORJİNALLİK BEYAN FORMU	Sayfa : 1/1
Öğrencinin		
Adı Soyadı	:	Damla Çevik Aka
Öğrenci Numarası	:	D189004002
Enstitü Anabilim Dalı	:	İşletme
Enstitü Bilim Dalı	:	Üretim Yönetimi ve Pazarlama
Programı	:	☐ YÜKSEK LİSANS ☒ DOKTORA
Tezin Başlığı	:	Endüstriyel Katı Atık Geri Dönüşümünün Çevresel ve Ekonomik Performansa Etkisini Belirlemeye Yönelik Bir Sistem Dinamiği Modeli Önerisi
Benzerlik Oranı	:	% 5
Sakarya Üniversitesi İşletme Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygulama Esaslarını inceledim. Enstitünüz tarafından Uygulama Esasları çerçevesinde alınan Benzerlik Raporuna göre yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının benzerlik oranının herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/ 09 / 2022 İmza Öğrenci		
Sakarya Üniversitesi İşletme Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygulama Esaslarını inceledim. Enstitünüz tarafından Uygulama Esasları çerçevesinde alınan Benzerlik Raporuna göre yukarıda bilgileri verilen öğrenciye ait tez çalışması ile ilgili gerekli düzenleme tarafımda yapılmış olup, yeniden değerlendirilmek üzere@sakarya.edu.tr adresine yüklenmiştir. Bilgilerinize arz ederim. 02 /09 / 2022 İmza Danışman		
Uygundur Danışman Unvanı / Adı-Soyadı: Tarih: 02 / 09 / 2022 İmza:		
☐ KABUL EDİLMİŞTİR		
☐ REDDEDİLMİŞTİR		
EYK Tarih ve No:		Enstitü Birim Sorumlusu Onayı

ÖNSÖZ

Oldukça zor ve yorucu bu yolda bana tavsiye, cesaret ve en önemlisi desteklerini veren çok değerli insanlara büyük teşekkürlerim var.

Doktora eğitimim boyunca akademik bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, tez konusuna karar sürecimde özel olarak ilgilenen, her çalışmamı titizlikle değerlendirerek yön veren saygı değer hocam Doç.Dr. Samet GÜNER'e teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma sürecimde fikirleri ve kritik önerileriyle tezimin iyileştirilmesi için katkılar sunan Doç.Dr. Özer UYGUN'a ve yüksek lisans sürecimden itibaren benimle tecrübe ve bilgilerini her zaman paylaşan, akademik ve moral desteklerini benden esirgemeyen değerli büyüğüm, hocam Dr.Öğr.Üyesi Kamil TAŞKIN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Türlü zorlukla karşılaştığım veri toplama sürecinde çalışmamı merakla dinleyen, yardımcı olmak isteyen, işletme verilerini büyük mesai harcayarak benimle paylaşan tüm geri dönüşüm firmalarının değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Teşekkürlerin en önemlisi şüphesiz aileme. Hayatımdaki her an için önce dualarını aldığım kıymetli babaneme, benim kadar bu süreci takip eden, benimle streslenen ve her an arkamda dağ gibi hissettiğim canım babam Ümit Çevik'e; bana olan güveni ve inancı sayesinde daha çok kendime güvenmemi sağlayan canım annem Sibel Çevik'e ve neşe kaynağım, varlığıyla güç bulduğum çok sevgili biricik kardeşim Mert Çevik'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, beni neredeyse her gün dakikalarca heyecanla dinleyen, çalışmaların kritiğini yaparak bana yol gösteren, karamsarlığa düştüğüm her anı aydınlığa çeviren, desteğini bir an olsun esirgemeyen ve hayatımı varlığıyla güzelleştiren yol arkadaşım, sevgili eşim Halil İbrahim Aka'ya minnettarım. Sen olmasan her şey çok daha zor olurdu.

Damla ÇEVİK AKA

02.09.2022

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 1: DÖNGÜSEL EKONOMİ & ATIK YÖNETİMİ	7
--	----------

1.1. Döngüsel Ekonomi (DE)	7
1.2. Atık Yönetimi	12
1.2.1. Atık Türleri ve Atık Yönetimi Kavramı	12
1.2.2. Atık Yönetiminin Engelleri ve Kolaylaştırıcı Unsurları	17
1.2.3. Atık Değerlendirme Yöntemleri	24
1.2.3.1. Kompostlama ve Biyobozunma	24
1.2.3.2. Düzenli Depolama (Atık Gömme)	24
1.2.3.3. Yakma	25
1.2.3.4. Fermentasyon	26
1.2.3.5. Azaltma, Yeniden Kullanım, Geri Dönüşüm (3Rs) ve Geri Kazanım	27
1.3. Sürdürülebilir Kalkınma ve Sürdürülebilir Atık Yönetimi Uygulamaları	52
1.3.1. Sürdürülebilir Kalkınma	52
1.3.2. Sürdürülebilir Atık Yönetimine Yönelik Farklı Ülkelerdeki Projeler	72
1.3.3. Türkiye’de Sürdürülebilir Atık Yönetimine Yönelik Son Gelişmeler	77

BÖLÜM 2: GERİ DÖNÜŞÜM FAALİYETLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANSINA ETKİSİ	88
--	-----------

2.1. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri	88
2.2. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansı	92
2.2.1. Ekonomik Sürdürülebilirlik Performansı	93

2.2.2. Çevresel Sürdürülebilirlik Performansı	95
2.2.3. Sosyal Sürdürülebilirlik Performansı.....	98
2.3. Geri Dönüşümün Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansı Üzerindeki Etkisine Dair Teorik Arka Plan	100
2.4. Geri Dönüşümün Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansı Üzerindeki Etkisine Ait Mevcut Literatürün Analizi	111

BÖLÜM 3: ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ 113

3.1. Araştırma Tasarımı.....	113
3.2. Yöntem.....	114
3.2.1. Sistem Dinamiği Metodolojisi	115
3.2.1.1. Sistem Dinamiği Yöntem Adımları.....	117
3.2.1.2. Sistem Dinamiğinin Sürdürülebilir Tedarik Zincirinde Kullanımı .	122
3.2.2. Best Worst Method (BWM).....	127
3.3. Veri Toplama Süreci	131

BÖLÜM 4: UYGULAMA 134

4.1. Model Tasarımı	135
4.1.1. Nedensel Döngü Diyagramları.....	135
4.1.2. Model Haritası.....	143
4.2. Model Boyutları	146
4.3. Çalışmanın Varsayımları.....	152
4.4. Plastik Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları.....	153
4.4.1. Plastik Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları	153
4.4.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Plastik Ürün Grubu).....	154
4.4.3. Plastik Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi	156
4.4.4. Plastik Ürün Grubuna Yönelik Bulgular.....	159
4.4.4.1. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular	160
4.4.4.2. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular.....	162
4.4.4.3. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular.....	164
4.5. Cam Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları	165

4.5.1. Cam Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları.....	166
4.5.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Cam Ürün Grubu)	166
4.5.3. Cam Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi.....	168
4.5.4. Cam Ürün Grubu'na Yönelik Bulgular.....	170
4.5.4.1. Cam Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular	171
4.5.4.2. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular.....	173
4.5.4.3. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular.....	175
4.6. Çelik Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları.....	176
4.6.1. Çelik Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları.....	177
4.6.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Çelik Ürün Grubu)	177
4.6.3. Çelik Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi.....	179
4.6.4. Çelik Ürün Grubuna Yönelik Bulgular	182
4.6.4.1. Çelik Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular	182
4.6.4.2. Çelik Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular	185
4.6.4.3. Çelik Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular	186
4.7. Alüminyum Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları	188
4.7.1. Alüminyum Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları.....	188
4.7.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Alüminyum Ürün Grubu)	189
4.7.3. Alüminyum Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi	191
4.7.4. Alüminyum Ürün Grubuna Yönelik Bulgular	193
4.7.4.1. Alüminyum Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular.....	194
4.7.4.2. Alüminyum Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular	196
4.7.4.3. Alüminyum Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular	198
4.8. Dört Ürün Grubunun Senaryo 1b'deki Sonuçlarını Değerlendirme	200
4.9. Dört Ürün Grubunun Senaryo 2'deki Sonuçlarını Değerlendirme	203
4.10. Senaryo Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	207
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	209
KAYNAKÇA	214
EKLER.....	245
ÖZGEÇMİŞ.....	286

KISALTMALAR

3Rs	: “Reduce, Reuse, Recycle”, Azaltma, Yeniden Kullanım, Geri Dönüşüm
AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi
AB	: Avrupa Birliği
AYM	: Avrupa Yeşil Mutabakatı
BM	: Birleşmiş Milletler
BWM	: “Best Worst Method”, En İyi En Kötü Yöntem
BOF	: Bazık Oksijen Fırını
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
DE	: Döngüsel Ekonomi
EAO	: Elektrik Ark Ocağı
EPA	: “Environmental Protection Agency”, Avrupa Çevre Koruma Kurumu
GRI	: “Global Reporting Initiative”, Küresel Raporlama Girişimi
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
RFID	: “Radio Frequency Identification”, Radyo Frekans ile Tanımlama Sistemi
SD	: Sistem Dinamiği
STZ	: Sürdürülebilir Tedarik Zinciri
TÜDAM	: Türkiye Değerlendirilebilir Atık Malzemeler Sanayiciler Derneği
TZ	: Tedarik Zinciri
UNEP	: “United Nations Environment Programme”, Birleşmiş Milletler Çevre Programı
USGS	: “United States Geological Survey”, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu
WCED	: “World Commission on Environment and Development”, Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu
WTE	: “Waste to Energy”, Atıktan Enerji

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 : Döngüsel Ekonomide İş Modeli Örnekleri.....	10
Tablo 2 : Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Kavramsal Tanımları.....	88
Tablo 3 : Tedarik Zincirini Sürdürülebilir Yapan Kriterler	91
Tablo 4 : STZ’nde Etkili Olan Ekonomik Sürdürülebilirlik Performans Boyutları.....	94
Tablo 5 : STZ’nde Etkili Olan Çevresel Sürdürülebilirlik Performans Boyutları	97
Tablo 6 : STZ’nde Etkili Olan Sosyal Sürdürülebilirlik Performans Boyutları.....	99
Tablo 7 : Sürdürülebilir Tedarik Zincirinde Sistem Dinamiği Yaklaşımının Kullanıldığı Çalışmalar	124
Tablo 8 : Atık Yönetiminde Sistem Dinamiği Yaklaşımının Kullanıldığı Çalışmalar	125
Tablo 9 : BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği.....	129
Tablo 10 : Sektörden Toplanan Verilerin Kaynakları.....	132
Tablo 11 : Plastik Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri	154
Tablo 12 : Plastik Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri	155
Tablo 13 : Plastik Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri.....	155
Tablo 14 : En İyi Kriteria Göre Değerlendirme (Plastik Ürün Grubu)	157
Tablo 15 : En Kötü Kriteria Göre Değerlendirme (Plastik Ürün Grubu).....	157
Tablo 16 : Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Plastik Ürün Grubu).....	158
Tablo 17 : Plastik Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları	160
Tablo 18 : Plastik Atıklar için Senaryo 1a’nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	161
Tablo 19 : Plastik Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları	163
Tablo 20 : Plastik Atıklar için Senaryo 1b’nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	163
Tablo 21 : Plastik Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları	164
Tablo 22 : Plastik Atıklar için Senaryo 2’nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	164
Tablo 23 : Cam Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri	166
Tablo 24 : Cam Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri.....	167
Tablo 25 : Cam Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri.....	167
Tablo 26 : En İyi Kriteria Göre Değerlendirme (Cam Ürün Grubu).....	168
Tablo 27 : En Kötü Kriteria Göre Değerlendirme (Cam Ürün Grubu).....	169
Tablo 28 : Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Cam Ürün Grubu)	169
Tablo 29 : Cam Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları.....	171

Tablo 30 : Cam Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri.....	172
Tablo 31 : Cam Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları	174
Tablo 32 : Cam Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	174
Tablo 33 : Cam Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları	175
Tablo 34 : Cam Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri.....	175
Tablo 35 : Çelik Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri	178
Tablo 36 : Çelik Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri.....	178
Tablo 37 : Çelik Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri.....	179
Tablo 38 : En İyi Kriteria Göre Değerlendirme (Çelik Ürün Grubu)	180
Tablo 39 : En Kötü Kriteria Göre Değerlendirme (Çelik Ürün Grubu).....	180
Tablo 40 : Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Çelik Ürün Grubu).....	181
Tablo 41 : Çelik Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları	183
Tablo 42 : Çelik Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	183
Tablo 43 : Çelik Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları	185
Tablo 44 : Çelik Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	186
Tablo 45 : Çelik Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları	187
Tablo 46 : Çelik Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri.....	187
Tablo 47 : Alüminyum Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri	189
Tablo 48 : Alüminyum Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri.....	190
Tablo 49 : Alüminyum Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri	190
Tablo 50 : En İyi Kriteria Göre Değerlendirme (Alüminyum Ürün Grubu).....	191
Tablo 51 : En Kötü Kriteria Göre Değerlendirme (Alüminyum Ürün Grubu)	192
Tablo 52 : Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Alüminyum Ürün Grubu)	192
Tablo 53 : Alüminyum Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları.....	194
Tablo 54 : Alüminyum Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	195
Tablo 55 : Alüminyum Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları	197
Tablo 56 : Alüminyum Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	197
Tablo 57 : Alüminyum Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları	198

Tablo 58 : Alüminyum Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri	199
Tablo 59 : Senaryo 1b'nin Uygulanmasına İlişkin Genel Sonuç Tablosu	200
Tablo 60 : Senaryo 2'nin Uygulanmasına İlişkin Genel Sonuç Tablosu	203
Tablo 61 : Senaryo 1b ve Senaryo 2 Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	207



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 : Kaynak Kullanım Hiyerarşisi.....	28
Şekil 2 : Çalışma Adımları	113
Şekil 3 : Sistem Dinamiği Yöntem Adımları.....	117
Şekil 4 : BWM’de Kriter Karşılaştırma Yapısı	128
Şekil 5 : Veri Toplama Süreci	131
Şekil 6 : Çevresel Sürdürülebilirlik Su Tüketimi Alt Modeli.....	136
Şekil 7 : Çevresel Sürdürülebilirlik Enerji Tüketimi Alt Modeli	137
Şekil 8 : Çevresel Sürdürülebilirlik Gaz Salınımı (CO2) Alt Modeli	138
Şekil 9 : Ekonomik Sürdürülebilirlik Toplam Maliyet Alt Modeli	139
Şekil 10 : Ekonomik Sürdürülebilirlik Karlılık Alt Modeli	140
Şekil 11 : Sürdürülebilirlik Gelişimi Değişkenine Yönelik Temel İlişkiler.....	141
Şekil 12 : Nihai Modelin Nedensel Döngü Diyagramı.....	142
Şekil 13 : Genel Model Haritası (Senaryo 1).....	144
Şekil 14 : Genel Model Haritası (Senaryo 2).....	145
Şekil 15 : BWM Doğrusal Çözümüne Ait Excel Görüntüsü.....	158

Tezin Başlığı: Endüstriyel Katı Atık Geri Dönüşümünün Çevresel ve Ekonomik Performansa Etkisini Belirlemeye Yönelik Bir Sistem Dinamiği Modeli Önerisi	
Tezin Yazarı: Damla ÇEVİK AKA	Danışman: Doç.Dr. Samet GÜNER
Kabul Tarihi: 02.09.2022	Sayfa Sayısı: x (ön kısım) + 244 (tez) + 42(ek)
Anabilim Dalı: İşletme	Bilim Dalı: Üretim Yönetimi ve Pazarlama
Sürdürülebilir olma baskısı ve sürdürülebilir kalkınmaya yönelik farkındalığın artması işletmeleri karlılığa ve maliyete daha çok odaklanan geleneksel tedarik zincirlerini yeniden tasarlamaya sevk etmiştir. İşletmelerin sürdürülebilir tedarik zinciri yaratma hedefiyle birlikte atıklarını kaynak olarak değerlendirme ihtiyacı da daha önemli bir hale gelmiştir. Üretimde oluşan katı atıkların üretici sorumluluğuyla geri dönüştürülmesine ve sonucunda işletmelerin tedarik zinciri performansını izlemelerine yönelik kapsamlı bir teorinin literatürde sunulmadığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında, işletmelerin üretim tesislerinde oluşan endüstriyel katı atıklarını geri dönüşümle üretim kaynağı olarak geri kazanmasının sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkilerini ortaya koyan modelin önerilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca plastik, cam, çelik ve alüminyum atık geri dönüşümünün sürdürülebilir tedarik zinciri performansına olan etkilerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması da çalışmanın bir diğer amacını oluşturmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında; birçok ülkede sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda uygulanan geri dönüşüm teşvik sistemlerini temel alarak, ülkemizde benzerlerinin uygulanması ile ulaşılabilecek sonuçların incelenmesi amaçlanmıştır. Son olarak, bu senaryoda geri dönüşüm teşvik sisteminin etkileri plastik, cam, çelik ve alüminyum malzemeli atıklarda ayrı ayrı değerlendirilerek, en çok katkının sağlandığı ürün gruplarına da karar verilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada geri dönüşüm sisteminin doğasındaki karmaşıklığı modelleme, değişkenler arasındaki ilişkileri analiz etme ve farklı senaryoları değerlendirme ihtiyacı sebebiyle sistem dinamiği yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmadaki verilere hem sektördeki uygulamacılardan hem de literatürden ulaşılmıştır. Birincil veriler altı farklı şehirden toplamda 16 geri dönüşüm firmasının uzmanlarıyla görüşülerek sağlanmıştır. Ayrıca modelde ihtiyaç duyulan sürdürülebilirlik kriterlerinin ağırlıkları için Best Worst Metodu kullanılarak çoklu metodoloji yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu aşamada da her ürün grubundan ayrı ayrı 10 uzmanla, toplamda 40 karar vericiyle uygulama yapılmıştır. Çalışma bulguları iki sene için değerlendirildiğinde, plastik atıkların geri dönüştürülmesinin sürdürülebilirlik performansına katkısı %39'a, cam atıkların %31'e, çelik atıkların %44'e ve alüminyum atıkların %47'ye ulaşmıştır. Geri dönüşümün su tüketimi açısından en büyük katkı oranı cam en az plastik ürün grubu üzerinde; enerji tüketimi ve sera gazı açısından en büyük katkı oranı alüminyum en az cam ürün grubu üzerinde gerçekleşmiştir. Ekonomik sürdürülebilirlik açısından ise hem toplam maliyet hem de fırsat maliyetinin yer aldığı karlılık açısından en büyük katkı oranını çelik geri dönüşümü vermiştir. Atık teşvik sistemlerinin uygulanma durumunda ise sonuçlar farklı amaçlar doğrultusunda değişmekte ve bu sebeple çok aşamalı değerlendirilmektedir. Ancak politika yapımcıların, teşvik sisteminin hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik performansına birçok açıdan sağlayacağı faydanın daha yüksek olması sebebiyle alüminyum geri dönüşümüne öncelik vermeleri daha iyi bir seçenek olarak görülmektedir.	
Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Tedarik Zinciri, Çevresel Sürdürülebilirlik Performansı, Ekonomik Sürdürülebilirlik Performansı, Geri Dönüşüm, Sistem Dinamiği	

Title of the Thesis: A System Dynamics Model Proposal to Determine the Impact of Industrial Solid Waste Recycling on Environmental and Economic Performance

Author: Damla CEVIK AKA

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Samet GUNER

Accepted Date: 02.09.2022

Np: x (pre text) + 244 (main body) + 42(app)

Department: Business Administration

Subfield: Production Management and Marketing

The pressure to be sustainable and the increasing awareness of sustainable development have led enterprises to redesign traditional supply chains that focus more on profitability and cost. With the goal of creating a sustainable supply chain of enterprises, the need to evaluate their waste as a resource has become more important. It has been observed in the literature that there is no comprehensive theory for recycling of solid wastes with manufacturer responsibility and as a result of pursuing the impact on the supply chain performance. In this thesis, it is aimed to propose a model that reveals the effects of industrial waste recycling on the sustainable supply chain performance. It is also aimed to determine and compare the effects of plastic, glass, steel and aluminum recycling on sustainable supply chain performance.

In the second part of the study; it is aimed to examine the results to be achieved by the implementation of similar ones in our country based on the recycling incentive systems implemented in many countries for sustainable development goals. In this scenario, it is also aimed to evaluate the effects of the recycling incentive system separately on plastic, glass, steel and aluminum material wastes, and to decide on the product groups that contribute the most.

The system dynamics approach was used in the thesis due to the need to model the complexity inherent in the recycling system, analyze the relationships between variables, and evaluate different scenarios. The data in the study were obtained from both the experts in the sector and the literature. Primary data was obtained by interviewing experts from 16 recycling companies from six different cities. In addition, for the weights of the sustainability criteria needed in the model, a multi-method approach was preferred by using the Best Worst Method. At this stage, the application was carried out with 10 experts from each product group and a total of 40 decision makers.

When the study findings are evaluated for two years, the contribution of plastic recycling on sustainability performance has reached 39%, glass recycling 31%, steel recycling 44% and aluminum recycling 47%. In terms of water consumption, the biggest contribution rate of recycling is in the glass product group, while its least contribution rate is in the plastic product group. In terms of energy consumption and greenhouse gas emission, the largest contribution rate of recycling is in the aluminum product group, while its least contribution rate is in the glass product group. In terms of economic sustainability, steel recycling gave the highest contribution rate on both the profitability, which includes the opportunity cost, and the total cost. In the case of the implementation of waste incentive systems, the results vary for different purposes and therefore the scenario outputs are evaluated in multiple stages. However, it is seen as a better option for policy makers to prioritize aluminum recycling due to the higher benefits it will provide to both environmental and economic sustainability performance in many ways.

Keywords: Sustainable Supply Chain, Environmental Sustainability Performance, Economic Sustainability Performance, Recycling, System Dynamics

GİRİŞ

Günümüzde işletmelerin her geçen gün sürdürülebilirliğin gerekliliğini fark etmeleri, sürdürülebilir kalkınmaya dair birçok strateji geliştirmelerine ve bu yönde hareket etmelerine katkı sağlamıştır. Bu adımlardan biri de işletmelerin atıklardan maksimum verimi alacak şekilde kaynaklarını doğru yönetmelerini sağlayacak “sürdürülebilir üretim ve tüketimi” benimsemesi olmuştur. Ancak geri dönüşüm faaliyetlerinin oldukça karmaşık olması, sürecin birçok belirsizliği barındırması, alandaki veri eksikliği ve sürecin büyük yatırımlar gerektirmesi sebebiyle işletmelerin kaynaklarını “sürdürülebilir” şekilde planlamaları zorlaşmaktadır. Bu durum da üretim kaynaklarının fazla tüketilmesine neden olarak hem çevresel hem de ekonomik açıdan birçok riski ve zorluğu getirmektedir. Böylelikle, geri dönüşümün mikro ve makro açıdan potansiyel faydaları kritik derecede göz ardı edilmektedir.

Diğer taraftan son yıllarda nüfusların aşırı büyümesi ve ekonomilerin genişlemesi sonucunda ekosistemler ve doğal kaynaklar büyük tehlikelerle karşı karşıya kalmıştır. Bu durum tüm dünyanın büyük bir farkındalık sürecine girmesine neden olarak sürdürülebilirlik uygulamaları hükümetlerin de gündemine giren öncelikli konularından biri haline gelmiştir. Neredeyse tüm dünyada özellikle 2015 yılından itibaren sürdürülebilir kalkınmaya yönelik önemli adımlar birlikte atılmıştır. Paris İklim Değişikliği Konferansı, BM Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi ve Avrupa Yeşil Mutabakat bunların en başında gelmektedir. Politika yapıcıların, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamaya yönelik hazırlanan bu hareketlerde yer almaları kendi eylem planlarını hazırlamaları açısından önemli olmuştur.

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkenin hedeflerinde her geçen gün daha çok yer almaya başlayan sürdürülebilirlik uygulamaları, çeşitli kamu kuruluşlarının toplumları ve sanayileri sürdürülebilir olmaya daha çok teşvik etmesine neden olmuştur. Böylelikle sürdürülebilirlik çalışmaları kamu politikalarında ve teşvik programlarında yer almaya başlamıştır. Programların öncelikli alanlarından biri sürdürülebilir atık yönetimi olurken ilgili çalışmalarda kaynaklardan en fazla yararlanmayı sağlayacak ve çevrede en az risk oluşturacak şekilde planlamalar yapılmaktadır. Bu bağlamda politika yapıcıların sanayi kuruluşlarını geri dönüşüme teşvik etme çabaları artmaya başlamış ve sürdürülebilir üretim ve tüketim anlayışı için bütüncül bir sistem gerekliliği ortaya koyulmuştur.

Hükümetler işletmeleri sürdürülebilir üretim ve tüketime teşvik edecek çevre bilinciyle hareket etmeleri için atıklarını geri dönüşümle malzeme olarak kazanmalarını sağlayacak teknik ve mali imkanlar sunmaya başlamıştır. Bu fırsatlar ile birlikte atık sahibi işletmelerin tedarik zinciri performanslarına olan katkılarının belirlenebilmesi hem hükümetin hem de işletmelerin stratejilerini ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini oluşturabilmeleri açısından önem kazanmıştır.

Tezin Amacı: Çalışmada ilk olarak firmaların üretim tesislerinde oluşan endüstriyel katı atıklarını geri dönüşümle üretim kaynağı olarak geri kazanmasının sürdürülebilir tedarik zinciri performansına olan potansiyel etkisini ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik boyutları üzerinden ortaya koyabilecekleri bir model önerilmesi amaçlanmıştır. İkinci amaç olarak işletmeleri geri dönüşüme teşvik edecek şekilde ihtiyaç duydukları bilgilerin, gerçek performans sonuçlarıyla ortaya koyulması beklenmektedir. Tasarlanan modelin kullanımıyla atık geri dönüşümünün, işletmelerin ekonomik ve çevresel performanslarında sağlayacağı katkıyı aynı ürüne birincil üretimle sahip olma etkileri açısından incelenmesi ve konunun plastik, cam, çelik ve alüminyum olmak üzere 4 farklı vaka üzerinden değerlendirilmesi çalışmanın önemli hedefleridir. Bu doğrultuda çalışmada aşağıdaki sorulara cevap verilmek istenmiştir:

1. Endüstriyel katı atık geri dönüşümünün işletmenin çevresel sürdürülebilirlik performansına etkisi nedir?
2. Endüstriyel katı atık geri dönüşümünün işletmenin ekonomik sürdürülebilirlik performansına etkisi nedir?
3. Endüstriyel katı atık geri dönüşümünün işletmenin sürdürülebilirlik performansına etkisi nedir?
4. Endüstriyel katı atık geri dönüşümünün ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performansı üzerindeki etkisi ürün gruplarına (plastik, cam, çelik ve alüminyum) göre ne ölçüde farklılık/benzerlik gösterecektir?

Ayrıca ikinci senaryo olarak çalışmada, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda planlanan ve dünyada bazı örnekleri olan geri dönüşüm teşvik sistemi benzerlerinin ülkemizde uygulanması ile politika yapıcılara fikir verecek şekilde sonuçların sunulması amaçlanmaktadır. Temelde geri dönüşüm teşvik sisteminin malzeme grupları üzerindeki etkilerinin görülmesi ve teşvik sisteminin hangi atık grubunda daha çok işe yaradığının

belirlenmesi amaçlanmıştır. Buradan hareketle çalışmada aşağıdaki sorulara cevap verilmek istenmiştir:

5. Birçok ülkedeki atık teşvik sistemlerini referans alarak ülkemizde benzer sistemlerin yapılandırılması sonucunda geri dönüşümün malzeme gruplarındaki potansiyel etkisi nasıl olacaktır?

6. Bu teşvik sistemi içinde yer alan endüstriyel katı atık geri dönüşümünde öncelik verilmesi muhtemel ürün grupları nasıl seçilmelidir?

Tezin Önemi: Son yıllarda işletmelerin sürdürülebilirlik gelişimine olan ilgileri ve müşterilerden, paydaşlardan ve karar vericilerden (hükümetin ilgili birimleri gibi) gelen farklı baskıları sebebiyle çeşitli sürdürülebilirlik uygulamaları önem kazanmıştır. Bu noktada işletmelerin odağı çoğu zaman mevcut tedarik zincirleri boyunca karşılaştıkları problemleri sürdürülebilirlik kapsamında değerlendirmek ve çözmek olmuştur. İşletmelerin çeşitli sebeplerden atık olarak ayırdıkları ürünleri tekrar kullanamaması ile yeni ürünler satın alarak süreçlerine devam etmeleri sonucunda, sürdürülebilir atık yönetimine daha fazla ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bu durum da geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri üzerine potansiyel etkilerinin hem mikro hem makro düzeyde tartışılmasına sebep olmuştur. Sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etki eden birçok farklı alt performans boyutunun varlığı ve farklılaşan endüstriyel katı atık çeşitlerine bağlı olarak artan karmaşıklık sebebiyle bu alanda genel bir ölçüm modelinin önemi artmıştır.

Bu çalışmanın, endüstriyel katı atıkların geri dönüşümle tekrar kazanılmasının ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik boyutları üzerinden etkilerini ortaya koyan model önerisiyle ilk çalışmalardan biri olması açısından önemli olacağı düşünülmektedir. Ayrıca çalışma sonuçlarının plastik, cam, çelik ve alüminyum atıklara sahip işletmelerin karar birimleri tarafından performanslarına yönelik daha gerçekçi tahminlerde bulunmak için kullanmalarına, hedeflerini belirleyebilmelerine ve uygulanabilir kararlar vermelerine fırsat vereceği düşünülmektedir.

Artan sürdürülebilirlik baskılarıyla birlikte son yıllarda hükümetler, işletmelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine destek verecek şekilde geri dönüşüm oranlarını arttıracakları, geri dönüşüm alt yapısını güçlendirecekleri, ikincil malzeme kullanımını genişletecekleri ve ikincil malzeme pazarlarını güçlendirecekleri politikalar yapmaya

başlamıştır. Ülkemizdeki geri dönüşüm oranlarının az olması, dış pazarlara olan bağımlılığın artması, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve çevresel risklerin artması gibi sebepler ile birlikte kaynakların verimli kullanımına dair çalışmalar dikkat çekici şekilde artmaya başlamıştır. Ancak halen geri dönüşüm oranları tüm dünyanın verilerine bakıldığında yeterli seviyede görülmemektedir. Bu nedenle, geri dönüşüm teşvik programlarının uygulanmasının atık sahibi işletmeler üzerindeki etkilerinin öngörülmesi önem kazanmaktadır. Buradan hareketle politika yapıcılar için geri dönüşüm teşvik sistemlerinin endüstriyel katı atık sahibi işletmelerin sürdürülebilirlik performans gelişimine etkisini ortaya koyarak, öncelikli ürün gruplarına karar vermelerini kolaylaştıran ve hedeflerin gerçekçi oluşturulması için referans alacakları veriler sunan ilk çalışmalardan olması sebebiyle önemli olduğu düşünülmektedir.

Tezin Literatüre ve Uygulamaya Katkısı: Çalışmanın literatüre beş temel katkısının olması beklenmektedir. İlk olarak literatürde geri dönüşümün tedarik zinciri üzerine etkisinin incelendiği çalışmalar olmasına rağmen, uygulamalarda özellikle belediye atık yönetimine odaklanılmış ve sanayiler üzerine mikro ölçüde incelenen çalışmalar çok kısıtlı bir alanda kalmıştır. Çalışmanın konusu itibarıyla üretim tesisinde meydana gelen atıkların üretici sorumluluğuyla geri dönüştürülmesine yönelik kapsamlı bir çalışmaya literatürde neredeyse yer verilmemiştir.

İkinci olarak geri dönüşümün tedarik zinciri performansına olan etkilerinin incelendiği çalışmalarda özellikle belirli tip ürünlere odaklanması sebebiyle hem girdiler hem çıktılar için benzer göstergeler (değişkenler) kullanılmıştır. Bu çalışma ile önerilen modelde, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarını göstermek üzere hem geri dönüşümün hem de birincil üretimle üretilmiş ürünün satın alınmasının etkilerini eş zamanlı değerlendiren değişkenler kullanılmasının mevcut literatür için faydalı olması beklenmektedir.

Üçüncü olarak, geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkilerinin cam, plastik, çelik ve alüminyum olmak üzere dört farklı ürün grubu için ayrı değerlendirilmesinin ve sonucunda farklı ürün grupları üzerindeki potansiyel farklılıkların ve benzerliklerin ortaya koyulmasının alandaki ilk çalışmalardan olması sebebiyle literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Dördüncü olarak, sürdürülebilir kalkınma bağlamında daha çok yer alan geri dönüşüm

teşvik sistemlerinin oldukça yeni olması ve ülkemizde son dönemlere kadar gündeme alınmayan konulardan olması sebebiyle literatürde uygulama örnekleri ile karşılaşılmamıştır. Bu sebeple çalışmada farklı bir senaryo olarak değerlendirilen geri dönüşüm teşvik sisteminin ilgili alan için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın literatür açısından son katkısı ise geri dönüşüm faaliyetlerinin işletmenin sürdürülebilirlik üzerindeki dinamiğini değerlendirecek model çözümünde sistem dinamiği yaklaşımı ile çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan BWM (Best Worst Method)’nin bir arada kullanılmasıdır. Bu çalışmada sistem dinamiği yaklaşımı ile BWM’nin birlikte uygulanmasının mevcut literatürde farklı bir disiplinde sadece birkaç kez yer alması sebebiyle, çalışmanın yöntemsel açıdan katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Tezin uygulamacılara sunduğu katkıların da son derece önemli olduğu düşünülmektedir. Çalışmada birkaç senaryonun incelenmesi bu bağlamda farklı katkıların oluşmasında etkili olmuştur. İlk olarak çalışma sonuçlarının mikro boyutta işletmelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerini atık yönetimi açısından belirleyebilmelerine, sürdürülebilirlik planlarını/programlarını hazırlayabilmelerine ve uluslararası faaliyetlerde, ihalelerde, anlaşmalarda gereklilik haline gelen sürdürülebilirlik raporlamalarına rehberlik edebilmesi beklenmektedir. Ayrıca kurulan temel modelin dinamik yapısı, model değişkenlerine ilişkin yeni veri girişine kolaylıkla fırsat verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu durum da işletmelerin farklı hedefleri doğrultusunda mevcut sistem verilerini gerçek karar süreçlerine destek olabilecek şekilde kullanmaları açısından fırsat sağlayabilir.

Diğer taraftan çalışmada sürdürülebilir kalkınmanın dokuzuncu alanı “Sanayi, Yenilikçilik ve Alt Yapı” ile on ikinci alanı “Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim” gereğince planlanan geri dönüşüm teşvik sistemlerinin uygulamacılar açısından katkısı makro boyutta değerlendirilmelidir. Teşvik sisteminin işletmelerin sürdürülebilirlik performansına etkisini ortaya koyan sonuçları, hükümetin karar birimlerinin öncelikli ürün gruplarını belirlemelerine, hedeflerini gerçekçi oluşturmalarına ve programda hedeflenen atık miktarına göre performans tahminlemelerine imkan sağlaması beklenmektedir.

Tezin Organizasyonu: Çalışmada dört bölüm yer almaktadır. İlk bölüm “Döngüsel Ekonomi & Atık Yönetimi” başlığıyla olup alt başlıklarında tez konusuna yönelik bilgiler

sunan döngüsel ekonomi, atık yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma hakkında kavramsal bir çerçeve yer almaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde “Geri Dönüşüm Faaliyetlerinin Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansına Etkisi” başlığıyla ilk olarak sürdürülebilir tedarik zinciri yöntemine ve performans boyutlarına yönelik hazırlanan çalışmalar incelenmiştir. Ardından geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri performansına dair teorik arka planı kapsamlı bir literatür incelemesiyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise “Araştırma Metodolojisi” başlığıyla araştırma tasarımına, araştırma yöntemlerine ve veri toplama sürecine yer verilmiştir. Uygulamada kullanılacak BWM ve sistem dinamiği yaklaşımı aşamaları bu bölümde detaylandırılmıştır ve araştırma için ihtiyaç duyulan verilerin elde edilme sürecine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Çalışmanın dördüncü bölümünde “Uygulama” yer almakta olup, çalışmada önerilen model tasarımına (nedensel döngü diyagramı ve model haritası) ve dört farklı ürün grubu için ayrı ayrı ulaşılan bulgulara yer verilmektedir. Araştırmanın son bölümü ise “Sonuç ve Öneriler” den oluşmaktadır.

Tezin Kısıtları: Araştırma süreci içerisinde birçok zorlukla karşılaşmıştır. Geri dönüşüm tesislerinin birçoğunun ‘profesyonellik anlayışıyla’ yönetilemiyor olması hem model kurulumunda hem de veri toplama noktasında araştırma sürecini karmaşıklaştıran ve kısıtlayan durumlar yaratmıştır. Araştırma sürecinde özellikle çevresel değişkenlere yönelik talep edilen verilere sektördeki kişilerin tam hakim olmayışları, geri dönüşüm sektöründeki uzman bilir kişilere duyulan ihtiyacı arttırmıştır. Beklenen profesyonelliğe sahip çalışanların yetersizliği, araştırmanın veri toplama sürecini zorlaştırmıştır. Bu sebeple çevresel değişkenlere yönelik verilerde sektörle beraber mevcut literatürdeki kaynaklardan yararlanılarak, uygulamada hem birincil veriler hem de ikincil veriler birlikte kullanılmıştır.

Diğer taraftan çalışmada gerçek bir geri dönüşüm sistemini teslim edecek şekilde önerilen sistem dinamiği modelinin tam olarak geçerliliği ve güvenilirliği test edilememiştir. Değişkenlerin sırasının, kurulan denklemlerin ve değişkenler arasındaki ilişkilerin doğru olup olmadığı yapısal olarak uzmanlar tarafından kalitatif olarak test edilmiş ve geçerli bulunmuştur. Ancak model için nicel test gerçekleştirilememiştir. Çünkü modelin dört farklı vaka üzerinden ulaşılan simülasyon çıktıları, gerçekte herhangi bir referans veri seti olmadığı için karşılaştırılmamıştır.

BÖLÜM 1: DÖNGÜSEL EKONOMİ & ATIK YÖNETİMİ

1.1. Döngüsel Ekonomi (DE)

Üretim girdilerindeki kısıtlamaların durumu, kaynakların verimli kullanılma ihtiyacı ve tabiatın korunma gerekliliği ülkeleri yeni ekonomik modeller kurmaya itmektedir. Artan farkındalık ile beraber firmaların sürdürülebilir uygulamalara geçmesinin sonucunda değer sunan yöntemler ve modeller ile birlikte yeni iş modelleri ve sistemleri tasarlanmaktadır. Kaynakların yaşam sonunda değerlerinin azaldığı veya kaybolduğu doğrusal sistemlerin yerine endüstrilerde döngüsel süreçler geliştirilmekte ve yeni süreçler kaynaklardan maksimum verimin alınmasını sağlayacak şekilde düzenlenmektedir. Çevre faktörlerinin işlevlerini ve ekonomik sistemle etkileşimlerini kabul eden döngüsel ekonomi, klasik ekonomik modele alternatif olarak modellenmiştir (Ghisellini vd., 2018). Döngüsel ekonomi kavramı ilk kez Pearce ve Turner'ın (1990) çevre ve ekonomik faaliyetler arasındaki bağlantıları ele alan bir çalışmada ortaya çıkmıştır ve çalışmada “her şey diğer her şeyin girdisidir” ilkesine göre ekonomik sistemin içinde yer aldığı kapalı döngü malzeme akışı tanımlanmıştır (Su vd., 2013). Ekonomik büyümenin doğal kaynakların aşırı kullanılmasına ve çevresel bozulmalara yol açması sonucunda döngüsel ekonomi kavramı biyosfer üreme kapasitesini azaltma düşüncesiyle kavramsallaştırılmıştır (Lieder & Rashid, 2016). Bu düşünceler ile birlikte DE'nin geleneksel doğrusal üretim ve tüketim şeklini yeniden tasarlanma gerekliliği sonucunda sunulduğu ifade edilebilir (Geng & Doberstein, 2008).

DE alanındaki ilk nitelikli çalışmalardan birini yapan Lowe (1993), döngüsel ekonominin yeşil ve sürdürülebilir tedarik zincirine paralel şekilde ortaya çıktığını vurgulamıştır. Endüstriyel ekolojiye uygun olarak geliştirilen döngüsel ekonomi ile sürdürülebilir tedarik zinciri arasındaki ilişkinin ve birbirleri üzerindeki etkinin belirlenmesi önemlidir. Endüstriyel ekoloji ile birlikte özellikle sürdürülebilirliğin çevresel boyutuyla incelenen DE, uygulama alanının genişlemesiyle beraber bu alandan ayrılarak kendi bağımsız çerçevesini oluşturmuştur. Döngüsel ekonomiyi enerji ve malzeme tüketimini azaltmaya yönelik diğer girişimlerden ayıran temel özellik, tüm toplumsal faaliyetleri kapsayan dairesel malzeme, enerji ve atık akış döngülerinin yaratılmasıyla bütünsel bir yaklaşım sunmasıdır (Masi vd., 2018). Döngüsel ekonominin temel amacı ekonomik refah ve çevresel kalkınma olarak görülürken, “sosyal eşitlik” kavramına çok fazla yer

verilmemektedir. Sürdürülebilir tedarik zincirinde ise sosyal özellikler (hak eşitliği, ücret politikalarındaki adalet vs.) diğer çevre ve ekonomik boyutlarla değerlendirilmesi açısından önemlidir.

DE, çevresel ve ekonomik kalkınma hedefleri arasında sinerji yaratma isteğiyle mevcut rekabet zorlukları için potansiyel bir çözüm olarak görülmektedir (Ellen MacArthur Vakfı, 2013). Geleneksel modellerdeki “al-yap-tüket-at” anlayışına; bakım, onarım, yeniden kullanım, yenileme, yeniden üretim gibi süreçlerinin dahil edilmesiyle döngüsel ekonomide kapalı döngü malzeme akışları oluşmaktadır. Döngüsel ekonomi ürünlerin yaşam sonu kavramının yerine kapalı döngü kavramını getirerek, yenileyici bir endüstriyel sistemi ifade etmektedir. Kapalı döngü tedarik zincirleri, “farklı türlerden dinamik değer kazanımı ile bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca değer yaratmayı en üst düzeye çıkarmak için kurulan sistemin tasarımı, kontrolü ve işletilmesi” dir (Van Wassenhove & Guide, 2009).

Kapalı döngü tedarik zincirlerinde tüm üretim tedarik zinciri geniş açıdan gözden geçirilmekte, kaynakların yeniden kullanımı ve yeniden kazanımına dayanan yüksek çevre dostu ve sürdürülebilir bir üretim sistemi amaçlanmaktadır (Angelis-Dimakis vd., 2016). Kapalı döngüleri mümkün kılmak için tedarik zincirlerinin bütününde, çevre dostu girdilerin sağlanarak tüm paydaşlarla iyi koordinasyonun sağlanması amaçlanmakta ve “kurumsal sınırların ötesinde” ortak çabanın gerekliliği söz konusu olmaktadır (Zhu vd., 2010). Döngüsel ekonomi tarafından önerilen ekonomik ve çevresel faydalar için ortak işbirliği ile iş geliştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü sürecin doğrusal olmaması veya döngüselliliği gerektirmesi sebebiyle operasyonların beraber yürütülmesi ve tedarik zincirlerinin yeniden tasarlanması gerekli görülmektedir. Tedarik zincirlerindeki şeffaflık ve ortak değer yaratma amacıyla sağlanan işbirliğinin operasyon başarısı üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Bu sebeple döngüsel ekonomi için ortak işbirliği ve paydaşlar arası iletişimin etkin yürütülmesi gerekmektedir.

Döngüsel ekonomi birçok farklı endüstride kendine yer bulan bir konu haline gelmiştir. Dünyadaki kaynakların sınırlı olduğu gerçeğiyle ve mevcut üretim ve tüketim alanına farklı bir bakış açısı getirme amacıyla sektörlerdeki kullanım alanı her geçen gün büyümektedir. İnşaat (Ghisellini vd., 2018), giyim (Morlet, 2017), plastik (Leslie vd., 2016), elektronik (Garlapati, 2016) ve imalat (Jawahir & Bradley, 2016) sektörleri

özellikle döngüsel ekonominin çalıştığı en önemli sektörler haline gelmiştir (Patwa vd., 2021). DE'nin farklı disiplinlerde ve düşünce okullarında yer alan nispeten yeni bir araştırma alanı olması (Bocken vd., 2016) sebebiyle kavramın tam olarak ne anlama geldiğine dair az fikir birliğine ve birçok farklı tanıma ulaşılmaktadır. Farklı kurumlar ve araştırmacılar tarafından yapılan tanımların yıllar içinde değişmeye ve genişlemeye başladığı görülmektedir. Kirchherr vd., (2017) DE'yi, üretim/dağıtım ve tüketim süreçlerinde malzemelerin azaltılması, alternatif olarak yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi veya kazanılması ile “ömrünün sonu” kavramının yerini alan ekonomik sistem olarak tanımlamıştır. Ashby (2018) tarafından DE, geri dönüşüm ve enerji geri kazanımına odaklanarak hem ekonomik hem de çevresel performansı artırabilecek kapalı yeniden kullanım ve restorasyon döngüsü ile değer elde etmek olarak ifade edilmiştir. Ghisellini vd., (2018) tarafından ise kavram atık oluşum miktarlarını önemli ölçüde azaltma amacıyla malzemelerin, malların ve bileşenlerin tekrar kullanılacak şekilde geri dönüştürülmesini sağlamak olarak tanımlanmıştır.

Kirchherr vd., (2017), döngüsel ekonomiye dair yapılan 114 farklı tanımları analiz ederek 17 boyutta kavramı toplamıştır. Bu boyutlar çalışmada; atık, 4R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover*) (azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım), sürdürülebilir gelişim, çevresel kalite, ekonomik özellikler, sosyal eşitlik, gelecek dönemler, sistem perspektifi, mikro sistemler, mezo sistemler, makro sistemler, iş modelleri ve tüketicilerdir. Çalışma sonucunda döngüsel ekonominin en çok azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm faaliyetlerinin kombinasyonu olarak açıklandığı görülmektedir. Analiz sonucunda ayrıca döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki bağlantılara da sıkça yer verildiği ifade edilmiştir. DE yalnızca doğrusal ekonominin etkilerini azaltmayı değil, uzun vadede sürdürülebilir kalmayı, çevresel faydalar sağlarken aynı zamanda ekonomik açıdan avantajlı durumda olmayı amaçlayan sistemik bir dönüşümdür.

Döngüsel ekonomide önemli bir konu iş modellerinin net tanımlarının ve değer önerilerinin geliştirilmesine dairdir. Kaynak verimliliğine sistematik olarak yaklaşan döngüsel ekonomi araştırmalarında benimsenecek iş modelleri kritiktir. DE iş modellerinin değer yaratma, teslim etme ve değeri yakalama mekanizmalarına sahip olma gerekliliği sebebiyle yeniden düşünülmesi önemlidir (Teece, 2010). DE'yi kavramsallaştıran farklı çerçeveler arasında odak büyük ölçüde 3Rs (Azalt, Yeniden

Kullan, Geri Dönüştür) modeli üzerinedir (Koksharov vd., 2019). Model zamanla değişerek 6Rs modeline (Yeniden Tasarla, Azalt, Yeniden Kullan, Yeniden Üret, Geri Dönüştür, Geri Yükle) ve daha sonra dört faktör daha eklenerek 10Rs modeline (Reddet, Yeniden Tasarla, Azalt, Yeniden Kullan, Onar, Yenile, Yeniden Üret, Yeniden Amaçla, Geri Dönüştür, Kurtar) dönüşmüştür (Okorie vd., 2018). Bocken vd., (2016) iş modeli olarak erişim performansı, ürün değerini artırma, klasik uzun ömür, yeterliliği destekleme, kaynak değerini genişletme ve endüstriyel ortak yaşam modellerini geliştirmiştir (Tablo 1). Araştırmacılar geliştirdiği iş modelleri, onarım ve yeniden üretim gibi tasarım ve hizmetler yoluyla ürün ömrünün uzatılmasını ve kaynak akışlarının yavaşlatılmasını önermektedir. Ayrıca araştırmacılar ömrünü tamamlamış ürün ve malzemelerin atık haline gelmesini önleyerek kaynak akışlarını daraltmayı veya atıkları hammadde olarak yeniden yönlendirerek kaynak akışlarını kapatmayı amaçlamışlardır.

Tablo 1: Döngüsel Ekonomide İş Modeli Örnekleri

Döngüleri Kapatmak için;	
Kaynak değerini geliştiren iş modeli	Atık olarak sınıflandırılan ürünlerin atık yönetim ilkeleri neticesinde toplanarak yeni bir değere dönüştürülmesidir.
Endüstriyel ortak yaşam modeli	Ortak işbirliği ile beraber bir kurumun işlemleri sonucundaki atıkların, başka bir kurum tarafından girdi olarak kullanılmasını ifade eden modellerdir.

Kaynak: Bocken, N.M., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 33, 308–320.

Döngüsel ekonomi kapsamı içinde kaynakların kapalı döngüde akmasını sağlamak amacıyla ürünler, üretim prosedürleri ve tedarik zincirlerinin yeniden tasarlanması gerekmektedir. Döngüsel ekonomi iş modellerinde atıkların en uygun nihai arıtma yöntemlerinin belirlenerek (Ellen Macarthur Vakfı, 2013), verimlilik esasında geri dönüştürülmesi önemlidir (Esa vd., 2017). DE yaklaşımında, malzemelerin ve enerjinin geri kazanılmasını ve bir firmanın atıklarının başka firma tarafından kaynak olarak kullanılması için kapasitenin geliştirilmesini gerektiren eko-sistemik özellikler vardır. Bu özellikler sayesinde tedarik zincirlerinde döngüler kurulabilir ve iş modelleri tasarlanabilmektedir. İşletmelerin DE'yi süreçlerine dahil edebilmeleri için birçok farklı hedefleri söz konusu olabilir. Mevcut hedeflerin çok büyük kısmının atık yönetimi ve kaynakların korunması ile ilgili olduğu veya bu hedeflerin farklı çevresel hedeflerle birleştirilerek ifade edildiği görülmektedir. Özellikle yapılan çalışmalarda DE hedefleri için beş temel uygulama alanına vurgu yapılmaktadır; verimlilik, geri dönüşüm, geri

kazanım, azaltma ve tasarımıdır (Morseletto, 2020). Bir DE modeli, geri dönüşüm ve geri kazanımdan daha geniş stratejiyi ve verimliliğin ötesinde daha olası çözümleri kapsamaktadır (Reike vd., 2018).

Sanayi sektöründe DE kavramının somut bakış açısıyla açıklanması gerekir; döngüsel ekonomi endüstriyel firmaların değerlerini korurken ve çevresel etkileri en aza indirirken kaynakları tam olarak kullanmalarını destekleyecektir (Angioletti, 2017). Sanayilerdeki döngüsel ekonomi yaklaşımı, kendine yetebilen ve çevreye sadık üretim yaklaşımlarına ve kaynakların tekrar tekrar geri dönüştürülmesine izin veren metabolizmanın kurulmasıyla ilgilidir (McDonough & Braungart, 2002). Sanayi sektörlerindeki bu tasarım fikrine, firmaların uzun vadede ekonomik kalkınmayı sağlayabilmesi için ihtiyaçları vardır (Mutingi, 2013). Avrupa Komisyonu tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, döngüsel ekonomi uygulamalarıyla imalat sektörünün yıllık 600 milyar avro kazandığı öne çıkarılmıştır. Bir başka açıdan Finlandiya'nın ulusal bir DE'ye geçişinden yılda 2,5 milyar Euro kazanacağı ve küresel ekonominin yılda 1000 milyar ABD doları fayda sağlayacağı tahmin edilmektedir (Arponen vd., 2015). Herhangi sektördeki döngüsel gelir akışı, sürecin basit ancak gerekli bir yönüdür.

Döngüsel ekonomi çevresel kalkınma ilkelerine dikkat ederek sürekli olarak ekonomik kalkınmayı teşvik etmektedir. DE'nin yeni iş fırsatları yaratması, kaynak verimliliğini sağlayarak aynı malzemenin tekrar kullanılmasına imkan vermesi sebebiyle satın alma maliyetlerinden tasarruf edilmesi ve fiyat oynaklığını azaltarak arz güvenliği sağlaması ekonomik açıdan önemlidir. Süreçlerin lineerlikten döngüsellığe evrilmesi ile üretilen atıkların ve sonucunda bertaraf yoluna gidilen malzemelerin değerlendirilmesi sonucunda yeni gelirler elde edilebilmektedir (JulienSaint-Amand & Le Moënner, 2008). Firmalar atık ürünlerini başka üreticilere satarak ekonomik kazanç sağlayabilmektedir, bu sayede firmalar için malzeme geri kazanımı gelir kaynağı olabilecek durum yaratabilmektedir. Bir diğer açıdan atık yönetiminde döngüsellik ile birlikte kurumlar büyük ölçüde rekabet avantajına sahip olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, sürdürülebilir rekabet gücü ile döngüsel ekonomi ilkeleri arasında güçlü bir ilişki olduğu ortaya koyulmuştur (Geng & Cote, 2002). Ancak güçlü bir ekonomi yaratılması, istikrarlılığı ve rekabette güçlü kalınması için zincirdeki tüm birimlerin ortak paylaşımı ve işbirliği önemlidir. Carter ve Rogers (2008), firmaların ve tedarik zincirlerin uzun vadede ekonomik hedeflerine ulaşabilmesi için kilit organizasyonlar arası iş süreçlerinde sosyal, çevresel ve ekonomik

başarılar için sistematik koordinasyonun sağlanmasını gerekli görmüştür. Bu sebeple iş süreçleri arasındaki işbirliğinin sağlanması, kaynakların daha etkin kullanılmasına neden olarak, firmayı ekonomik açıdan avantajlı duruma getirebilmektedir. Firma bu sayede ortaya çıkan maliyetlerindeki düşüş ile farklı yatırımlar yaparak sağlam rekabet gücüne de sahip olabilmektedir.

1.2. Atık Yönetimi

Döngüsel ekonomiye dair yapılan çalışmalara bakıldığında, DE'nin üç ana faaliyeti kapsadığı görülmüştür. Bunlar; işlenmemiş hammaddelerin kullanımının azaltılması, mevcut işlenmiş malzemelerin yeniden kullanılması ve son olarak atıkların geri dönüşümüdür (Kirchherr vd., 2017). Atıkların kaynağa dönüştürülmesi, yani ürünlerin birincil kullanımdan sonra tekrar dönüştürülmek üzere yönetilmesiyle birlikte döngüsel ekonominin temellerinin atıldığı kabulü vardır. Atık yönetimi, döngüsel ekonomideki hedeflere ulaşmak için döngüsel ekonominin alt sektörü olarak ortaya çıkan temel bir stratejidir (Merli vd., 2018) ve DE'nin ayrılmaz bir parçasıdır. Atık yönetiminin doğru anlaşılması için ilk olarak atık tanımının doğru yapılması gerekmektedir. 02.05.2015 Resmi Gazete'de yayımlanan şekliyle atık, üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyali ifade etmektedir (Resmi Gazete, 2015). Katı atıklar, evlerden, ticari alanlardan, sanayi bölgelerinden, inşaatlardan veya sivil hizmetlerden üretilen (Ngoc & Schnitzer, 2009); hem insan hem de hayvan faaliyetlerinden kaynaklanan, mevcut haliyle bir yararı olmayan tüm atıkların birleşimi (Tchobanoglous vd., 1993) olarak ifade edilmektedir. Genellikle tüm kentsel atıklar ve tarımsal, mineral ve maden atıkları 'katı atık' kavramı içinde değerlendirilmektedir.

1.2.1. Atık Türleri ve Atık Yönetimi Kavramı

Literatürde katı atıkların, farklı özelliklere ve amaçlara göre çeşitli şekillerde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bilinen en temel sınıflandırma atıkların, katı, sıvı, organik, geri dönüştürülebilir ve tehlikeli atık olarak ayrılmasıdır. Atık yönetiminde bir başka sınıflandırma, atıkları endüstriyel ve evsel atık olarak ayırmaktadır. En çok kabul gören sınıflandırmalardan biri de Tchobanoglous vd., (2002) tarafından, katı atıkları ortaya çıktıkları kaynaklara göre sekiz kategoriye ayırmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Evsel ve ticari katı atıklar (tehlikeli atıklar dışında olan);

(Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre evsel ve ticari atıklar, evlerden atılan aynı zamanda park ve piknik alanları gibi yerlerden de toplanan tehlikesiz atıklardır (Resmi Gazete, 2002, Sayı: 24736). Bu atık sınıfı; gıda, kağıt, plastik, karton gibi organik maddeleri ve plastik, kauçuk, deri, alüminyum, demirli metaller gibi inorganik maddeleri içermektedir.

- Evsel ve ticari özel katı atıklar; tüketici elektroniği, beyaz eşya ve bahçe atıkları, piller gibi atıklar,
- Asitler, ağır metaller, tıbbi atıklar gibi canlı sağlığını tehdit eden tehlikeli atıklar,
- Tıbbi atıklar haricinde kurumsal (devlet merkezleri vs.) katı atıklar,
- İnşaat sahalarından kaynaklanan atıklar,
- Tesis atıkları; arıtma tesisi atıkları, su ve endüstriyel atık arıtma tesislerinden çıkan diğer kalıntılar, yakma tesisi atıkları,
- Endüstriyel katı atıklar; tehlikeli atıkların dışında endüstriyel tesislerden üretilen proses atıklar,
- Tarımsal atıklar; arpa, tarla, ağaç gibi çeşitli tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atıklardır.

2015 Resmi Gazetede yayınlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği tarafından ise atıklar, daha detaylı bir sınıflandırma ile 20 farklı şekilde kategoriye ayrılmıştır. Bunlar; madenlerin çıkarılması veya işlenmesi gibi çeşitli işlemlerden sonra ortaya çıkanlar, tarım-hayvancılık-ormancılık veya gıda üretim işlemleri sonucunda ortaya çıkanlar, ahşap işleme ve kağıt üretim gibi işlemler sonucundaki atıklar, tekstil endüstrisindeki atıklar, petrol rafinasyon işlemleri sonucundaki atıklar, inorganik kimyasal işlemler sonucundaki atıklar, organik işlemler sonucundaki atıklar, boya veya yapışkan gibi malzemelerin üretiminden ve kullanımından sonra oluşan atıklar, fotoğraf endüstrisinden oluşan atıklar, ısıtma işleminden oluşan atıklar, malzemelerin kimyasal işlenmesinden doğan atıklar, metal veya plastik malzemelerin işlem sonrası oluşan atıklar, yağ ve sıvı yakıt atıklar, atık organik çözücüler ve soğutucular, ambalaj atıkları, listede yer almayan diğer atıklar, inşaat atıkları, insan veya hayvan sağlığı araştırmalarından kullanılan atıklar, atık yönetim tesislerindeki ve arıtma su tesislerindeki atıklar ve son olarak belediye atıklarıdır.

Atıkların farklı şekillerde sınıflandırılması, atık çeşitlerinin net tanımının yapılmasında

ve onları süreç içerisinde ayıklamada büyük avantajlar sağlamaktadır. Her atık çeşidi farklı özelliklere sahip olması ve farklı işlemlerden geçebilmesi sebebiyle farklı şekillerde yönetilmektedir. Literatürdeki en kolay ve temel sınıflandırmalardan biri de Goren (2005)'in aynı kaynaklarda üretilen atıkların aynı özelliklerde sahip olduğunu ifade etmesiyle, atıkların üretildiği yere göre sınıflandırılmasıyla yapılmıştır. Bu çalışmada atıklar, evsel, tıbbi, endüstriyel ve tehlikeli olmak üzere 4 kategoride incelenmiştir. Evsel atıklar, evlerde ve ticari/kurumsal iş yerlerinde üretilen, başta gıda atıkları olmak üzere bahçe, mobilya, gazete, giysi gibi ürünlerin yer aldığı dayanıklı veya dayanıksız atıklardır. Tıbbi atıklar, hastane, klinik veya muayenehane gibi sağlık tesislerinde üretilen iğne, şırınga, alınan numune, tıbbi tüpler gibi tanısal veya tedavi amaçlarıyla kullanılan geri dönüşüme yatkın olmayan malzeme atıklarıdır. Artan sanayileşmeye bağlı olarak çağımızın yönetilmeye en değerli atıklarından görülen endüstriyel atıklar, üretim süreçleri içerisinde üretilen atıklardır. Farklı endüstriler tarafından farklı özelliklerde ortaya çıkan sanayi atıkları ortaya çıkan atığın malzemesine göre, tehlikeli olma durumuna göre veya üzerindeki işlemlere göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Tehlikeli atıklar ise saklanması, işlenmesi veya bertaraf edilmesi risk yaratan, insan sağlığına zarar verecek nitelikte olan toksik, reaktif ve kanserojen özelliklerdeki atıklardır. Ayrıca bu sınıfın atıkları çevresel açıdan da tehlike yaratan durumdadır. Her ne sınıflandırma da olursa olsun tüm atıkların üretimine dair çözümler olmalı ve uygulanmalıdır.

Atık üretimi, ürünlerin ya da üründeki malzemelerin değersiz olmasının tespit edilmesiyle bunların atılması veya bertarafı için bir araya toplanması faaliyetlerini ifade etmektedir (Tchobanoglous vd., 2002). Katı atık üretim zinciri, hammaddelerin ürünlere dönüştürülmesindeki tüm adımlarda istenmeyen kalıntıların meydana çıkması sonucunda atıkların üretilmesidir. Ancak atık üretimi bu kadar sınırlı ve dar bir alanı kapsamamaktadır. Üretim süreçleri içerisinde atıkların meydana geleceği gibi, ürünlerin kullanım sonrasında da değerinin yitirilmesiyle kalan ürünler atık olarak kabul edilmektedir. Birden fazla şekliyle kurumların süreçlerinde istiflendiği gibi, tüketiciler tarafından da bu ürünler sistemlere geri dönebilmektedir.

Toplumların gelişmesiyle birlikte insanların gereksinimlerinin artmasının sonucu olarak atık miktarındaki artış, katı atık yönetim sistemlerinin yürütülmesini zorlaştırmaktadır (Rada, 2016). Hem gelişmiş ülkelerde hem de gelişmekte olan ülkelerdeki bu durum birbirinden çok farklı değildir. Gelişmiş ülkelerdeki yüksek yaşam standartları ve kişi

başına düşen gelirin yüksek olması, toplumdaki bireylerin gelirlerini harcama şekillerini etkilemiş ve üretimle birlikte tüketime de bağlı nüfus oluşmuştur. Gelişmekte olan ülkelerde ise sanayileşme her geçen gün artarken, bunun sonucunda istenmeyen atık miktarında artış yaşanmıştır. Nüfusun artan istekleri ile birlikte ürünlerden vazgeçme hızları artmış ve bu durum hem evsel hem endüstriyel atıkların miktarını arttırmıştır. Kawai ve Tasaki (2016)'nin yaptığı çalışmada, gelişmekte olan ülkelerdeki küresel atık üretiminin %37, gelişmemiş ülkelerdeki %23 ve gelişmiş ülkelerdeki ise %40'a ulaştığını ortaya koymuştur.

Atık üretimi, küresel düzeyde birçok kurumun karşı karşıya kaldığı en büyük tehditlerden biri haline gelmiş ve doğrudan hava, toprak ve su kirliliği ile ilişkilendirilmiştir. Atıklardan gelen sızıntı su, metallerin ve diğer toksik bileşenlerin sürekli deşarjı yoluyla yüzey suyunu, yeraltı suyunu ve toprağı büyük ölçüde kirletmektedir. Kirlenen su aynı zamanda tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin zarar görmesinde etkilidir. Benzer şekilde atıkların doğaya bilinçsizce dökülmesi toprağın fiziksel, jeolojik ve biyolojik yapısına büyük zarar vererek, hem kalitesini düşürmekte hem de yaşayan canlıların ölmesine neden olmaktadır. Katı atık üretimi, havaya salınan sera gazları ile de doğrudan ilişkilidir. Kyoto Protokolü'nce belirlenen 6 gazdan en zararlısı ve zehirlisi olan CH₄ (Metan)'a, katı atıklar önemli ölçüde neden olmaktadır. 2014 yılındaki Birleşmiş Milletler (BM) İklim Zirvesi (2014) raporuna göre katı atık sahaları ve çöplükler, küresel metan emisyonunun üçüncü en büyük antropojenik kaynağıdır. Fosil yakıtların bilinçsizce yakılmasının sonucunda salınan SO₂ gazı da insan sağlığına ve doğaya büyük ölçüde zarar vermektedir. Çevreye verilen bu zararlar sadece insanları tehlikeye atmakla kalmamakta, doğadaki tüm canlılara zarar vermektedir. Katı atık üretiminin sonucunda özellikle buna maruz kalan çevrelere daha yakın olan nüfusların sıtma, dermatit, mide-bağırsak bozuklukları, bronşit ve astım gibi çeşitli hastalıklara daha çok sahip olduğu görülmektedir (De & Debnath, 2016).

Atık yönetimi, teknik, finansal, kurumsal ve bilgisizlik gibi durumlar sebebiyle sürekli artan atık miktarının sistemli yönetilmesini sağlayan faaliyetler bütünüdür. Atık yönetiminin temel ilkesi, geri dönüşüm yoluyla atık miktarını azaltmak ve atıkların çevrenin korunmasına zarar vermeyecek şekilde sıhhi şekilde bertaraf edilmesini sağlamaktır. Sürdürülebilir katı atık yönetimi, tüketilen kaynaklara bağlı olarak insan talebini yansıtan ve atık yönetimi çalışmaları ile doğal çevreyi sürdürülebilir kılmayı

amaçlayan bir sistemdir (Ikhlayel, 2018). Başarılı atık yönetiminde kurumlar için sosyokültürel, ekonomik, çevresel, teknik ve politik birçok konu önemlidir. Bu konuların her biri atık yönetim kararlarında kritik roledir ve süreci etkilemektedir. Atık yönetim stratejileri atıkları hızlı bir şekilde ortadan kaldırmak, imha etmek, filtrelemek, geri dönüştürmek ve yeniden kullanmak gibi çok farklı şekilde yürütülmektedir. Atık yönetiminde dair yürütülen planlar veya stratejiler farklılaşsa da atık yönetiminin hedefleri zaman içinde değişime dirençli olarak kalmıştır. Atık yönetimi stratejilerinin temeli çevrenin ve hijyenin sağlanarak toplum sağlığının korunması ile beraber malzeme, doğal kaynaklar, enerji ve alanın korunmasına dayanmaktadır.

Toplumların artan sağlık problemleri ve doğada yaşayan diğer canlıların karşılaştığı olumsuz etkiler, atık yönetiminin doğru ve sistemli yürütülememesinin bir sonucudur. Katı atık üretim oranının küresel düzeyde 2016 yılında 2.01 milyar tona ulaştığı görülürken, her geçen gün artmaya devam ettiği ve büyük tehditler oluşturduğu bilinmektedir. Son 2-3 yıl içinde bu oran %70 civarlarında artarken, 2050 yılında dünyada 3.50 milyar ton atığın olması beklenmektedir (Kaza vd., 2018). Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki atık üretim miktarları sanayileşme oranının artması ve yüksek nüfuslara sahip olması nedeniyle sürekli artmaktadır. Sanayileşme öncesi dönemde atıklar analiz edildiğinde hem miktarlarının hem de içerdiği toksik madde oranının daha az olduğu tespit edilmiştir (Theisen, 2000). Sanayileşme sonrası dönemde ise seri üretimin küreselleşmesi ile birlikte yüksek miktarlarda üretimin bir sonucu olarak atık artışı kaçınılmaz olmuştur. Bunun sonucunda özellikle doğal kaynakların korunması ve çevresel risklerden arınmış bir toplum yaratılması için sürdürülebilir atık yönetimi bir zorunluluk haline gelmiştir.

Sürdürülebilir katı atık yönetimi, çevreye zararlı olan katı atıkların ekonomi içinde faydalı olacak şekilde kaynakları koruyan uygun atık yönetim sistemlerinin uygulanmasıdır (Kumar vd., 2017). Sürdürülebilir atık yönetimine yönelik yapılan çalışmalarda konu hem ekonomik hem çevresel hem de sosyal açıdan çalışılmıştır, bu durum da konuya bütünsel açıdan bakılması gerektiğini ortaya koymuştur. Sürdürülebilir katı atık yönetimi, katı atıkların toplanması, işlenmesi, dönüştürülmesi, geri dönüştürülmesi veya bertaraf edilmesi için kullanılan yöntemlerin yer aldığı bir sistemdir. Üretimden son bertarafa kadar, katı atık yönetimi 6 işlevsel birimden oluşmaktadır (Kocasoy, 1999):

İlk aşama atıkların üretilmesidir. Ürünlerin değerini kaybetmesi ile birlikte uzaklaştırma veya bertaraf edilme ihtiyacı ile atıklar ortaya çıkmaktadır. İkincisi atıkların kaynağında elleçlenmesi, ayrıştırılması ve depolanması süreçlerini içermektedir. Üretilen atıkların taşınmasına kadar gerekli olan tüm işlemler bu aşamada gerçekleşir. Atıkların konteynırlara konularak taşınması için gereken faaliyetler; materyallerin elleçlenmesi, uygunluğuna göre ayrıştırılması ve gerek görülürse depolanmasını içermektedir. Atık ayrımı, atıkların organik, plastik, cam, kağıt veya metal gibi farklı kategorilere ayrılma işlemleridir. Üçüncüsü materyallerin toplanması ve taşınmasıdır. Katı atıkların ayrıştırılmış ve geri dönüştürülebilir olarak toplanması, atık yönetimi programının kritik bir parçasıdır ve ayrıca katı atık yönetiminin tamamında harcanan paranın ortalama yüzde 50-70'i toplama faaliyetine harcanmaktadır (Theisen, 2000). Atık miktarının artması ve çeşitlenmesi süreci daha karmaşık kılmaktadır.

İlk üç adımda toplanan atıkların ardından süreç, atıklardan değer kazanma noktasına gelmektedir. Dördüncü adım katı atıkların işlenmesi ve dönüştürülmesidir. Geri dönüşüm alanına ulaşan ürünler, uygun yöntemlerle işlenmekte ve değer sağlayacak süreçlere dönüştürülmektedir. Bu aşamada ilk olarak atıkların daha detaylı ayıklanması yapılarak değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Hem elle hem de hareketli bant üzerinde mekanik olarak yapılan ayıklama işleminde geri dönüştürülecek atıklar işlem için hazırlanmaktadır. Birçok farklı ürün grubu için farklı teknolojiler ve çözümler geliştirilmiştir. Çelik, alüminyum, cam, kağıt veya plastik gibi ürünlerin geri dönüştürülmesinde maksimum faydanın sağlanması için farklı yöntemlere maruz kalmaktadır. Beşinci adım işlenen ürünlerin transfer sürecidir. Ürünler geri dönüşüm durumuna göre bertaraf sahalarına ya da ilgili tesislere taşınmaktadır. Son adım (ihtiyaç duyulması halinde) atıkların bertarafıdır. Değeri olmayan, işlevsiz veya kullanılamayacak durumda olan malzeme ya da ürünler yakma tesislerinde son işlemde imha edilmektedir.

1.2.2. Atık Yönetiminin Engelleri ve Kolaylaştırıcı Unsurları

Atık yönetiminin birçok işlevsel birimden oluşması ve bütünsel bir süreç olması sebebiyle karşılaşılan birçok engeli bulunmaktadır. Katı atık yönetiminin başlıca zorlukları, atık sektörünün işlevsel yönleriyle (atık üretimi ve yetersiz atık toplama, taşıma, arıtma ve bertaraf süreçleri) ilişkilidir. Karşılaşılan ilk problem atık üretimindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Beklenen veya beklenmedik şekilde oluşan atıkların iyi yönetimi için

takibinin, analizinin ve gelecek dönemlere ilişkin gerçekçi tahmininin yapılması gereklidir. Olası atık üretim planlarının yapılması ve takibi kamu veya ticari kurumlarda ortak olarak iyi atık yönetim stratejisinin birincil adımı olmalıdır. Diğer bir engel geri dönüşüm/kazanım faaliyetlerindeki atıkların genellikle plansız veya gelişigüzel toplanmasından kaynaklanmaktadır. Atıkların geri dönüştürülebilir malzeme yapısına uygun olarak kaynağında ayrılması sürdürülebilir atık yönetimini kolaylaştırıcı bir unsurdur. Her ürün grubunun ayrı olarak toplanması iyi bir seçenek olarak görülmelidir. Bunun için farklı teknikler ve teknolojiler geliştirilmeye devam etmektedir. Coğrafi Bilgi Sistemleri, Radyo Frekansı Tanımlama (RFID), Ultrasonik Sensörler ve Mobil/Genel Radyo Paket Servisi ve SolidSeveral üst düzey atık izleme teknolojileri, atık toplamayı geliştirmek için yakın zamanda geliştirilen uygulamalardandır (Hassan vd., 2016).

Atık yönetimindeki üçüncü engel, katı atık yönetim sistemlerindeki teknik entegrasyondan kaynaklanmaktadır (Bui vd., 2020). Kurumlardaki alt yapı ve teknoloji eksiklikleri veya bunların mevcut sisteme olan entegrasyonu atık yönetimindeki büyük engellerden görülmektedir. Yaşanan teknik eksiklikler süreçlerin verimliliğini etkileyerek, kurumların sürdürülebilir olmasını zorlaştırmaktadır. Alt yapı eksikliği özellikle az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin en büyük problemlerinden biri haline gelmiştir. Çünkü bu eksiklik, uygun atık işleme kanallarının olmaması nedeniyle atık yönetimini zorlaştırmaktadır. Dördüncü engel katı atık yönetimi ile ilgili toplumların ve kurumların bilgi eksikliğinin olması ve doğru veriye ulaşamamasıdır. Bu durum sanayilerdeki en büyük engellerden biridir. Katı yönetim sistemi birbirine bağlı adımlardan oluşması sebebiyle bütünsel bir süreçtir. Bu yönetimde ihtiyaç duyulan doğru ve kaliteli veriler için planlayıcıların değerlendirmesi gereken birçok farklı kılavuz vardır. Atık yönetimini uzun bir süreç olarak düşünmek ve her aşamalı değerlendirmek önemlidir. Krcal ve Reslove'ın 2014 yılında yaptıkları literatür inceleme çalışmasında atık yönetimi için örgütsel öğrenme, bilgi paylaşımı, bilgi üretme ve atıkların nasıl ve ne şekilde değerlendirileceğine dair bilgi ihtiyacının olduğu açıkça ortaya koyulmuştur. Atık yönetimindeki veri eksikliği ve yanlış varsayımlar atık yönetiminin bir ihtiyaç olarak görülmemesini ve kurumların operasyonlarına dahil etmemelerine neden olarak geleceğe dair sürdürülebilirlik gelişimine engel olan durumlar yaratmaktadır. Kurumlar tarafından atık yönetiminde en uygun değerlendirme yöntemlerinin seçilmesindeki bilgi eksikliği de süreci yavaşlatmaktadır. Atık sistemlerinin belirli standartlarının olmayışı yönetimi için

ihtiyaç duyulan doğru bilgilere de ulaşmayı geciktirmektedir.

Bir diğeri sistemdeki paydaşlar arasındaki iletişim eksikliğidir ve bu durum sistemli bir atık yönetim sürecini zorlaştırmaktadır. Bazı kurumlar kendi içinde kurduğu geri dönüşüm sistemleriyle atıkları değerlendirirken, birçok kurum doğrudan atık arıtma tesisleri ile birlikte çalışarak atıklarını uzaklaştırmayı tercih etmektedir. Geri dönüşüm faaliyetlerini üretim süreçlerine dahil eden firmaların temelde şeffaflık ilkesine bağlı kalarak, doğrudan iletişim ve hesap verebilirlik temelinde diğer birimlerle ortak hareket etmesi önemlidir. Bu sebeple firmaların doğru atık taşıma sistemlerini kurmalarını gerektirmektedir. Altıncı engel atık yönetiminin mali boyutudur. Atık yönetim sistemlerinin kurulması için ihtiyaç duyulan büyük harcamalar (Sharholly vd., 2007) ve finansal desteğin zamanında ve yeterli olarak sağlanamaması işletmeleri kısıtlayan büyük bir unsurdur. Bu sistemleri kurmak isteyen firmaların atık toplama ve işleme ekipmanları, atık taşıma araçları, tesis için arazi, (gerekliyse) altyapı sağlama yatırımı ve kirlilik kontrol ekipmanları gibi mali harcama yapmalarını gerektiren büyük sermayelere ihtiyaçları vardır (Theisen, 2000). Ayrıca süreçlerdeki operasyonel maliyetler de göz ardı edilmemesi gereken giderlerdendir. Personel maaşları, enerji / yakıt giderleri, ofis ve iletişim giderleri, kullanılan kimyasallar malzemeler, geri dönüşüm işlem maliyetleri, sigorta giderleri, yasal ücretler, lojistik harcamalar, ekipman bakımı ve beklenmeyen giderler en temel operasyonel harcamalardandır. Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak isteyen karar vericiler çevresel, ekonomik, teknik ve birçok sosyal faktörleri dengeleyen en uygun maliyetle uygulanabilir atık yönetimini takip etmektedir.

Alandaki diğer zorlayıcı unsur atık yönetiminin birçok kurum tarafından sadece ekonomik yönüyle ilgilenilmesinden kaynaklanmaktadır. Allesch ve Brunner (2014)'ın 151 makaleyi inceleyerek yaptıkları çalışma sonucunda, atık süreç yöntemlerinin olası etkilerinin incelendiği çalışmaların %50'sinin sadece ekonomik yönden değerlendirildiğini ortaya koymuştur. Benzer çalışma yapan Mai ve Hipel (2016), 1980-2014 yılları arasındaki akademik çalışmalara odaklanmış ve sonucunda belediye katı atık yönetiminde sosyal boyutların ihmal edildiğini ve yalnızca ekonomik ve çevresel boyutlara odaklanıldığını tespit etmiştir. Sürdürülebilir atık yönetiminde tek faktör ekonomik boyutlar olmamalıdır, sosyal ve çevresel boyutlar da en az ekonomik boyutlar kadar değerlendirilmelidir. Birçok kurum atık yönetimini sadece ekonomik açıdan değerlendirmesi sebebiyle çözümler de kısıtlı kalmaktadır. Atık yönetimindeki büyük bir

problem de birçok ülkenin belediye atıklarına daha fazla eğilim göstermesidir (Allesch & Brunner, 2014). Diğer taraftan endüstriyel atıkların geri dönüşüme en uyumlu atık çeşit grubu olması, üzerinde çalışılması gereken bir konu olduğunu gerektirmektedir.

Atık yönetimindeki en büyük engellerden biri de hükümet ve yerel yönetimlerin yön veren yönetmelik ve standartları uygulaması ve desteği ile ilgilidir. Kocasoy (1999), atık planlarında sert hükümet onaylarına ihtiyaç duyulması ve işlemlerin karmaşık, zaman alıcı ve bütçe gerektirmesi durumlarının sürdürülebilir atık yönetimi prosedürünü oluşturmada zorlayıcı olarak görmüştür. Zacho ve Mosgaard (2016)'ın 1996-2015 yılları arasındaki 59 makaleyi analiz ettiği çalışma sonucunda, atık önleme çalışmalarının oldukça yetersiz kaldığını ve yasal eksikliklerin mevcudiyetini belirlemiştir. Atık yönetmelikleri kurumların atıklarını yürütmeleri için bir takım yaptırımlar uygulamasında ve sürecin takibini kolaylaştırmasında belirleyicidir. Her toplumun kendi atık sistemini ve standartlarını oluşturması bir ihtiyaçtır. Weeks vd.,(2021)'nin yaptığı çalışmada da atıkların miktar, kalite ve çeşit bakımından değişmesi ideal sistemin olmayışına neden olarak kurumların önündeki en büyük engellerden biri olarak görülmüştür. Böyle bir farklılığın temelinde ülkenin genel ekonomik durumu, yaşam biçimi, okuryazarlık oranı, yaş dağılımı (Kolekar vd., 2017), ülkenin büyüme hızı, endüstri kolları, üretimin payı, ülke çapındaki ARGE yatırımları ve mevcut çevre yönetmelikleri yatmaktadır. Paes vd., (2019)'in 249 çalışmayı değerlendirmesi sonucunda döngüsel ekonomi perspektifinde atıklardan elde edilen alternatif malzemelerin kullanılması için mevcut iş modellerinin, mevzuatın ve vergilerin değiştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Ülkemizde en son 2015 yılında yayımlanan Atık Yönetim Direktifi de bu anlamda atılan büyük adımlardan biridir. 02.04.2015 Resmi Gazetede 29314 numaralı sayı ile yayımlanan atık yönetimi yönetmeliği toplam 9 bölüm ve 29 maddeden oluşmaktadır. Yönetmeliğin birinci bölümü 4 maddeden oluşmaktadır. Madde 1 amacı, Madde 2 kapsamı, Madde 3 diğer yönetmeliklerle ve yasalarla olan bağlantısını (dayanağını) ve Madde 4 yönetmelikteki kavramların tanımlarını açıklamaktadır. Yönetmelik üç temel amaç etrafında oluşturulmuştur. Bu amaçlar atıkların oluşumu ile başlayıp bertarafına kadar giden süreç boyunca insan ve çevrenin zarar görmemesi, atıkların oluşumunu azaltma ve malzeme geri kazandırma, insan ve çevre sağlığını koruyacak ürünlerin gelişimini sağlamaya dayanmaktadır.

Yönetmeliğin ikinci bölümü altı maddeden oluşmaktadır. Genel ilkelerin açıklandığı Madde 5'in a bendinde, atık üretmenin yarattığı tehlikelilik özellikleri, temiz teknolojilerin gerekliliği, çevreye ve insana en az zararı veren ürünlerin geliştirilmesini ve dayanıklı ve yeniden kazanılabilen ürünlerin çevresel tasarımlarını yapmalarını esas almaktadır. Madde 5'in b bendinde atık yönetiminin bir zorunluluk haline geldiği durumlar için malzemelerin hammadde olarak veya enerji kaynağı olarak geri kazanılmasını; c bendinde doğal kaynakların ve enerji tüketiminin azaltılması için geri kazanılan ürünlerin kullanmasını esas almıştır. Madde 6, 7, 8, 9 ve 10 ise atık yönetiminde sorumlu olanların yetki ve görevlerinin detaylı tanımlandığı bölümdür. Atık yönetiminden sorumlu olan bakanlığın görevlerinin açıklandığı Madde 6'da çevreyi koruyan politikaların geliştirilmesi için tedbirlerin sağlanması, faaliyetlerin takip edilmesi, tesislere lisans verilmesi ve halkın bilgilendirilmesi gibi görev tanımları yer almaktadır. Madde 7'de il müdürlüklerinin görev ve yetkileri detaylandırılmıştır. Bu kapsamda denetimlerin yapılması, atık üreticilerin takip edilerek beyanların kontrolünün sağlanması, uygunsuzlukların saptanmasıyla gerekli yasal işlemlerin yapılması ve atık yönetim stratejik planlarının oluşturulması gibi daha teknik ve yasal işlemler yer almaktadır. Madde 8 belediyelerin görev ve sorumluluklarını açıklarken, Madde 9 atık sahiplerinin ve üreticilerin yükümlülüklerini detaylandırmaktadır. Bu görevlerin ilk adımı atık üretimini minimum seviyede tutacak önlemlerin alınmasıdır. Kurumların atık üretim planlarını il müdürlüklerini sunmaları, bakanlıklar tarafından belirlenen esaslara göre kayıtlarını tutmaları, belediyelerle işbirliği içinde çalışmaları, bütün atıklarını toplamaları, taşımaları ve depolamalarında insan ve çevre sağlığını sağlamaları gerekmektedir. Madde 10'da ise atık işleme tesislerindeki yükümlülüklerle yer verilmiştir.

Atık listelerinin oluşturulması ve atıklara verilen kodların yer aldığı üçüncü bölümde, her atığa karşılık gelen altı haneli atık kodlarının tanımlanmasına yer verilmiştir. Dördüncü bölüm ulusal atık yönetim planlarının hazırlanmasını, bildirilmesini ve kayıtlarda bulundurulmasını açıklar. Yönetmeliğin beşinci bölümü mali sorumlulukların, altıncı bölüm üretici sorumluluklarının, yedinci bölüm yetkilendirilmiş kuruluşların yükümlülüklerinin açıklandığı alanlardır. Yönetmeliğin sekizinci bölümünde atıkların ulusal sınırlardan uzaklaştırılması ve ulusal sınırlara alınması durumlarını değerlendirmektedir. Son bölümde artık "Son Hükümler" başlığı altında kanunlara dayanan idari yaptırımlar, son güncel durumda yürürlükten kaldırılan mevzuatlar ve yeni

ekleneceği düşünölen maddeler yer almaktadır. Bu maddeler atık yönetiminde hükümetlerin yasal düzenlemelerinin ne denli belirleyici olduğunu göstermektedir. Yönetmeliklerdeki atık tanımları, biçimleri, yönetim şekilleri tüm organizasyonlar için aynıdır ve aynı kurallara tabi olarak yönetilmelidir. Denetleyicilerin varlığı ve bir takım yasal dayanaklar kurumların atıklarını daha düzgün şekilde değerlendirmesini sağlayarak hem ekonomiye hem de çevreye büyük fırsatlar sunmaktadır.

Doğru yönetilen katı atık yönetim sistemlerinin kurumlara sunduğu birçok fayda vardır. Genel çerçevede ifade edilecekse, önceliği atık üretimini ortadan kaldırmak olan atık yönetiminde, tedarik zincirleri boyunca daha az atık üreten üreticilerin daha iyi ekonomik performans gösterme eğiliminde olduğu görölmüşür (Hayami vd., 2015). Fazla miktarlarda oluşan atıklar süreçlerin ve malzemelerin tam verimli olmadığının ve kaynaklardan tam olarak yararlanılmadığının göstergesidir. Dolayısıyla kaynaklarını etkin kullanmayan bir kurumun ekonomik performansı da tam başarıyla sağlanamayacaktır. Atık üretiminin kaçınılmaz olduğu durumlarda ise atıkların toplanmasının, ayrıştırılmasının ve taşınmasının işletmelere birer maliyet kalemi olarak döneceği gerçeğiyle atık miktarındaki artış durumu firmanın ekonomisine doğrudan yansıyacaktır.

Atık yönetimi içindeki önemli bir konu da atıklardan enerji üretilmesi ile ilgilidir. Farklı katı atık kaynaklarından enerji üretimi sürdürülebilir yaklaşım için yaygın kabul edilmektedir. Enerji rezervlerindeki dalgalanmalar ve beraberinde gelen enerji maliyetleri yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu ihtiyaca cevap olarak sürekli gelişen teknolojilerle beraber atıklardan enerji kazanımı daha önemli bir konu haline gelmiştir. Atık yakma tesislerinde ortaya çıkan enerji, buhar türbinden geçerek elektrik enerjisine dönüşmektedir. Düzenli depolama ve atıklardan enerji geri kazanımı kurumlar için oldukça faydalıdır.

Doğru atık yönetim sisteminin sağladığđ birçok çevresel faydadan bahsedilebilir. Tüm dünyanın karşı karşıya kaldığđ en büyük zararlı etkilerden olan sera gazı emisyonlarının en büyük sebeplerinden biri atık üretimidir. Dolayısıyla iyi atık yönetimi zararlı gazların salınımını azaltarak özellikle hava kirliliğine engel olmaktadır. Diğer yandan su ve toprak kirliliği atıkların sebep olduğu çevresel kirliliğin sonuçlarıdır. Dünyadaki her canlının hem toprağa hem suya hem de kaliteli hava solumaya ihtiyacı vardır. Bu çevresel

durumların üstesinden gelinmesi de zor, zahmetli ayrıca büyük miktarlarda maliyet gerektirmektedir. Dolayısıyla atık yönetimindeki doğru işleyiş sayesinde bunlara çözüm sağlamaktadır.

İyi yönetilen katı atık yönetiminin kritik faydası, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde kaynak üretkenliğini en üst düzeye çıkarmaya destek olmasıdır (Ellen MacArthur Vakfı, 2013). Kaynak geri kazanımı atık yönetiminin en temel amaçları içerisinde. Atıkların geri dönüştürülmesiyle daha çok ikincil malzemelerin kullanılması, birincil malzemenin daha az kullanılmasına katkı sağlayacaktır. Birincil üretimdeki bu düşüş de daha az enerjinin, suyun ve malzemenin kullanılmasına neden olarak ekonomik ve çevresel açıdan avantajlı durumlar yaratabilecektir. Doğru bir katı atık yönetim sistemi ile doğal kaynakların verimli kullanılıyor olması büyük rekabet avantajı sağlarken (Hart, 1995), aynı zamanda çevreye daha iyi uyum sağlayarak uzun vadede sürdürülebilir olmayı sağlamaktadır. Sürdürülebilir katı atık yönetimi ile makro ölçekte kaynak dönüşümünün sağlanması diğer yandan radikal bir yaklaşım geliştirerek, yeni iş ve meslek fırsatlarını da getirebilmektedir (Aid vd., 2017; İkhlayel, 2018).

İkincil üretimdeki artış ve ikincil ürün pazarının genişlemesi bu alandaki istihdamı arttıracak bir durum olarak görülmektedir. Kaynak geri kazanımı sonucunda firmalar geri dönüşümle tekrar kullanamayacağı dönüştürülmüş malzemeleri coğrafi yakınlığında olan başka firmalarla iş ortaklığına girerek satabilmektedir. Böylelikle üretilen atıklar başka firmalar tarafından girdi olarak kullanılabilir. Atıkların değerlendirilmesine dayanan yeni modellerde bu firmalar ayrıştırıcılar olarak kabul edilmekte ve ayrıştırıcı firmalar sıfıra yakın atık elde edene kadar atıkların dönüştürüldüğü ve diğer firmalarla simbiyotik etkileşime dayanan iş modellerine sahip firma türünü temsil etmektedir (Vazquez, 2014). Ortak işbirliği ile firmalar atık malzeme ve enerjinin kullanılması yoluyla maliyet düşüşlerini elde ederken (Dong vd., 2014), aynı zamanda atıklarını değerlendirerek gelir elde edebilmektedir (McDonough & Braungart, 2010).

Sonuç olarak bu faydalarla birlikte katı atık yönetimi sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasında oldukça önemlidir. Büyüyen ekonomilerde artan nüfuslu ülkelerde daha fazla atık ürettikçe katı atıklarla başa çıkmak için sürdürülebilirliğe giden bu yolda birçok farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin en başında kompostlama ve biyobozunma, sıhhi depolama, yakma, fermentasyon ve çalışmanın odağını oluşturan 3Rs

(azaltma, geri dönüştürme ve yeniden kullanma) teknikleri gelmektedir.

1.2.3. Atık Değerlendirme Yöntemleri

Oluşan atık çeşidine, sahip olduğu özelliklere, tehlike durumlarına, çevreye ve topluma verecekleri zarara ve süreç sonunda alınacak faydaya göre atıklara uygulanacak yöntemlerde farklılıklar söz konusu olabilmektedir. Atık değerlendirme yöntemlerinin çoğunlukla kompostlama ve biyobozunma, düzenli depolama, yakma, fermentasyon, 3Rs (Azaltma, Yeniden Kullanım ve Geri Dönüşüm) ve geri kazanım olmak üzere 6 ana başlıkla incelendiği görülmektedir.

1.2.3.1. Kompostlama ve Biyobozunma

Kompostlama, heterojen organik atıkların mikrobiyal popülasyonla birlikte kontrollü oksijen, nem ve sıcaklık koşulları altında organik maddelerce zengin maddelere dönüştürülmesi sürecidir (Farooqi vd., 2021). Daha çok sebze, meyve gibi gıda atıkları ve gübre, toprak gibi bahçe atıklarının kontrollü bir şekilde mikroorganizmalar tarafından humusa ayrıştırılması olarak ifade edilmektedir. Temeli, organik maddelerin mikrobiyal olarak mantarlar veya bakteriler tarafından ayrışmasıdır. Kompostlama özellikle sürdürülebilir tarımla ilgilenenler için süreç verimliliğini arttıran değerli bir araç sunmaktadır. Ayrıca zararlı organizmaları engellemek için kullanılan pestisit miktarında da azalmaya gidilmesine destek olarak besin açısından daha zengin ürünler edilir ve bu sayede çiftçiler için önemli faydalar sağlanabilmektedir.

1.2.3.2. Düzenli Depolama (Atık Gömme)

Atık yönetimindeki geri dönüşüm, geri kazanım gibi kaynak korunmasını sağlayan yöntemlerin mümkün olmadığı durumlarda bazı atıklar için düzenli depolama, katı atık yönetimi içinde en ekonomik stratejilerden biri olarak görülmektedir. Düzenli depolama ile atıklar biyolojik, kimyasal ve fiziksel bozunma süreçleri ile zararsız hale gelene kadar kontrollü şekilde ortamdaki izole edilmektedir. Toplanan atıklar depolama alanının sağlığını ve çevresindeki yerleşimi bozmayacak şekilde depolanmaktadır. Depolamanın kontrollü şekilde yürütülmesi yüzey ve yer altı suyu kirliliğine, görüntü kirliliğine ve canlıların zarar görmesine engel olmaktadır. Çünkü ayrıştırılan atıklardaki bozulmalar sonucunda sızan suların herhangi şekilde çevreye yayılmaması için boru sistemleri geliştirilmiştir.

Atık gömme sahalarındaki ilk işlem yönetmeliğe göre kabul edilen atıkların sisteme kaydının yapılmasıdır. Kaydı yapılan atık araçları döküm sahasına ulaşarak, kontrollü şekilde atıklarını boşaltmaktadır. Üçüncü adımda atıkların daha küçük yer kaplaması amacıyla düzenli depolamada oldukça önemli olan hacim küçültme işlemi için çöpler sıkıştırılmaktadır. Çünkü tesis alanında maksimum faydanın alınması sağlanabilmektedir. Son adım ise organik maddelerin saha içerisinde bozunmaya başlamasıdır. Bu süreçten sonra atıkların çürümesiyle başlayan metan gazının kontrolü ve takibi yapılmalıdır. Bu sebeple depolama alanlarında doğal havalandırma sistemleri kurulmaktadır (Hassan vd., 2000). Ayrıca toplanan gazlar gaz motorlarında yakılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.

Depolama alanları hemen hemen her türlü atığı sisteme alabilmesiyle avantajlıdır. Kalifiye elemana ihtiyaç duymadan, kısıtlı çalışanla süreçler yürütülebilmektedir. Yüksek teknolojik ürünler ve sistemler gerektirmemesi sebebiyle düşük yatırımlar yeterli olmaktadır. Tüm katı atık yönetim teknikleri içinde en ekonomik olanıdır. Ancak depolama alanlarının tesis yer seçimine karar verilmesi, özel şekilde tasarlanma ihtiyacı, projelendirmesinin maliyetli oluşu ve uzun zaman alması, tesisin dönemsel standartlarına uyulma zorunluluğu ve periyodik bakımı da zorlayıcı olabilmektedir. Aynı zamanda atık gömme tekniği döngüsel ekonomiye uygun değildir ve sürdürülebilir bir uygulama olarak görülmemektedir. 2015 yılında AB ülkelerinde sunulan “Döngüsel Ekonomi” paketinde, düzenli depolama alanlarının aşamalı olarak kaldırılması kararı verilmiştir. Bu direktifte atıkların yeniden kullanılması ve geri dönüşümünü engelleyecek her türlü tedbirin alınması ile daha iyi atık yönetim sisteminin kurulması amaçlanmıştır.

1.2.3.3. Yakma

Yakma işlemi, atıkların hacmini küçültme, stabilizasyonu sağlama ve temelde enerji elde etme amacıyla yanabilen kentsel katı atıkların toplanması ve yüksek sıcaklıklarda yakılmasını ifade etmektedir. Atık yakma, atık formundaki ürünlerin içerisindeki organik materyalin oksijenli ortamda yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak yakılmasını ifade etmektedir. Düzenli depolama yöntemi gibi atık yakma da tüm dünyada yaygın kullanılan bir yöntemdir. Her ne kadar atığın bileşimine bağlı olsa da organik atıklar (metalik olmayan) ve hastalık riskinden kurtulmak için tıbbi atıklar yakma işlemi çok fazla tercih edilmektedir.

Atık yakma işlemleri özellikle enerji üretim kaynağı olması açısından önemlidir. Fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi ve enerji talebinin artması, hükümetleri sürdürülebilir enerji kaynaklarına itmektedir. Atık yakma seçeneği enerji üretimine fayda sağlamaktadır ve farklı katı atıkları için kullanılmaktadır (Kothari vd., 2010). Yakma teknolojileri, katı atıklardaki depolanmış enerjinin geri kazanımını sağlamaktadır ve bu sebeple çeşitli türlerde ve fiziksel formlardaki tehlikeli atıkların işlenmesi için farklı yakma teknolojileri geliştirilmiştir. Atıkların içerdiği malzemeye göre enerji verme potansiyeli de çok yüksek olabilir. Enerji üretiminin %90'ının yakma ile sağlandığı bilinmektedir (Aynur, 2011). Atık yakma süreçleri yatırım ve operasyon açısından yüksek maliyetli olmasına rağmen sağladığı enerji ile birlikte uzun dönemde ekonomik açıdan avantajlı durum yaratabilmektedir.

Birçok gelişmiş ülkede düzenli depolama alanlarının olmaması veya yönetmeliklerinde yer verilmemesi sebebiyle evsel atıkların yakılması uygun görülmüştür. Özellikle 2005 yılında AB ülkeleri için çıkarılan “Döngüsel Ekonomi” programı sonrasında atık gömme yerine yakma teknolojileri üzerine daha çok çalışılmıştır. Atık gömmenin yasak olmadığı bölgelerde atık yakma, bu alanlara gidecek olan atıkların miktarını hem hacimsel hem de ağırlık bakımından azaltmaktadır. Fransa’da 210 tane evsel katı atık yakma tesisinin bulunduğu tespit edilmiş ve bu tesislerden en önemlilerinden olan St. Quen bölgesindeki çöp santralinde katı atıkların ortalama %30'unun yakıldığı tespit edilmiştir (Wikipedia, 2021). Almanya’da atık yönetimi ile ilgili yönetmelikler gereği malzemenin geri kazanılmadığı durumlarda atıkların yakılması zorunlu kılınmıştır.

1.2.3.4. Fermentasyon

Düzenli depolama ve yakma dışında, atıkların madde olarak geri kazanılması amacıyla organik atıkların oksijensiz ortamda parçalanmasını sağlayan anaerobik fermentasyon yöntemi tercih edilebilir. Fermentasyon, biyolojik olarak parçalanabilirliği yüksek organik atıkların arıtılması sırasında biyogaz üretimi için anaerobik çürütme işleminin uygulanmasıdır (Bolzonella vd., 2005). Özellikle fermentasyonla birlikte bileşiminde çoğunlukla metan ve CO₂ bulunan, tarımsal atıklardan elde edilen enerji kaynağı biyogazın üretilmesi önemlidir. Üretilen bu gaz enerji elde etmek için yakma sistemlerinde kullanılmaktadır. Fermentasyon işlemi sonucunda enerji geri kazanımına, organik gübre üretilmesine, atıklardaki koku ve mikropların azaltılmasına ve fosil yakıt

kullanımının azalmasına ulaşılabilir (csb.gov.tr, 2021).

1.2.3.5. Azaltma, Yeniden Kullanım, Geri Dönüşüm (3Rs) ve Geri Kazanım

Atık yönetiminde kaynakların en doğru şekilde kullanılabilmesi için atıkların hangi önceliklerde değerlendirilmesi önemli bir konudur. Atık yönetimi hiyerarşisi, atıkların mümkün olduğunca kaynağında azaltılmasına vurgu yapılan, atık yönetimi uygulaması için kabul edilen kılavuздur; atıkların önlenemediği durumlarda ise yeniden kullanımın araştırılmasına ve atıkların yeniden kullanılamaması durumunda ise geri dönüşümün teşvik edilmesine odaklanmaktadır (Ahmadi, 2017). Ancak atıkların geri kazanılmasıyla alakalı harcanan çabalar ve sonucunda elde edilen kazanımlara rağmen atıkların hiç oluşmaması, kaynağında önlenmesi tercih edilmelidir. Atık önleme dolayısıyla malzemelerin, parçaların veya nihai ürünlerin atık haline gelmeyecek şekilde tedbirlerin alınmasını içermektedir (Direktif 2008/88/EC). Bu doğrultuda birçok yasal yönetmelikler hazırlanmaktadır. Atık önleme çalışmaları ile birlikte ürünlerin hem kullanım ömürlerinin uzaması hem de atıkların olumsuz sonuçlarının yok edilmesi amaçlanmaktadır (Zacho & Mosgaard, 2016).

Atıkların önlenemediği noktalarda ise atık hiyerarşisine bağlı olarak atıkların yönetilmesi gerektiği önerilmektedir. Atık hiyerarşisi seçeneklerinin çeşitliliği, atıkları yönetirken izlenecek en sürdürülebilir doğru yönün kararını da zorlaştırmaktadır. Gharfalkar vd., (2015)'nin çalışmasında atıkların “kaynak kullanımı hiyerarşisinde” olduğu sıralamaya dayanarak yönetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu durum Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu hiyerarşinin temeldeki amacı, kaynakların daha iyi yönetilmesine yardımcı olmaktır. Kaynak kullanım hiyerarşisinin atık yönetimi aşağıdaki sırayla oluşturulmuştur.

- Atıkların yeniden kullanıma hazırlanması: Ürünlerin atık haline geldikten sonra temizleme, kontrol etme, tamir etme gibi küçük işlemlerle aynı amaçla ürünü kullanıcının tekrar kullanabilmesidir.
- Kullanılmış, onarılmış, yenilenmiş veya yeniden üretilmiş ürünlerin kiralanması, leasingi veya satılması yoluyla tekrar kullanılmasıdır (ikinci el, üçüncü el).
- Geri dönüşüm işlemleri: Yukarı dönüşüm, geri dönüşüm ve aşağı geri dönüşüm olacak şekilde, ürünün toplanıp, ayıklanıp çeşitli işlemlerden geçirilerek aynı veya farklı

değerdeki başka ürünlere dönüştürülmesidir.

- Diğer geri kazanım faaliyetleri: Malzeme geri kazanımına ilaveten, enerji geri kazanımı ve yakıt olarak diğer maddelerin geri kazanılmasıdır.
- Arıtma: Atık kalitesini arttıracak şekilde düzeltme işlemine ihtiyaç duyulmasıdır.
- İade: Bu aşamada üretilen atığın hiçbir amaca hizmet etmeyeceğine karar verildikten sonra atık bertarafı gerçekleştirilmektedir.
- Atık ihracatı: Ülkelerin atıklarını çöplüklerinden yönlendirerek, daha az gelişmiş ülkelere gönderebildiği işlemlerdir (Bartl, 2014).



Şekil 1: Kaynak Kullanım Hiyerarşisi

Kaynak kullanım hiyerarşisinde gösterildiği gibi atık üretiminin kaçınılmaz olduğu durumlarda öncelik 3R'ye bağlı kalacak şekilde azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm olarak sıralanmaktadır. Atık yönetiminin 3Rs stratejisi, gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak kullanılan sürdürülebilir ve kabul edilebilir bir stratejidir. 3Rs stratejisi birçok araştırmacı tarafından farklı konu başlıklarında incelenmektedir. Bu üçlü stratejinin yeniden kullanım (*reuse*), yeniden üretim (*remanufacture*) ve geri dönüşüm (*recycle*) (Gehin vd., 2008; Nagalingam vd., 2013) ya da azaltma (*reduce*), geri kazanım (*recovery*) ve geri dönüşüm (Wang & Hsu, 2010) olacak şekilde değerlendirildiği görülse de 3Rs'nin bilinen ve kabul edilen en yaygın temel kullanımı azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşümdür (Sakai vd., 2011; Yan & Feng, 2014).

Atık üretiminin önlenemediği yerlerde atıklar çevresel ve ekonomik olarak yönetilmelidir. Meydana gelen katı atık miktarını azaltmak için en etkili strateji, işlenmemiş hammaddelerin tüketimini minimum seviyede tutmak ve atık malzemelerin

hem yeniden kullanımını hem de geri kazanım oranını artırmak olmalıdır. Bu doğrultuda azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm faaliyetleri atık yönetiminde birlikte kavramsallaştırılan ve değerlendirilen bir konu haline gelmiştir (Mohanty, 2011; Chowdhury vd., 2014; Koksharov vd., 2019). Ürünlerin üretiminde, dağıtımında ve kullanımında kaynak kullanımının azaltma, maksimum düzeyde yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanım ile en aza indirgenmesi 3R (Azalt, Yeniden Kullan ve Geri Dönüştür) kavramı ile somutlaştırılmıştır (Reza & Yousuf, 2013).

1.2.3.5.1. Azaltma (Reduce)

Kaynak azaltma atık yönetimi içindeki en önemli seçeneklerin başında görülmektedir. Azaltma, üretim birimi başına daha az malzeme kullanmaya veya ürün tasarımında daha az maddesel olmaya atıfta bulunmaktadır (Worrell & Reuter, 2014). Genellikle atık önleme olarak adlandırılan kaynak azaltma, daha az tüketmek ve daha az atmaktır. Atık azaltma yöntemi imalat süreçlerinde daha az malzeme gerektirerek veya daha az atık üreterek sağlanmaktadır. Kaynak azaltma atık yönetimi içinde kritik bir yerdedir, çünkü temelde atık oluşumunu engellemeye dayandığı için stratejiktir.

Atık azaltmanın fizibilitesi, içinde yer aldığı tüm üretim sistemindedir. Bortoleto vd. (2012), israfi önlemenin ekonomik kazanç olduğunu ve israfi önlemek için net talimatların gerekli olduğunu teyit etmektedir. Bir ürünün daha az hammadde veya malzeme ile üretilmesi daha az enerji tüketilmesini de etkilemektedir. Bu durum hem hammadde malzemelerinin hem de ihtiyaç duyulan enerjinin daha düşük maliyetlerde olmasına katkı sağlayarak, ekonomik açıdan faydalı bir durum yaratmaktadır. İkinci olarak daha az kaynakla üretilen ürünler lojistik süreçlerinde de avantajlı durumdadır. Maliyet avantajına sahip olan üreticiler daha düşük fiyatlarda ürünlerini piyasaya sunarak, tüketicilerin daha fazla alım gücüne sahip olmasına katkı sağlamaktadır. Hem hacimsel hem de ağırlık olarak sağlanan bu avantajlı durum ile araçlar daha fazla yüklenebilmektedir. Taşıma maliyetlerindeki avantaj ile birlikte çevreye yayılan sera gazı yayılımındaki indirgeme tedarik süreçlerinde verimliliği arttırabilmektedir.

Kaynakta azaltma, tasarım ve üretim sırasında ürün kalitesinin ve maliyet etkinliğinin korunmasına yönelik bir yaklaşım olan eko tasarım uygulanarak gerçekleştirilmektedir (Bârsan ve Bârsan 2014). Eko tasarımlar, israfi önlemek için kullanılacak malzeme türüne (çevre dostu malzemeler, geri dönüştürülmüş malzemeler), malzeme girdisinin

azaltılmasına, üretim sırasında israfın önlenmesine, ambalajın azaltılmasına veya ürünün işlevselliğinin optimizasyonuna (birden çok işlevi içeren) odaklanabilmektedir (Wimmer & Züst, 2003). Özellikle ürün ambalajlarında kaynak azaltma konuları önem verilmesi gereken alanlardandır.

1.2.3.5.2. Yeniden Kullanım (Reuse)

Günümüzde tüketimi yavaşlatmanın çok mümkün olmaması sebebiyle, ürünler ve malzemeleri atık akışından uzaklaştırmak ve onların yaşam ömürlerini daha uzun tutmak önemli odaklanma konusudur (Bulkeley & Gregson, 2009). Yeniden kullanım yöntemi, ürünlerin daha uzun sürelerde kullanılmasına odaklanan atık yönetiminin büyük bir parçası olarak görülmektedir. Bu süreçte malzemelerin orjinal veya ikincil formlarda birden fazla kullanılmasına imkan verilmektedir. Avrupa Birliği mevzuatı tanımına göre yeniden kullanım, ürünlerin atık haline gelmesini, yani atıkları uzaklaştırma amacıyla toplama sistemine girmesini veya başka birime teslim etmesini gerektirmektedir. Yeniden kullanımın temeli, ürünü hammaddeden itibaren üretmek yerine tekrar kullanılabilir hale getirerek ihtiyaç duyulan enerji ve malzemelerden kazanmaktır. Yeniden kullanım, atık ürünlerin tamir, bakım gibi küçük işlemler sonucunda halen kendi özelliğini ve kimliğini koruması sebebiyle tekrar kullanılabilir durumudur.

Bu yeniden kullanım konseptinde israfı önleyici olarak uygulanabilecek işlemler, ürün sahibinin değişmediği ve mal sahibinin üründe ihtiyaç duyduğu değişiklikleri aynı şekilde gerçekleştirmeye devam edebildiği yenileme (Pires & Martinho, 2019) olarak ifade edildiği gibi daha yaygın olarak herhangi bir uyarlamaya ihtiyaç duymadan ve 'yeni gibi' çalışan bir ürünün ikinci bir tüketicisinin olması şeklinde de tanımlanmaktadır (De Brito & Dekker, 2003). Yeniden kullanım, çevre dostu tasarımlarla, onarılabilirliğin geliştirilmesiyle, bakım uygulamalarıyla ve ürün parçalarının yeniden kullanılabilir formda olmasıyla sağlanabilmektedir. Kavrama dair yapılan birçok tanımda farklı detaylar üzerinde durulmuştur. Yeniden kullanımda Ghisellini vd., (2014) ürünün aynı amaç için kullanılmasını; Silva vd., (2013) yenilemeye ihtiyaç duyulmamasını ve Fleischmann vd., (1997) yeniden tamir gerektirmemesini ifade etmiştir. Literatürde ise daha yaygın şekilde yeniden kullanım ürünlerinde, kalite kontrollerinin, temizliğin ve küçük onarımların yaygın olduğu öne sürülmektedir (García-Rodríguez vd., 2013).

1.2.3.5.3. Geri Dönüşüm (Recycle)

Geri dönüşüm, kullanım dışı kalan veya atık olarak ayrılan ürünlerin daha yüksek ya da daha düşük kalitedeki malzemelere dönüştürülmesi amacıyla yapılan işlemlerdir. Geri dönüşüm, ikincil malzemeler olarak adlandırılan atık ürünlerin tekrar malzeme şeklinde elde edilerek tedarik zincirine döndürülmesi olarak tanımlanabilir (Worrell ve Reuter, 2014). Geri dönüşümde atık malzemeler, orjinal veya başka amaçlarla ürünlere veya malzemelere dönüştürülmesi için yeniden işlenmektedir ve böylelikle malzemelerin geri kazanımı sağlanmaktadır. Malzeme tüketimini azaltma ve nitelikli atıkların değerlendirilmesi amacıyla yapılan geri dönüşüm faaliyetlerinin temelindeki fikir, doğal kaynakları verimli kullanarak onların korunmasını sağlamaktır. Özellikle endüstriyel ürünlerin geri dönüşümü kaynakların korunmasında kritik bir roledir. Birçok farklı malzeme içeriğindeki endüstriyel ürünler geri dönüşüm sistemlerinde yer alabilir ve malzeme olarak tekrar kazanılabilmektedir. Bu durum da kullanılan doğal hammadde kaynaklarının tükenmesini önleyebilmektedir. Diğer taraftan farklı içerikteki endüstriyel atıkların geri dönüşümü her zaman mümkün olmayabilir. Literatürde bu durum endüstriyel malzemeleri üç gruba ayırarak incelenmektedir (Zhong vd., 2000):

- a) Geri dönüşüme ekonomik ve teknik olarak uygun malzemeler (plastik, kağıt, çoğu metal gibi),
- b) Geri dönüşüme teknik olarak uygun, fakat ekonomik olarak uygun olmayan malzemeler (ambalaj malzemeleri),
- c) Geri dönüşüme teknik olarak uygun olmayan malzemeler (deterjanlar, koruyucular, gübreler gibi).

Endüstriyel atıkların geri dönüşümünde ilk olarak teknik olarak uygun maddelerin seçilmesi ve geri dönüşüm sürecinin ekonomik açıdan uygunluğu belirlenmelidir. Atıkların ekonomik uygunluğu için ilk olarak Atık Çevre Direktifinin aşağıda yazan ilk üç maddesi dikkate alınmalıdır. Atık Çevre Direktifi, atık ürünlerin geri dönüştürülebilir veya ikincil hammadde olmalarını sağlamak için atık sonu kriterleri tanımlayarak, ekonomiye atık ürünlerin girişini teşvik etmeyi amaçlamıştır. Direktif tarafından tanımlanan kriterler şu şekildedir (Avrupa Parlamentosu ve Konseyi 2008):

- Nesneler belirli amaçlar için yaygın olarak kullanılmalı,

- Böyle bir nesne için pazar veya talep olmalı,
- Nesne belirli amaçlar için teknik gereksinimleri karşılamalı ve ürünler için geçerli olan mevcut mevzuat ve standartlara uygun olmalı,
- Nesnenin kullanımı genel olarak olumsuz çevre veya insan sağlığı etkilerine yol açmamalıdır.

Ancak bu şartları sağlayan atık ürünlerin geri dönüştürülmesi ve malzeme olarak kazandırılması anlamlı olacaktır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin orijinal ürün formlarının veya yapılarının değişebilmesi ve herhangi yerde yeniden kullanılabilmesi (Graedel vd., 2011) teknik olarak bir ihtiyaca cevap verecek şekilde kullanılmasını gerektirir. İhtiyaçları karşılayabilecek özellikte olan bu malzemeler kendi pazarını yaratarak piyasada talep görebilir ve ürünün ekonomik değeri ortaya çıkabilir. Diğer açıdan belirli standartlara veya gerekliliklere bağlı olarak yürütülen süreçlerin uygunluğu, ürünlere olan güveni arttırarak onları daha fazla tercih edilebilir kılabilmektedir.

Geri dönüşüm faaliyetleri kendi içerisinde ileri geri dönüşüm, geri dönüşüm ve aşağı geri dönüşüm olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. İleri geri dönüşüm, geri dönüştürülmüş malzemenin daha önemli veya daha yüksek çevresel değerle yeniden kullanıldığı ve zamanla geri dönüştürülmüş malzemenin değerini artırabilen süreçlere atıfta bulunmaktadır (Chandler & Werther 2014). İleri geri dönüşüm (*upcycling*), daha yüksek değer ve kalitenin elde edildiği dönüştürülme işlemleridir. Otomotiv, tekstil, plastik veya alüminyum gibi sektörler özellikle ileri dönüşüme imkan veren başlıca alanlardır. Niero vd. (2017) tarafından sunulan vaka çalışmasında, Carlsberg'in alüminyum kutuları için eko-verimliliği ve eko-etkililiği teşvik eden bir metodolojisinin uygulanması sonucunda malzemelerin sürekli ileri dönüşüme teşvik edildiği vurgulanmıştır. İkinci grup olan geri dönüşümde ise, atıkları geri dönüştürmek için kullanılan süreç zamanla ürünün veya malzemenin değerini koruyacak şekilde gerçekleşmektedir. Atık malzemeler tekrar işlenerek geri dönüştürüldüğünde ilk ürünün değerine sahip olurken, burada tam kapalı döngünün varlığından bahsetmek doğru olacaktır. Kapalı döngünün en büyük örneklerinden biri olan cam atık geri dönüşümünde, malzemeler aynı değerinde orijinal forma dönüşebilmektedir. Aşağı geri dönüşüm ise geri dönüştürülen malzemenin zamanla değerinin azaldığı, daha az değerli süreçlerde kullanıldığı veya daha düşük kaliteli malzemenin elde edildiği geri dönüşüm işlemidir (Chandler & Werther 2014). Çoğu

zaman belediye atık akışlarının (kağıt/karton, plastik) (Pires & Martinho, 2019), inşaat atıklarının fiilen geri dönüştürülmesi aşağı dönüşüm olarak kabul edilmektedir. Bir takım beton kırma, yıkım gibi işlemlerden sonra ortaya çıkan çakıllı kumlar, yol yapımında dökme dolgu, dolgu drenajı, alt temel veya temel malzemesi olarak kullanılmaktadır (Florea ve Brouwers, 2013).

Geri dönüşüm işlemleri, özellikle madencilik malzeme veya kaynakların tüketiminden kaçınmanın herhangi şekli için kullanılmaktadır (Ghisellini vd., 2014). Malzemelerin geri dönüşümle tekrar kazanılmadığı durumlarda orjinal ürünlerin hammaddeden itibaren yeniden üretilmesi gerekmektedir. Bu durum hem doğal kaynakların azalmasını hem de tükenmesini gündeme getirmektedir. Atık yönetim sistemlerinde geri dönüştürülen malzemelere bağlı olarak kaynak kullanım verimliliğinin artırılması ve çevresel yükün azaltılması değerli bir konudur. Aynı malzemenin hem geri dönüşümle hem de birincil üretimle üretilmesi mümkünken, süreçte ihtiyaç duyulan elektrik, yakıt ve su gibi kaynaklara da ayrı miktarlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle ürünün geri dönüşüm işlemleri sonucunda üretilmesi ile hammaddeden itibaren üretilmesinde gerek duyulan fiziksel ve kimyasal işlem sayısındaki fark bu durum üzerinde etkili olmaktadır. Çin hükümeti piyasadaki birçok hurda aracın toplatılmasını sağlayarak, yeniden üretim önceliğine sahip motorların, direksiyonların, şanzımanların, ön ve arka aksların geri dönüşüm sistemlerinde işlenmesine olanak sağlamış ve hammadde tedariğini kolaylaştırmıştır (Wang vd., 2019). Örneğin bir metal kutunun geri dönüştürülmesi için ihtiyaç duyulan adımlarla, maden cevherinden maddenin çıkarılması ve saflaştırmasını içeren birincil üretim aşamaları birbirinden oldukça farklılaşmaktadır. Dolayısıyla süreç içindeki çevresel yük aynı olmamaktadır.

Çevresel etkilerin değerlendirilmesi ile birlikte yenilenmeyen kaynak kullanımı veya kaynakların sorumsuzca tüketilmesi birçok ekonomik problemi de ortaya çıkarmaktadır. Kaynakların kıtlaşması üreticilerin daha yüksek malzeme maliyetleri ile karşılaşmasına neden olurken, üretim maliyeti artan ürünler de tüketicilerin alım gücünü etkilemektedir. Yani olay mikro boyuttan makro boyuta her kesimin konusu haline gelmektedir. Diğer taraftan kaynak ulaşılabilirliğinin dönemsel olarak değişebilmesi de malzemelerin fiyatlarındaki dalgalanmalara sebep olarak, pazar dinamiğini belirsizleştirebilmektedir. Fiyatlardaki beklenmedik yükselişler kurumların ekonomik istikrarını da olumsuz etkileyebilmektedir. Yaşanan bu etkilere geniş çerçeveden bakıldığında sadece kurumlar

değil uzun dönemlerde hükümetler de ekonomik dalgalanmalarla karşı karşıya kalabilmektedir. Dolayısıyla kaynak geri kazanımında geri dönüşüm önemli stratejik çabalardan biri olarak görülmelidir. Geri dönüşümün üretim süreçlerindeki en başta malzeme ve enerji maliyetlerinde sağladığı kazanç, kurumların ekonomik açıdan gelişiminde etkili olmuştur. Hem ekonomik hem çevresel hem de sosyal yönden sağlanan avantajlı durumlar sürdürülebilir kalkınmanın temelidir. Bu sebeple atık malzemelerin geri dönüşümü, endüstriyel süreçlerin sürdürülebilirliğine ve kurumsal sürdürülebilir gelişimine katkıda bulunmaktadır.

Geri dönüşüm uygulamaları, fiyatlar, malzemelerin kullanım şekli, malzemelerin türü ve özellikleri ve geri dönüşümde neden olacağı malzeme kayıpları gibi birçok faktöre bağlıdır (Geyer vd., 2016) ve bu durum geri dönüşümün ekonomik olup olmasını etkilemektedir. Geri dönüşümün hangi çeşidi olursa olsun belirli miktarlarda yatırım gerektiren süreçlerdir. Geri dönüşüm işlemlerinde, parçalama, eritme ve (neredeyse) saf malzemeleri yakalamak için diğer işlemler de dahil olmak üzere pahalı teknolojik ekipmanlar kullanılabilir (Yan & Feng, 2014). Geri dönüşüm stratejilerinde oluşturulacak kapalı döngü tedarik zincirlerinde, atıkların tedariği, geri dönüşüm sonrası yeniden üretilecek ürünlerin talepleri, süreçlerin net karlılığı, ihtiyaç duyulan yatırımlar, bertaraf işlemleri, çevresel ve operasyonel maliyetler de kritiktir. Bu pahalı sermaye gereksinimi ve operasyonel maliyetlerinin yüksek olması, firmaları kısıtlayan bir durumdur. Ancak kurumların bu süreci uzun dönemde ekonomik yatırım olarak görmeleri gerekmektedir. Bir diğer önemli nokta geri kazanılan ikincil malzemeler, birincil malzemelere kıyasla çoğu durumda nispeten düşük parasal değere sahiptir (Velenturf & Jopson, 2019). Kalite sorunu olmayan ikincil malzemelerin pazarı da bu doğrultuda gelişmekte ve döngüsel ekonomi büyümektedir. Artan kaynak verimliliğinin sonucunda bu işletmelerin önümüzdeki 10-20 yıl içinde en iyi performans gösteren ekonomilerden olması beklenmektedir (Velenturf & Jopson, 2019).

Geri dönüşüm işlemlerinde diğer önemli konu kalitedir. Atıkların ayrıştırılması ve seçilmesi sürecinde farklı kalite seviyelerinin kullanılabilmesi (De Brito & Dekker 2003), geri dönüştürülen ürünlerin değerini ve pazardaki hammaddelerle olan rekabeti zor duruma getirebilir (Agrawal vd., 2015). Ancak cam, kağıt veya birçok metal malzemede çok az kalite kaybı yaşanmaktadır, bazı malzeme çeşitlerinde de kalite aynen korunmaktadır. Geri dönüşüm işlemine girecek atık malzemelerin özellikleri ulaşılacak

kalite düzeyinde belirleyicidir. Geri dönüştürülmüş malzemelerin sahip olduğu kalite düzeyi endüstriler tarafından kabul edilebilir sınırlarda kalırsa ve hatta malzemede kalite kaybı yaşanmazsa geri dönüşümün süreç üzerindeki etkililiği ve verimliliği yüksek olmakta; bu durum da geri dönüşümü teşvik edici bir unsur olabilmektedir.

Malzemeler, yapısına, kullanım şekillerine veya hangi endüstrilerde kullanılacağına göre farklı işlemlerden geçirilerek farklı ekonomik ve çevresel faydalar sunabilir. Günümüzde metaller, camlar, termal plastikler ve diğer birçok mühendislik malzemeleri büyük ölçüde geri dönüştürülmektedir. Özellikle atık geri dönüşümündeki ürün gruplarının başında, endüstriyel süreçlerde hammadde olarak tekrar kullanılan ve çevreye verdiği riskleri düşüren endüstriyel ürünler bulunmaktadır. Bu alt kategoride tanımlanan başlıca malzeme grupları, demir ve çelik, alüminyum, bakır metal hurdaları, kurşun ve kalaydan oluşan hurdalar, plastikler, kağıt, tekstil, cam ve diğer metal ürünlerdir.

1.2.3.5.4. Geri Kazanım (Recover)

Geri kazanım faaliyetleri onarım, yeniden üretim ve ürünlerin geri dönüştürülmesi yoluyla malzeme ömrünü artırma stratejilerini içermektedir (Jayaraman vd., 1999). Ürün geri kazanım yönetimi, kullanılmış ürünlerin ekonomik değerini geri kazanmanın yanı sıra nihai atık miktarını azaltmayı ve daha iyi çevresel performans göstermeyi amaçlamaktadır (Wang vd., 2019). 2015 Resmi Gazete’de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği’nde EK-2/B’de Geri Kazanım İşlemleri 13 farklı şekilde yer almaktadır. Bunlar; (Resmi Gazete, 2015) enerji üretimi amacıyla kullanım, çözücü ıslahı/yeniden üretimi, diğer organik malzemelerin geri dönüşümü (kompostlama veya biyolojik dönüşüm gibi yöntemlerle), metal türevli malzemelerin geri dönüşümü, diğer inorganik malzemelerin geri dönüşümü, asit veya bazların yeniden üretimi, çevresel kirliliğin azalımı için kullanılan bileşenlerin geri kazanımı, katalizör bileşenlerinin geri kazanımı, yağların yeniden kullanımı, ekolojik iyileştirme sağlayacak arazi ıslahı, bu işlemlerden kazanılacak atıkların kullanımı, atıkların burada ifade edilen tüm işlemlerden herhangi birine göre değişimi ve son olarak bu işlemlerden herhangi birine girene kadar atıkların geçici depolanması şeklinde yönetmelikte yer almaktadır.

Geri kazanım kavramı içinde geri dönüşümdeki benzer tanımların, açıklamaların, amaçların ve kazanım işlemlerinin yer alması, geri dönüşüm ve geri kazanımın birlikte kullanılmasına neden olarak, aralarındaki ince farkın çoğu zaman ihmal edilmesine neden

olmuştur. Bu iki atık yönetim uygulamasının ortak paydası; atık ürünlerin tekrar malzeme olarak geri dönüşümle kazanılmasına olanak sağlamasıdır. Malzeme geri kazanımının olduğu araştırmalarda ve uygulamalarda iki kavramın da kullanılması yanlış olmayacaktır. Ancak iki atık yönetim uygulaması arasındaki fark Worrell ve Reuter'in (2014) "Geri Dönüşüm El Kitabı'nda ele alınarak, geri kazanımın hem geri dönüştürülebilir ürün ve malzemelerin toplanması ile hem de atık akışlarından "enerji geri kazanımı" ile ilgili olduğu şeklinde ifade edilmiştir. Yani geri kazanım faaliyetleri yeniden üretim, onarım, geri dönüşüm gibi süreçler ile birlikte kaynak kazanımını sağladığı gibi kaynakların kurtarılamadığı durumlarda enerji kazanımına da odaklanmaktadır.

Enerji kazanımı, malzemenin yakılarak elde edilmesi ile oluşmaktadır (Bölüm 1.2.3.3). Enerji kaynağı olarak kullanılabilen malzemelerin birçoğu geri dönüştürülemeyen değerli biyokimyasal bileşiklerden oluşmaktadır (Morseletto, 2020) ve malzeme olarak kazanılamayan atık, enerji olarak kazanılmaktadır. Enerji geri kazanımının temelinde ürünlerdeki malzemelerde depolanan (bir kısmının) enerjinin geri kazanılması vardır. Enerji geri kazanımı için kurulan atıktan enerjiye (Waste to Energy/WTE) dönüşüm tesisleri, atıklardan enerji elde etmek ve aynı zamanda düzenli depolama sahalarına gönderilen katı atık miktarını azaltmak için önemlidir (Khoo, 2019). Ayrıca organik atıklardan enerji geri kazanılması sonrasında ortaya çıkan kalıntılar, düşük karbonlu toprak geliştiriciler olarak tarıma geri döndürülebilmektedir. Bu durum toprağın kalitesi ve toprakta büyüyen gıdaların güvenliğini arttırmaktadır.

Bunların yanı sıra geri kazanım faaliyetlerinde dikkat edilmesi gereken konular vardır. Bunlardan biri enerji geri kazanımı için yakma sırasında ortaya çıkan çeşitli gazlardır. Birçok endüstri raporunda, atıklardan enerji kazanım sistemlerinde önemli miktarlarda sera gazı emisyonu üretildiği gösterilmiştir (Kuo vd., 2011). Bu durumun hem çevresel hem de toplumun sağlığı üzerinde etkisi büyüktür. Yapılan işlemlerin iyi teknolojiler tarafından kontrollü yapılması önemlidir. Bir diğeri gittikçe daha karmaşık ürün kategorileri ve ürün bileşimlerinin oluşmasıdır. Her ürün veya bileşenin kendi özelliklerine (kalite, maliyet, fayda vb.) göre çeşitli değer kazanım seçeneklerine sahip olabilmesi, uygun yöntem kararlarının verilmesini zorlaştırmaktadır (Wang vd., 2019). Bu nedenle geri kazanım faaliyetlerinin maksimum faydayı verecek şekilde doğru yöntemlere ve uygun malzeme kombinasyonlarına karar vermek önemlidir. Ayrıca bu

sistemlerdeki enerji tüketimi, su tüketimi, karbondioksit emisyonu ve atık alanı gibi çevre göstergeleri değerlendirilmelidir.

1.2.3.5.4.1. Plastik Geri Dönüşümü

Plastikler, çeşitli kimyasal ve mekanik özelliklerde olan, esas olarak petrokimyasal hammaddelerden üretilen organik polimerlerdir. Plastiklerin düşük yoğunluğu, güçleri, sağlamlıkları, kolay şekillenmesi, üretim yetenekleri, yavaş bozunması ve düşük maliyetleri sebebiyle fazla kullanılan malzemelerdir. Yayınlanan son raporlarda 2015 yılında küresel plastik üretiminin 322 milyon tona, 2019 yılında 368 milyon tona ulaştığı belirlenmiştir. (Plastic Europe, 2020). Plastik malzemelerle özellikle gıda ambalajlarında, otomotiv sektöründe, beyaz eşyalarda, elektronik aletlerde ve medikal sektöründe karşılaşmaktadır. AB-15 üye ülkelerinde plastiklerin %38'i paketlemede, %21'i inşaatta, %8'i ev eşyalarında, %7'si otomotiv sektöründe, %6'sı elektroniklerde, %4'ü mobilyada, %2'si tarımda ve %14'i diğer alanlarda kullanılmaktadır (Plastics Europe, 2011). Kullanılan plastikler termoplastikler ve termoset olarak ayrılmaktadır; termoplastikler geri dönüşümü daha kolay olan gruptur ve termosetler ise kimyasal reaksiyona girmesi sebebiyle geri dönüşümü nistepen daha zor olandır (Shen & Worell, 2014). Ana termoplastikler polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivini klorürdür (PVC). PE, polimer zincirlerinin plastikte dağılma şekline bağlı olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) olarak alt bölümlere ayrılmaktadır. PP özellikle otomotiv yan sanayide, PS beyaz eşya ve elektronik parçalarda en çok kullanılan malzeme grubudur ve bu ürünlerin geri dönüşümü de kimyasal işlem gerek duymadığı için termosetlere nazaran daha kolaydır.

Küresel düzeyde birçok şekilde kullanılan plastik malzemeler kullanım sonrası veya üretim süreçleri içerisinde çeşitli problemlerden dolayı atık olarak ayrılmaktadır. World Bank tarafından yayınlanan çevre raporunda 2016 yılında toplam küresel atık üretiminin %12'sini plastiklerin oluşturduğu açıklanmıştır (World Bank, 2020). Günümüzde kullanılan plastiklerin yaklaşık %50'sinin tek kullanımdan sonra çöpe atıldığı görülmüştür (Plastic Oceans International, 2020). Plastik atıklar ekolojik ortamları etkileyen parçalanamazlık sorunu nedeniyle büyük tehdit unsuru haline gelmiştir (Hopewell vd., 2009) ve tüm dünyada çevresel bir problem olmuştur.

Plastik içerikli ürünlerin geri dönüşümü plastikle ilişkili çevre sorunlarını azaltmak için kilit stratejilerden biridir. Bu malzemelerin geri dönüşümü plastiklerin geri kazanılmasını sağlayarak, yeni ürünün daha kolay üretilmesine destek olmaktadır (Ezeah vd., 2013). Plastik atıkların döngüsel ekonomi içinde yeniden kullanılacak şekilde geri dönüştürülmesi veya kompostlama işlemiyle farklı tasarımlarda yeni ürün haline gelmesi sağlanmaktadır (World Economic Forum vd., 2016). Böylelikle döngüsel ekonomi içerisinde plastiklerin kaynağı korunarak, fosil yakıtların kullanımı sınırlandırılmaktadır. Plastik atıkların geri dönüşüm işlemleriyle ikincil hammadde olarak teknik, ekonomik ve yasal açıdan onaylanması, döngüsel ekonomide birincil üretimdeki plastiklerin yerini alacak şekilde hedeflenmesi açısından önemlidir (Simon, 2019). Geri dönüşüm ile birlikte geri kazanılan polimerler, birçok kez aynı aşamadan geçebilme özelliklerine sahip oldukları için sürdürülebilir malzeme yönetimine, aynı zamanda sürdürülebilir üretime katkıda bulunmaktadır.

Plastik atık yönetimi 7 farklı sınıflandırma ile açıklanmaktadır; mekanik geri dönüşüm, kimyasal geri dönüşüm, piroliz, gazlaştırma, hidrokraking, depolimerizasyon ve enerji kazanımıdır (Davidson vd., 2021). Farklı plastik atık yöntemlerinde firmaların kendi amaçları ve bir takım önceliklerine göre hangisini tercih edeceği değişmektedir. Yerel kirlilik, enerji kullanımı, sera gazı emisyonu, maliyetler veya gerek duyulan yatırımlar gibi kriterler verilecek kararlarda etkili olmaktadır. En popüler plastik atık yönetimi düzenli depolama olarak görülmüştür. Plastik malzemelerin içerisinde bulunan karbon sayesinde ürünlerin yakılmasında ortaya çıkacak CO₂ gazı, parçalanması uzun yıllar alan atıl plastik içinde toprakta depolanır. Bu nedenle düzenli depolama, karbonun atmosfere hızlı salınımını önlemektedir (Davidson vd., 2021). Ancak düzenli depolama sahasının kullanılması sonucunda ilgili faaliyetlerde herhangi ürün, yeni bir kaynak olarak elde edilememektedir. Çöp sahasına gönderilen plastik ürünler, değer zincirinde kaybolup gitmektedir. Bu yöntemle yapılan plastik atık bertarafı, döngüsel ekonomi modeliyle uyumlu değildir (World Economic Forum vd., 2016).

Plastik atıkların kimyasal geri dönüşümünde ise atıklar monomerlere, oligomerlere veya çeşitli fazlardaki hidrokarbon karışımlara ayrılmaktadır. Kimyasal geri dönüşüm, daha çok karmaşık ve kontamine atıklar için tercih edilen bir seçenektir (Ragaert vd., 2017). Piroliz işlemi, katı, sıvı ve gaz şeklindeki hidrokarbon ürünleri üretecek şekilde atıklardaki hidrokarbon bağlarını parçalamak için malzemelerin yüksek sıcaklıkta termal

ayırıştırma işlemi iken; gazlaştırma, piroliz işleminin ardından hidrojen ve karbonmonoksit yönden zengin sentez gazı üretmek için atıkların parçalanmasında ısı ve kontrollü buhar, oksijen ve/veya hava içeriğinin kullanılma işlemidir (Davidson vd.,2011). Hidrokraking, plastik atıktaki karbon-karbon bağlarını kırmak ve katı, sıvı ve gaz halinde hidrokarbonlar üretmek için ısı ve basıncın kullanılma işlemidir. Depolimerizasyon ise plastiğin bileşen monomerlerini ve oligomerlerini elde etmek için kullanılmasıdır. Tüm plastik atık yönetim tekniklerinden en az tercih edilen yöntem kimyasal geri dönüşümdür. Bunun sebeplerinden biri dönüşüm alt yapısındaki eksiklerdir. Mekanik geri dönüştürülmeyen plastik türevli termosetlerin düzenli depolama alanlarına gönderilmesinden ziyade; yöntemin plastik atıkların iyileştirilmesinde potansiyel bir seçenek olarak görülmesi gerektiği de vurgulanmaktadır (Plastics Europe, 2020). Çünkü mekanik olarak geri dönüştürülmeyen atıklardan ‘monomer’ yapıya dönüştürülmesini sağlayan kimyasal geri dönüşüm yöntemidir.

Polimerlerin endüstriyel ekolojisi ile ilgili olarak, birincil, ikincil, üçüncül ve dördüncül geri dönüşüm olmak üzere plastik katı atıkların geri dönüşümünde dört ana yaklaşım vardır (Hopewell vd., 2009). Birincil ve ikincil geri dönüşüm, mekanik geri dönüşüm işlemi içinde yer almaktadır. Mekanik geri dönüşüm, plastik atıkları ayırma, hacimsel veya boyut küçültme, yeniden eritme ve üretim teknolojilerini içeren yeni ürünlere dönüştürmek için fiziksel arıtmayı içermektedir (Al-Salem vd., 2009). Mekanik geri dönüşüm, geri dönüştürülmüş plastik paletleri üretme ve plastik atıkları eritmek için ekstrüzyon, ısı ve ayırma tekniklerinin kullanılma işlemidir (Davidson vd., 2021). Birçok çalışmada özellikle plastiklerin çevreye olan etkileri (enerji, gaz salınımı vs.) açısından mekanik geri dönüşüm yönteminin tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Perugini vd., 2005; Piemonte, 2011). Mekanik geri dönüşüm, karmaşık plastik atık karışımlarıyla karşılaşılacak zorluklara rağmen, plastik atıkların geri dönüştürülmesi için kullanılan temel teknolojidir (Ulusal Çevre Ajansı, 2017). Ancak termosetler gibi bazı plastiklerde mekanik geri dönüşüm yöntemi kullanılmamaktadır. En yaygın kullanılan mekanik geri dönüşümün adımları şu şekildedir:

1. Aşama: Gelen malzemeler tasnif edilmektedir. Bu süreçte malzeme kalitesini etkileyeceği için karışık plastiklerin ayrılmasında TIR (Spektrometre Cihazı), Yakın kızılötesi Spektroskopi (NIR), X-Ray veya RAMAN gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Ürünleri ayırmanın süreçler üzerindeki etkisi ve verimliliğe katkısı

büyüktür.

2. Aşama: Plastik türevli malzemelerin verimli depolanması ve işlenmesi için manuel veya otomatik olarak ayırma işlemi yapılmaktadır. Bu aşamada uygulanacak yöntem malzemenin yoğunluğuna veya yüzey özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Geri dönüşüm süreçlerinde yüksek kalitedeki ürünlerin elde edilmesi için girdilerin en az % 98 saflıkta olması beklendiği için (Shen & Worell, 2014), malzeme ayrılmasına ayrıca önem verilmektedir.

3. Aşama: Plastikler paletler veya pullar gibi daha kolay işleme girmesini sağlayan ince formlara küçültülmektedir. İnce formlar için plastiklerin öğütülmesi veya parçalanması gerekmektedir (Zia vd., 2007). Bu işlemde atıkların hacimsel olarak kapladığı alanının küçültülmesi esastır.

4. Aşama: Granül haline gelen malzemeleri dış malzemelerden arındırmak, fire vermemek ve en önemlisi daha kaliteli ürünler elde edebilme amacıyla sıcak veya soğuk su ile yıkama işlemi yapılır. Soğuk su kullanımı çoğu zaman kimyasalların ve mekanik enerjinin kullanımının artmasına neden olmaktadır. Plastik atıkların ayırma ve temizleme işlemlerinde genellikle ilave adımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Al-Salem vd., 2017). Kirlenmiş malzemelerden aranan malzemeler uygun ısıda kurutularak diğer aşamaya geçilir. Bazı sistemlerde parçalama işleminden önce de yıkama ve kurutma işlemi yapılmaktadır.

5. Aşama: Son olarak temizlenen plastik malzemeler yeniden işlenerek geri kazanılmaktadır. İşlemin temeli plastik malzemelerin eritilmesine ve kalıplanmasına dayanmaktadır. Bu noktada malzemeler ya yeni bir şekle dönüştürülebilir ya da granül durumuna getirilebilir. Plastiklerin yeniden işlenmesinde çeşitli teknikler kullanılmaktadır, en çok bilineni ve kullanılanı ekstrüzyondur. Ekstrüzyon yöntemi, hem işlenmemiş hammaddeler hem de geri dönüşüme girecek malzemelerden için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ekstrüde etmek, erimiş plastik partiküllerin istenen sıcaklığında, ısıtılmış bir varilin içine basınç yardımıyla yavaş yavaş itilmesi işlemidir (Shen & Worell, 2014). Ekstrüde edilen malzemelere enjeksiyon kalıplama yapılarak süreç sonlanmaktadır.

Plastik atıkların özellikle mekanik olarak geri dönüştürülmesinin son dönemlerde büyümeye başladığı hem yapılan çalışmalarda hem de uygulamalarda görülmüştür.

Mekanik geri dönüşüm yöntemi diğer geri dönüşüm yöntemlerine göre daha çevreci uygulamalardandır (Wäger & Hirsch, 2015) ve işlenmemiş plastiklerin üretimine nazaran yöntemin, özellikle çevresel yönden daha uygun olduğu bilinmektedir (Gu vd., 2017). Diğer önemli özellik mekanik geri dönüşümde arzu edilen kalite düzeyini yakalamanın kolay olmasıdır. Mekanik geri dönüşümde plastiklerin kalitesini arttırmak için dolgu malzemesinin eklenmesi gibi birçok yöntemin başarılı olduğu görülmektedir (Gu vd., 2016; Sommerhuber vd., 2016). Ekonomik açıdan değerlendirilme yapıldığında ise özellikle mekanik geri dönüşümle elde edilen plastik malzemelerin fiyatlarının avantajlı durumda kaldığı görülmüştür. Hatta yapılan çalışmalarda kurumların %20-50 oranlarında ekonomik açıdan tasarruf elde edebildiği ortaya çıkmıştır (Gu vd., 2016).

Sağladığı birçok avantaja rağmen plastik geri dönüşümündeki alt yapı eksiklikleri, sermaye yetersizliği ve plastiğin homojen olarak ayrılmasındaki zorluklar plastik geri dönüşümünün önündeki engellerden görülmektedir. Geri dönüşüm kararlarında sürecin ekonomik ve çevreye olan etkisi, plastik atıkları toplama, ayırma, temizleme ve yeniden işlemek için kullanılan enerjiden, ihtiyaç duyulan suya, malzeme türüne, geri dönüştürülmüş plastiğin kalitesine, operasyonel maliyetlere ve geri dönüştürülmüş ürünün fiyatına kadar birçok faktöre bağlıdır. Örneğin, Hopewell vd., (2009)'nin geri dönüştürülmüş ürünlerin fiyatlandırmasına dair yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş plastiğin fiyatının geçerli petrol fiyatının fonksiyonu olması sebebiyle atık yönetiminde büyük bir engel olarak görülmüştür. Standartlaşmanın ve bir takım yasal düzenlemelerin varlığı (Milios vd., 2018), ürün tasarımlarının seçimi (Horvath vd., 2018), bu sistemlere dair algı ve tutumların geliştirilmesi (Blomsma & Brennan, 2017) ve kalite planlamaları (Iacovidou vd., 2019) da geri dönüşüm kararlarında belirleyici faktörlerdendir. Diğer açıdan geri dönüşüm yöntemleri, malzemelerin kimyasal veya moleküler yapısı ve kullanılacak teknolojiler işlem adımlarının verimliliği ve etkinliği üzerinde etkili olması sebebiyle süreci karmaşıklştırabilmektedir.

Plastik geri dönüşümündeki oranlar küresel açıdan yetersiz bulunmaktadır. 2017 yılında Almanya, Danimarka ve Finlandiya'da plastik geri dönüşüm oranlarının yaklaşık %40-50'lere ulaştığı görülmüştür (Bundesamt, 2017) ve bu ülkeler dünyada en gelişmiş geri dönüşüm sistemlerine sahip olan grup içerisinde yer almaktadır. UNEP (Birleşmiş Milletler Çevre Raporu) (2018) raporunda plastik geri dönüşüm oranının çok düşük olduğu görülmektedir. OECD (Ekonomik İşbirliği ve Geliştirme Teşkilatı)'nin 2018

yılında yayımladığı raporda da küresel düzeyde, plastiklerin yalnızca %14–18'inin geri dönüşüm amacıyla toplandığı, bunun yalnızca %5'inin sonraki kullanımlar için saklandığı ve geri kalanının da daha düşük değerlere geri dönüştürüldüğü belirtilmiştir. Çevre ve atık yönetimi gelişmiş olan Avrupa'da ise plastik atıkların ağırlıkça 3'de biri dönüştürülmektedir (Plastikler, 2019; European Parliament, 2020). Amerika özellikle son 5 yıl içinde plastik atık yönetimine odaklanarak, 2017 yılında 3 milyon ton plastiği geri dönüştürürken, 2018 yılında bu sayının 3.02 milyon tona çıktığını ve her yıl artırma hedefinde olduğunu açıklamıştır (EPA(Avrupa Çevre Koruma Kurumu), 2020). Plastik atıklardaki artışı önlemek için endüstriyel üretimi sürdürülebilir kılacak şekilde döngüsel ekonomi kapsamında Avrupa'da da çeşitli plastik stratejiler uygulanmaktadır. Avrupa Komisyonu, 2030 yılına kadar tüm plastik malzemeleri geri dönüştürülebilir hale getirmek amacıyla plastik malzemeleri öncelikli alan olarak belirlemiştir (Avrupa Komisyonu, 2018).

Her ne kadar plastik atıkların geri dönüşüm oranları arzu edilen seviyelerde olmasa da birçok dünya ülkesinde geri dönüşümün büyüyen ve gelişen bir alan olduğundan bahsedilebilir. Birçok farklı sektöre girmiş plastik malzemelerin, zamanla artan farkındalıkla geri dönüşüm süreçlerinde yerini daha çok alması beklenmektedir. Plastiğin en çok kullanıldığı sektörlerden biri olan otomotiv sektöründe, geri dönüştürülmüş plastik malzemelerin kullanımı artmaya başlamıştır. Bunun önemli örneklerinden biri Ford tarafından geri dönüştürülmüş malzemelerin Focus modelinin koltuklarında uygulanmasıdır. Benzer bir uygulama da 2015 yılında LandRover'in iç döşemelerinde PP kullanılmasıyla gerçekleşmiştir (Eldridge, 2015). Geri dönüşüm teknolojilerindeki makine veya yazılımsal yenilikler, bu süreçleri zaman olarak, işlem olarak ve maliyet olarak geliştirmektedir. Ayrıca kurumları destekleyen yasal düzenlemelerin, kamusal teşviklerin, ekonomik motivasyonların ve teknolojik gelişmelerin artması, sürecin daha yaygın hale gelmesinde muhtemel etkili olacaktır.

1.2.3.5.4.2. Cam Geri Dönüşümü

Cam, MÖ 3000'li yıllarda eski Mısır'da rastlanılmış en eski sentetik malzemelerdendir (Martin & MacFarlane, 2002). Cam uygun bir hammadde birleşiminin önce fırında eritilmesi ve ardından soğutulma öncesi çeşitli işlemlerle şekillendirilmesiyle binlerce yıldır üretilmektedir. Esas olarak üretiminde kum, soda külü ve kireçtaşı kullanılsa da

birçok farklı hammaddenin eklenmesiyle yapılan şeffaf bir maddedir. Sahip olduğu optik berraklık, sertlik ve güçlülük özelliğiyle camlar, ambalaj, tüm taşıtlar, ev eşyaları ve elektrikli ekipmanlar gibi insan faaliyetinin birçok kullanım alanına girmiştir. Dünyadaki cam endüstrisinden elde edilen kütle üretiminin % 80-85'i düz cam şeklinde olup, bu grup camlar yiyecek, içecek ve ilaç endüstrileri için kaplarda, inşaatlarda ve motorlu taşıt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (FEVE, 2015).

Camlar çoğunlukla şeffaf (çakmaktaşı), kahverengi (kehribar) ve yeşil olmak üzere üç renkte üretilir. Bu renklerden çakmaktaşı en fazla uygulama alanına sahiptir ve genellikle cam üreticileri tarafından en çok talep gören renktir (Peng vd., 2019). Güneş ışığına maruz kalmanın ürünün bozulmasına neden olabileceği ürünlerde kahverengi veya yeşil cam kullanılır. Yeşil camın üretiminde az miktarda krom eklenirken, kahverengi camda kromun yanında demir materyali de karışıma dahil edilmektedir. Camlar, farklı renk ve içeriğindeki malzemeye göre farklı özelliklerde olsa da üretim süreçleri çok benzerdir.

Cam üretimi, özellikle çevresel açıdan değerlendirilmesi gereken önemli bir konudur. Çünkü üretiminde yığını eritmek için yüksek enerji kullanılmaktadır, bu durum da yanma gazlarının emisyonlarına ve karışımın bileşenlerinin ısı reaksiyonuna neden olmaktadır (Dyer, 2014). Camı eritebilmek için ihtiyaç duyulan ısı, sürekli olarak beslenen ve daha sonra erimiş halde fırından çekilen yığın malzeme banyosunun üzerinde fosil yakıtları yakarak sağlanmaktadır. Akaryakıt ve doğal gaz, eritme işlemleri için baskın enerji kaynakları olarak kullanılır. Cam üretimindeki enerji, hammaddelerin sıcaklığını yükseltmek ve bileşenlerin reaksiyona girmesini sağlamak için gereklidir (Butler & Hooper, 2019). Süreç sonunda enerji tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan gazlar da CO₂, kükürt ve nitrojen oksitlerdir. Sera gazı olarak geçen bu emisyon gazlarının çevrede yarattığı risklerin önlenmesi önemlidir. Cam üretiminin çevreye verdiği bu etkiler ile birlikte üretimde enerji tüketimini sınırlandırmak, gaz salınımını önlemek ve daha hafif ağırlıkta ürünleri üretmek önerilmektedir (Glass Pack Solutions, 2016).

Camın kolaylıkla eriyebilmesi, şekil alabilmesi ve “kapalı döngü” geri dönüşüm ile aynı özelliklere dönüştürülebilmesi sebebiyle önemli bir malzeme grubudur ve birçok biçimiyle yeniden kullanılabilir. Bazı durumlarda sadece eritilmesi ve kalıplanması ile sağlanan geri dönüşüm işlemi, herhangi performans kaybı olmaksızın süresiz olarak tekrarlanabilmektedir. Sahip olduğu bu sınırsız döngüsellikle birlikte diğer

malzemelerden ayrılmaktadır. Ayrıca birçok yönden diğer malzeme gruplarıyla arasında büyük farklılıklar vardır. Daha önce ifade edildiği gibi geri dönüşüm faaliyetlerinin en temel amaçlarından biri sürdürülebilir malzeme yönetimini sağlayabilmektir. Fakat bu durum cam ürün gruplarına gelindiğinde farklı hal almaktadır. Çünkü içeriğinde bulunan hammaddelerin hiçbiri (silis kumu, kireçtaşı gibi) doğada kıt kaynak olarak görülmemektedir, maddelere kolaylıkla ve miktar açısından kısıt olmadan ulaşılabilir. Bir diğeri birçok geri dönüştürülen ürünün aksine camlar, enerji kazanımında kullanılabilecek bir malzeme grubu değildir. Camın yanıcı özellikte olmaması sebebiyle cam atıklar elektrik üretmek ve yerel ısıtma amacıyla atıktan enerjiye dönüştürme tesislerinde yer almamaktadır.

Cam üretiminde ortaya çıkan çevresel endişeler ve camın sahip olduğu özellikler neticesinde hemen hemen tüm malzemenin kalite kaybetmeden geri kazanılması, geri dönüşüm faaliyetlerini etkilemiştir. Cam geri dönüşümü camın üretildiği ilk zamanlardan beri yürütülen bir faaliyet alanı olarak bilinmektedir. Cam geri dönüşüm potansiyeli, kütle bakımından baskın olmaları ve içeriğindeki soda-kireç silika camı ile birlikte tekdüze kimyasal bileşimleri nedeniyle büyük ölçüde konteyner ve düz cam sektörlerinden gelmektedir (Butler & Hooper, 2019). Özellikle cam şişeler, kavanozlar ve kaplar en fazla malzeme geri dönüşümünün yapıldığı ürünlerdir. Finlandiya'daki Palpa Geri Dönüşüm Sistemi tarafından yayınlanan raporda, cam şişelerde %97'lik geri dönüş oranı olduğu bildirilmektedir (Palpa, 2016). Yapılan bir başka çalışmada Amerika'da 10 milyon metrik ton atık camın sadece üçte birinin geri dönüştürüldüğü, Avrupa ülkelerinde ise atık camların geri kazanımının %80-90'lara ulaştığı görülmüştür (Jacoby, 2019).

Cam geri dönüşümünün birçok faydalı sonucu bulunmaktadır ve ilk olarak cam geri dönüşümü çevreye yayılan veya bertarafı için toplanan atıkların azalmasına katkı sağlamaktadır. Bu da depolama alanlarının ve arazilerin daha verimli kullanılmasına neden olarak daha sürdürülebilir bir atık yönetimini mümkün kılmaktadır. İkincisi yeni ürünleri üretmek için eski malzemelerin kullanılması, ihtiyaç duyulan işlem basamaklarını azalttığı için enerji tasarrufunda etkili olmaktadır. Özellikle yığın halinde toplanan atık camlar, toplu olarak işleme alındığından hem çevre açısından hem de ekonomik açıdan avantajlı olmaktadır. Bu sebeple sistem boyunca dengeli malzeme akışının sağlanması önemli görülmektedir. Ayrıca kullanılmış cam ürünlerin yaşam döngüsünü sürekli geri beslemesiyle çevreye en zararsız seçeneklerden biri olduğu

söylenbilir.

Sağladığı birçok fayda sebebiyle cam geri dönüşümü hem üreticiler hem de hükümetler tarafından önemli bir uygulama alanıdır. Teoride cam kapların tamamı kırıntıdan yapılabilmekte ve kullanılan cam parçalarının geri dönüştürülmesi konusunda herhangi bir kısıt bulunmadığı ifade edilmektedir. Geri dönüşüm işlemlerinin doğası aynı kalacak şekilde cam geri dönüşüm adımları 4 temel başlıkta toplanabilmektedir. Bunlar:

Aşama 1: Cam geri dönüşümünde ilk adım toplanan cam atıkların üflenmiş hava yardımıyla üzerinde kirletici olan kağıt veya plastikten arındırılmasıdır. Eğer metal nesne varsa mıknatıs yardımıyla camdan uzaklaştırılmaktadır.

Aşama 2: Eğer farklı renklerde camlar bulunuyorsa manuel veya otomatik olarak ayırma işlemi yapılmaktadır ve camlardan yabancı malzemeleri uzaklaştırmak için belirli basınçta sularla yıkama işlemi yapılmaktadır. Bazı durumlarda parçaların temiz ve işlem göreceği fırına hazır hale getirebilmesi için ek işlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir.

Aşama 3: Cam malzemelerin daha kolay işleme girmesi için ince formlarda küçültme işlemi yapılmaktadır.

Aşama 4: Küçülen cam parçalar veya kırıntılar yüksek sıcaklıkta eritilmekte ve ardından istenen formda şekillendirilmesi için kalıplanmaktadır.

Örneğin Birleşik Krallık'daki Saint Gobain Glass isimli üretici firma, düz cam üretimi için ihtiyaç duyduğu camın ağırlığınca %30'unu cam kırıntılarından kullanmış ve bunun sonucunda yılda 36.000 ton kırıntı camı değerlendirmiştir (St Gobain Glass, 2019). Bazı durumlarda kırıntı camların kullanılması ürünün kalitesi için uygun görülmemektedir. Düz camın farklı seviyelerde optik özelliklere sahip olması istendiğinde, gereken ham madde saflığı nedeniyle istenen ürünler üretilmemektedir (Dyer, 2014). Aynı zamanda camların renklere göre toplanarak, ayrıştırılması ve geri dönüşüm sürecine dahil edilmesi kalite üzerinde belirleyici etmenlerdendir. Çünkü bilinen şekliyle yeşil camlardan geri dönüştürülmüş malzemelerin kalitesi %85-95 oranlarında, kahverengi camlarınkı ise %60-70 oranlarındadır. Şeffaf camlarda bu oran %100 seviyelerine çıkabilmektedir. Camların geri dönüşümündeki bir diğer önemli konu camın macun ve diğer malzemelerle kontaminasyonun geri dönüşümün önünde bir engel olmasıdır (Tandy & Way, 2004). Bu sebeple temizleme ve kirlilikten arındırma önemle dikkat edilmesi gereken adımlardandır.

Düz camlar kirlenmeden ve diğer atıklarla karışmadan toplanıp ayrıştırılabiliyorsa yeni düz cam üretiminde kullanılması mümkün ve avantajlı olmaktadır. Araçlardaki temperli cam, geri dönüşüm için kolayca geri kazanılan ürün gruplarındandır. Lamine ön camlar ise camı polimer tabakasından ayırmak için biraz daha özel teknikleri gerektirir, ancak geri dönüştürülebilir. AB’de de araç başına ortalama 21.2 kg olarak hesaplanmış cam ağırlığına göre atılmış araçlardan kaynaklanan düz cam atığının yılda yaklaşık 85.000 ton olduğu bilinmektedir (Butler & Hooper, 2019). Hem üretici firmaların hem de hükümetlerin bu atıkları değerlendirmesiyle sağlayacağı başta ekonomik fırsatlar küçümsenmeyecek kadar büyük boyutlardadır.

1.2.3.5.4.3. Metal Geri Dönüşümü

Metallerin neredeyse sürekli geri dönüştürülebilmesi ve fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde koruyor olması sebebiyle metallerde geri dönüşüm faaliyetleri önemlidir. Metal malzemelerin büyük çoğunluğu doğal madenlerden üretilmektedir, bu durum da sınırlı doğal kaynakların durumunu tehlikeye atmaktadır. Metallerin kaynaklarını koruma amacıyla yönetilme ihtiyacı özellikle vurgulanan bir konudur (Chen, 1995) ve bu etkisi yıllar içinde de aynı kalmıştır. Ayrıca çevreye yayılan metal atıkların 10-100 yıl arasında doğada bozulduğu bilinmektedir. Bu sebeplerin etkisiyle sürdürülebilir bir çevre ve yaşam için metal malzeme atıkların en iyi şekilde, maksimum verimlilik ile yeniden kazanılması gereklilik haline gelmiştir.

Metal geri dönüşümü özellikle tam kapalı döngü özelliği göstermektedir. Geri dönüştürülen metallerin piyasaya değeri, plastik, cam, kağıt gibi endüstrilerin her birinden daha yüksektir. Geri dönüşümle kaybedilmeyen malzeme kalitesi, endüstrilerdeki bu pazara olan talebin de belirleyici ölçütüdür. Metalleri ekonomik olarak geri kazanma yeteneği, endüstriyel süreci içerisinde hangi şekillerde değerlendirildiğine ve girdiği işlemlere bağlı olarak değişebilmektedir. Metal geri dönüşümünde maksimum faydanın alınabilmesi için aynı zamanda işlem maliyetleri ve geri dönüştürülmüş malzeme fiyatı gibi değişkenlerin değerlendirilmesi son derece önemlidir. Metallerin geri kazanımında en fazla karşılaşılan temel maddelere demir, çelik, bakır, pirinç ve alüminyum örnek olarak verilebilmektedir.

- **Çelik Geri Dönüşümü**

Çelik, dünyanın en çok kullanılan metalidir. Demir cevherinin doğadaki birçok metale

göre kolay bulunabilmesi, daha az enerji gerektirmesi ve çeşitli alaşımlarla istenen özelliklerin verilebilmesi çelik kullanımını yaygınlaştırmıştır. Çeliği tek bir malzeme gibi tanımlamak yerine bazı sıcaklık aralıklarında dövülebilen ve manganez, karbon, tungsten, krom ve genellikle diğer alaşım elementlerini içeren demir alaşımı olarak ifade etmek daha doğrudur. Çünkü çelik bir alaşımdır ve uygulama alanına göre farklı alaşımlarda üretilebilmektedir. Endüstriyel faaliyetler sonucunda binlerce farklı formda karşılaşılabilen çelik mukavemet, sertlik, dayanıklılık ve manyetik özellik gibi özelliklere sahiptir. Çelikler endüstrilerin ve toplumların gelişmesinde oldukça kritik öneme sahiptir ve kullanım alanları inşaat, beyaz eşya, ev aletleri ve otomotiv sektörü gibi birçok alanda yer almaktadır.

Çeliğin üretiminde iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki maden cevherinden üretilmesi diğeri ise çelik hurdalarının geri dönüşümle kazanılmasıyla çeliğin tekrar elde edilmesidir. Çelik üretiminde Bazik Oksijen Fırını (BOF) ve Elektrik Ark Ocağı (EAO) kullanılmaktadır. Birincil çelik üretimi olarak kabul edilen üretim şeklinde, demir cevher pik demire indirgenmektedir. Ardından BOF’da yüksek sıcaklıktaki karbonmonoksit, hidrojen, azot gibi gazların yardımıyla pik demirin yanma ve saflaştırılma işlemleri yapılmaktadır. Saflaştırma sonrası erimiş haldeki çeliğe farklı alaşımlar eklenerek yeni özel çelikler elde edilebilmektedir. İkincil çelik üretimi ise EAO’da çoğunlukla hurdaların işlenmesine dayanmaktadır. Temel prensibinde paslanmaz çelik takım çeliklerinin ark elektrotları sayesinde ısıtılması, ardından saflaştırılması ve fırına girme süreçleri vardır (Echterhof, 2021). Hurda çeliğin bu işlemler sırasında istenen özelliklerde olabilmesi için fiziksel veya kimyasal işlemler ek olarak uygulanabilmektedir. EAO sürecine çelik hurdanın tamamı kabul edilmektedir (World Steel Association, 2018).

Çelik hurdası, üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır: (Bowyer vd., 2015)

Ev hurdası: Bir demir çelik fabrikasında ürün üretimi sırasında fırında, potalarda veya farklı işlem sıralarında ortaya çıkan kırıntı veya ıskartalardır. Ev hurdası bilinen fiziksel özelliklere ve kimyasal bileşime sahip olduğundan, hızlı bir şekilde yeniden işlenebilir özelliktedir ve kalitesini korumaktadır. Bu hurda sınıfının 2014 yılında sadece ABD’de geri dönüştürülen hurdanın yaklaşık %21’ini oluşturduğu görülmüştür (USGS (Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu), 2014).

Eski Hurda: Tüketim mallarından gelen ve çoğu zaman ürün ömrünün tamamlanmasıyla

ortaya çıkan hurda araçlar, eski beyaz eşyalar, ofis makineleri veya inşaat yıkıntılarından sağlanan hurdalardır. Ev hurdasının aksine kimyasal veya fiziksel bileşimleri tam olarak bilinmemektedir. Bu grup hurdanın farklı bileşimlerde veya fazla işlem sayısında olmasının bir sonucu olarak çoğu zaman en yüksek maliyete sahip olandır (USGS, 2014). Üç grup içerisinde, en fazla hurda çeliğin toplandığı ve işlendiği hurda sınıfıdır.

Yeni hurda: Ev hurdalarında olduğu gibi kimyasal bileşimin bilindiği ve beyaz eşya, otomotiv gibi tüketim mallarının üretim sahalarından gelen imalat hurdalarıdır. Yeni hurda ABD'de geri dönüştürülen hurdaların yaklaşık %22'sini oluşturmaktadır (USGS, 2014).

Çelik hurdalardan geri dönüşüm, çeliğin dünyada en fazla kullanılan metal olması sebebiyle ayrıca önemlidir. 2012 yılında Batı Avrupa'da hurdadan üretilen çeliğin payı %50-55 olarak hesaplanırken (Eurofer, 2013); Amerika Birleşik Devletleri'nde 2015 yılında çeliğin yaklaşık %60'ının EAO işlemiyle üretildiği ve ortalama geri dönüştürülmüş EAO çeliği içeriğinin yaklaşık %90'a ulaştığı görülmüştür (Bowyer vd., 2015). Günümüzde ise dünyadaki çelik üretiminin yaklaşık %40-45'inin çelik hurdasına dayalı olduğu tahmin edilmektedir. Ancak küresel düzeyde çeliğe olan talebin yüksek olması sebebiyle çeliğin yalnızca geri dönüşümle kazanılması yeterli olmamaktadır. Bu sebeple talep hem geri dönüşümle hem de birincil çelik üretimiyle sağlanmalıdır (Yellishetty vd., 2011). Avrupa çelik endüstrisi, rekabet gücünü artırmak üzere yenilikçi eylemler başlatmaya ve çevresel etkilerini de azaltarak süreç verimliliğini artırmaya yönelik adımlar atmaktadır (Yao vd., 2018). Geçtiğimiz son on yıl içinde, Avrupa çelik endüstrisinin döngüsel ekonomiye daha çok yoğunlaştığı, yan ürün geri kazanımı ve kalitesinin iyileştirilmesi için yalnızca mevcut teknolojilere değil aynı zamanda yenilikçi sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine odaklandığı görülmüştür (Branca vd., 2020).

Çelik geri dönüşümü diğer birçok malzemenin geri dönüşümü gibi temel işlem adımlarından oluşmaktadır; çelik hurdaların toplanması ile başlayan süreç geri dönüştürülmüş çeliğin üretilmesi ve şekillendirmesi ile son bulmaktadır. Temel işlem adımları şu şekildedir:

Adım 1. Ürünlerin Toplanması: Hurda çelikler, yukarıda sınıflandırılan hurda çeşidine göre ilgili alanlardan toplanmaktadır.

Adım 2. Boyut Küçültme (Hacimsel): Daha kolay taşınma ve fırını besleme için hurdalar

bir parçalayıcı yardımıyla genelde el büyüklüğünde küçük parçalara ayrılmaktadır. Büyük hurdalarda çoğu zaman çekiçli değirmen adı verilen makinelerden destek alınmaktadır. Hurda ürünlerin daha yoğun hale getirilmesinde hidrolik silindirden yararlanılarak, sıkıştırma işlemi yapılmaktadır.

Adım 3. Sınıflandırma veya fiziksel ayırma: Metal olmayan ürünlerden, metali ayırma amacıyla yapılır. Bunun için farklı teknikler kullanılabilir. El ile geleneksel ayırma işlemi yapıldığı gibi bilgisayar görsel analiz tekniği veya lazer kaynaklı spektroskopi teknolojisi de kullanılabilir.

Adım 4. Manyetik Ayırma: Demirli hurdaları demir dışı hurdalardan ayırma işlemi için eğer gerekli görülürse manyetik ayırma yapılmaktadır. Bu işlem sırasında çoğu zaman elektromıknatıslar tercih edilir. Ayrıca manyetik özelliklere dayalı olarak hurda ayırma ekipmanları piyasada mevcuttur. Manyetik özellikleri nedeniyle çeliğin atık akışlarından ayrılması kolaydır ve yüksek geri kazanım oranları sağlar.

Adım 5. Çelik Hurdasının Eritilmesi: Gerçek işleme teknolojisine bağlı olarak verimli bir eritme ünitesi olan EAO'da çelik hurdasının eritilme işlemi yapılmaktadır.

Adım 6. Arıtma: Malzemenin yüksek kalitede olması için bazı durumlarda arıtma işleminden geçirilebilmektedir. En bilinen yöntem elektrolizdir.

Adım 7. Soğutma: Son adımda eritilmiş çeliğin soğutulması, yani katılaştırma işlemi yapılmaktadır. Çoğu zaman erimiş çelikler çubuk veya tab şeklindeki formlara dönüştürülmektedir.

Döngüsel ekonomi perspektifinden atık malzemelerin yeni ürünlere dönüştürülmesinde, yeni hammaddelerin çıkarılmasına göre büyük tasarruf elde edilmektedir (Bianco & Porisiensi, 2016). Farklı amaçlar için kullanılabilen çeliğin geri dönüştürülmesine olan ihtiyaç özellikle kaynak korunması için gereklidir. Yapısı gereği dayanıklı malzeme olarak görülen çelikler, kendi özelliklerini kaybetmeden süresiz olarak geri dönüştürülebilmektedir. Bu özelliği çeliği sürdürülebilir kılmaktadır. Araştırmacıların büyük çoğunluğu çelik geri dönüşümünün, işlenmemiş cevheri çıkarmaktan ve yeni çelik yapma sürecinden her zaman daha ekonomik olduğu savunulmuştur (Müller vd., 2006). World Steel Association (2010) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, çelik geri dönüşümünde kullanılan bir ton çelik hurda için 1200 kg'dan fazla demir cevheri, 7 kg kömür ve 51 kg kireçtaşı kazanılabilmektedir. Uluslararası Geri Dönüşüm Bürosu'nun

çalışmasında ise, 1 ton çeliğin geri dönüşümünde yaklaşık 1,1 ton demir cevherinden, 0.6 ton kömürden ve 55 kg kireçtaşından tasarruf sağlandığı görülmektedir (BIR, 2013).

Çeliklerin geri dönüşümünün kaynak verimliliği sunması dışında ihtiyaç duyulan enerji kaynakları ve depolama alanında sağlayacağı faydalar da gündeme gelmektedir. Dünyada en fazla üretilen malzeme gruplarından olan çeliklerin geri dönüşüme imkan vermemesi, atık yönetimi için çok büyük alanlarda ve miktarlarda depolama alanlarını kaçınılmaz kılarken, kirliliğin kontrol edilmez boyutlara ulaşması muhtemeldir. Çelik geri kazanımını cazip kılan faktörlerden olan enerji ve su tüketimi de kurumların ekonomik açıdan iyileşmesinde etkili olmaktadır (US DOE, 2008). Çelik üretiminde ortaya çıkan toplam maliyetin ortalama %25-50'sinin enerji maliyetlerinden kaynaklandığı bilinmektedir, bu nedenle enerji verimliliğinin iyileştirmesi hem nihai maliyetin düşürülmesine hem de bu sayede rekabet gücünün artırılmasına destek olmaktadır (Jabbar & Hassan, 2021). Bir diğer kaynak olan su da özellikle çeliğin soğutulması ve kirlilikten arınması için bu endüstrinin temel kaynaklarından biridir ve bu nedenle su tüketiminin kontrolü doğru atık yönetimi için önemlidir (Water, 2009).

- **Alüminyum Geri Dönüşümü**

Alüminyum (Al), çelikten sonra dünyada en çok bulunan ve kullanılan metaldir. Alüminyumun sahip olduğu hafiflik, elektriksel ve termal iletkenlik, kolay işlenebilirlik, yüksek dayanıklılık ve ucuz olma özelliği endüstride kullanımını vazgeçilmez kılmaktadır. Küresel olarak kullanılan alüminyum metal miktarı 1950'lerden itibaren hızla artmaktadır ve bu eğilimin devam edeceği ön görülmektedir (Cullen & Allwood, 2013). Özellikle alüminyum alaşımları birçok farklı endüstride geniş uygulama alanına sahiptir. Aluminium Association Inc.'e göre 1990'lı yılların sonlarında farklı bileşim değerlerinde olan yaklaşık 450 den fazla alaşım bulunmaktaydı (Davis, 1998). Dünya ekonomisi içinde önemli yere sahip olan alüminyum metaline başta uzay ve havacılık sanayisi olmak üzere, otomotiv parçaları, elektronik aletler ve inşaat gibi günlük yaşamın her yerinde karşılaşılabilmektedir.

Ulaşım endüstrisi dünya çapında alüminyumun en büyük tüketicilerinden biridir ve toplam alüminyum tüketiminin %35-40'ından sorumludur (Nappi, 2013). Bu durumda özellikle son yıllarda dünyanın hafif araçlar üretmeye odaklanması ile geleneksel çeliklerin yerine yüksek saflıkta alüminyum kullanması etkili olmaktadır (Goede vd.,

2008). Çünkü sahip olduğu hafiflik özelliği ile alüminyum metali otomobillerde yakıt tasarrufuna çözüm sağlayabilen önemli bir metaldir. Ayrıca üzerinde boya olmamasına rağmen korozyona yüksek derecede dayanıklı olması ve çelik gibi malzemelerde ihtiyaç duyulan ek işlemlerin alüminyumlu alaşımlarda gerekli görülmemesi ulaşım endüstrisindeki büyümede etkili olmuştur. Bir diğer önemli özelliği olan darbeyi absorbe etme gücü özellikle araç güvenliğini sağlamaktadır. Alüminyum veya alüminyum alaşımları, Beyaz Gövde (BIW), şasi bileşenleri, kapı kapatma, ve dış paneller gibi araç gövdelerinin üretimi için en uygun malzeme kategorileri arasında gösterilmektedir (Hirsch, 2011; Volkswagen Group, 2009). Günümüzde sayısı artmaya başlayan elektrikli araçların tasarımında da metalin daha çok kullanılması beklenmektedir.

Yaygın kullanım alanlarına sahip alüminyum alaşımlı parçaların saf alüminyumdan üretilmesi, üreticileri süreçlerin karmaşıklığı, maliyetli oluşu ve yüksek enerji ihtiyacı sebebiyle zorlayabilmekte aynı zamanda en düşük maliyette ve yüksek kalitede alaşım elde edebilme durumunu da sınırlandırabilmektedir. Bu sebeple alüminyum geri dönüşümüne büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Alüminyum dünyada yüksek oranda geri dönüştürülebilir metaldir ve bu özelliğiyle döngüsel ekonomiyi en iyi şekilde temsil etmektedir. Alüminyumun yüksek ekonomik değeri (Blomberg & Söderholm, 2009) ve üretilen büyük ölçekli hurda değeri (Logozar vd., 2006; Baser, 2013) nedeniyle yüksek geri dönüşüm potansiyeline sahip en yaygın kullanılan metallere dendir. Özellikle son elli yılda dünya alüminyum arzının büyük kısmının alüminyum hurdası endüstriyel atıklardan ve tüketim sonrası ürünlerden geri kazanıldığı bilinmektedir (Schlesinger, 2014). Aluminum Association'a göre (2019) ABD'de alüminyum içerikli malzemelerin geri dönüşümü için tüketici geri dönüşüm oranının % 49.8 ve endüstri geri dönüşüm oranının ise % 63.6'lara ulaştığı ifade edilmiştir. Aynı raporda (2019) şimdiye kadar üretilmiş tüm alüminyumun ortalama %75'inin halen günümüzde kullanılmakta olduğu açıklanmıştır. Bu durum alüminyum metalini içeren birçok ürünün daha önce geri dönüştürüldüğünü göstermektedir. Dünyadaki en yaygın geri dönüştürülmüş malzemelerden olan (ve geri dönüşümü en kolay olanlar arasında) alüminyum, gerçek kapalı döngü dairesel çözümün neredeyse mükemmel bir örneğidir ve döngüsel ekonomiyi çok iyi şekilde temsil etmektedir. Alüminyumun başarılı ve avantajlı şekilde geri dönüştürülmesi için dikkat edilmesi gereken önemli konular vardır. Bunlar (Schlesinger, 2014):

- Toplama maliyetinin avantajlı olması için metalin devamlı arzının olması,

- Hurda metalin toplanması, safsızlıkların giderilmesi ve geri dönüşüm tesisine teslim edilmesi için altyapının sağlanması,
- Doğal cevherlerden metal üretimi ile ekonomik olarak rekabet edebilecek metali geri dönüştürmek için doğru yönetime karar verilmesi,
- Bileşimi veya kalitesi birincil metalden farklıysa, geri dönüştürülmüş metal için yeni bir pazarın bulunmasıdır.

Alüminyumun geri dönüşüm yoluyla üretilmesinin sunacağı birçok fayda açıktır. Bu durumun en büyük sağladığı avantajlardan biri şüphesiz enerji tüketiminde yaşanmaktadır (Hussain & Hakim, 2007). Birincil üretimle üretilen alüminyumda elektrolitin direncini yenmek ve çözünmüş alüminayı parçalamak için büyük enerjiler gerekmektedir. En büyük enerjiye genellikle fosil yakıt kullanımıyla gerçekleşen eritme adımı ihtiyacı duyulurken, geri dönüşümde bu oranın kritik şekilde azalabileceği ifade edilmektedir (Schlesinger, 2014). Sürecin sunduğu ekonomik avantajlar ise alüminyum hurdanın görece değerine ve bulunabilirliğine göre değişse de çoğu durumda alüminyum alışımlı ürünler değerlidir (Hussain & Hakim, 2007).

İkincil alüminyum üretiminin özellikle çevresel katkıları büyüktür. Geri dönüştürülmüş alüminyumun küresel ve yerel açıdan çevreye olan etkilerinin incelendiği çalışmaların birçoğunda büyük oranlarda iyileştirmelerin görüldüğü vurgulanmaktadır (Bertram vd., 2006). Birincil alüminyum üretiminin yoğun enerji gerektirmesi sebebiyle en büyük endişelerden biri küresel karbondioksit emisyonlarını önemli ölçüde arttırmasıdır (Norgate vd., 2007). Alüminyum geri dönüşümün ise birçok çalışmada alüminyum endüstrisinin karbon ayak izini olumlu yönde etkilediği görülmüştür (Das vd., 2010). Alüminyum geri dönüşüm faaliyetlerinin çevreyi oldukça fazla koruyan etkilerin ortaya çıktığı görülmüş ve birincil üretimin sebep olduğu zararların çok daha azı yaşanmıştır.

1.3. Sürdürülebilir Kalkınma ve Sürdürülebilir Atık Yönetimi Uygulamaları

1.3.1. Sürdürülebilir Kalkınma

Ekonomik büyüme, teknolojik gelişmeler, endüstriyel faaliyetler veya nüfus artışı gibi faktörler ekosistemleri büyük tehlikeye atarak insan yaşam kalitesinde birçok zorluğa yol açmıştır. Hem çevre hem canlıların sağlığı üzerinde etkili olan durumlar diğer taraftan hammadde, enerji ve su gibi kaynakların olumsuz etkilenmesine de neden olmuştur.

Yaşamın ve ekonominin sürdürülebilir olması için ihtiyaç duyulan kaynakların mevcudiyeti ve erişilebilirliği yine çevreyi ve ekonomiyi doğrudan ilgilendirmektedir. Bu bağlamda sürdürülebilirliğe bütüncül bir bakış açısıyla bakıldığında “sürdürülebilir kalkınma” kavramı ortaya atılmış ve yıllar içinde sayısız çalışma yürütülmüştür.

Sürdürülebilir kalkınma terimi ilk kez Uluslararası Doğa Koruma Birliği'nin 1980 yılında yayınladığı Doğa Koruma ve Doğal Kaynaklar Stratejisi'nde yer alarak (IUCN, 1980), ormanların biyolojik yenilenmesine duyulan ihtiyaç sebebiyle ortaya çıkarılmıştır. O dönem içerisinde sadece ekolojik olarak incelenen kavram, çok kısa bir süre içinde ekonomik ve sosyal yönler açısından da değerlendirilmeye ihtiyaç duyularak genişlemiştir. Sürdürülebilir kalkınmaya yönelik birçok tanımlar yapılmıştır. Bu tanımlardan ilki ve en çok kullanılanı Dünya Çevre ve Gelişme Komisyonu (WCED) tarafından 1987 yılında yapılmıştır; sürdürülebilir kalkınma “günümüzün ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetinden ödün vermeden karşılayan bir gelişme” olarak tanımlanmıştır. Harwood (1990) tarafından sürdürülebilir kalkınma, “kalkınmanın bütün insanlar ve diğer tüm türler için gerekli olan çevre ile denge içinde daha verimli kaynak kullanımına odaklandığı ve insanlar için daha çok fayda sağlanan sınırsız bir kalkınma sistemi” olarak ifade edilmiştir. Bir başka tanım da sürdürülebilir kalkınma, temel yaşam kalitesini sağlamak için ekonomik kalkınma sürecini değiştiren, aynı zamanda değerli ekosistemleri ve diğer toplulukları koruyan bir program şeklinde yapılmıştır (Vander-Merwe & Van-der-Merwe, 1999).

Yıllar içinde kavrama dair tanımlamalarda değişiklikler olurken daha kapsamlı açıklamalar yapılmıştır. Bu tanımlardan biri de Vare ve Scott (2007) tarafından kaynakların artırıldığı, yatırımların yönünün belirlendiği, teknolojinin gelişimine odaklanıldığı ve farklı kurumların çalışmalarının uyumlu hale getirildiği bir değişim süreci şeklinde ifade edilmiştir. Araştırmacıların yapmış olduğu tanımlamanın önemli bir kısmı hem yatırımların yönünün belirlenmesine olan vurgu hem de farklı kurumların uyumlu işbirliğine yapılan işarettir. Aynı zamanda bu durum sürdürülebilir kalkınmanın ekolojik, sosyo-ekonomik ve politik bağlam içine yerleştirilmesi gereken bütünsel bir yaklaşım olduğunun ifadesi olarak yorumlanabilir.

Sürdürülebilir kalkınmanın genel amacı, ekonominin ve çevrenin uzun vadeli istikrarını sağlayabilmektir ve bu durum bütün bir yaşam boyunca ekonomik, çevresel ve sosyal

kaygıların bütünleştirilmesi ve kabul edilmesi yoluyla başarılabilir (Emas, 2015). Ancak bazı kısıtlamalar altında hükümet gözetiminin ve yaptırım eksikliğinin diğer kurumların uyum sağlama yeteneğini etkilediği görülmüştür (Kammer & Christopherson, 2018). Sürdürülebilir kalkınma için özellikle devlet kurumları tarafından yapılan düzenlemeler ve destekler önemlidir. Çünkü sürdürülebilir kalkınmanın kapsamı ve doğası birçok birimin entegre şekilde çalışmasını gerektirmektedir. Sürdürülebilir kalkınma sektörler, bölgeler ve nesiller arasında ekonomik, çevresel ve sosyal hedeflerin entegrasyonuna ihtiyaç duymaktadır (Emas, 2015).

Sürdürülebilir kalkınma kavramının oluşturulmasına farklı kurum ve kuruluşlar katılmıştır. Bunlardan en önemlisi, 1945te kurulan, merkezi New York'ta bulunan ve bünyesinde 190 dan fazla üye ülkenin yer aldığı Birleşmiş Milletlerdir (BM, 2015e). Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Bölümü (UNSD) de özellikle nesiller arası ve uluslararası işbirliği alanında, sürdürülebilir kalkınmanın uygulanmasını teşvik etmek ve koordine etmek için kurulmuştur (Klarin, 2018).

Sürdürülebilir kalkınma kapsamında en önemli faaliyetlerden biri 1987 yılında Norveç Başbakanı Brundtland liderliğinde 18 ülkenin başkanlarının yer almasıyla gerçek anlamda sürdürülebilir kalkınmanın tanıtıldığı Brundtland Raporunun yayımlanmasıdır (Drexhage & Murphy, 2010). Yeni bir yaklaşım olarak sürdürülebilir kalkınma, sosyoekonomik kalkınma ve çevre arasındaki dengenin sağlanması, kirliliğin ve çevresel bozulmanın azaltılması, doğal kaynakların kullanılması, zararlı gaz emisyonlarının ve iklim etkilerinin azaltılması, yoksulluğun ve çevrenin azaltılması gibi gelecekteki zorluklara yanıt verebilmeyi içermelidir (WCED, 1987). Brundtland Raporu'nun yayınlanması sürdürülebilir kalkınmanın temeli sayılan ve farkındalık yaratmaya başlayan önemli bir olaydır. Ardından 2000'li yıllara kadar sürdürülebilir kalkınmaya destek veren birçok kurum ve kuruluşun faaliyet göstermesinin dışında, 2000'li yıllardan sonra da gelişmeler hızla devam etmiştir. 2002 yılında Güney Afrika'da "Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya Zirvesi" düzenlenmiş ve raporda kavramın uygulanmasında gereken yükümlülükler için kılavuz yayınlanmıştır (BM, 2003).

2009 yılında İsviçre'de Üçüncü Dünya İklim Konferansı düzenlenmiş ve değişen çevre koşullarına karşı gerçek ihtiyaçların belirlenmesi doğrultusunda bilimsel ilerleme için bir çerçeve oluşturulmuştur (Dünya İklim Konferansı, 2009). Aynı yıl, ABD'nin Pittsburg

eyaletinde Dünya Kongre Zirvesi G20 düzenlenmiş ve G20 ülkelerinin katılımıyla sürdürülebilir bir ekonomi için genel konular tartışılmıştır. 2012 yılında Brezilya'da düzenlenen BM Rio +20 konferansının ise önemi farklıdır. Çünkü bu konferansın benzeri Birleşmiş Milletler tarafından tam 20 yıl önce yine Brezilya'da düzenlenmiştir. Rio Konferansından 20 yıl sonra yapılan konferansta sürdürülebilirlik konuları tartışılarak, sürdürülebilir kalkınma hedefleri tekrar revize edilmiştir (Sürdürülebilir Kalkınma için Birleşmiş Milletler Konferansı Rio +20, 2012).

2015 yılına gelindiğinde ise bugünün sürdürülebilirlik eylemlerinde bile en çok konuşulan ve şartlarına bağlı kalınan iki önemli adım atılmıştır. Bunlardan biri Paris'de BM'in iklim değişikliği üzerine gerçekleştirilen COP21 Paris İklim değişikliği Konferansı'dır. Konferansın konusu özellikle sera gazlarının azaltılmasına yönelik gerçekleşmiştir. Konferansta yapılan onlarca konuşma sonrasında iklim değişikliği konusunda yasal olarak bağlayıcı olacak uluslararası anlaşma metni hazırlanmış ve bu anlaşma 12 Aralık 2015 tarihinde 191 Taraf tarafından kabul edilmiştir (BM İklim Değişikliği, 2021). Paris Anlaşması'nın yürürlüğe girmesi ise 1 yıldan daha az bir zamanda Kasım 2016'da gerçekleşmiştir.

Paris anlaşması sürdürülebilirlik çalışmalarında ilk kez bağlayıcı bir anlaşma olması sebebiyle dönüm noktasıdır. Paris anlaşmasının maddeleri ve kazanımları tüm dünyayı etkileyecek olan küresel ölçekte değerlendirilmesi gereken önemli bir olaydır. Anlaşma metninin maddelerinde tüm katılımcı ülkelerin rehber olarak alabileceği sürdürülebilir hedefler yer almaktadır. Paris Anlaşması, ülkelerin emisyonlarını nasıl azaltacağı ve iklim değişikliğinin etkileriyle nasıl başa çıkacağı konusunda uzun yıllar boyunca yön sağlamayı hedeflemektedir (COP 21 Paris, 2015). Anlaşmada gelişmiş ülkelerin emisyon azaltma hedeflerine ulaşmaları beklenirken, gelişmekte olan ülkelerin de emisyon azaltma hedeflerini yükseltmeleri beklenmektedir. Anlaşmanın özü sera gazı salınımlarından kaynaklanan küresel sıcaklık artışını uzun vadede 1.5 santigrat derece ile sınırlı kalmasına dayanmaktadır. Bu sebeple sera gazı salınımindaki artışa neden olan her türlü insan kaynaklı faaliyetlere dair önlemlerin alınması en temel ihtiyaç olarak görülmektedir. Örneğin tüm dünyada büyük karbon salınımlarına sebep olan milyonlarca atık her gün üretilmektedir. Atıkların neden olduğu sera gazı salınımı azaltmak için her ülkenin atık yönetimindeki rolünü doğru kavraması bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu sebeple ülkelerin sera gazı salınıminin en büyük etmenlerini doğru kavrayabilmesi ve

ülkenin genel durumuna göre hareket etmesi önceliklidir.

2015 yılındaki bir diğer önemli sürdürülebilir kalkınma çalışması ise günümüzde birçok ülkenin sürdürülebilirlik politikalarını oluşturduğu BM Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi'dir. 2015 yılında Türkiye'nin de içinde yer aldığı 193 ülkenin ortak kararıyla "2030 Sürdürülebilir Kalkınma" yürürlüğe girmiştir. Bu zirvede 2030 yılına kadar tüm dünyayı ilgilendiren 17 sürdürülebilir kalkınma hedefi paylaşılmıştır. Bir diğer ismiyle tüm dünyanın ortak hedefleri haline gelen "Küresel Hedefler" olarak da kabul edilmiştir. Bu hedeflerin belirlenmesi huzurlu ve sağlıklı bir yaşam için eylem çağrısı olarak görülmektedir. Belirlenen 17 hedefin her birinin eylemin diğer alanlardaki sonuçları etkileyeceği ve kalkınmanın sosyal, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği dengelemesi gerektiği kabul edilmektedir (UNDP, 2015).

Bu hedeflerin temeli sırasıyla aşağıda ifade edilmiştir:

Hedef 1: Yoksulluğun bütün biçimleriyle her yerde sona erdirilmesidir. 2015 yılında yaklaşık 736 milyon insanın her birinin 1,90 \$/gün altında gelirle yaşadığı tespit edilmiş ve bu kesimin çoğunluğunun yiyecek ve temiz içme suyundan mahrum kaldığı belirlenmiştir (UNDP, 2015). Bu doğrultuda sürdürülebilir kalkınmanın ilk hedefini oluşturan 'yoksulluğu önleme' çabaları 2030 yılına kadar ulaşılacak şekilde 7 alt hedefe ayrılarak detaylandırılmış ve üzerinde çalışmaya başlanmıştır. Bu hedeflerin özeti şu şekilde ifade edilebilir:

Hedef 1.1: Günümüzde 1,25 \$/gün altında bir gelirle geçinen insanların oluşturduğu aşırı yoksulluğu tüm dünyada ortadan kaldırmaktır.

Hedef 1.2: Tanımlara göre yoksulluk içindeki her yaştan insan oranını en az yarıya düşürmektir.

Hedef 1.3: Yoksul ve savunmasız kişiler için sosyal koruma sistemlerini ve önlemleri uygulamaktır.

Hedef 1.4: Tüm insanların ekonomik kaynaklar, mülkiyet biçimleri, miras, doğal kaynaklar ve uygun koşullar üzerinde mülkiyet üzerinde eşit haklarda olmasını sağlamaktır.

Hedef 1.5: Yoksul ve savunmasız kişilerin iklimle ilgili durumlara ve diğer ekonomik, sosyal ve çevresel şoklara ve afetlere maruz kalmalarını azaltmaktır.

Hedef 1.a: Yoksulluğu engellemek üzere çeşitli program ve politikaların uygulanmasını sağlamaktır.

Hedef 1.b: Yoksulluğun ortadan kaldırılmasını sağlayacak çeşitli hareketleri ve politikaları yatırımlarla desteklemektir.

Hedef 2: Açlığın sona erdirilmesi ve gıda güvenliğinin sağlanmasıdır. Tüm dünyada bu alanda önemli gelişmeler kaydedilmekte ve yetersiz beslenen insanların sayısının hızlı ekonomik büyüme ve tarım alanlarının verimliliğindeki artış nedeniyle son yirmi yılda neredeyse yarı yarıya azaldığı görülmektedir (undp.org, Erişim Tarihi: 11.02.22). Ancak dünyanın çeşitli bölgelerinde çevresel bozulmalar ve kuraklık gibi durumların olması sebebiyle açlık büyük bir problemdir. Özellikle Güney Amerika ve Afrika ülkelerinde açlık tehlikeli boyutlardadır. Hedef 2 için aynı zamanda 8 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir;

Hedef 2.1: Tüm dünyanın tüm yıl boyunca güvenli, besleyici ve yeterli gıdaya erişiminin sağlanmasıdır.

Hedef 2.2: Özellikle 5 yaşın altındaki çocuklar, ergen kızlar, hamile/emzikli kadınlar ve yaşlıların özel beslenme ihtiyaçlarını karşılamaktır.

Hedef 2.3: Özellikle kadınlar, çiftçiler, çobanlar ve balıkçılar gibi küçük ölçekli gıda üreticilerinin tarımsal üretkenliğini ve gelirlerini iki katına çıkarmak üzere katma değer sağlayacak destekler vermektir.

Hedef 2.4: Sürdürülebilir gıda üretim sistemlerini ve toprağın kalitesini her türlü duruma karşı iyileştiren tarım uygulamalarını sağlamaktır.

Hedef 2.5: Tohumların, ekili bitkilerin ve hayvanların genetik çeşitliliğini korumaktır.

Hedef 2.a: Gelişmekte olan ülkelerde tarım üretim kapasitesini artırmak üzere uluslararası işbirliği yoluyla yatırımı artırmaktır.

Hedef 2.b: Dünya tarım pazarlarındaki ticaret kısıtlamalarını ve çarpıklıkları düzeltmektir.

Hedef 2.c: Gıda fiyatlarındaki aşırı oynaklığı sınırlamaya yardımcı olmak için gıda emtia piyasalarının ve türevlerinin düzgün işleyişini sağlamaktır.

Hedef 3: Herkes için sağlıklı ve kaliteli yaşamı sağlamaktır. Sağlıklı bir yaşam sürmek

ve herkes için eşit sağlık şartlarına sahip olmak önemlidir. Hedef 3 için 13 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir;

Hedef 3.1: Dünyadaki anne ölüm oranını 100.000 canlı doğumda 70'in altına düşürmektir.

Hedef 3.2: Yeni doğan ölüm oranlarını ve 5 yaş altı çocuklardaki ölüm oranlarını belirli bir seviyede tutmaya yöneliktir.

Hedef 3.3: AIDS gibi hastalıkların salgınlarını sona erdirmek ve hepatit gibi bulaşıcı hastalıklarla mücadele etmektir.

Hedef 3.4: Bulaşıcı olmayan hastalıklardan kaynaklanan ölümleri engelleme ve tedavi yoluyla azaltmaktır.

Hedef 3.5: Madde kullanımını önlemek ve tedavilerini güçlendirmektir.

Hedef 3.6: Karayolu trafik kazalarından kaynaklanan ölüm ve yaralanma sayısını azaltmaktır.

Hedef 3.7: Aile planlaması hizmetlerine yönelik stratejiler ve programlar geliştirmektir.

Hedef 3.8: Tüm insanlar için kaliteli temel sağlık hizmetlerine erişim sağlayacakları evrensel sağlık sigortasına ulaşmaktır.

Hedef 3.9: Tehlikeli kimyasallardan kaynaklanan ölüm ve hastalık sayısını azaltmaktır.

Hedef 3.a: Dünya Sağlık Örgütü Tütün Kontrolü Çerçeve Sözleşmesinin uygulanmasını sağlamaktır.

Hedef 3.b: Bulaşıcı ve bulaşıcı olmayan hastalıklara yönelik aşıların ve ilaçların araştırılması ve geliştirilmesini desteklemektir.

Hedef 3.c: Gelişmekte olan ülkelerde sağlık finansmanını ve sağlık işgücünün işe alınmasını, eğitilmesini ve elde tutulmasını arttırmaktır.

Hedef 3.d: Sağlık risklerinin yönetimine yönelik güçlendirme yapmaktır.

Hedef 4: Herkes için kaliteli ve eşit fırsatlarda eğitim sağlamaktır. Hedef 4 için 10 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir;

Hedef 4.1: Ücretsiz, eşitlikçi ve kaliteli ilk ve orta öğretimin tamamlanmasını sağlamaktır.

Hedef 4.2: Tüm çocukların, ilköğretime hazır olmaları için kaliteli okul öncesi eğitime

erişimlerini sağlamaktır.

Hedef 4.3: Tüm bireylerin, uygun maliyetli ve kaliteli yüksek öğrenime eşit şekilde ulaşmasını sağlamaktır.

Hedef 4.4: Teknik ve mesleki becerilere sahip genç ve yetişkinlerin sayısını artırmaktır.

Hedef 4.5: Eğitimde cinsiyet eşitliğini sağlamak ve savunmasız kişilerin tüm eğitim ve mesleki seviyelere erişimini desteklemektir.

Hedef 4.6: Tüm bireylerin okuryazarlık ve matematik becerisine sahip olmasını desteklemektir.

Hedef 4.7: Sürdürülebilir yaşam tarzları için eğitim, insan hakları, cinsiyet eşitliği ve şiddet içermeyen bir kültüre teşvik etmektir.

Hedef 4.a: Her kesim için güvenli ve etkili öğrenme ortamları sağlamaktır.

Hedef 4.b: Küçük ada devletlerine ve Afrika ülkelerine verilen bursların sayısını küresel olarak önemli ölçüde artırmaktır.

Hedef 4.c: Gelişmekte olan ülkelerde ğretmen eğitimi için nitelikli ğretmen arzını önemli ölçüde artırmaktır.

Hedef 5: Cinsiyet eşitliğini sağlamak ve kız çocukları/kadınları güçlendirmektir. Sürdürülebilir gelecek için özellikle cinsiyet ayrımcılığını ortadan kaldırmak ve kızları/kadınları her yönde güçlendirmek önemlidir. Hedef 5 için 9 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir;

Hedef 5.1: Tüm kadınlara/kız çocuklarına karşı bütün ayrımcılığı sonlandırmaktır.

Hedef 5.2: Kamu ve özel alanlarda kadınlara/kız çocuklarına yönelik şiddeti ortadan kaldırmaktır.

Hedef 5.3: Erken yaşta ve zorla evlendirme ve kadın sünneti gibi tüm zararlı durumları ortadan kaldırmaktır.

Hedef 5.4: Kamu hizmetleri, altyapı ve sosyal koruma politikalarını desteklemektir.

Hedef 5.5: Kadınların siyasi, ekonomik ve kamusal yaşamda tam ve etkin katılımı için eşit fırsatları yaratmaktır.

Hedef 5.6: Cinsel sağlık, üreme sağlığı ve üreme haklarına evrensel erişimi sağlamaktır.

Hedef 5.a: Kadınlara ekonomik kaynaklar üzerinde eşit haklar, arazi ve diğer mülkiyet biçimleri, mali hizmetler ve miras üzerinde mülkiyet ve denetime erişim hakkı verilmesini sağlamaktır.

Hedef 5.b: Kadınlar tarafından bilgi ve iletişim gibi teknolojilerin kullanımını geliştirmektir.

Hedef 5.c: Tüm kadınlara/kız çocuklarına yönelik güçlü politikaları ve uygulanabilir mevzuatı benimsemektir.

Hedef 6: Tüm dünyada erişilebilir su kaynağı sağlamaktır. Su kıtlığı, insanların %40'ından fazlasını etkilemekte ve artan kuraklık ve çölleşme doğrultusunda 2050 yılına kadar her dört kişiden en az birinin tekrarlayan su sıkıntısı çekeceği tahmin edilmektedir (undp.org, Erişim Tarihi: 11.02.22). Bu sebeple sürdürülebilir kalkınmanın önemli hedeflerinden birini su güvencesi oluşturmuştur. Hedef 6 için 8 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir;

Hedef 6.1: Tüm dünyanın güvenli ve uygun fiyatlı içme suya erişmesini kolaylaştırmaktır.

Hedef 6.2: Tüm dünyanın yeterli ve adil sanitasyon ve hijyene erişimini sağlamaktır.

Hedef 6.3: Kirliliği azaltarak, arıtılmamış atık su oranını yarıya indirerek ve küresel olarak geri dönüşümü ve güvenli yeniden kullanımı önemli ölçüde artırarak su kalitesini iyileştirmektir.

Hedef 6.4: Tüm sektörlerde su kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırmaktır.

Hedef 6.5: Tüm seviyelerde entegre su kaynakları yönetimini uygulamaktır.

Hedef 6.6: Suyla ilgili ekosistemi korumaktır.

Hedef 6.a: Su ile ilgili faaliyetler ve programlarda gelişmekte olan ülkelere yönelik uluslararası işbirliği ve kapasite geliştirme desteğini genişletmektir.

Hedef 6.b: Su yönetiminin iyileştirilmesine yerel toplulukların katılımını desteklemektir.

Hedef 7: Tüm dünya tarafından erişilebilir ve temiz enerjiye ulaşmaktır. Nüfusun artmaya devam etmesi ucuz enerji talebinin artmasına ve fosil yakıtlara dayanan ekonomi ikliminde ciddi değişiklikler olmasına neden olmaktadır ve bu sebeple sürdürülebilir kalkınma için enerji verimliliğini yaratmak önemli bir hedeftir (undp.org, Erişim Tarihi:

11.02.22). Hedef 7 için 5 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 7.1: Ekonomik, güvenilir ve gelişmiş enerji hizmetlerine herkes tarafından erişimin sağlanmasıdır.

Hedef 7.2: Yenilenebilir enerjinin payını artırmaktır.

Hedef 7.3: Enerji verimliliğindeki küresel iyileşme oranını arttırmaktır.

Hedef 7.a: Yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği başta olmak üzere uluslararası işbirliğini geliştirmek ve enerji altyapısına yatırım yapılmasını sağlamaktır.

Hedef 7.b: Gelişmekte olan ülkelerde destek programlarına uygun olarak modern ve sürdürülebilir enerji hizmetlerini sağlamak için altyapı genişletmek ve teknolojiyi yükseltmektir.

Hedef 8: Sürdürülebilir, kapsayıcı ve istikrarlı ekonomik büyümeyi ve yüksek üretken istihdamı sağlamaktır. Uluslararası Çalışma Örgütü'ne göre 2015 yılında 204 milyondan fazla kişinin işsiz olması (undp.org, Erişim Tarihi: 11.02.22), sürdürülebilir kalkınmada öncelik verilen konulardan biri olmasına neden olmuştur. Hedef 8 için 12 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 8.1: Ulusal koşullara uygun olarak kişi başına düşen ekonomik büyümeyi sürdürmektir.

Hedef 8.2: Teknolojik iyileştirme ve yenilik yoluyla daha yüksek ekonomik üretkenlik seviyelerine ulaşmaktır.

Hedef 8.3: Mikro, küçük ve orta ölçekli işletmelerin resmileşmesini ve büyümesini teşvik eden kalkınma odaklı politikaları teşvik etmektir.

Hedef 8.4: Tüketim ve üretimde küresel kaynak verimliliğini aşamalı olarak iyileştirmektir.

Hedef 8.5: Tüm çalışacak bireyler için insana yakışır iş ve eşit değerdeki işe adil ücretlendirme sağlamaktır.

Hedef 8.6: İstihdamda, eğitim veya öğretimde olmayan genç nüfusu azaltmaktır.

Hedef 8.7: Çocuk işçiliğinin her şekline son vermek için önlemler almaktır.

Hedef 8.8: İşçi haklarını korumak ve güvenli çalışma ortamlarını sağlamaktır.

Hedef 8.9: İstihdam sağlayan ve yerel kültüre teşvik eden sürdürülebilir turizme yönelik politikaları tasarlamak ve uygulamaktır.

Hedef 8.10: Herkes için finansal hizmetlere erişimi teşvik etmek ve yerel finans kurumlarının kapasitesini güçlendirmektir.

Hedef 8.a: Gelişmekte olan ülkelere yönelik ticaret ile ilişkili teknik yardımın artırılmasıdır.

Hedef 8.b: Genç istihdam için küresel strateji geliştirmek ve operasyonel hale getirmektir.

Hedef 9: Kapsayıcı ve sürdürülebilir sanayileşmeyi teşvik etmek ve dayanıklı altyapı oluşturmaktır. Altyapı ve inovasyona yatırım, ekonomik büyüme ve kalkınmanın önemli itici gücüdür ve bu sebeple sürdürülebilir kalkınma için endüstrileri teşvik etmek ve bilimsel araştırma ve inovasyona yatırım yapmak oldukça gerekli bir durumdur (undp.org, Erişim Tarihi: 12.02.22). Sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir ayağı olan Hedef 9 için 8 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 9.1: Ekonomik kalkınmayı ve insan refahını desteklemek için kaliteli, güvenilir, sürdürülebilir ve dayanıklı altyapı geliştirmektir.

Hedef 9.2: Sanayideki istihdam ve GSYH payını ulusal koşullara uygun olarak önemli derecede artırmaktır.

Hedef 9.3: Küçük ölçekli sanayi ve diğer işletmelerin finansal hizmetlere erişimini ve bunların değer zincirlerine entegrasyonunu artırmaktır.

Hedef 9.4: Kaynak kullanım verimliliğini artırma ve çevreye duyarlı teknoloji/süreçlerin daha fazla kabul edilmesi amacıyla altyapı ve güçlendirme endüstrilerini yükseltmektir.

Hedef 9.5: İnovasyonu hem kamu hem de özel sektörlerde teşvik edecek şekilde bilimsel araştırmaları geliştirmek ve sektörlerin teknolojik yeteneklerini yükseltmektir.

Hedef 9.a: Afrika ülkeleri ve gelişmekte olan ülkeler için mali, teknolojik ve teknik destek vererek altyapı gelişimini kolaylaştırmaktır.

Hedef 9.b: Gelişmekte olan ülkelerde yerli teknoloji geliştirme, araştırma ve inovasyonu desteklemektir.

Hedef 9.c: Bilgi ve iletişim teknolojilerine erişimi önemli ölçüde artırmak ve en az gelişmiş ülkelerde internete evrensel ve uygun maliyetli erişim sağlamaktır.

Hedef 10: Tüm dünyadaki gelir eşitsizliklerini azaltmaktır. Her geçen gün artan gelir eşitsizliği küresel çözümün gerektirdiği büyük bir problemdir. Sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir ayağı olan Hedef 10 için 10 alt hedef tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 10.1: Nüfusun en alt katmandaki %40'lık kesiminin gelir artışını ulusal ortalamanın üzerinde kademeli olarak elde etmektir.

Hedef 10.2: Herhangi bir özelliğine (din, ırk vb.) bağlı olmadan tün dünyadaki bireylerin sosyal, ekonomik ve politik güçlenmesini teşvik etmektir.

Hedef 10.3: Ayrımcı yasaları, politikaları ve uygulamaları ortadan kaldırmak ve bu bağlamda uygun yasaları, politikaları ve eylemleri teşvik etmektir.

Hedef 10.4: Özellikle maliye, ücret ve sosyal koruma politikalarını benimsemektir.

Hedef 10.5: Küresel finans piyasalarının düzenlenmesini ve kurumların izlenmesini iyileştirmek ve güçlendirmektir.

Hedef 10.6: Uluslararası finansal kurumların karar alma süreçlerinde daha güvenilir ve hesap verebilir kurumlar sunmak için gelişmekte olan ülkelerin daha fazla söz sahibi olmasını sağlamaktır.

Hedef 10.7: İnsanların düzenli, güvenli, düzenli ve sorumlu göçünü ve hareketliliğini politikalarla kolaylaştırmaktır.

Hedef 10.a: Dünya Ticaret Örgütü anlaşmalarına uygun olarak gelişmekte olan ülkeler için özel ve farklı muamele ilkesini uygulamaktır.

Hedef 10.b: Ulusal plan ve programlarına uygun olarak, Afrika ülkeleri ve gelişmekte olan ülkelerde en fazla ihtiyacı olanlara resmi kalkınma yardımı sağlamaktır.

Hedef 10.c: 2030'a kadar göçmen havalelerinin işlem maliyetlerini yüzde 3'ün altına düşürmektir.

Hedef 11: Sürdürülebilir şehirler ve toplumlar yaratmaktır. Hızlı artan nüfus ve kentlere olan büyük göçler sebebiyle şehirleri sürdürülebilir kılmak önemli bir konu haline gelmiştir. Sürdürülebilir kalkınmada önemli olan Hedef 11 için 10 alt hedef

tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 11.1: Tüm insanların güvenli ve uygun fiyatlı konutlara ve temel hizmetlere erişiminin sağlanması ve gecekonduda yaşıyan kesim için ise konutların daha iyi koşullara getirilmesini kolaylaştırmaktır.

Hedef 11.2: Tüm insanlar için güvenli, uygun maliyetli, erişilebilir ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine erişim sağlamak ve yol güvenliğini artırmaktır.

Hedef 11.3: Tüm dünyada sürdürülebilir nüfus yerleşimin planlanması ve yönetimi için kapasitenin geliştirilmesidir.

Hedef 11.4: Dünyanın kültürel ve doğal mirasını koruma ve muhafaza etme çabalarını güçlendirmektir.

Hedef 11.5: Yoksulları ve savunmasız durumdaki insanları korumaya odaklanarak, afetlerin neden olduğu ekonomik kayıpları önemli ölçüde azaltmak ve zarar görecektir insan sayısını büyük ölçüde azaltmaktır.

Hedef 11.6: Hava kalitesine ve atık yönetimine önem vererek şehirlerdeki kişi başına olumsuz çevresel etkileri azaltmaktır.

Hedef 11.7: Özellikle kadınlar, çocuklar, yaşlılar ve engelliler için güvenli, erişilebilir, yeşil ve kamusal alanlara evrensel erişimin sağlanmasıdır.

Hedef 11.a: Ulusal/bölgesel kalkınma planlamasını sağlamlaştırarak kentsel ve kırsal alanlar arasındaki ekonomik, sosyal ve çevresel bağlantıları güçlendirmektir.

Hedef 11.b: Sürdürülebilir şehirlerin geliştirilmesine yönelik hazırlanan politika ve programları uygulayan şehirlerin ve insan yerleşimlerinin sayısını önemli ölçüde artırmaktır.

Hedef 11.c: Sürdürülebilir ve dayanıklı binalar inşa etmek için mali ve teknik yardım ile en az gelişmiş ülkeleri desteklemektir.

Hedef 12: Sürdürülebilir üretim ve tüketimi teşvik etmektir. Ortak doğal kaynakların verimli yönetimi ve zehirli atık ve kirleticileri bertaraf etme şekli önemli hedeflerdir ve sanayileri, işletmeleri ve tüketicileri geri dönüştürmeye ve atıkları azaltmaya teşvik etmek, gelişmekte olan ülkeleri 2030 yılına kadar daha sürdürülebilir tüketim kalıplarına doğru ilerlemeye desteklemek oldukça kritiktir (undp.org, Erişim Tarihi: 13.02.22).

Sürdürülebilir kalkınmada önemli olan Hedef 12 için 11 alt hedef tanımlanmış ve bu hedeflerin her biri Türkiye için geçerli kılınmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019). 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 12.1: Sürdürülebilir tüketim ve üretime ilişkin 10 yıllık programları, gelişmekte olan ülkelerin kalkınma ve yeteneklerini dikkate alarak tüm ülkelerde uygulamaktır.

Hedef 12.2: Doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimini ve verimli kullanımını sağlamaktır.

Hedef 12.3: Perakende ve tüketici seviyelerinde kişi başına düşen küresel gıda israfını yarıya indirmek ve hasat sonrası kayıplar da dahil olacak şekilde tedarik zincirleri boyunca gıda kayıplarını azaltmaktır.

Hedef 12.4: Tüm atıkların yaşam döngüleri boyunca çevresel açıdan sağlıklı şekilde yönetilmesini sağlamak ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek için havaya, suya ve toprağa salınımlarını büyük oranlarda azaltmaktır.

Hedef 12.5: Önleme, azaltma, geri dönüşüm ve yeniden kullanım yoluyla atık üretimini önemli derecede azaltmaktır.

Hedef 12.6: Şirketleri sürdürülebilir uygulamaları benimsemeye ve sürdürülebilirlik bilgileri raporlama döngülerine entegre etmeye teşvik etmektir.

Hedef 12.7: Ulusal politikalara uygun olarak sürdürülebilir kamu uygulamalarını teşvik etmektir.

Hedef 12.8: İnsanların sürdürülebilir kalkınma ve doğayla uyumlu yaşam tarzları için gerekli bilgiye ulaşmalarını sağlamaktır.

Hedef 12.a: Gelişmekte olan ülkeleri, daha sürdürülebilir tüketim ve üretim kalıplarına geçmeleri için bilimsel ve teknolojik kapasitelerini güçlendirmelerini desteklemektir.

Hedef 12.b: İstihdam yaratan ve yerel kültürü teşvik eden sürdürülebilir turizmde sürdürülebilir kalkınma etkilerini izlemek için araçlar geliştirmektir.

Hedef 12.c: Ulusal koşullara uygun olarak piyasa bozulmalarını ortadan kaldırarak, özel ihtiyaçları ve gelişmekte olan ülkelerin kalkınmaları üzerinde sebep olunan olumsuz etkileri yoksulları ve toplulukları koruyacak şekilde en aza indirmektir.

Hedef 13: İklim değışikliğı etkileri ile afetlere karşı küresel düzeyde harekete geçmektir. İklim değışikliğinin etkileri tüm dünyada hissedilmektedir. Sera gazı emisyonlarının 1990'dakine nazaran %50'den fazla olduğu tespit edilmiş ve küresel ısınma, iklim sisteminde uzun süreli değışikliklere neden olarak harekete geçilmediğinde geri dönüşü olmayan sonuçlar yaratacağı belirlenmiştir (undp.org, Erişim Tarihi: 13.02.22). Sürdürülebilir kalkınmada yer alan Hedef 13 için 5 alt hedef tanımlanmış ve bu hedeflerin ilk üçü Türkiye için geçerli kılınmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019). 2030 yılına kadar bu hedeflerin temeli şu şekilde özetlenebilir:

Hedef 13.1: Tüm ülkelerin iklimle ilgili tehlikelere ve doğal afetlere karşı dayanıklılığını güçlendirmektir.

Hedef 13.2: İklim değışikliğı önlemlerini ulusal politikalara ve stratejilere entegre etmektir.

Hedef 13.3: İklim değışikliğıyle mücadele, uyum ve etki azaltma konularında eğitim kapasitesini geliştirmektir.

Hedef 13.a: Gelişmiş ülke tarafları tarafından Birleşmiş Milletler İklim Değışikliğı Çerçeve Sözleşmesine bağlı kalarak, geliştirmekte olan ülkelerin ihtiyaçlarına destek olabilmek için 2020 yılına kadar ortaklaşa 100 milyar dolar/yıl hedefe yönelik taahhüdü uygulamak ve Yeşil İklim Fonu'nu tamamen operasyonel hale getirmektir.

Hedef 13.b: Geliştirmekte olan ülkelerde iklim değışikliğı ile ilgili etkili planlama ve yönetim kapasitesini artırmaya yönelik mekanizmaları teşvik etmektir.

Hedef 14: Su kaynaklarını korumak ve sürdürülebilir kullanmaktır. Sanayi devriminin başladığından bugüne kadar geçen zaman içinde su kaynaklarının asitlenmesinde % 26'lık bir artış tespit edilmiş ve bu doğrultuda sürdürülebilir kalkınma hedeflerinde deniz ve kıyı ekosistemlerini sürdürülebilir bir şekilde yönetmek ve kirlilikten korumak yer almıştır (undp.org, Erişim Tarihi: 14.02.22). Hedef 14 için 10 alt hedef tanımlanmış ve bu hedeflerin altısı Türkiye için geçerli kılınmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019).

Hedef 14.1: 2025 yılına kadar, kara kaynaklı faaliyetlerin neden olduğu her türlü deniz kirliliğini önlemektir.

Hedef 14.2: 2020 yılına kadar, deniz ve kıyı ekosistemlerini sürdürülebilir bir şekilde korumak ve sağlıklı okyanuslar elde etmek için harekete geçmektir.

Hedef 14.3: Her düzeyde bilimsel işbirliği ile okyanus asitlenmesinin etkilerini en aza indirmektir.

Hedef 14.4: 2020 yılına kadar, balık stoklarını maksimum sürdürülebilir verimle üretebilecek seviyelere getirmek için hasadı düzenlemek ve aşırı avlanma ve bildirilmeyen balıkçılık uygulamalarına son vermektir.

Hedef 14.5: 2020 yılına kadar, tüm dünyadaki hukuka uygun olarak, bilimsel bilgilere dayanarak kıyı ve deniz alanlarının en az yüzde 10'un korunmasını sağlamaktır.

Hedef 14.6: 2020 yılına kadar aşırı kapasiteye ve avlanmaya neden olan balıkçılık sübvansiyonlarının yasaklanması ve yasadışı, bildirilmeyen ve düzenlenmemiş sübvansiyonların kaldırılması Dünya Ticaret Örgütü balıkçılık sübvansiyonları müzakeresinin ayrılmaz bir parçası haline getirilmektir.

Hedef 14.7: 2030 yılına kadar deniz kaynaklarının sürdürülebilir kullanımında Küçük Ada Devletlerine ve en az gelişmiş ülkelere sağlayacağı ekonomik faydaları artırmaktır.

Hedef 14.a: Okyanus sağlığını iyileştirmek ve deniz biyo çeşitliliğin gelişmekte olan ülkelerin kalkınmasına katkısı sağlamak amacıyla bilimsel bilgiyi artırmak ve araştırma kapasitesini geliştirmektir.

Hedef 14.b: Küçük ölçekli balıkçıların deniz kaynaklarına ve pazarlarına erişimlerini sağlamaktır.

Hedef 14.c: Su kaynaklarını korumak ve uluslararası hukuku uygulayarak geliştirmektir.

Hedef 15: Karada yaşamı sürdürülebilir haline getirmektir. Karadaki ekosistemin korunmasını sağlamak, iyileştirmek ve sürdürülebilir hale getirmek, ormanların sürdürülebilir yönetimi sağlamak, arazi bozulmalarını engellemek ve biyo çeşitliliği korumak sürdürülebilir kalkınma için oldukça önemlidir. Hedef 15 için 12 alt hedef tanımlanmış ve bu hedeflerin tümü Türkiye için geçerli kılınmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019).

Hedef 15.1: 2020 yılına kadar uluslararası anlaşmalardaki yükümlülükler doğrultusunda karasal ve iç tatlı su ekosistemlerinin sürdürülebilir kullanımının sağlamaktır.

Hedef 15.2: 2020 yılına kadar her tür ormanda sürdürülebilir yönetimin uygulanmasını teşvik etmek, bozulmuş olanları eski haline getirmek ve küresel düzeyde yeniden ağaçlandırmayı arttırmaktır.

Hedef 15.3: 2030'a kadar bozulmuş arazi ve toprağı eski haline getirmek ve arazi bozulmasını nötralize etmek için çabalamaktır.

Hedef 15.4: 2030 yılına kadar dağ ekosistemlerini korumaktır.

Hedef 15.5: Doğal yaşam alanlarının bozulmasını azaltmak, biyolojik çeşitlilik kaybını durdurmak ve 2020 yılına kadar tehdit altındaki türlerin neslini korumaktır.

Hedef 15.6: Genetik kaynakların kullanımından doğan faydaların adil ve hakkaniyetli paylaşımını sağlamak ve kaynaklara uygun erişimi teşvik etmektir.

Hedef 15.7: Korunan flora/fauna türlerinin kaçakçılığını sona erdirmek için önlem almaktır.

Hedef 15.8: 2020 yılına kadar, istilacı yabancı türlerin kara ve su ekosistemleri üzerindeki etkisini önemli ölçüde azaltmak ve öncelikli türlerin kontrol edilmesini sağlamaktır.

Hedef 15.9: 2020 yılına kadar ekosistem ve biyolojik çeşitlilik değerlerini yerel planlama, ve kalkınma süreçlerine entegre etmektir.

Hedef 15.a: Biyo çeşitliliği ve ekosistemleri korumak için tüm kaynaklardan gelen finansal kaynakları önemli ölçüde artırmaktır.

Hedef 15.b: Sürdürülebilir orman yönetimini finanse etmek için her seviyedeki kaynakları seferber etmek ve kaynakları geliştirmek üzere gelişmekte olan ülkelere yeterli teşvikler sağlamaktır.

Hedef 15.c: Sürdürülebilir geçim fırsatlarını devam ettirmek için korunan türlerin kaçakçılığına karşı uygulanan çabada küresel desteği artırmaktır.

Hedef 16: Herkes için barış ve adaletin sağlanmasına destek olmak ve bu doğrultuda harekete geçmektir. Hedef 16 için 12 alt hedef tanımlanmış ve bu hedeflerin ilk 10 tanesi Türkiye için geçerli kılınmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019). Bu hedefler:

Hedef 16.1: Tüm dünyadaki şiddeti ve buna bağlı ölüm oranlarını önemli ölçüde azaltmaktır.

Hedef 16.2: Çocuklara yönelik istismar, sömürü, insan ticareti ve her türlü şiddete son vermektir.

Hedef 16.3: Ulusal ve uluslararası seviyede hukukun üstünlüğünü teşvik etmek ve herkes için adalete eşit şekilde erişimi sağlamaktır.

Hedef 16.4: Yasa dışı silah akışlarını büyük oranda azaltmak ve her türlü organize suçla mücadele etmektir.

Hedef 16.5: Yolsuzluk ve rüşvetin her şeklini azaltmaktır.

Hedef 16.6: Her düzeyde hesap verebilir ve şeffaf kurumlar geliştirmektir.

Hedef 16.7: Her düzeyde duyarlı, katılımcı ve temsili karar almayı sağlamaktır.

Hedef 16.8: Gelişmekte olan ülkelerin küresel yönetim kurumlarına katılımını güçlendirmek ve geliştirmektir.

Hedef 16.9: Her insan için yasal kimlik sağlamaktır.

Hedef 16.10: Ulusal mevzuat ve uluslararası anlaşmalar uyarınca halkın bilgiye erişimini sağlamaktır.

Hedef 16.a: Şiddeti önlemek ve suçla mücadele etmek için özellikle gelişmekte olan ülkelerde her düzeyde kapasite oluşturmak için ulusal kurumları güçlendirmektir.

Hedef 16.b: Herkes için eşit yasaları ve politikaları uygulamaktır.

Hedef 17: Sürdürülebilir ortaklığı sağlamaktır. Sürdürülebilir kalkınma için aynı hedeflere ulaşmayı sağlayacak işbirliği ayrıca önemlidir. Bu doğrultuda Hedef 17, 5 ana başlık ve 19 alt hedef etrafında açıklanmıştır. Bu hedefler:

Finans Açısından;

Hedef 17.1: Gelişmekte olan ülkelere vergi ve diğer gelir tahsilatları için yerel kapasiteyi geliştirmek üzere yerel kaynak seferberliğini güçlendirmektir.

Hedef 17.2: Gelişmiş ülkelerin, gelişmekte olan ülkelere yönelik resmi kalkınma yardımı taahhütlerini tam olarak yerine getirmelerini sağlamaktır.

Hedef 17.3: Gelişmekte olan ülkeler için birçok farklı kaynaktan ilave finansal kaynakları harekete geçirmektir.

Hedef 17.4: Borç finansmanını, borç tahliyesini ve borç yeniden yapılandırmasını teşvik

etmeyi amaçlayan koordineli politikalar yoluyla gelişmekte olan ÷lkelere yardımcı olmak ve yüksek borçlu yoksul ÷lkelerin dış borcunu ele almaktır.

Hedef 17.5: En az gelişmiş ÷lkeler için yatırım teşvik rejimlerini uygulamaktır.

Teknoloji Açısından;

Hedef 17.6: Kuzey-Güney, Güney-Güney ve üçlü bölgesel ve uluslararası işbirliğini karşılıklı olarak mutabık kalınan şartlarla bilgi paylaşımını ve küresel teknoloji kolaylaştırma mekanizması geliştirmektir.

Hedef 17.7: Karşılıklı olarak mutabık kalındığı üzere uygun şartlarla çevreye duyarlı teknolojilerin geliştirilmesini, transferini ve gelişmekte olan ÷lkelere yayılmasını teşvik etmektir.

Hedef 17.8: 2017 yılına kadar en az gelişmiş ÷lkeler için teknoloji bankası ile bilim, teknoloji ve inovasyon kapasite geliştirme mekanizmasını operasyonel seviyeye getirmek ve özellikle bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımını geliştirmektir.

Kapasite Geliştirme;

Hedef 17.9: Kuzey-Güney, Güney-Güney ve üçgen işbirliği olmak üzere bütün sürdürülebilir kalkınma hedeflerini uygulamaya yönelik uluslararası desteğin artırılmasıdır.

Ticaret;

Hedef 17.10: Doha Kalkınma Gündemi ve Dünya Ticaret Örgütü kapsamında evrensel, kurallara dayalı ve adil çok taraflı ticaret sistemini teşvik etmektir.

Hedef 17.11: Özellikle en az gelişmiş ÷lkelerin küresel ihracattaki payını 2020 yılına kadar iki katına çıkarmak amacıyla gelişmekte olan ÷lkelerin ihracatlarını büyük oranda artırmaktır.

Hedef 17.12: Dünya Ticaret Örgütü kararlarına uygun olarak, en az gelişmiş ÷lkeler için kalıcı olarak gümrüksüz ve kotasız piyasaya erişimin zamanında uygulanmasını gerçekleştirmek ve pazara erişimi kolaylaştırmaktır.

Politika ve Kurumsal Uyum;

Hedef 17.13: Küresel makroekonomik istikrarı geliştirmektir.

Hedef 17.14: Sürdürülebilir kalkınma için politika tutarlılığını geliştirmektir.

Hedef 17.15: Yoksulluğun ortadan kaldırılması ve sürdürülebilir kalkınma için çok paydaşlı politikalar oluşturmak ve uygulamaktır.

Çok paydaşlı işbirlikleri;

Hedef 17.16: Tüm ülkelerde sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasını desteklemek için bilgi, uzmanlık, teknoloji ve finansal kaynakları harekete geçirme ve çok paydaşlı ortaklıklarla küresel ortaklığı geliştirmektir.

Hedef 17.17: Ortaklıkların deneyimine ve kaynak bulma stratejilerine dayanarak kamu, kamu-özel ve sivil toplum ortaklıklarını teşvik etmektir.

Veri Takip Edebilme ve Hesap Verilebilirlik;

Hedef 17.18: 2020 yılına kadar gelir, cinsiyet, yaş, ırk, etnik köken, göçmenlere göre ayrıştırılmış yüksek kaliteli, zamanında ve güvenilir verilerin mevcudiyetini önemli ölçüde artırmaktır.

Hedef 17.19: 2030'a kadar gayri safi yurtiçi hasılayı tamamlayan ve gelişmekte olan ülkelerde istatistiksel kapasite geliştirmeyi destekleyen sürdürülebilir kalkınmaya ilişkin ilerleme ölçümlerini geliştirmektir.

Günümüze doğru geldikçe önemli adımlardan biri Avrupa Birliği'nin Aralık, 2019'da açıkladığı ekonomik dönüşüm programı olarak görülen Avrupa Yeşil Mutabakatı'(AYM) dır. Bu mutabakatta AB tarafından yeni büyüme stratejisi olarak enerji, ulaşım ve sanayi gibi birçok farklı şekilde ekonomiyi etkileyen eylemlerin gözden geçirilerek ilgili politikaların şekillendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur (Muş, 2021). AYM, Avrupa ekonomisini, üretim ve tüketim kalıplarını dönüştürmeye dayanan politika ve finansal kaynakların bir paketi olarak ifade edilebilir (Keleş, 2021). Mutabakatın önemli bir tarafı sadece AB ülkelerini değil, bu ülkelerle ticari ilişki içinde olan diğer tüm ülkeleri ilgilendiriyor olmasıdır.

Mutabakatın en temel hedeflerinden biri 2050 yılına kadar Avrupa kıtasını iklim nötr hale getirebilmektir. Bu hedefe ulaşabilmek için mutabakat doğrultusunda döngüsel ekonomiye geçişi sağlayan birçok farklı strateji gündeme gelmekte ve çeşitli projeler geliştirilmeye ve uygulanmaya devam etmektedir. Eylem planları içinde özellikle "iklim nötr" yani karbon nötrlüğü sağlayan yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir üretim

ve tüketim kalıpları, sürdürülebilir gıda sistemleri, temiz ulaşım gibi konular daha çok gündeme alınmaktadır. Bu doğrultuda önerilen bazı temel çalışmalar şu şekildedir:

*Enerji tüketiminin önemli bir payını oluşturan binaların yenilenmesi sürdürülebilirlik için kritik bir konudur ve binaların enerji verimliliğine odaklanılarak sürdürülebilir kentsel gelişim hareketine başlanmalıdır.

* Enerji üretimi ve kullanımı AB'nin sera gazı emisyonlarının %75'inden fazlasını oluşturması sebebiyle enerji sektörünün altyapısını modernize etmek ve enerji verimliliğini teşvik ederek temiz, yenilenebilir enerji kullanımına öncelik vermek gereklidir.

*Ulaşım araçlarından kaynaklanan emisyonları azaltma amacıyla daha temiz ve daha verimli toplu/özel ulaşım kullanımını teşvik eden çalışmalar yapılmalıdır.

* Sanayide kullanılan malzemelerin sadece %12'sinin geri dönüşümden gelmesi sebebiyle üreticilerin süreçlerini revize etmeleri ve sıfır emisyon üreten döngüsel üretimi teşvik edecek yardımların verilmesi sağlanmalıdır. Kısacası Avrupa Yeşil Mutabakatı döngüsel ekonomiye geçme amacıyla doğal kaynak tüketimini sınırlamaya, kaynak kullanım verimliliğini arttırmaya ve kirliliği azaltmaya odaklanmaktadır.

Bölümde anlatıldığı gibi sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma herkes için önemlidir, çünkü tüm dünyanın sahip olduğu doğal kaynaklar sınırlıdır ve mevcut kaynakları maksimum verim alacak şekilde yönetmek hem ekonomik hem ekolojik hem de canlıların sağlığı açısından kritik bir konudur. Bunun bilincinde olan dünya ülkelerinin sürdürülebilir yaşamı sağlamak üzere çeşitli politikalar ve programlar geliştirmeleri bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu kapsamdaki hareketlerden en önemlilerinden biri döngüsel ekonomiyi sağlamak üzere birçok ülkenin iklim planlarında, sürdürülebilirlik mevzuatlarında veya yeşil eylem planlarında 'atık yönetimini' ele alan uygulamalar yapmasıdır.

1.3.2. Sürdürülebilir Atık Yönetimine Yönelik Farklı Ülkelerdeki Projeler

Paris İklim Değişikliği Konferansı, BM Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi ve Avrupa Birliği Yeşil Mütakat gibi sürdürülebilir kalkınmaya yönelik gerçekleştirilen büyük çalışmalarda ülkeler yapılan görüşmeler sonrasında kendi eylem planlarını ve politikalarını geliştirmeye başlamışlardır. Özellikle bu eylem planlarından biri döngüsel

ekonominin özünü oluşturan doğal kaynakların yönetimine yönelik gerçekleşmektedir. Küresel kaynak tüketiminin son kırk yılda üç katına çıktığı belirlenmiş (Birleşmiş Milletler Çevre Programı, 2016) ve bu durum gelecek nesiller için büyük bir tehdit haline gelmiştir. Diğer taraftan doğal kaynak çıkarma ve işleme faaliyetlerinin toplam küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %50'sini oluşturduğu (Uluslararası Kaynak Paneli, 2019) tespit edilmiştir. Buradan hareketle döngüsel ekonomiye geçiş neredeyse bütün ülkelerin gündemine bir şekilde oturmuştur. "Döngüsel ekonomi", sistem odaklı bir yaklaşımı ifade etmektedir. Döngüsel ekonomi malzemelerin, ürünlerin ve sistemlerin yeniden tasarlanarak atıkları ortadan kaldıracak şekilde kaynakların en uzun süre en yüksek değerlerini korumalarına odaklanmakta ve yeni ürün üretiminde hammadde görevi görececek atıklar kaynak olarak geri kazanılmaktadır (EPA, 2021). Bu noktada kaynak kullanımını sınırlayan/mevcut kaynaklardan maksimum şekilde yararlanmayı sağlayan sürdürülebilir atık yönetimi çalışmaları önem kazanmıştır. Avrupa Komisyonu'nun 2019 yılında yayınladığı Döngüsel Ekonomiye Geçiş Eylem Planı Raporu'nda sürdürülebilir atık yönetimi kapsamında kritik hedefler vurgulanmış ve bu hedefler doğrultusunda 2024 yılının bitimine kadar sürdürülebilir kaynak kullanımı ile ilişkilendirilen yeni döngüsel ekonomi modelinin (The Implementation of the Circular Economy Action Plan, 2019) uygulanacağı açıklanmıştır. Bölüm 1.3.1' de ifade edildiği şekliyle kabul edilen ve mütabık kalınan çeşitli çalışmalara bağlı olarak uygulanan sürdürülebilir atık yönetimi uygulamaları bu bölümde anlatılmaktadır. Bölümde özellikle kamu-özel sektör işbirliğine dayanan, atık geri dönüşümünde bir takım mali teşvik sistemlerinin uygulandığı örneklere yer verilmektedir.

Teşvik sistemleri, bir faaliyetin gelişmesini sağlama amacıyla kamu tarafından verilen destekleri içermektedir. Teşvik politikalarının uygulanmasında 3 temel enstrümanın varlığı söz konusudur. Bunlardan ilki finansal teşvikler, ikincisi mali/vergisel teşvikler ve sonuncusu diğer teşvikler olarak (arsa tahsisi, ucuz enerji desteği, teknik destek gibi) ifade edilebilir (TÜDAM (Değerlendirilebilir Atık Malzemeler Sanayiciler Derneği), 2016). Diğer teşvikler altında kamu tarafından arsa tahsisi, ucuz enerji desteği, teknik destek (know*how), alt yapı hizmetlerinin sağlanması, proje uygulanmasına/yürütülmesine yönelik hammadde, alt yapı, pazarlama gibi hizmetlerin sağlanması, döviz kurunun indirgenmesi gibi teşvikler bulunmaktadır. Gelişmiş ülkelerde teşvik sistemleri çoğunlukla finansal yardımlar ve faizsiz krediler gibi destekleri içerirken, gelişmekte olan

ülkelerin bütçe sınırlılıkları dolayısıyla vergi erteleme, özel vergi oranların uygulanması, amortisman indirimi veya KDV muafiyeti gibi teşvikler kullanılmaktadır (Yavan, 2011).

Sürdürülebilirlik atık yönetimi ile ilişkili olarak özellikle 2015 yılından itibaren birçok ülkede farklı sürdürülebilirlik çalışmaları yapılarak, teşvik mekanizmaları kurulmuştur. Sürdürülebilir atık yönetimi çalışmalarını modernize ederek teşvik programlarını başarılı uygulayan ülkelerden biri Polonya'dır. Polonya'da 2007-2013 bütçe dönemi içinde AB yapısal fonlarından yaklaşık 38 milyar Euro sadece "Altyapı ve Çevre Operasyonel Programı'na" ayrılarak kamunun çevre yatırımları yapması desteklenmiştir (TÜDAM, 2016). Program, Polonya'nın doğal kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlayan, düşük enerji tüketimini destekleyen ve CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde azaltan döngüsel ekonomiye geçmesini desteklemek için bir dizi yatırım yapılmasını sağlamıştır (European Comission, 2013). Bu program kapsamında belirlenen tematik hedeflerden biri sera gazı emisyonlarını büyük oranda etkileyen sürdürülebilir atık yönetimine işletmeleri teşvik ederek geri dönüşüm oranlarını arttırmaktır. Programda atık üreticisi işletmelerin bulunduğu bölgelerde aynı zamanda kalkınmayı sağlayacak şekilde geri dönüşüm tesisleri organize edilmiş ve işletmelere finansal ve teknik destekler sunulmuştur (European Comission, 2013).

Yapılan çalışmalardan biri cam atık üreticilerinin özellikle toplama ve işleme programlarındaki ücret artışları sebebiyle cam atıkları geri dönüştürmemesi sonucunda bölgesel cam geri dönüşüm oranlarının artırılması amacıyla oluşturulmuştur (SERDC, 2020). Güneydoğu Geri Dönüşüm Geliştirme Konseyi (SERDC) ile Cam Ambalaj Enstitüsü tarafından ortak yürütülen projede kamu desteğiyle cam atık sahibi işletmelerin geri dönüşüm tesislerinden yararlanmalarını destekleyecek şekilde fırsatlar sunulmuştur. Projede seçilen pilot bölge 15 cam üreticisi ve kullanıcısının olduğu sanayi alanından seçilerek, işletmelerin taşıma maliyetlerinden de tasarruf etmesi amaçlanmış ve endüstriyel cam atık üreticisi firmalara sadece operasyonel maliyetlere katlanacakları şekilde dönemsel programlar sunulmuştur (SERDC, 2020). Diğer taraftan geri dönüşüm firmalarının bu teşvik programlarında yer alması için KDV istinası, vergi indirimi, sigorta prim desteği, gelir vergisi ve enerji tüketim indirimi gibi fırsatlar sunulmuştur.

ABD'nin kamu birimleri, özellikle sürdürülebilir atık yönetimi konusunda sağladığı teşviklerle öncü ülkelerden biri olmuştur. ABD'de Ulusal Geri Dönüşüm Stratejileri

olarak daha güçlü, daha erişilebilir ve uygun maliyetli katı atık geri dönüşüm sistemi oluşturma amacıyla başta EPA (Çevre Koruma Ajansı) olmak üzere Sürdürülebilir Malzeme Yönetimi Programları geliştirerek özellikle kaynak azaltma ve yeniden kullanım konularına odaklanılmıştır (EPA, 2020). ABD Houston bölgesinde, inşaat ve yapı malzemelerinin(özellikle metal olanları) geri dönüşüm oranlarının arttırılması amacıyla Houston Galveston Bölge Konseyi ile Houston Katı Atık Yönetim Birimi'nin ortak çalışması sonucunda büyük bir proje yürütülmüştür. Çoğunlukla inşaatçıların ve inşaat malzemesi üreten firmaların atık olarak ayırdıkları malzemeler bu projelendirme sayesinde ücretsiz olarak yeniden kullanım deposunda depolanabilmekte, ardından kamunun sağladığı geri dönüşüm tesislerine üreticilerin mali sorumluluğunda taşınabilmektedir. (Sodemsen, 2020). Geliştirilen projede geri dönüşüm tesislerinde birden fazla atık üreticisi işletmenin malzemeleri RFID gibi teknolojilerle taranarak benzer malzemelerin ortak gruplarda toplanması ve geri dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Camların da döngüsel ekonomide tekrar kullanılmasının amaçlandığı projede atık sahibi işletmeler tesis ve ekipmanları (kaynak) kullanırken hem teknik yönden hem de finansal açıdan avantaj elde edebilmiştir (houstontx.gov, Erişim Tarihi: 29.12.2021). Proje bitiminde ise sonuçlar oldukça tatmin edici bulunmuş ve 3000 ton malzemenin geri dönüştürülmesi sağlarken, projenin önemli bir kazanımı da yerel işletmelerin geri dönüşüme teşvik edilmesi olmuştur (Galveston Bay Foundation, 2021).

ABD Seattle'da Ulusal Atık ve Geri Dönüşüm Derneği (NWRA) geri dönüşüm endüstrisini tam olarak temsil eden, atık ve geri dönüşüm hizmetlerini atık üreticilerinin yararlanacağı şekilde organize eden 700 üyesinin bulunduğu bir kurumdur (NERC, 2022). NWRA geri dönüşüm endüstrisindeki paydaşlarla (geri dönüşüm firmaları, atık üreticileri, lojistik firmaları, danışmanlık şirketleri gibi) işbirliğine giderek kamunun finansal/teknik teşvik politikaları ile çeşitli projeler yürütmüştür. Atık sahibi üreticilerin geri dönüşüm tesislerinden belirli maliyetlere katlanarak yararlanmaları sağlanmış, bazı işlerde de geri dönüştürülen malzemelerin yerel işletmelere satılması desteklenmiştir. Projenin sonuçlanmasıyla hem yerel pazarların canlandığı, hem istihdamın büyük oranlarda arttığı hem de kaynakların ziyan edilmemesiyle ekonomik ve çevresel açıdan işletmelere ve ülkenin sürdürülebilir hedeflerine çeşitli faydalar sağladığı görülmüştür (EPA, 2019).

Amerika'daki önemli bir proje de “Beyond 34” tür. Proje ABD Ticaret Odası Vakfı

tarafından yönetilmiş, kar amacı gütmeyen kuruluşlarla birlikte çalışılmış ve döngüsel ekonomide başarılı olacak şekilde geri dönüşüm oranlarını %34 arttırmaya odaklanılmıştır (U.S. Chamber of Commerce Foundation, 2018a). Projede pilot bölge olarak Orlando, Florida seçilmiş ve projenin birimleri atık üreticileri, geri dönüşüm firmaları, üreticiler ve kamu kuruluşları olmuştur (U.S. Chamber of Commerce Foundation, 2018b). Projenin alt programlarından birinde atık üreticisi firmalara kaynak kullanım hizmeti sunulurken, geri dönüşüm firmalarına tesis yatırım fonu sağlanmış ve diğer taraf olan müşteriler için de bazı ürün gruplarında ikincil pazar yaratılmıştır. Proje kapsamında birden fazla ürün grubu pilot çalışmaya dahil edilmiş olup teşvik mekanizmasının uygulandığı eyaletin sürdürülebilir kalkınmaya destek verecek şekilde çevresel yönden birçok olumlu sonuca ulaştığı görülmüştür (U.S. Chamber of Commerce Foundation, 2018b).

ABD, Kuzey Carolina Çevre Kalitesi Departmanı'nın Çevresel Yardım ve Müşteri Hizmetleri Bölümü (DEACS), çevre yönetiminde işletmelere, üreticilere, yerel yönetimlere, kurumlara, ekonomik geliştiricilere ve vatandaşlara teknik ve mali yardım sunan düzenleyici bir bölümdür ve eyaletin geri dönüşüm ekonomisini büyütmek için yerel geri dönüşüm programlarını desteklemektedir (deq.nc.gov, Erişim Tarihi: 21.01.2022). Kurum geri dönüşüm pazarlarını geliştirmeye, kaynak kullanım akışının zararını azaltmaya ve işletmelere değişen pazar koşullarına çözüm bulmaya yardımcı olma amacıyla toplam 17 işletmeye 511 bin \$ hibe sağlamış ve toplamda 1.3 milyon \$'dan fazla kazanç sağlamıştır (EPA, 2019).

ABD'de gerçekleşen bir diğer yerel büyük geri dönüşüm programı, 2016 yılında ABD Çevre Koruma Ajansı'nın finanse ettiği ve SERDC ile birlikte sürdürülebilir geri dönüşümü teşvik edecek şekilde onlarca üreticiye geri dönüştürülmüş hammadde sağlandığı yerel geri dönüşüm programıdır (SERDC, 2017). Program içeriğinde atık üreticilerinden toplanan atıklar, yerel geri dönüşüm tesislerinde değerlendirilerek elde edilen ikincil hammaddeler tekrar üreticiler tarafından kullanılacak forma dönüştürülmüştür. Atık üreticisi firmaların geri dönüşüm işlemleri için ihtiyaç duyduğu bütçenin bir kısmı kamunun ilgili birimleri tarafından sağlanırken, kalan kısmı üretici sorumluluğuna bırakılmıştır (EPA, 2019). Plastik, cam, metal gibi birçok farklı malzeme içeriğinde atıklar projede değerlendirilmiştir. Projede geri dönüşüm firmaları KDV istisnası, vergi indirimi, sigorta prim desteği gibi kamuya olan yükümlülüklerinden

feragat etmiştir. Böylesine kapsamlı bir programı finanse eden ABD Çevre Koruma Ajansı, çalışma sonunda geri dönüştürülen atıklardan 40 milyar doları aşacak şekilde ekonomik fayda sağlandığını duyurmuştur (SERDC, 2017).

Brüksel, Belçika’da da sürdürülebilir atık yönetimine yönelik çalışmalar yapılmış ve “Döngüsel Ekonomiye Karşı Dönüşüm” adlı bölgesel programı kapsamında “Be Circular Projesi” ile kaynakların verimli kullanılmasına yönelik Brüksel Üniversitesi ve Eceros Danışmanlık şirketinin birlikteliğiyle atıkların geri dönüştürülmesine odaklanılmıştır (circulareconomy.brussels, Erişim Tarihi: 10.02.2022). Programa birçok şirketin dahil olmasıyla, toplamda 39 alt proje (iş) gerçekleşmiş ve 18 ay içinde 1670 ton atık geri dönüştürülmüştür (Sodemsen, 2020). Programda özellikle endüstriyel ekolojiye (atık ve kaynak alışverişi) odaklanılarak, geri dönüşüm firmaları, atık üreticisi firmalar ve birincil hammadde kullanıcısı üreticiler geliştirilen projelerde yer almış ve geri dönüşüm firmalarına sağlanan yatırım teşvik hibesi ile atık sahibi işletmelerin kaynak kullanımına imkan verilmiştir.

İfade edildiği gibi dünyada “Döngüsel Ekonomi” konseptli birçok proje geliştirilmiş ve özellikle atık geri dönüşüm oranlarının arttırılmasına dayanan atık üreticilerini destekleyen teşvikler sağlanmıştır. Bu çalışmalarda hükümetler çoğunluklu geri dönüşüm alt yapısını güçlendirmeye, geri dönüşüm oranlarını arttırmaya, eğitim ve erişime işletmeleri teşvik etmeye, çevresel riskleri azaltmaya ve malzeme pazarlarını güçlendirmeye odaklanmaktadır. Ayrıca beklenen diğer faydalar; bertaraf için ayrılan bütçeyi katma değer yaratacak şekilde ayırmak, vergi gelirleri sağlamak, istihdam yaratmak, ikincil ürün pazarları açmak, bölgeler arası pazarları birbirine bağlamak, dış ilişkilerin (ticaretin) gelişimine imkan sağlamak, dışa bağımlılığı azaltmak (değer zinciri yaratmak), sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, AB uyum politikaları için hedeflere ulaşmak, doğal kaynakları korumak ve kirliliği önlemek şeklinde ifade edilebilir.

1.3.3. Türkiye’de Sürdürülebilir Atık Yönetimine Yönelik Son Gelişmeler

Türkiye’de geri dönüşüm alt yapılarının kurulmaması, geri dönüşüm sistemlerinin yetersizliği, atık depolamanın düşük maliyetlerde olması, atıkların kaynağında ayrıştırılmaması, teşvik sistemlerinin neredeyse olmayışı ve çevre koruma programlarının azlığı gibi sebepler ülkemizin geri dönüşüm kapasitesinin oldukça az olmasına neden olmuştur. Çevre koruma programları yetersiz kalsa da son yıllarda bu yolda önemli

adımlar atılmaya başlanmıştır. Türkiye’deki atık azaltmaya, yeniden kullanıma, yeniden üretime, geri dönüşüme ve enerji geri kazanımını içeren farklı düzeylerde ulusal planlara, programlara ve düzenlemelere yönelik adımlar atılmaktadır.

Türkiye dünyanın birçok yerindeki sürdürülebilir kalkınmaya, döngüsel ekonomiye, temiz üretime ve sürdürülebilir tüketime odaklanan platformlarda yer edinmeye ve gelişmiş/gelişmekte olan birçok ülke gibi anlaşma taraflarından biri olmaya başlamıştır. Gelişmekte olan ülke statüsünde olan Türkiye 2015 yılında Fransa’da gerçekleşen Paris Anlaşması imza törenine katılarak 195 ülkenin temsilcileriyle birlikte anlaşmada yer aldığını resmileştirmiştir. Ancak 2015 yılında imzalanan anlaşmaya rağmen, Türkiye’de anlaşma maddeleri anayasadan 2021 yılının Ekim ayında geçerek süreç tamamlanmıştır. Gelişmiş ülkelerin vaad ettiği 2030 yılındaki sıfır emisyon hedefi, Türkiye tarafında 2053 yılı olarak belirlenmiştir. Paris Anlaşması ile hedeflenen sera gazı salınımının nötrlenmesine dair yürütülecek çalışmalarda faaliyet alanlarının en başında demir-çelik sektörü gelmektedir. Çelik İhracatçıları Birliği tarafından sera gazı düzenlemelerinin Avrupa Birliği ülkelerinde uygulamaya koyulması ile o bölgelere ihracat yapan sektördeki işletmelerin maliyetlerinde artış yaşanacağı öngörülmektedir (DW Grup, 2021). Tahmin edilen durumun da hem sektörün karlılık oranlarında hem de rekabet gücünde ciddi kayıplara yol açacağı düşünülmektedir. Bu sebeple işletmelere yönelik teşvik sistemleri daha çok gündeme alınmıştır. Yalnızca demir-çelik sektörü değil birçok metal ürün grubu başta olmak üzere farklı hammadde kaynakları için sonuçların benzer olması beklenmektedir. Ancak böyle bir gelişim ve dönüşüm ihtiyacı duyulan süreçten sadece sektörleri ve bağlı olduğu işletmeleri sorumlu tutmak sürdürülebilir bir yol olarak gözükmemektedir ve kamu birimlerinin çeşitli destekler verecek şekilde bütün bir sistemin organize olmaları gerekmektedir. Bu sebeple son birkaç yılda hükümetin ilgili alanda yaptığı çalışmalarda ve teşvik desteklerinde bir artış yaşanmaktadır.

Paris Anlaşması’nın onaylanması ile Türkiye’de özellikle çeşitli endüstrilerde ‘yeşil dönüşüm’ uygulamaları başlatılmıştır. Ancak büyük ölçekli firmalar sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çalışmalarını yürütürken, ekonominin %90’ından fazlasını oluşturan küçük/orta ölçekli firmalar için dönüşüm o kadar da kolay olacağı benzememektedir. Bu sebeple Türkiye’de çeşitli destekleyici politikalara duyulan ihtiyaç daha çok artmıştır. İş dünyasının yeşil dönüşüme geçebilmesi için özellikle finansal kaynağa ve her türlü bilgi ihtiyacını karşılayabilecekleri danışmanlık hizmetlerine ihtiyaç

duyulmaktadır. Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı direktörü olan Dr. Güven Sak söyleşilerinde özellikle KOBİ'ler için geniş kapsamda ilk olarak destek mekanizmalarının hazırlanmasına ve sanayi bölgelerinin yeşil dönüşüme uygun olarak tasarlanması gerektiğine dikkat çekmektedir (DW Grup, 2021).

Türkiye için önemli bir adım da BM'nin 2015 yılında "Sürdürülebilir Kalkınmaya" yönelik hazırlanan protokolde yer almasıdır. Türkiye'nin protokolde yer alarak anlaşmanın taraflarından biri olması sürdürülebilir kalkınmaya giden yolda oldukça önemli gösterilebilir. Küresel düzeyde geçerliliği olan "2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nin" siyasi sahiplikle ulusal sürdürülebilirlik eylemlerinde maksimum düzeyde yer alması ve tüm paydaşları içerecek şekilde işbirliğinin sağlanması hedeflenmiştir (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017). Buradan hareketle çeşitli stratejik planlar ve belgeler oluşturulmaktadır. Ayrıca bu eylemler için sadece hükümetlere değil, üniversitelere, akademik çalışma yapanlara, özel sektördeki iş dünyasına, sivil toplum kuruluşlarına ve vakıflara büyük iş düşmektedir. Sürdürülebilir kalkınmanın amaçlandığı faaliyet alanlarında stratejik adımlar için birçok birimin koordine çalışması ve birbirilerini yönlendirebilecekleri kararları birlikte almaları bir zorunluluk olarak görülmelidir.

Sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin önemli ve öncelikli alanlarından biri kaynak kullanım verimliliğine yönelik gerçekleştirilen eylemlerdir. Özellikle son yıllarda sürdürülebilir kalkınma, sınırlı doğal kaynaklar ve aşırı kaynak tüketimin olumsuz sonuçları nedeniyle güçlü çevresel sürdürülebilirliğe giderek daha fazla odaklanılmasını gerektirmektedir (Davies, 2013). Bu durum sürdürülebilir kalkınmayla ilişkili olan birçok durumun yeniden karakterize edilmesine etki ederek, geçmiş yıllarda doğrusal ekonomi olarak adlandırılan süreçler kökleri sürdürülebilir kalkınma kavramına dayanan döngüsel ekonomiye dönüşmeye başlamıştır. Bu doğrultuda sürdürülebilir kalkınma hedefleri arasında özellikle Hedef 9 ve Hedef 12'yi içeren ilgili maddelere dayanan programlar özellikle sanayi kuruluşları için özel tasarlanmıştır. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden 9.3, işletmelerin döngüsel ekonomiye destek veren kaynak verimliliğini sağlamak üzere ihtiyaç duydukları finansal hizmetlerin karşılanmasına yönelik oluşturulmuştur. Bu doğrultuda Hedef 9.3'e yönelik hazırlanan planlar "Türkiye Sanayi Strateji Belgesi (2015-2018)", "KOBİ Stratejisi ve Eylem Planları", "Türkiye Kamu-Üniversite-Sanayi İşbirliği (KÜSİ) Stratejisi ve Eylem Planı" ve "Vizyon 2023 Strateji Belgesi (TÜBİTAK)" içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmalarda Bilim, Sanayi ve

Teknoloji Bakanlığı başta olmak üzere Kalkınma Bakanlığı, Hazine Müsteşarlığı ve Maliye Bakanlığı gibi kurumlar ortak çalışmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017).

Hedef 9.4, kaynak verimliliğini sağlamak üzere yeşil endüstriyel süreçlerin kullanımına yönelik alt yapının geliştirilmesine dayanmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017). Özellikle endüstrilerde verimliliğin ve katma değerin artmasına odaklanılmaktadır. Hedef 9.4'e yönelik atılan adımlar başta Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı olmak üzere Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (yeni adı) ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın ortak çalışmalarıyla "Vizyon 2023 Strateji Belgesi (TÜBİTAK)", "Ulusal Enerji AR-GE ve Yenilik Stratejisi" ve "Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Stratejik Planı (2015-2017)" içerisinde yer almaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017).

Hedef 9.5 ise özel sektör-kamu işbirliği ile teknolojik dönüşümün ve yeni sanayi uygulamalarının geliştirilmesi üzerine odaklanılarak döngüsel ekonomiye destek verecek çalışmalar gündeme gelmektedir. Hedef 9.5'e yönelik atılan ilk adımlar "Verimlilik Stratejisi ve Eylem Planı (2015-2018)", "Türkiye Kamu-Üniversite-Sanayi İşbirliği (KÜSİ) Stratejisi ve Eylem Planı", "Yeni Sanayi Devrimi Akıllı Üretim Sistemleri Teknoloji Yol Haritası (TÜBİTAK)", "Vizyon 2023 Strateji Belgesi (TÜBİTAK)", "Bilgi Toplumu Stratejisi ve Eylem Planı (2015-2018)" ve "Türkiye Otomotiv Sektörü Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2015-2018)" içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmalarda Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı koordinatörlüğünde Maliye Bakanlığı, Kalkınma Bakanlığı ile TÜBİTAK işbirliği ile çalışmaktadır. Hedeflerde ifade edildiği gibi sanayi, yenilikçilik ve alt yapı hedeflerinin hemen hemen her birinin temelinde alt yapıyı geliştirecek ARGE faaliyetleri ile sanayide katma değer yaratma düşüncesi hakimdir ve kamunun birden fazla kurumu bu doğrultuda birlikte çalışmaktadır.

Sürdürülebilir kalkınmayla ilişkisi olan döngüsel ekonomi kavramını değerlendiren hedeflerden biri de doğrudan Hedef 12'yi oluşturan "Sürdürülebilir üretim ve tüketim" ile ilişkilidir. Hedef 12 ile ilişkili olacak şekilde yapılması önerilen en temel çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017):

- Doğal hammaddelerin etkin kullanımının sağlanması,

- Özellikle sanayideki doğal hammaddelerin verimli kullanımının sağlanarak katma değeri yüksek ürünlerin geliştirilmesine dair çalışmaların desteklenmesi,
- Doğal hammaddelerin ekonomik değerlerini belirleyebilme,
- Üretimde meydana gelen endüstriyel atıkların toplanması ve geri dönüşüm sistemine katılımının sağlanması, ekonomik değere dönüştürülerek üretim sistemine tekrar kazandırılan atıkların çevreye ve üretim maliyetlerine yansıtacağı avantajların endüstriler tarafından içselleştirilmesinin sağlanması,
- Geri dönüşüm tesisi veya ekipmanı kurmak isteyen işletmelere hibe veya çeşitli ödeme kolaylığı sunulan finansal desteğin sağlanması,
- Endüstriyel ortak yaşam (simbiyoz) uygulamalarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için politikaların hazırlanması, hukuksal, mali ve teknik altyapının güçlendirilmesidir.

Daha özel hedefler değerlendirildiğinde; sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden 12.2, kaynak kısıtları olması ve kaynak kullanımında verimliliğe ulaşılması amacıyla doğal kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanımına ve yönetimine yönelik oluşturulmuştur. Bu doğrultuda Hedef 12.2'ye yönelik hazırlanan ilk planlar “Verimlilik Stratejisi ve Eylem Planı (2015-2018)”, “Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Stratejik Planı (2013-2017)” ve “Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Stratejik Planı (2013- 2017)” şeklindedir. Bu çalışmalarda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (yeni adı) başta olmak üzere Kalkınma Bakanlığı, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Orman ve Su İşleri Bakanlığı birlikte çalışmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017). Doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimine yönelik 2014-2017 yılları arasında gerçekleşen “Sanayide Kaynak Verimliliği Potansiyelinin Belirlenmesi” adlı proje de bu kapsamda önemli çalışmalardan biri olarak görülmektedir. Projede sanayiden seçilen beş sektörden yola çıkılmış ve hammadde, enerji ve suyun etkin kullanımı ile ulaşılabilecek potansiyel etkiler tahmin edilmiştir (TÜBİTAK MAM, 2017).

Hedef 12.4, tüm atıkların yaşam döngüleri boyunca çevreye/ekonomiye/insan sağlığına verdiği olumsuz etkilerin azaltılmasına dayanmaktadır ve Türkiye’de gelişim halinde bulunarak ilerleme sağlanması beklenmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017). Bu hedefler doğrultusunda kaynak verimliliği, sanayide verimliliğin artırılmasına yönelik programlar, verimlilik eylem stratejileri gibi çeşitli stratejik planlar

hazırlanmaktadır. Bunlardan en önemlileri “Verimlilik Stratejisi ve Eylem Planı (2015-2018)”, “Ulusal Çevre Stratejisi ve Eylem Planı” ve “Stockholm Sözleşmesi İçin Türkiye Ulusal Uygulama Planı” olarak gösterilebilir. Verimlilik Stratejisi ve Eylem Planı’nda sürdürülebilir üretime, üretim süreçlerinde kaynak verimliliğinin sağlanmasına ve ekoverimlilik yaklaşımlarının hayata geçirilmesine büyük oranda yer verilmiştir. “Sanayinin verimlilik temelli yapısal dönüşümü” çerçevesi üzerine belirlenmiş olan “Sürdürülebilir Üretim” başlığı altında “Sanayide sürdürülebilir üretim altyapısına dönüşüm sürecinde uygulama ve teknolojileri yaygınlaştırmak” hedefi bulunmaktadır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2018). Bu amaçla yapılan çalışmalarda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinatör olmak üzere Sağlık Bakanlığı ve Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı birlikte çalışmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017).

Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin döngüsel ekonomi ile en büyük hedeflerinden biri Madde 12.5’de yer almaktadır. Hedef 12.5, ilk olarak atık önlemeye, atıkları azaltmaya, geri kazanmaya ve tekrar kullanmaya dayanmaktadır ve belirlenen hedefler doğrultusunda Türkiye’nin ilerleme kat etmesi beklenmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017). Bu doğrultuda Hedef 12.5’e yönelik hazırlanan en önemli planlardan biri “Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2014-2017)” olmuştur. Akabinde 2016-2023 yıllarını kapsayacak şekilde önemli bir çalışma da Çevre, Şehircilik ve İklim Bakanlığı tarafından Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (2016-2023) olarak hazırlanmıştır. Ulusal atık yönetimi ve eylem planının hazırlanmasında hem ulusal mevzuata hem de AB sürdürülebilirlik çalışmalarına bağlı kalınmıştır. Plan içeriğini uluslararası ve ulusal önceliklere dikkat edilerek atıkların toplanmasına, taşınmasına, depolanmasına, yeniden kullanılmasına, geri dönüştürülmesine ve enerji olarak geri kazanılmasına yönelik konularda politikaların ve stratejilerin belirlenmesi oluşturmuştur (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017). Özellikle tasarlanan eylem planı içerisinde üreticilerin fayda/maliyet seçmelerine olanak sağlanarak yeni araçların geliştirilmesine duyulan ihtiyaçtan bahsedilmektedir. Aynı zamanda genişletilmiş üretici sorumluluğunu politikalarla destekleyerek geri dönüşüm performansını arttırma gelecek dönemlerin gündemine alınmıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017). Bu arayış içerisinde Türkiye’nin gelişmeleri takip ederek en uygun sürdürülebilir atık yönetim politikalarını pilot bölgelerde uygulaması ve çevresel ve ekonomik hedeflere ulaşıldıktan sonra birçok bölgeye genişletmesi

beklenmektedir.

Atılan öncü adımla birlikte atık yönetiminde yer alan tesisler için kapasite hacmi, genel yatırım ve işletme maliyetleri planlamaları yapılmış ve her yıl sanayiler arası ortak işbirliğine dayanan projeler için yaklaşık 2 milyar € ile 3 milyar € ayrılması hedeflenmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017). Bu aktif yürütülen faaliyetler için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinatörlüğünde Sağlık Bakanlığı, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, İçişleri Bakanlığı ve Türkiye Belediyeler Birliği birlikte çalışmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017).

Hedef 12.6, işletmelerin sürdürülebilir uygulamaları benimsemesine ve yaptıkları/planladıkları eylemleri sürdürülebilirlik raporlamalarına entegre etmelerine dayanmaktadır ve bu hedef doğrultusunda Türkiye’de her geçen gün yayınlanan sürdürülebilir raporlarında artış gözlemlendiği görülmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017). Bu doğrultuda Hedef 12.6’ya yönelik kalkınma planları ve işletmeler tarafından yıllık programlar hazırlanmaktadır. İşletmeleri entegre sürdürülebilirlik raporlamaları hazırlamaya yönelik çalışan kurumların başında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı gelirken, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Rekabet Kurumu ve BİST (Borsa İstanbul) de öncelikli kurumlar olarak yer almıştır (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2017).

Sürdürülebilirlik raporlamaları, kurumların sürdürülebilirlik kapsamında yürüttüğü/planladığı faaliyetlere yönelik hedefleri belirlemede, performanslarını ölçmede ve yol haritası olarak tanımlamalarında önemlidir. Uluslararası kabul gören bilgilere yer verilmesi ve aynı ölçütlerin kullanılması amacıyla evrensel açıdan uygun olacak biçimde G4 gibi geçerli raporlama sistemleri geliştirilmiştir. G4, Küresel Raporlama Girişimi (GRI)’nin son güncelleme paketini oluşturmaktadır ve kullanıcılardan gelen öneriler doğrultusunda sürekli izlenmekte ve güncellenebilecek şekilde takip edilmektedir. Kar beklentisi olmayan GRI’nin temel amacı, sürdürülebilirlik raporlamasına yönelik standart bir rehber geliştirerek, bu rehberin her sektörden büyük ve orta ölçekteki işletmeler tarafından kullanılabilmesini sağlamaktır.

G4 gibi sürdürülebilirlik raporları kurumların sürdürülebilirlik yaklaşımlarını, çevresel, sosyal ve ekonomik performanslarını ortaya koyan herkes için uluslararası birer

kaynaktır. Sürdürülebilirlik raporlarına yönelik oluşturulan standartlar bu yönde raporlama planlayan tüm işletmeler için geçerli görülmektedir (GRI 2014a, 24). Bu standartlar en temeliyle “(a) strateji ve analiz, (b) kurumsal profil, (c) tanımlanan öncelikli unsurlar ve çerçeveler, (d) paydaş katılımı, (e) rapor profili, (f) yönetim, (g) etik değerler ve dürüstlük olmak üzere yedi kısımdan oluşmaktadır (GRI 2014a, 24). Sürdürülebilirlik raporlamalarında kurumların ekonomik, çevresel ve sosyal performanslarına yönelik verileri sunulurken, potansiyel gelişimlerine, çeşitli iyileştirilmelere, yerel/bölgesel/küresel seviyede sebep olunan katkılara veya geleceğe yönelik hedeflere de yer verilmektedir (Global Reporting Initiative (GRI), 2014).

GRI’ye yönelik ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere üç kategoride hazırlanan kılavuzdan “Sosyal Kategori” çalışanlara ve topluma yönelik sorumluluğu içerirken, “Ekonomik Kategori” işletmelerin mikro ve makro boyutlardaki ekonomik etkileri ile ilgilenmektedir. “Çevre Kategorisi” ise enerji/su tüketimi, enerji yoğunluğu, yenilenebilir malzemeler ve geri dönüştürülmüş malzemeler gibi girdiler ile emisyon, emisyon yoğunluğu, atık miktarı ve atık su gibi çıktılardan oluşmaktadır. Sürdürülebilir atık yönetimi hedef ve eylemleri için sürdürülebilirlik raporlamalarında özel alt başlıklar oluşturulmaktadır. GRI: 306 (2020) Standardı atık konusunu ele almakta ve herhangi bir kurumun büyüklüğü, türü, sektörü, coğrafi konumu veya raporlama deneyimi ne olursa olsun atıkla ilgili bilgileri raporlamak için kullanılmaktadır (GRI STANDARDS, 2022). Bu durum kurumların atık üretimine ve nedenlerine yönelik bütünsel bir bakış açısıyla değerlendirme yapmalarında ve aynı zamanda atık önleme ve döngüsellik önlemlerini benimsemelerinde fayda sağlayabilmektedir.

Türkiye’de sürdürülebilir ekonomi için yapılan son gelişmelerden biri uluslararası ticarete kritik yeri olan ve AB ile ticari ilişkilerin devam etmesi için kamu ve özel sektör işbirliği ile 2019 yılında hazırlanan “Yeşil Mutabakat Eylem Planı” olmuştur. Bu planın birçok farklı düzeyde çalışanı ve kuruluşu gerektirmesi sebebiyle oldukça kapsamlı olduğu söylenebilir. Yeşil Mutabakatı sadece bir iklim politikası görmek yerine ekonomik dönüşüm programı olarak geniş perspektifle değerlendirmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Çünkü bu eylem planı enerji, ulaşım, sanayi ve inşaat gibi Avrupa Birliği ekonomisini yeniden şekillendirecek ve ivme kazandıracak kapsamlı dönüşümü içermektedir (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2021).

2020 yılından itibaren sadece Avrupa Birliği ülkeleri değil birçok uluslararası ticaretin yoğun yapıldığı ülkelerde de bu dönüşüm başlamıştır. Güney Kore, Japonya, Çin gibi ülkelerle birlikte Kanada, Norveç gibi ticaretin önemli olduğu dünya ülkelerinde de çalışmalar başlamıştır. Ülkemizde de sürdürülebilir, kaynak etkin ve çevreci ekonomiye geçmeyi destekleyen dönüşümü sağlayacak şekilde yol haritaları tanımlanmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2021). Ticaret Bakanlığı başta olmak üzere, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Dışişleri Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Tarım ve Orman Bakanlığı ve Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın katılımıyla üst düzey ekip bir eylem planını birlikte hazırlamıştır (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2021). Eylem Planı toplamda 9 ana başlıkta oluşturulmuştur. Bu başlıklardan en önemlilerinden biri “Yeşil ve Döngüsel Bir Ekonomi” olarak yer almıştır. AB'nin Yeşil Mutabakat ve Yeni Sanayi Stratejileri kapsamında ayrı olarak “Döngüsel Ekonomi Eylem Planını” da hazırladığı görülmüştür. Bu plan doğrultusunda kapsamlı program değişiklikleri yapılarak atık miktarlarını en az seviyede tutmayı amaçlayan ekonomi yaklaşımı benimsenmiştir. Bu bağlamda Türkiye’de öncelikli sektörler belirlenerek ulusal döngüsel ekonomi planının geliştirilmesi önem kazanmış ve yeşil organize sanayi bölgeleri ve yeşil endüstri bölgelerinde ortak çalışmaların sağlanması amaçlanmıştır (Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021). Özellikle ürün ve hizmetlerin değer zinciri boyunca çevreye olan etkilerini izleme ve değerlendirme ülkemizde öncelikli konulardan biri haline gelmiştir. 2021 yılında hazırlanan Yeşil Mutabakat ile birlikte enerji verimliliğini ve atık minimizasyonu teşvik edecek şekilde hem kaynak tasarrufu sağlama hem çevre /insan sağlığını koruma hem de başka pazarlara açılma hedeflenerek Kalkınma Ajansları tarafından birçok bölgede döngüsel ekonomiye geçişi sağlayan kaynak verimliliği çalışmalarının yürütülmesi planlanmaktadır. Ülkemizdeki Yeşil Mutabakat Eylem Planı'nın hedeflerinde yer alan döngüsel ekonomi doğrultusunda yer alan bazı maddeler şu şekildedir:

*Yeşil Organize Sanayi Bölgeleri (YOSB) sisteminin hayata geçirilmesine yönelik teknik çalışmaların yürütülmesi, (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı sorumluluğunda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve OSB Üst Kuruluşu gibi kurumlarla çeşitli mevzuatların ve yönetmeliklerin hazırlanmasını içermektedir.)

*Ulusal Yaşam Döngüsü Platformlarının kurulması, (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile

TÜBİTAK koordinatörlüğünde sanayi kuruluşları, üniversiteler ve çeşitli bakanlıklarla birlikte yaşam döngüsü çalışmalarının yaygınlaştırılması ve geliştirilmesine yönelik her türlü eylemi içermektedir.)

*Döngüsel ekonomi için gereken teknolojik alt yapının güçlendirilmesi ve ARGE çalışmalarının teknik ve mali olarak desteklenmesi, (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve TÜBİTAK koordinatörlüğünde hem kamu hem özel sektörün katılımıyla ortak projelerin teknik ve mali olarak desteklenmesi ve uygun alt yapıların hazırlanmasını içermektedir.)

*(Ulusal) Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'nın hazırlanması, (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı sorumluluğunda geri kazanılmış ikincil ürün ve malzeme kullanımına yönelik çalışmaları içermektedir.)

*AB'nde uygulanacak "Sürdürülebilir Ürün Mevzuatı" ile uyum gösterecek ve döngüsel ekonomiyi destekleyecek düzenlemelerde bulunulması,

*Ulusal Sürdürülebilir Tüketim ve Üretim Eylem Planı'nın hazırlanması, (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Ticaret Bakanlığı başta olmak üzere döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlikle ilişkilendirilen üretim/tüketim zincirlerini geliştirecek çalışmaların yürütülmesini içermektedir.)

*26 Düzey ve 2 Bölgesi'nde (Tekirdağ, Balıkesir, Kocaeli, Samsun gibi şehirler) yer alan Kalkınma Ajanslarının desteğiyle döngüsel ekonomi kapsamında kaynak verimlilik çalışmalarının yürütülmesi, (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Kalkınma Ajansları koordinasyonunda bölgesel kaynak verimliliği sağlayacak her türlü çalışmanın yürütülmesini içermektedir.)

* Döngüsel ekonomiye katkı sağlayacak projeler ve çalışmalar için çeşitli uluslararası ve IPA (Katılım Öncesi Mali Yardım) fonlarının desteklenmesi şeklinde ifade edilebilir. (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı sorumluluğunda özellikle Dışişleri Bakanlığı ve Hazine ve Maliye Bakanlığı ile birlikte çeşitli finansal kaynaklarla dönüşümün desteklenmesi bu kapsamda ifade edilebilir.

Görüldüğü gibi Türkiye'de sürdürülebilir atık yönetimi çalışmaları son yıllarda hükümetin daha çok gündeme aldığı ve çeşitli stratejik eylem planlarıyla hedeflerini belirlediği önemli bir alan haline gelmiştir. Diğer taraftan Türkiye'nin AB ile uyumlu olacak şekilde katı atık geri dönüşümü için sanayi bölgelerinin kurulması, alt yapının

oluşturulması ve sanayi-üniversite-kamu işbirlikleri ile geri dönüşüm oranlarını arttıracak eylem planları oluşturmaları gündemde çokça yer almaya başlamıştır. Türkiye’deki geri dönüşüm oranlarının yetersiz olması, işletmelerde atık ürünlerin yeniden değerlendirilmesi, geri dönüştürölmesi ve ikincil malzeme pazarların genişletilerek dışa bağımlılığın azaltılması kritik konulardan olmuştur. Bu sebeple diğerk ölkelerde uygulanan başarılı teşvik sistemlerinin ve projelerinin ulusal eylem planlarımıza dahil edilerek pilot bölgelerde uygulanmaya başlamasının büyük faydalar sağlaması muhtemeldir.



BÖLÜM 2: GERİ DÖNÜŞÜM FAALİYETLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ PERFORMANSINA ETKİSİ

2.1. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri

Sürdürülebilirliğin yaşamın her noktasına değdiği gibi işletmelerin tedarik zincirleri içinde bu yaklaşımı kullanma ihtiyacı, değerlendirilmesi gereken bir konu haline gelmiştir. Tedarik zincirinde hammaddelerin ilk işlenmesinden ürünlerin son tüketiciye kadar ulaşması gerçeği göz önüne alındığında tedarik zincirlerine odaklanmak, sürdürülebilirliğin daha geniş şekilde benimsenmesi ve geliştirilmesine yönelik önemli bir adımdır (Ashby vd., 2012). Karlılık ve maliyete odaklanılan geleneksel tedarik zinciri yapısına günümüzde sürdürülebilirlik kriteri de eklenmiştir. Dolayısıyla sürdürülebilirliğin neredeyse tüm işletmelerin tedarik zincirine dahil edilmesi birinci öncelik haline gelmeye başlamıştır (Govindan vd., 2015). Sürdürülebilirlik ve tedarik zinciri arasındaki etkileşimin kritik hal almasıyla birlikte (Corbett & Kleindorfer, 2003) sürdürülebilirliğin gerçek doğasını kavrama üzerine yeni bir araştırma alanı ortaya çıkmıştır. Zamanla gelişen, bütünsel açıdan değerlendirilen ve farklı paydaşlar üzerinde değişik etkiler barındıran sürdürülebilir tedarik zinciri kavramı geleneksel süreçlere farklı bir soluk getirmiştir. Sürdürülebilir tedarik zincirinin tanımı birçok araştırmacı tarafından farklı formlarda yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2: Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Kavramsal Tanımları

Çalışmalar	Tanımlama
Zhu vd. (2004)	STZ, kullanım ömrü sonunda veya gerektiğinde kullanılmış ürünlerin üreticiye iade edilmesi, geri dönüşüm faaliyetleri, yeniden üretim ve yeterli atık bertarafı, çevre dostu ambalajlama gibi çevresel kalkınmaya yarar sağlayacak uygulamalar bütünüdür.
Jørgensen & Knudsen (2006)	STZ, şirketlerin örgütsel ve coğrafi sınırları kapsayan yerinden edilmiş üretim süreçlerinde sosyal sorumluluklarını yönettiği araçlardır.
Teuscher vd. (2006)	STZ, tüm tedarik zincirindeki riskleri, ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri değerlendiren toplam kalite yönetimi anlayışıdır.
Ciliberti (2007)	STZ, sürdürülebilirliğin üç boyutunun (ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlar) dikkate alındığı tedarik zinciri yönetimidir.
Seuring & Muller (2008)	STZ, imalatta kullanılan malzemelerin, sermayenin ve bilgi akışının yönetimi ve tüm zincir boyunca işbirliğinin sağlanmasıdır.

Carter & Rogers (2008)	STZ, bir şirketin uzun vadeli ekonomik performansını geliştirecek iş süreçlerinin, diğer birimler arasında sistemli koordinasyonu kurarak sürdürülebilir hedeflerinin stratejik başarısıdır.
Lambert (2008)	STZ, son kullanıcıdan orijinal tedarikçilere kadar anahtar iş süreçlerinin entegrasyonu, müşteriler ve paydaşlar için değer katan ürünler, hizmetler ve bilgilerdir.
Pagell & Wu (2009)	STZ, sürdürülebilir zincir yaratma hedefi ile tedarik zincirini daha sürdürülebilir hale getirmek için gerçekleştirilen özel yönetsel eylemlerdir.
Haake & Seuring (2009)	STZ, firmanın mallarının tasarımı, satın alınması, üretimi, dağıtımı, kullanımı, yeniden kullanımı ve elden çıkarılması ile ilgili olarak çevre ve sosyal konularla ilgili endişelere yanıt olarak uygulanan tedarik zinciri yönetim politikaları ve alınan eylemlerdir.
Closs vd. (2011)	STZ, bir kurumun tedarik zincirindeki küresel risklerini tanımlayabildiği, hafifletebildiği ve bunlara cevap verebildiği bir güçtür.
Wolf (2011)	STZ, bir üreticinin tedarik zinciri ortaklarıyla stratejik olarak işbirliği yapma ve sürdürülebilirlik için organizasyon içi ve organizasyonlar arası süreçleri işbirliği içinde yönetme derecesidir.
Wittstruck & Teuteberg (2012)	STZ, geleneksel tedarik zincirine çevre ve sosyal faktörlerin eklenip genişlemesiyle oluşmaktadır.
Hassini vd. (2012)	STZY, tedarik zincirinin ekonomik karlarını ve sosyal refahını maksimize etme ve çevre kirliliğini en aza indirme hedefine ulaşmak için tedarik zincirinin temel operasyonlarının, kaynaklarının, bilgilerinin ve fonlarının yönetimidir.
Ahi & Searcy (2013)	STZ, malzemenin, bilginin ve sermayenin etkili bir şekilde yönetilmesi için ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerle işletmelerin arasındaki entegrasyondur.
Pagell & Shevchenko (2014)	STZ, çevreye ve sosyal sistemlere zarar verilmemesini sağlarken, ekonomik uygulanabilirliği de sağlamak için minimum beklenti ile zinciri sürdürülebilir kılmak için tedarik zincirinin tasarımı, koordinasyonu, kontrolü ve organizasyonudur.
Raut vd. (2015)	STZ, çevresel hususları, sosyal performansı ve ekonomik katkıyı bütünleştiren yönetim sürecidir.

Bütün bu tanımlar ışığında STZ, hammaddelerin tedarikçilerden satın alınmasıyla başlayan süreçte yenilenebilen ürün tasarımlarının yapıldığı, çevreci üretimin gerçekleştiği, kaynakların verimli yönetildiği ve müşterilere doğru ve zamanında ürünlerin teslim edildiği süreçte ekonomik faydaların yanında çevreye minimum zararın verildiği faaliyetler bütünü olarak tanımlanabilir. Ayrıca STZ, bir tedarik zinciri boyunca malzeme, bilgi ve sermaye akışının yönetilmesinde sürdürülebilirliğin üç boyutunun dikkate alınması olarak ifade edilebilir.

Sürdürülebilir tedarik zincirinin temeldeki amacı, tedarik zinciri boyunca ürünlerin, bilginin ve sermayenin aktarılmasını sağlayacak faaliyetlerde ekonomik kazanç elde etmek kadar çevreye ve sosyal kriterlere de önem vererek sürecin aksamadan devam

etmesini sağlamaktır. Organizasyonların gerçek anlamda sürdürülebilirlik amaçlarına ulaşabilmesi için zincirin tüm halkalarında bu değişimin gözlemlenmesi ve bütünsel açıdan değerlendirilmesi önemlidir. STZ'nin diğer amacı, zincirdeki tüm birimlerin katılımının sağlanarak geleceğe yönelik önemlerin alınması ve uzun vadeli ekonomik büyümenin sağlanmasıdır. Bu noktada STZ, yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır. Sürdürülebilir tedarik zincirlerinde paydaşların çevresel ve sosyal kriterlere uyması gerekirken, müşteri ihtiyaçlarını ve ekonomik beklentileri karşılayarak rekabetin sürdürülmesi (Seuring & Müller, 2008) ve şirketlerin ekonomik, çevresel ve sosyal kaynaklarını üretim dışında toplum yararına kullanmaları da beklenmektedir. Genovese vd., (2017) tarafından ise sürdürülebilir tedarik zincirinin amacı işletmelerin daha az kaynakla, daha az atığa sebep olarak çevresel zararı minimum seviyeye çekmesi olarak ifade edilmektedir. Özellikle sürdürülebilir ağ zincirinde ürün tasarımı, geri dönüşüm ve geri kazanım faaliyetleri optimize edilmelidir (Gülenç, 2004).

Dünya nüfusunun artması, kaynak sayısının azalması (Carter & Jennings, 2004) ve teknolojilerin gelişmesi durumları işletmeleri tedarik zincirlerini yeniden tasarlama ve yapılandırma gerekliliği ile karşı karşıya bırakmıştır. Tedarik zincirlerinin sürdürülebilir yönetimi, kısıtlı çevresel kaynak ve büyüyen dünya nüfusu karşısında giderek artan ihtiyaç haline gelmiştir; çünkü üretim ve lojistik faaliyetleri fazla kaynak tüketirken atık ve kirliliği de arttırmaktadır (Rebs vd., 2019). Sürdürülebilir tedarik zinciri, 1990'lı yıllardan sonra üzerinde fazlaca düşünülen, konuşulan ve tartışılan bir konu olmuş ve özellikle 2000'li yıllardan sonra tüm sektörlerde bulunan işletmeler için uygulanır hale gelmiştir. Skowronska (2008), sürdürülebilir tedarik zinciri yapılandırılmasını 4 davranış üzerinde açıklamıştır; seçim, minimizasyon, maksimizasyon ve sınıflandırma. Firmalar seçim ile çevreye daha az zararı olan ürünü seçmeyi; minimizasyon ile kaynakların, malzemelerin ve gereken enerjilerin kullanımını en düşük seviyede tutmayı; maksimizasyon ile alan, materyal, enerji veya ulaşım gibi konulardaki istenen verimlilik artışını yakalamayı ve sınıflandırma ile lojistik süreçlerinin yan etkilerinin ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. İşletmelerin yeşil tedarikçi seçimiyle başlayan süreci, zincirdeki tüm akış boyunca her birimin sorumluluğunda olmalı ve ürünlerin müşterilere ulaşmasını sağlayacak ağ boyunca en az riski ve zararı sağlayacak kararlar verilmelidir. Seçimlerde müşteri ihtiyaç ve isteklerini karşılayacak ürün ve hizmet dağıtımı boyunca kaynakların minimum seviyede kullanılması, gerek duyulan ve tedarik edilen

kaynaklardan da en üst seviyede yararlanılması beklenmektedir.

Sürdürülebilir tedarik zinciri kapsamında şirketlerin uygulayabileceği birçok farklı uygulama vardır. Her firma kendi süreçlerine ve hedeflerine uygun olan bir noktadan bu değişime başlayabilmekte ve çevreci ürün tasarımları, envanter yönetimi, atık yönetimi, yeniden üretim, ürün geri kazanımı, enerji geri kazanımı, enerji kullanımı ve emisyon azalımı gibi stratejileri birçok üretim planlama ve kontrol faaliyetlerine dahil edebilmektedir. Bu sayede işletmeler ürünlerin yaşam sürelerinde, hammadde ihtiyacında, enerji tüketiminde, atık miktarlarında, toplumsal sağlayacağı katkılarda veya çalışan/müşteri memnuniyeti gibi birçok alanda fayda sağlayabilmektedir. Şirketler doğrudan üretim süreçlerinde etkili olan sürdürülebilirlik uygulamalarını, tedarik zincirlerindeki ortak alanlarda da yapabilir. Ancak STZ uygulamalarında doğrudan geçiş yapabilmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Gopalakrishnan vd., (2012) STZ için;

- Sürdürülebilirlik ile ilgili genel sistemi ve etkileyecek faktörleri anlamının,
- Bu çabada dışarıdan etki edecek hükümetin, sosyal politikaların ve mevzuatın etkilerini kavramanın,
- Sürdürülebilirliğin olası etkilerini fark etmenin (maliyet, kalite gibi),
- Çevreci üretim yöntemlerinin uygulanması durumunda gerekli maliyetleri karşılayabilmenin,
- Olası değişime karşı değişime açık örgütsel yapıya sahip olmanın gerekliliğine dikkat çekmiştir. Hussain vd. (2016)'nin tedarik zincirlerine “sürdürülebilir olma” özelliğinin kazandırılmasında etkili olan faktörleri belirledikleri çalışmanın özeti aşağıdaki Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3: Tedarik Zincirini Sürdürülebilir Yapan Kriterler

Sürdürülebilirlik Boyutu	Tedarik Zincirinin Sürdürülebilir Olmasını Sağlayan Kriterler
Ekonomik (Finansal)	Kalite Yönetimi, Risk Yönetimi, Teknoloji Yönetimi, Stratejik Planlama, İşbirliğine Dayanan Ortaklıklar, İletişim Gücü, Müşteri Katılımı
Çevresel	Çevresel Kalite Yönetimi, Risk Yönetimi, Standartlar, Eğitim, Bilgi Paylaşımı, Yönetmelikler, Teşvikler, Çevreci Uygulamalar
Sosyal	Yönetmelikler, Hayırseverlik, Sağlık Fırsatları, Yaşam Kalitesi, Eşitlik, İş Sağlığı ve Güvenliği, Standartlar

İşletmelerin STZ’nde başarılı olmasında bu kriterlere bağlı yeteneklerin geliştirilmesi önemlidir. Her işletme kendi faaliyet alanı ve planları doğrultusunda farklı sürdürülebilir uygulamaları benimseyebilir. Ancak STZ’nin uygulama alanlarının doğru yönetimi, denetimi ve performans takibi için uygun kriterlerin olabildiğince açık tanımlanması önemlidir.

2.2. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansı

Performans bir faaliyetin etkinliğini veya etkililiğini ölçmek için kullanılmaktadır. Performans ölçüm sistemi, işletmelere finans, müşteri yönetimi, yenilik ve iyileştirme gibi sorunları ele almak için yeterli bilgi sağlamalıdır (Kaplan & Norton, 1996). Performans ölçüm sistemleri yöneticilerin işletmelerini verimlilik, etkinlik ve özel alanlarda kontrolü için stratejik araç olarak görülmektedir. Organizasyonların amaçlarını ölçmek ve performanslarını değerlendirmek için ilk olarak uygun metrikleri tanımlamaları gerekmektedir (Hassini vd., 2012; Shukla, 2016). Tedarik zinciri performans değerlendirmenin temelde çok katmanlı içsel bağlantılı faaliyetlere sahip olması ve çok sayıda varlık içeren karmaşık problemleri (Tavana vd., 2013) içermesi sebebiyle kurumların operasyonel, taktiksel ve stratejik kararlarını doğru verebilmeleri için ayrıca önemlidir.

Tedarik zinciri yönetiminde sürdürülebilirlik kavramının tanıtılması kurumların rekabet gücünü etkileyen performans iyileştirilmesinde önemli bir yol olarak tanımlanmakta (Chardine-Baumann & Botta-Genoulaz, 2014) ve küresel rekabetin artmasıyla sürdürülebilir tedarik zinciri performansı birçok endüstride önemli kaynak haline gelmektedir (Hoole, 2005; Shukla, 2016). Kapsamlı bir performans yönetim sistemi tasarlamak ve uygulamak, herhangi sürdürülebilir tedarik zincirinin (STZ) ticari operasyonlarının verimliliğini ve etkinliğini çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan attırabileceği (Tajbakhsh & Hassini, 2014) için gereklidir. Bu sebeple kurumsal tedarik zinciri performansının odak noktası zamanla tek bir ekonomik performanstan, ilgisi giderek artan sürdürülebilir tedarik zinciri performansına yani ekonomik, çevresel ve sosyal yönleri eş zamanlı odaklanmaya doğru evrilmiştir (Ahi & Searcy, 2015; Cantor, 2008; Hassini vd., 2012; Seuring & Mueller, 2008; Tajbakhsh & Hassini, 2015).

Sürdürülebilir tedarik zinciri performansında ekonomik, sosyal ve çevresel performansların etkileşimine veya kesişimine dayanan durumların değerlendirilmesini

sağlayan “Üçlü Bilanço Yaklaşımı” ile sürdürülebilir tedarik zinciri performansının yönetilmesi ve operasyonel seviyede tutulması uygulayıcılar tarafından kabul görmüştür (Margolis & Walsh, 2003). Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde bu ilişkiyi bütünsel olarak gösteren ilk çalışmalardan biri Carter & Rogers (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Alandaki çalışmaların büyük çoğunluğu Carter ve Rogers’ın aksine, sürdürülebilirliğin tek veya ikili boyutu üzerinden tedarik zinciri performansı değerlendirilmiş ve bu doğrultuda çalışmaların kapsamı kısıtlı kalmıştır. Sürdürülebilirlik performansını ölçmek için geliştirilen mevcut modeller, çevresel ve sosyal performansı ayrı değerlendirdikleri ve farklı sürdürülebilirlik boyutları arasındaki ilişkileri göz önünde bulundurmadıkları için sınırlı kalmıştır (Singh vd., 2012). Çünkü çevresel ve sosyal performansın sürdürülebilir tedarik zinciri performansına olan etkilerini değerlendirmek, üç boyutun karşılıklı ilişkilerini modellemek kadar zor bulunmuştur (Seuring, 2013). Ancak kurumların ürün yaşam döngüsü üzerinde artan sorumluluğa sahip olmaları, tekli boyutlara odaklanmanın yetersiz kaldığını ve en az iki boyutu dikkate alan daha geniş bir yaklaşıma ihtiyaç duyulduğunu ifade etmiştir (Biswas vd., 2018; Shou vd., 2019).

2.2.1. Ekonomik Sürdürülebilirlik Performansı

Hem geleneksel tedarik zinciri yönetiminin hem de sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin temel hedefi ekonomik büyümeyi sağlamaktır. Sürdürülebilir tedarik zincirinin diğer hedefleri ekonomik boyut üzerinde şekillenmektedir. Bu yüzden sürdürülebilir tedarik zincirinin performans yönetiminde ekonomik performans kritik bir konudur. Ekonomik sürdürülebilirliğin temel amacı organizasyonun çevresel faydaları ile ekonomisi arasındaki dengeyi sağlamaktır. Finansal faaliyetleri iyi bir dengede sürdürürken, doğal kaynakların kullanımına dikkat etmek, yenilenebilir kaynakları korumak, yenilenemeyen kaynakların tüketimine dikkat etmek ve diğer çevresel riskleri değerlendirmek önemlidir. Çevresel sürdürülebilirlik ile birlikte sosyal sürdürülebilirliğin de gerçekleşmesi için gerekli finansal kaynakların yaratılması ve sürdürülmesi ekonomik sürdürülebilirlikle ilgilidir (Anand & Sen, 2000).

Ekonomik sürdürülebilirlik performansı, likiditeyi sağlamak ve işletmelerin stratejik açıdan daha uzun dönemlerde devamlılığını sağlayacak karı arttırmak için yeterli sermaye akışı sağlama yeteneğini ölçmektedir (Vachon & Mao, 2008). İhtiyaç duyulan gerekli sermaye ve harcamalar işletmelerin sürdürülebilir ekonomik performansını doğrudan

etkilemektedir (Brent & Labuschagne, 2006; Feng vd., 2010). Sürdürülebilir tedarik zincirinin ekonomik performans boyutu esas olarak uzun vadeli karlı kalmaya ve bunu sürdürmeye odaklanmaktadır. Uzun dönemli ekonomik sürdürülebilirlik uygulamaları, çoğu zaman satış büyüme, aktif getiri, vergilendirme öncesi kar ve nakit akışları üzerinde belirleyici olmaktadır (Ameer & Othman, 2012). Önemli bir konu tedarik zincirindeki tüm birimlerin sürdürülebilir tedarik zincirinin ekonomik performansını belirleyebilmesidir. Tedarik zincirdeki paydaşların sürdürülebilirlik uygulamaları sonucunda ulaştıkları ekonomik karlılığın genel sürdürülebilirlik performansına olumlu etkisi olduğu bilinmektedir (Wang vd., 2018).

STZ kavramı içinde ekonomik sürdürülebilirlik üzerine mevcut araştırmalar genellikle sağlıklı nakit akışı, yüksek kar marjları, uygun yatırım getirisi, iş performansının iyileştirilmesi ve rekabet avantajına odaklanmak üzerine yapılmıştır (Ketchen vd., 2011). Ekonomik performans metrikleri çoğu zaman maddi değer cinsinden ölçülebilen değişkenlerden seçilmiş ve işletme maliyetleri, dağıtılmamış kârlar ve yerel olarak yapılan harcamaları içermiştir (Dreher vd., 2009). Literatürde sürdürülebilirlik performansını etkileyen onlarca farklı ekonomik metrikler incelenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4: STZ’nde Etkili Olan Ekonomik Sürdürülebilirlik Performans Boyutları

Çalışmalar	Boyutlar
Gunesakaran vd. (2004)	Yatırım getirisi (ROI), varlık getirisi (ROA), ürün teslim zamanı, makine kurulum zamanı ve envanter devri
Szekely & Knirsch (2005); Linton vd. (2007)	Verimlilik
Soosay & Cahpman (2006)	İş gücü maliyetleri, zamanında teslimat ve envanter devri
Singh vd. (2007)	Verimlilik, ürün/proses yatırımı
Bhagwat & Sharma (2007)	Üretim maliyeti, operasyon saat başına maliyet ve envanter maliyeti
Markley & Davis (2007)	Kaynak kullanımı
Liu & Wang (2009)	Bilgi teknolojisi alt tapısı
Erol vd., (2009)	Ürün/proses yatırımı
Tsai & Hung (2009)	İmha maliyetleri, yeniden işlem maliyetleri
Pochampally vd. (2009)	Operasyon maliyetleri, ürün kalitesi
Flynn vd. (2010)	Varlık getirisi (ROA), yatırım getirisi (ROI), pazar payı ve kar
Bouchery vd. (2010)	Taşıma maliyetleri ve zamanında teslimat
Epstein & Roy (2011); Picazo- Tadeo vd. (2011)	Ekonomik eklenen değer
Adel El-Baz (2011)	Üretim maliyeti ve esneklik (hacimsel & teslimat)
Ameer & Othman (2012)	Aktif getiri, vergilendirme öncesi kar ve nakit akışları
Gopala vd. (2012); Huq vd. (2014); Varsei vd. (2014);	Firma imajı, kar, yabancı yatırım oranı, müşteri sayısı, yeni müşteri elde etme oranı

Freise & Seuring (2015); Tajbakhsh & Hassini (2015) Govindan vd. (2013) Farel vd. (2013)	Üretim maliyetleri Geri dönüşüm maliyeti, geri dönüştürülmüş ürün talebi, vergiler, cezalar, atık depolama alan maliyetleri, lojistik maliyeti, hammadde fiyatı, geri dönüştürülmüş ürün fiyatı, enerji fiyatı, depolama (stok) maliyeti ve yeni teknolojiler Öz kaynak verimliliği
Santos vd. (2013) Aguezoul (2014) Ahi & Searcy (2015)	Yatırım ve bilgi teknolojisi alt yapısı Bilgi teknolojisi alt yapısı, çevresel maliyetler, operasyonel maliyetler ve pazar payı Risk paylaşımı ve pazar payı
Tavana vd. (2016) Ding vd. (2016)	Geri dönüşüm maliyeti, yeniden kullanılacak malzeme kazancı, kaynak azaltma maliyeti, cezalar ve depolama alan maliyeti ARGE yatırımları, ekonomik değer ve çevresel yatırımlar
Lenort vd., (2017) Kumar & Garg (2017)	Ürün maliyeti ve marjı, kaynak kullanımı, kar marjı, teknoloji ve finansal yetenek Kar, üretim maliyeti, zamanında teslimat ve verimlilik
Sopadang vd. (2017) Giannis vd. (2017)	Kirlilik önleme maliyetleri, atık yaratma maliyetleri, yakma maliyetleri, geri dönüşüm maliyeti, geri dönüşüm kazancı, vergiler ve endüstriyel büyüme oranı, Maliyet/fiyat, kalite, teslimat ve hizmet süresi, teknik yetenek, finansal yetenek, güvenilirlik ve esneklik
Petrudi vd. (2018) Agarwall vd. (2018) Hu vd. (2019) Osiro vd. (2018)	Hurda malzeme satışları, sermaye fazlası ekipman satışı, geri dönüşüm sistemi için yatırım ve stok fiyatları Kalite yönetimi, risk yönetimi, stratejik yönetim, bilgi paylaşımı, teknoloji yönetimi ve ortaklık
Govindan vd. (2019) Abdelaziz vd. (2020) Dubey vd. (2020)	Ürün kalitesi, tedarik maliyeti, kar, bilgi teknolojisi alt yapısı, risk, çevresel maliyetler, operasyonel maliyetler ve pazar payı Ciro, büyüme oranı, kaynak kullanımı ve talep Satın alma maliyetleri, enerji tüketim maliyeti, atık işleme maliyetleri, atık kurtarma maliyetleri ve çevresel vergiler
Haryanti & Subriadi (2021)	Ekonomik büyüme, satış miktarı (karlılık), vergi ve verimlilik

İşletmelerin kendi hedefleri doğrultusunda uyguladıkları sürdürülebilirlik faaliyetleri için farklı kriterlerden performans takip ve yönetimi gerçekleştirebilirler. Kurumlar için özel durumlarda performans yönetiminde tek ekonomik boyut belirleyici olurken, bazı durumlarda birçok farklı boyutun eş zamanlı değerlendirilmesine ihtiyaç duyulabilir. Buradaki temel ayrım kurumların amaçlarına, politikalarına, yönetim şekillerine veya sürdürülebilirliği uygulama alanlarına bağlı olarak değişebilmektedir.

2.2.2. Çevresel Sürdürülebilirlik Performansı

Çevresel sürdürülebilirlik, çevre ve insan ilişkilerinde doğal çevrenin en doğal şekliyle korunmasını sağlayarak zarar gören çevrenin iyileştirilmesine yönelik faaliyetler bütünüdür (Goodland, 1995). Çevresel sürdürülebilirlik ekosistemdeki yenilenmeyen kaynakların korunmasına ve yenilenebilir olanların daha fazla kullanılmasına teşvik

etmeyi sağlayan uygulamalar olarak tanımlanabilir (Ramjonh, 2008). Gruszecka-Tiesluk (2013), organizasyonların çevresel sürdürülebilirlik çalışmalarını ürünlerin yaşam döngüsü içindeki tüm aşamalarını kapsayan tasarım, nakliye, hammaddelerin üretim için kullanımı ve geri dönüşümü olarak ifade etmektedir. Çevresel sürdürülebilirlikte toplumsal ihtiyaçların gözetilerek, biyoçeşitliliğin korunması, yenilenmeye destek veren kaynakların kullanılması, yeniden kullanma ve geri dönüşüm faaliyetlerine odaklanma faaliyetleri önemlidir (Morelli, 2011).

Sürdürülebilir tedarik zinciri performansının çevresel boyutu, tedarik zinciri operasyonlarının çevre üzerinde yarattığı etkiyi ifade etmektedir. Çevresel sürdürülebilirliğin genel kapsamının, geri dönüşüm ve lojistik süreçleri ile ilgili göstergeleri içerecek şekilde üretim alanından bütün bir tedarik zincirine, yani ürünün yaşam döngüsüne genişletildiği söylenebilir (Lu vd., 2010). 2000’li yıllardan itibaren işletmelerde çevresel sürdürülebilirliğin gelişmesine yönelik genel bilinçlenmenin başladığı görölse de günümüze kadar bu etkinin ne kadar başarılı yönetildiği bir tartışma konusudur. Ancak son birkaç yılda tedarik zinciri çevresel performansının araştırılmasına artan bir eğilim vardır (Longoni & Cagliano, 2018). Kurumların genel üretim stratejileri ile çevresel yönetim planları arasındaki ilişki oldukça önemlidir. İşletmelerin ekonomik ve çevresel performanslarını daha iyi yönetebilmelerinin başlıca yolu çevresel baskıların potansiyel etkilerini doğru anlayabilmelerinden geçmektedir (Zhu & Sarkis, 2007). Wang vd. (2018)’nin çalışmasında çevre yönetimi uygulamalarının işletmelerin hem ekonomik hem de çevresel performansı üzerinde olumlu etkiler yarattığı gösterilmiştir.

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin çevresel performansı çoğu durumda yeşil tedarik zinciri yönetimi ile ilişkilendirilmektedir (Longoni & Cagliano, 2018) ve bu konudaki araştırmacılar yeşil tedarik zinciri literatüründe önemli yeri olan enerji kaynak kullanımı, ürün geri dönüşümü, yeşil satın alma ve emisyonların azaltılması kriterleri ile daha çok ilgilenmektedir (Acquaye vd., 2017). Mikro düzeyde incelenen çalışmalarda ise çevresel kriterler çoğu zaman hem iç hem de dış politikalara dayanmaktadır (Feng vd., 2010). İç politikalar kurumların işletme kültürüyle ve stratejileriyle paralel olacak şekilde çevre hedeflerini gösterirken, dış politikalar kurum dışı yönetmelikler veya kurallar gibi uyulması zorunlu olan yasal durumları göstermektedir. Çevresel sürdürülebilirliğin ayrıca farklı düzeylerde ve sektörlerdeki çalışmalarda yer alması bu alandaki çalışmaları zenginleştirmiş ve farklı boyutlar üzerine çalışılmıştır. Literatürde sürdürülebilirlik

performansını etkileyen onlarca farklı iç ve dış çevresel boyut incelenmiştir (Tablo 5). Bu boyutlar çevre eğitimleri, çevre yönetmeliklerine uygunluk ve denetimler, kaynak kullanımı, atık yönetimi ve çevre tasarrufu sağlayan etkinliklerden oluşurken (Tam vd., 2006), enerji tüketimi, su tüketimi ve gaz salınımı gibi kriterler de çalışmalarda yer almıştır.

Tablo 5: STZ’nde Etkili Olan Çevresel Sürdürülebilirlik Performans Boyutları

Çalışmalar	Boyutlar
Theyel (2000); Huang & Matthews (2008) Veleva & Ellenbecker (2001)	Tedarik zincirinde açığa çıkan zararlı maddeler
Rao (2002)	Emisyon, su tüketimi, enerji tüketimi ve atık miktarı
Zhu & Sarkis (2004)	Katı atıklar, su tüketimi, hava emisyonu, çevresel iyileştirme
Szekely & Knirsch (2005)	Zararlı maddeler, katı atık, su tüketimi, hava emisyonu, çevresel kazalar, firma çevresel durum
Hervani vd., (2005)	Emisyon ve enerji tüketimi
Singh vd., (2007); Santos vd. (2013)	Enerji tüketimi, gaz emisyonu, geri kazanılan malzemeler ve zararlı maddeler
Vachon & Klassen (2008)	Emisyon, su tüketimi ve enerji tüketimi
Erol vd., (2009)	Katı atık, su tüketimi ve gaz emisyon
Hubbard (2009)	Emisyon, su tüketimi ve atık miktarı
Tsai & Hung (2009)	Su tüketimi ve enerji tüketimi
Pochampally vd., (2009)	Atık miktarı
Bouchery vd. (2010)	Bertaraf edilen atık miktarı
Dou & Sarkis (2010)	Enerji kullanım, kaynak tüketimi, gaz emisyonu ve alan kullanımı
Lai & Wong (2012)	Kirlilik, kaynak tüketimi ve çevre yönetim sistemi kurulumu
Gimenez vd. (2012); Maxwell & van der Vorst (2003)	Zararlı maddeler, katı atık, su tüketimi, gaz emisyonu ve çevresel kazalar
Govindan vd. (2013)	Çevreci ürün ve süreç tasarımı
Hajmohammad vd. (2013)	Su tüketimi
Farel vd. (2013)	Zararlı maddeler, katı atıklar, su tüketimi ve gaz emisyonu
Gualandris & Kalchschmidt (2014)	Geri dönüşüm oranı, geri dönüştürülmüş ürün pazar hacmi, malzeme geri dönüşüm motivasyonu, hammadde tasarruf motivasyonu ve enerji tüketim azaltma motivasyonu
Ahi & Searcy (2015)	Eko tasarımlar, çevre yönetim sistemi kurulumu, yeşil tedarikçi seçimi ve tedarikçi işbirliği düzeyi
Glavas & Mish (2015)	Enerji tüketimi ve gaz emisyonu
Ding vd. (2016)	Enerji tüketimi, tehlikeli madde kullanımı ve atık yönetimi
Lenort vd. (2017)	Katı atık, depolanacak atık, bertaraf oranı, geri dönüşüm oranı, yeniden kullanılan atık ve kaynak azaltma
Kumar & Garg (2017)	Enerji yoğunluğu, su miktarı, kaynak kullanımı ve emisyon
Sopadang vd. (2017)	Gaz emisyonu, katı atık, enerji etkinliği ve yenilenebilir enerji, kaynak kullanımı ve temiz teknoloji kullanımı
Giannis vd. (2017)	Enerji kullanım, su kullanım, elektrik kullanım, gaz emisyonu ve katı atık
	Katı atık, geri dönüşüm oranı, bertaraf oranı, geri dönüşüm kapasitesi, depolama alan kapasitesi ve depolama oranı

Feitó-Cespón vd. (2017)	Taşıma kapasitesi, geri dönüşüm kapasitesi, geri dönüştürülmüş ürünlere talep, enerji tüketim, alt tapı, su tüketim ve depoalam alan kullanımı
Xu vd. (2018); Zhang vd. (2018); Ni & Sun (2019) Das (2018)	Eko tasarım, yeşil paketleme, temiz üretim ve işbirliği düzeyi (kaynak kurtarma)
Zhang (2018)	Atık emisyon oranı, enerji tasarrufu sağlayan ürün ve hizmetler, yenilenebilir ve geri dönüştürülmüş enerji, yeniden kullanılabilir bileşen ve hammadde kullanım oranı ve standartlara uygunluk
Yu & Solvang (2018)	Enerji kullanım oranı, ürün geri dönüşüm oranı, atık emisyon oranı ve enerji güvenliği garanti oranı
Zhao vd. (2018)	Gaz emisyonu, ürün geri dönüşüm oranı ve enerji geri kazanım
Govindan vd. (2019)	Atık üretimi, geri kazanım oranı, geri dönüştürülmüş ürün ve yeniden üretilen ürün oranı
Hu vd. (2019)	ISO 14000 ile uyum, çevre koruma politikaları, kirlilik, yeşil dağıtım, çevre yönetim sistemi kurulumu ve yeşil aktivitelere katılım düzeyi
Koberg & Longoni (2019)	Eko tasarım, yeşil paketleme, temiz üretim, işbirliği düzeyi (kaynak kurtarma) ve yeşil tedarikçi seçimi
Dubey vd. (2020)	Yeşil tedarikçi seçimi ve işbirliği düzeyi
Chaudhary & Vrat (2020)	Gaz emisyonu, ürün geri dönüşüm oranı, katı atık önleme, zararlı madde tüketimi, çevre kazaları ve çevresel girişimler
Haryanti & Subriadi (2021)	Ürün geri dönüşüm oranı, kaynak geri kazanım ve bertaraf oranı
	Gaz emisyonu, yeşil paketleme ve yeşil lojistik

Yukarıdaki tabloya bakıldığında 2000’li yıllardan başlayan çalışmaların özellikle 2017 yılından sonra arttığı görülmüştür. Ayrıca son birkaç yıldır yapılan çalışmalarda da yoğunlukla enerji tüketimi, atıklar ve gaz emisyonları odaklanılan kriterlerden olmuştur.

2.2.3. Sosyal Sürdürülebilirlik Performansı

Sosyal sürdürülebilirlik, toplum ihtiyaçlarının giderilmesini, adaletin var olmasını ve eşitliğin sağlanmasını içeren sosyal konularda bugünü ve gelecek nesilleri bağlayan uygulamaların birleşimidir (Littig & Griessler, 2005). Sosyal boyut, ekonomilerin ve toplumların gelişmesiyle birlikte toplumun genel olarak faydasını gözeterek şekilde değerlendirilmektedir. Firma performansının hem çalışanlar hem de toplum açısından sosyal boyutta değerlendirilmesi için yapılan yatırımların gerçekte bu kişilerin yeteneklerini geliştirecek elverişli bir ortamın yaratılmasına ne ölçüde katkıda bulunduğu izlenmesi gerekmektedir (Das, 2018).

Sosyal sürdürülebilirlik performansı genellikle iş yasalarına ve insan haklarına uygunluk, adil ücretlendirme, iş ortamındaki eşitlik, sağlık ve güvenlik olanakları ve topluluklarla olan işbirliği üzerinden değerlendirilmesi gereken bir boyuttur (Gruszecka-Tiesluk, 2013). Sosyal boyutun dikkate alınma durumu, hem kurumsal sosyal sorumluluk performans düzeyini hem de tüm tedarik zincirinin performans seviyesini

iyileştirmektedir (Xioyan Yang, 2016). Sürdürülebilir tedarik zincirinde özellikle tedarikçi seçimi, mod ve taşıyıcı seçimi, tesis konum kararları ve paketleme seçimi gibi sürdürülebilir uygulama kararları çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra sosyal performansı etkileyebilmektedir.

Sürdürülebilir tedarik zinciri performansını içeren uygulamalarda sosyal performans boyutu çoğu zaman ihmal edilmiştir (Gold, vd., 2010; Wei & Xiong, 2020). Literatürde sosyal performansın yer aldığı sınırlı çalışmalarda da ekonomik, çevresel ve sosyal performansın üç boyutunun pozitif olarak ilişkili olduğu görülmüştür. Ekonomik ve çevresel performans parametreleri çalışmalarda uzun süredir var olmasına rağmen, şirketlerin sosyal ve etik görünümünün sistematik olarak değerlendirildiği çocuk işçiliği ve insan hakları gibi temaların işlendiği çalışmalar özellikle son zamanlarda uygulamalara dahil edilmeye başlanmıştır (Awasthi vd., 2018). Sosyal sürdürülebilirliği ele alan literatür, sosyal açıdan sorumlu tedarik zinciri yönetimi olarak bilinen araştırma akışı yaratarak temelinde hissedarlara karşı sorumluluk, çalışan refahı, yolsuzluğun önlenmesi, sosyal imaj, topluma karşı sorumluluklar ve iş sağlığı ve güvenliği gibi çeşitli sosyal konuları araştırmaktadır (Feng vd., 2017). Eriksson (2015) işletmelerde eşitlik, sağlık ve güvenlik, eğitim, borç ve etik konularında artan farkındalık nedeniyle son yıllarda tedarik zincirinde sosyal sürdürülebilirliğin giderek daha fazla ilgi gördüğüne dikkat çekmektedir. Literatürde sürdürülebilirlik performansını etkileyen birçok farklı sosyal boyut incelenmiştir (Tablo 6).

Tablo 6: STZ’nde Etkili Olan Sosyal Sürdürülebilirlik Performans Boyutları

Çalışmalar	Boyutlar
Veleva & Ellenbecker (2001)	Müşteri şikayetleri, sağlık ve kaza oranı ve eğitim programları
Maxwell ve van der Vorst (2003); Gimenez vd. (2012)	Toplumsal gelişimine ve refahına daha fazla katkı, sağlık ve güvenlik
Gunasekaran vd. (2004); Gaiardelli vd. (2007); Markley & Davis (2007); Yeung (2008)	Müşteri şikayetleri
Szekely & Knirsch (2005)	Eğitim programları
Linton vd. (2007); Erol vd., (2009)	Toplum için yatırım ve müşteri şikayetleri
Singh vd., (2007); Santos vd., (2013)	Sağlık ve kaza oranı
Carter & Rogers (2008); Sancha vd. (2015)	İş yerinde refah, çalışan morali, iş tatmini, iş eğitim programları, insan hakları ve sağlık ve güvenlik
Liu & Wang (2009)	İnsan kaynakları faaliyetleri
Chen vd. (2009)	Bilgi paylaşımı ve müşteri şikayetleri

Hubbard (2009)	Toplum için yatırım
Pochampally vd. (2009)	Müşteri memnuniyeti ve iş eğitim programları
Dou & Sarkis (2010)	Çalışma eşitliği, esnek çalışma ve paydaş katılımı
Gopalakrishann vd. (2012); Huq vd. (2014); Varsei vd. (2014); Freise & Seuring (2015); Tajbakhsh & Hassini (2015)	Çalışan çekiciliği ve çalışan elde tutma oranı
Gualandris & Kalchschmidt (2014)	Sağlık ve güvenlik sertifikaları ve eğitim programları
Ahi & Searcy (2015)	Müşteri memnuniyeti, gönüllülük ve paydaş katılımı
Zhu vd. (2016); Mani vd. (2016a,b)	Adil ücretlendirme, çalışan sağlığı, çalışma koşulları, yaşam koşulları, iş fırsatları, toplum eğitimi, toplum sağlığı ve toplum okuryazarlığı
Lenort vd., (2017)	Çalışan devir hızı, sağlık ve güvenlik ve iş eğitim programları
Kumar & Garg (2017)	Çalışma şartları/güvenlik/sağlık, adil ücretlendirme, kariyer gelişimi, çalışma dengesi, sosyal destekler, kadın çalışan sayısı ve çalışan eşitliği
Yawar & Seuring (2017)	Toplumsal fayda (araştırma-geliştirme vs.), eğitim faydaları, eşitlik, cinsiyet eşitliği, kamusal sorumluluklar ve ücret şartları
Sopadang vd. (2017)	Müşteri memnuniyeti, çalışan memnuniyeti ve sağlık/güvenlik
Giannis vd. (2017)	Yasal zorunluluklar (geri dönüşüm)
Govindan vd., (2019)	Topluma etkisi, insan kaynakları faaliyetleri, paydaş katılımı, sağlık, eğitim, çalışma eşitliği, iş fırsatları ve esnek çalışma,
Ni & Sun (2019)	Sağlık ve güvenlik sertifikaları ve iş eğitim programları
Ren (2019)	Hissedarlara karşı sorumluluk, çalışanlara karşı sorumluluk, müşterilere karşı sorumluluk, ortaklara karşı sorumluluk, topluma karşı sorumluluk, hükümete karşı sorumluluk ve kamu refahı endüstrisine karşı sorumluluk
Dubey vd. (2020)	Cinsiyet eşitliği, çocuk çalışan sayısı, fakirlik oranı, organizasyon tarafından verilen yemek içeriği, sunulan güvenli içme tesisi, sağlık hizmeti, konut desteği ve ulaşım olanakları
Haryanti & Subriadi (2021)	Müşteri memnuniyeti, istihdam ve yönetime bağlılık

2.3. Geri Dönüşümün Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansı Üzerindeki Etkisine Dair Teorik Arka Plan

Günümüz iş ortamlarında atıkların tekrar kullanılmasının ekonomik faydalarının ve çevresel etkilerinin yüksek önemi, çoğu şirketin kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarlamasına neden olmuştur (Farrokh vd., 2018). Kaynakların kısıtlı olduğu bir dünyada sürdürülebilirliği sağlamak için onların yeniden kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. Toplumun her kesiminde malzemelerin geri dönüşümü, yeniden üretimi ve yeniden kullanımı önemlidir. Kaynak kurtarma sürdürülebilirlik için kritik öneme sahiptir ve çevre ile toplum arasındaki ilişkisi göz ardı edilmemelidir. Bu sebeple özellikle kurumların tedarik zincirlerinde geri dönüşüm ve malzeme geri kazanımı önemli konular haline gelmiştir. Birçok tedarik zincirinin hedefleri arasında zincirin tümünde daha az atık ve daha az kaynak tüketimi yer almaktadır. Başarılı bir sürdürülebilir tedarik zinciri

performans yönetiminde geri dönüşüm faaliyetlerinin işletmelerin performansları üzerindeki etkilerinin düzenli olarak değerlendirilmesi gerekli görülmektedir.

Olugu ve Wong (2012) STZ içinde geri dönüşüm faaliyetlerinin incelendiği literatürü araştırdıklarında, araştırmacıların ağırlıklı olarak zincir optimizasyonuna ve ağ tasarımına odaklandığını ortaya çıkarmışlardır (Olugu & Wong, 2012). 2012 yılında yayınlanan bu çalışma sonuçlarına paralel şekilde günümüzde halen ilginin benzer temalarda ilerlediği, çalışmalarda özellikle birçok parametre altında sürdürülebilir tedarik zincirinde yüksek performansı sağlayacak olan ağ modellerinin kurulmasının amaçlandığı ifade edilebilir. Belirsiz parametrelere sahip tedarik zincirlerinin yönetiminde stokastik, bulanık, sağlam ve kısıtlı modelleme yaklaşımları kullanılmıştır (Nidhi & Pillai, 2019). Mevcut literatürün araştırılmasına dayanarak, genel olarak kapalı döngü tedarik zinciri performansını aydınlatmak için yapılan çalışmalarda ve kullanılan ölçümlerde çok fazla eksiklik bulunmaktadır (Olugu & Wong, 2012; Nidhi & Pillai, 2019).

Literatürde tedarik zinciri veya lojistik ağı yapılandırılmasının tedarik zincirinin toplam performansı üzerine etkileri farklı uygulamalarla işlenmiştir. Daha çok sürdürülebilir tedarik zincirindeki atık yönetimi için depo, araç, konteyner sayıları, geri dönüşüm merkezlerinin veya ilgili birimlerin konumları veya araç rotalarının (Schultmann vd., 2006) araştırıldığı lojistik ağı tasarlanması önemli konulardan olmuş ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Yang vd., 2009; Kannan vd., 2010; Ramos vd., 2014; Jafari vd., 2017; Feitó-Cespón vd., 2017; Ali vd., 2020). Bu amaçtaki çalışmalarda çoğunlukla çok dönemli, çok kademeli, stokastik karışık tam sayılı doğrusal veya doğrusal olmayan modelleme yöntemlerinin kullanıldığı görülmüştür.

İlgili konudaki çalışmalardan birini yapan Feitó-Cespón vd. (2017), geri dönüşüm tedarik zinciri ağını yeniden tasarlamak için farklı senaryolar altında çevresel ve ekonomik hedefleri göz önünde bulunduran performans göstergeleri oluşturmayı amaçlamışlardır. Çalışmada taşıma kapasitesi, geri dönüşüm kapasitesi, talep, enerji tüketim, alt tapı, su tüketim, alan kullanımı, birimler arası mesafeler ve birimler arası lojistik maliyetleri kullanılmıştır. Geliştirilen model Stokastik Çok Amaçlı Karışık Tam Sayı Doğrusal Olmayan problem ile çözülmüştür. Çalışma sonucunda ekonomik ve çevresel hedeflere bağlı olarak tedarik zinciri performansını belirleyen müşteri hizmet seviyesi güçlü sürdürülebilirlik yaklaşımına dayanan karar verme için değerli bilgiler sağlamıştır.

Çalışmanın sonunda bu alanda çalışan araştırmacılar için öngörülmeleyen diğer parametrelerin (fiyatlar, üretim maliyetleri, geri dönüştürülmüş ürünlerin kalitesi) dahil edilmesi önerilmiştir. Benzer çalışma yapan Jafari vd. (2017) de birçok çevresel ve sosyal faktörleri göz önünde bulundurarak tekstil endüstrisindeki geri dönüşüm ağını tasarladığı çalışmada Çok Amaçlı Titreşim Sönümlleme Optimizasyonu ve NSGA-II (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması) algoritmasını kullanmıştır.

Yu ve Solvang (2018)'un çalışmasında, toplanan ahşap atıkların kalite ve miktar belirsizliği altında kapasitede esneklik yaratılmasının STZ performansına olan sonuçları incelenmek istenmiş ve modelde operasyonel maliyetler, geri kazanım maliyetleri, CO₂ emisyonu, kapasite, geri dönüşüm oranları, enerji geri kazanım ve kalite seviyesi göstergeleri kullanılmıştır. Çalışmada çok ürünlü çok kademeli sürdürülebilir tersine lojistik sisteminin ağ tasarım problemi için, karlılık ile çevre performansı arasında bir dizi Pareto çözümü sağlamayı amaçlayan, iki aşamalı, stokastik, iki amaçlı, karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Araştırma sonucunda tersine lojistik zincirinin sistem esnekliğini iyileştirmesi ile hem ekonomik hem de çevresel performans üzerinde önemli etkiler yaşanmış ve bu durumun da sürdürülebilir tedarik zinciri performansına olumlu katkılar sağlayacağı tespit edilmiştir.

Ali vd. (2020)'nin çalışmasında, Hindistan'da yer alan büyük endüstriyel klima şirketindeki iade edilen ürünlerin geri dönüşümü için çok aşamalı tersine lojistik ağını tasarlanması amaçlanmıştır. Model iş ihtiyaçlarına uygun olarak çok amaçlı programlama modeline dönüştürülmüş ve karma tam sayılı doğrusal programlama ile çözülmüştür. Tüm ilgili amaç fonksiyonlarında üç ayrı sonuç sağlayan bulanık doğrusal programlama modelindeki ağırlıklar BWM (*Best Worst Method*), AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) ve FAHP (Fuzzy (Bulanık) Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemleri ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda iade edilen ürünlerin tekrar kullanılmasına yönelik tasarlanan lojistik ağı, müşteri memnuniyetinin artmasına, pazar payının artmasına, maliyetlerin düşmesine ve bu durumun da STZ'nin performansının gelişmesine katkı sağladığı görülmüştür. Araştırmada iade edilen ürünlerin miktarındaki ve kalitesindeki belirsizlik altında geliştirilmiş model, tedarik zincirinin verimliliğini artıracak şekilde tasarlanması ile sonuçlanmıştır.

Literatürde sürdürülebilir tedarik zincirindeki atık yönetimi uygulamalarını içeren

Çalışmalardan birkaçı üretim/geri dönüşüm teknolojilerinin seçimi, geri dönüşüm merkezindeki üretim miktarının belirlenmesi ve mevcut kaynakların kullanımı gibi stratejik ve taktik düzeylerde karar verme problemleri şeklindedir. Bu amaçla yapılan Kurilova ve Zelinskaya (2020)'nın çalışmasında, çok amaçlı doğrusal olmayan tam sayılı karışık tam sayılı matematiksel programlama modeli sunulmuştur. Modelin amaç fonksiyonları ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğin üç boyutunu içerecek şekilde kurulmuştur. Ayrıca model tedarikçiler, toplama merkezleri, geri dönüşüm merkezleri ve tüketiciler olmak üzere dört seviyeyi kapsamaktadır.

Atık yönetimindeki bir başka çalışma alanı da sürdürülebilir tedarik zinciri performans ölçüm sistemi geliştirmek üzerinedir (Olugu & Wong, 2012; Wei vd., 2014; Wu vd.,2018; Avsec & Kaucic (2018)). Otomotiv endüstrisinde yüksek performanslı kapalı döngü tedarik zinciri elde etme amacıyla performans değerlendirme sistemi kurmak isteyen Olugu ve Wong (2012), geri dönüşüm maliyeti, geri dönüşüm etkinliği ve atık yaratma seviyesi (geri kazanım süresi miktarı) değişkenlerini kullanarak uzman bulanık kural tabanlı sistem geliştirilmiştir. Wu vd., (2018) sürdürülebilir tedarik zinciri performans ölçüm sistemi oluşturmak için ekonomik performans, çevresel performans ve sosyal performansa odaklanarak, elli dokuz ikincil gösterge kullanmışlardır. Göstergeler ÇKKV (ok Kriterli Karar Verrme) yöntemlerinden AHP ile ağırlıklandırılmıştır. Çalışmada bir imento işletmesinin ekonomik performansını iyileştirmek, ekosistemi korumak ve sağlıklı bir kamu imajı oluşturmak için sürdürülebilir tedarik zinciri oluşturmanın performansa olan etkisi incelenmiştir. Araştırma sonunda kalite evi modeline dayanarak, kurumların kirliliğinin izlenmesinin, atıklardan kaçınmasının, kaynakları geri dönüştürmesinin ve sürdürülebilir sömürünün kurumların performansını olumlu etkileyen en önemli yetenekler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca birkaç önemli sonuç firmaların sürdürülebilir tedarik zinciri kurma yatırımlarının çok yüksek olmasına rağmen gerçek bir bilgi sistemi oluşturmanın, geri dönüştürölmüş kaynakları benimsemenin ve tedarik zinciri ortaklarıyla işbirliği geliştirmenin uzun dönemli faydalı olacağıdır. Çalışmada STZ performansını geliştirmeye yardımcı olan tedarik maliyetlerindeki düşüşlerin, kalite iyileştirmelerinin ve kaynakların geri dönüşümü için artan çabanın ve yatırım yapmanın gerekliliğine dikkat çekilmiştir. Avsec & Kaucic (2018) ise ömrünü tamamlamış katı atıkların geri dönüşüm sistemi performansını değerlendirmek üzere eko-verimlilik göstergelerini geliştirmeleriyle kapsamlı bir performans ölçüm sistemi önermiştir.

Modelde toplanan atık miktarı, geri dönüştürülen atıklar, geri dönüşüm oranı, üretim girdileri (iş gücü vs.), üretim maliyetleri, teknoloji ve kalite ile ilişkilendirilen parametreler, sabit maliyetler, depolama alanına gönderilecek atık fiyatları ve net varlık değeri parametreleri kullanılarak, çalışma tedarik zincirinin matematiksel modeline dayanan bir sistem dinamiği modeli ile desteklenmektedir.

Sarkis ve Dijkshoorn (2007), atık yönetim uygulamalarını benimseyen KOBİ'lerin sürdürülebilirlik performansını belirleyen çevresel ve ekonomik verimliliklerini araştırmak üzere çalışma yapmışlardır. Bunun için 299 KOBİ'den oluşan örneklem belirlenmiş ve bu örnekleme çevre atık denetim uygulamalarını yürüten kuruluşlar ve bu uygulamaları benimsemeyen kurumlar olmak üzere iki farklı sınıflandırma yapılmıştır. Çalışmada veri zarflama yöntemi kullanılarak çevresel ve ekonomik verimlilik puanları parametrik olmayan istatistiksel analiz (Mann-Whitney testi) ile test edilmiştir. Çalışmada çevresel verimlilik, kuruluşun atıklarını ne kadar iyi yönetebildiğinin bir göstergesi olarak tanımlanmıştır. Modelin çıktısı geri dönüştürülmüş malzemeler olarak belirlenmiştir. Ekonomik verimlilik ise atıkların maliyet etkin bir şekilde yönetilebilmesidir ve ihtiyaç duyulan maliyet modelin tek girdisi olarak tanımlanmıştır. Test sonucunda, çevreci uygulamaları benimseyen ve bunu başlangıçta çevresel ve imaj olmak üzere daha proaktif nedenlerle yapan kuruluşların daha iyi sürdürülebilirlik performansları gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca katı atıkların yönetilmesinde eğitimin kalitesinin, performansı daha yükselteceği öngörülmüştür. Çalışmada verilerin doğrulanmamış olması, verimliliği belirleyen girdi ve çıktı faktörlerin yeterlilik düzeyi ve tam olarak hangi endüstrileri kapsadığı çalışmanın kısıtlayıcı unsurları olmuştur.

Suttibak ve Nitivattananon (2008)'un Tayland'ın farklı kentsel alanlarında bulunan katı atık geri dönüşüme ilişkin zincir performansını etkileyen faktörleri araştırmak istediği çalışmasında 120 kişiye anket çalışması yapmıştır. İstatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak geri dönüşüm performansının değerlendirilmesi için verimlilik, etkinlik ve hizmet oranını içeren göstergeler kullanılmıştır. Çalışmada geri dönüşüm faaliyetlerindeki özellikle ekonomik desteklerin, ulaşım maliyetlerinin ve düşük yatırım maliyetlerinin kurumların performansına olumlu etki yarattığı gösterilmiştir. Benzer bir çalışmayı elektrikli ve elektronik atıkları üzerine Tayvan'da yapan Wen vd. (2009), zincir performansını belirleyecek şekilde toplama oranı, geri dönüşüm oranı ve geri kazanım oranını değerlendirmiş ve benzer sonuçlara ulaşmıştır.

STZ ve geri dönüşüm ortak çalışma alanından biri de ters tedarik zinciri içinde yapılan sözleşmelerin performansa etkisini analiz etmektir ve birçok araştırmacı tarafından çalışılan yaygın bir konu olmuştur (Cachon & Lariviere, 2005; Wang vd., 2007; Arshinder vd., 2009; Höhn, 2010; Kannan vd., 2012; Govindan & Popiuc, 2014; Golroudbary & Zahraee, 2015). Govindan ve Popiuc (2014), geri dönüşümün ters tedarik zinciri performansı üzerindeki etkilerini araştırma amacıyla bilgisayar sektörü için üç kademeli analitik model önermişlerdir. Çalışmada elde edilen gelir, yapılan sözleşme aracılığıyla tedarik zincirindeki birimler arası paylaşılacak şekilde modellenmiştir. Önerilen model, sayısal bir örnek üzerinde uygulanabilirliği ile test edilmiş ve sonuçlar tedarik zinciri koordinasyonunun işbirliğiyle katılımcıların performans ölçümelerini iyileştirdiğini ve toplam tedarik zinciri karını artırdığını ortaya koymuştur.

Diğer taraftan STZ performansında etkili olan atık yönetiminin dahil edildiği çevre yönetim sistemlerinin uygulanması önemli bir araştırma alanı olmuştur (Melnik vd. 2003; Theyel & Hoffman, 2015). Melnik vd. (2003), kurumların ürün üretimi, kullanımı ve/veya bertarafı sırasında oluşan atıkları azaltmaya veya ortadan kaldırmaya yönelik çevre yönetim sistemlerini benimsemelerinin STZ performanslarına olan etkilerini tartışmışlardır. Uygulama sürecinde Kuzey Amerikalı yöneticilerle (1222 cevaplayıcı) anket yapılmış ve çevre yönetim sistemleri ve ISO 14001'e yönelik tutumlarından elde edilen veriler sonucunda çevre uygulamalarının STZ performansına olumlu katkılar sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca sonuçlar atık yönetiminde etkili olan çevre yönetim sistemleri sertifikasyonuna sahip firmaların, sertifikalandırmamış firmalara göre performans üzerinde daha büyük bir etki yaşadığını göstermektedir. Çalışmadaki çevre yönetim sistemine dahil olan uygulamalar kirlilik kontrolü, atık minimizasyonu, eğitim ve üst yönetim hedefleri olarak belirlenmiştir. STZ performansında belirleyici değişkenler; maliyetler, çevrim zamanları, ürün kalitesi, pazar payı, firma tanınırlığı, daha iyi ürün geliştirme ve iç pazar satışları olarak belirlenmiştir. Benzer amaçla bir çalışma yapan Theyel ve Hoffman (2015) da atık miktarı ve tehlikeli atıklar başta olmak üzere, eğitim, temiz ürün tasarımları, geri dönüştürülebilir ürünler ve enerji kullanımı göstergeleri çerçevesinde STZ performansını belirleyen temel kriterleri rekabet gücü, verimlilik ve toplam maliyet açısından incelemişlerdir.

Atık yönetimi ve özellikle geri dönüşüm faaliyetlerinin STZ performansına olan etkilerinin doğrudan incelendiği çalışmalara dair ciddi bir literatür eksikliğinden

bahsedilebilir. Alandaki tüm çalışmalar incelendiğinde sınırlı sayıda araştırmaya ulaşılmıştır. Farel vd. (2013), Fransa'da araç camı geri dönüşümünün fayda-maliyet analizini gösterecek şekilde STZ performansının olası etkilerini araştırmıştır. Çalışmada geri dönüşüm oranı, geri dönüşüm maliyeti, geri dönüştürülmüş ürün talebi, malzeme geri dönüşüm motivasyonu, vergiler, cezalar, depolama alan maliyeti(atıklar), lojistik maliyeti, hammadde fiyatı, geri dönüştürülmüş ürün fiyatı, enerji fiyatı, depolama (stok) maliyeti, hammadde tasarruf motivasyonu ve enerji tüketim azaltma motivasyon boyutları değerlendirilmiş ve model çözümlemesinde sistem dinamiği yaklaşımından yararlanılmıştır. Araştırma sonucunda STZ performansı üzerinde ekonomik performansın çevresel performansa nazaran daha etkili olduğu ve cam geri dönüşümünde işletmelerin gelirlerinin artacağı ve işleme maliyetlerinin azalacağı görülmüştür. Araştırmacılar tarafından performans değerlendirmesi ve simülasyon için gerekli verilere erişimin oldukça güç olduğuna ve güvenilirlik sorunlarına değinilerek karar vericinin birden fazla gelecek senaryosu oluşturmaları ve parametreleştirmek için farklı kaynaklardan gelen modelleri ve verileri bir araya getirmesi gereklidir.

Das & Dutta (2013), ürün değişimi ve üç yönlü kurtarma politikasını (yeniden kullanım, yeniden üretim ve ham madde geri kazanımı) içerecek şekilde kapalı döngü tedarik zincirinin performansını ortaya koyma amacıyla sistem dinamiği çerçevesi geliştirmişlerdir. Modelde toplanan ürünler, ürün değişim oranları, envanter içerikleri, yeniden üretim için kabul edilen ürünler, geri dönüşüm için kabul edilen ürünler, yeniden kullanılacak ürünler, ikincil ürün envanteri, sipariş miktarı, ikincil ürünlerin talebi, perakendeci envanteri, perakendeci satışları, ortalama gelir ve ortalama maliyet temel değişkenler olarak yer almaktadır. Araştırma sonucunda ters tedarik zincirinde üç yönlü kurtarma politikalarının, hem perakendeci hem de distribütör düzeyinde sipariş varyasyonunu ve kamçı etkisini azalttığını ve bu durumun da tedarik zinciri operasyonlarının karlılığını artırdığını göstermektedir.

Cucchiella vd. (2014), pil geri dönüşüm tesislerinin sürdürülebilir tedarik zinciri performansını çevresel ve ekonomik açıdan değerlendirmeleri için yaşam döngüsü analizini uygulamışlardır. Çalışmada pillerin geri dönüşümü ile elde edilen malzemelerin endüstriyel (çinko, çelik) ve tarım (potasyum sülfat kristalleri) sektöründe ikincil malzeme olarak kullanılması değerlendirilmiştir. Çalışmada yer alan ekonomik ve çevresel kriterler, su tüketimi, yakıt tüketimi, enerji, potansiyel kaza riskleri, karbon

salınımı, ozon tabakasına verilen zarar, yatırım, malzeme maliyetleri, lojistik maliyetleri, bakım maliyetleri, toplama maliyeti, işgücü maliyeti ve atık işleme maliyetleri olarak belirlenmiştir. Araştırma sonucunda geri dönüşüm faaliyet yatırımlarının yüksek olmasına rağmen, elde edilen getiri itibarıyla avantajlı olduğu ve faaliyetlerin çevre dostu olması sebebiyle olumlu fırsatlar yarattığı tespit edilmiştir. Böylelikle hammadde geri kazanımının ikincil malzeme oranlarını paralel şekilde arttırması sonucunda tedarik zinciri performansında olumlu etkilere sebep olduğu ifade edilmiştir.

Haghighi vd. (2016), sürdürülebilir tedarik zinciri performansını değerlendirme ve operasyonların verimliliğini arttıracak şekilde karar vericilere yardımcı olma amacıyla hem niteliksel hem de niceliksel girdi ve çıktıları dikkate alan yeni hibrit Kurumsal Karne Veri Zarflama Yöntemi çerçevesi önermişlerdir. Araştırmanın uygulama kısmında önerilen model, İran'ın Mazandaran ve Golestan eyaletlerindeki plastik geri dönüşüm şirketlerine ait kırk adet tedarik zincirinin sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Araştırmada literatür taraması ve kartopu örneklem ile ulaşılan uzman görüşleri kullanılarak, geri dönüşüm endüstrisi için ağırlıklandırılan sürdürülebilirlik göstergelerine karar verilmiştir. Ekonomik sürdürülebilirlik boyutları esneklik, teslimat maliyetleri, yatırım, teslimat zamanı, tedarikçi reddetme oranları ve servis kalitesi iken; çevresel sürdürülebilirlik boyutları kirlilik, ISO14001 sertifikası, tehlikeli malzemeler ve yeşil ürün sayısı olmuştur. Son olarak çalışmadaki sosyal sürdürülebilirlik müşteri memnuniyeti ve çalışan sağlık durumu açısından incelenmiştir.

Ding vd. (2016), inşaat atıklarını yeniden kullanmanın veya geri dönüştürmenin STZ performansı üzerine etkilerini çevresel performansa odaklanarak araştırmıştır. Modelde gaz emisyonları, arazi toprak kullanımı, arazi su kaybı ve depolama alanı temel çevresel boyutlar yer alırken, çözümünde deneysel ve laboratuvar verileri kullanılarak sistem dinamiği yaklaşımı uygulanmıştır. Önerilen model Çin'in Shenzhen şehrinde bir vakada kullanılmıştır. Çalışmadaki atık azaltma yönetiminin düşük atık teknolojileri ve yerinde yönetim kararları sonucunda daha iyi çevresel ve tedarik zincir performansa neden olduğu gösterilmiştir. Ayrıca başarılı görülen performans sonuçlarında arazi toprağının ve su kaybının önlenmesiyle arazi kaynaklarından elde edilen tasarruf da etkili olmuştur.

Rinsatitnon vd. (2018)'nin inşaat sektöründeki katı atık geri dönüşümünün STZ performansına etkilerini incelemek üzere dinamik model çöp sahası, geri dönüştürülmüş

veya yeniden üretilmiş seçenekleri kullandıkları modelde etkiler çevresel ve ekonomik boyutlar üzerinden incelenmiştir. Uygulamaya dahil olan maliyetler; işçilik, ekipman bakım, nakliye, depolama, geri dönüşüm ve yeniden üretim maliyetleridir. Model çeşitli senaryolar altında sistem dinamiği ile çalıştırılmış ve pozitif net kar elde etmek için geri dönüşüm programlarının en az üç yıl boyunca uygulanması ve yatırıma geçecek şekilde dokuzuncu yılın sonuna kadar devam etmesi gerektiği belirlenmiştir. Aynı zamanda sonuçların uzun dönemde geri dönüşüm ve yeniden üretim seçeneklerinin faydalarını doğrulamasıyla, yönetimin geri dönüşüme teşvik etmesi, daha nitelikli işgücü yetiştirmesi ve gerekli makine ve teçhizat için finansal destek sağlaması gerekli görülmüştür.

Machete (2019), sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi ile geri dönüşüm performansı arasındaki etkinin gözden geçirilmesi amacıyla özellikle belediye veya yerel yönetim alanına odaklanarak 18 ülkenin ikincil verilerini derinlemesine analiz etmiş ve mevcut verilerin meta analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada ülkelerin atık sıralamalarının belirlenmesi ve en çok geri dönüştürülen malzemelerin keşfedilmesi istenmiştir. Meta-analiz geri dönüşüm performansını etkileyen farklı faktörleri tanımlamaya, sıralamaya ve bunların sıklığını veya önemini belirlemeye yardımcı olmuştur. Belediye sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi ve geri dönüşüm performansı arasındaki ilişki, keşifsel, açıklayıcı ve içerik analizi kullanılarak 89 ikincil veri kaynağının ve ilgili literatürün derinlemesine analizi yoluyla incelenmiştir. Çalışma sonucunda belediye atıklarından en çok geri dönüştürülebilir malzemeler sırasıyla metaller, kağıt, plastik ve cam olarak belirlenirken en az geri dönüştürülebilir malzeme de lastik olarak belirlenmiştir.

Nidhi ve Pillai (2019), malzemelerin geri kazanımının ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerini dikkate alarak sürdürülebilir endeks terimiyle sürdürülebilir tedarik zinciri performans değerlendirmesini ele almışlardır. Araştırmada kabul edilen endeks, temelde toplanan atık oranı ile geri kazanım oranından etkilenmektedir. Tedarik zincirinin performans optimizasyonu için üretim, kullanım, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve bertaraf sırasında oluşan emisyonlar değerlendirilmektedir. Çalışmadaki ekonomik performans, tedarik zincirinin toplam lojistik maliyeti ile ilgilidir; tedarik zincirinin tedarik maliyeti, üretim merkezi maliyeti, dağıtım merkezi maliyeti, geri dönüşüm merkezi maliyeti ve nakliye maliyetidir. Çevresel performans tedarik zincirindeki tesislerin emisyonların ölçümünden oluşmaktadır. Tedarik zincirindeki toplam emisyonu optimize etmek üzere akış miktarlarını uygun şekilde tahsis ederek tedarik zincirindeki

malzeme akışını kapalı döngüde tasarlamak için beş aşamalı karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Model aynı zamanda, karar vericilere geri dönüşümün uygulanması ve kaynakların geri kazanılması yoluyla ceza maliyetini formüle etmede rehberlik etmektedir.

Lagarda-Leyva vd. (2019), ambalaj geri dönüşümünün STZ'nin ekonomik ve çevresel performansları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla tersine lojistik modeli önermişlerdir. Çalışmanın uygulaması için Meksika'nın Sonra Bölgesi'nde kimyasal kap üreten bir firmadan yararlanılmıştır. Önerilen modelde kar, gelir, talep, depolama alanı, toplanan ürünler, kapasite, iş yaratma, kaynak kullanımı, yatırım, yakıt kullanımı ve kirlilik değişkenleri kullanılarak, sistem dinamiği yaklaşımı ile senaryo testleri uygulanmış ve çalışmanın güvenilirliği orijinal verilerle sağlanmıştır. Çalışma sonucunda çevresel riskleri azaltmak amacıyla, atılan zirai kimyasal kapların geri dönüşümle tekrar kullanılması sonucunda kuruluşun tedarik zinciri performansında iyileşmelerin yaşandığı görülmüştür.

Wang vd. (2020), resmi geri dönüşüm politikalarının kurumların performansına olan etkisini incelemek amacıyla yaptığı çalışmada yasal düzenlemeler, ıskarta miktarı, geri dönüşüm oranı, deposito, vergiler, resmi geri dönüşüm maliyetleri, resmi karlar, dış maliyetler, resmi olmayan düzenlemeler, dış maliyetler, ortalama fiyatlar, cezalar ve karlılık değişkenleri kullanılarak bir model önerisinde bulunulmuştur. Model çeşitli senaryolar altında sistem dinamiği yöntemiyle çalıştırılmış ve sonucunda pet şişelerin geri dönüşüm hacmindeki eğilimi ve her bir paydaşın kârını gösterecek performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda tüketicilerin ve geri dönüşüm sektörlerinin politika değişikliklerine uyum sağlamasına ve piyasa oynaklığını azaltmasına olanak sağlayacak şekilde mevduat ve vergi politikalarının yıllık döngüde güçlendirilmesi önerilmiştir.

Alamerew ve Brissaud (2020), elektrikli araç akülerinin kullanım ömürleri sonunda geri dönüşüm sürecine dahil edilmesinin STZ performansını etkileyen maliyet, gelir ve stratejik/düzenleyici kararların dinamiklerini modelleme üzerine çalışmışlardır. Çalışmada birçok ekonomik, çevresel ve sosyal kriter değerlendirilmiştir ve bunlar yeniden üretilen akü fiyatı, yeniden üretilen akünün geliri, yeni akü fiyatı, düzeltme maliyetler, taşıma maliyetleri, yeniden üretim marjı, değişken maliyetleri, sabit

maliyetleri, karlılık, müşteri tatmini, müşteri satışları, çevresel etki motivasyonu, yasal düzenleme, malzeme kazanım etkinliği, birinci kaynak bağıllığı ve çevresel fayda olarak ifade edilmiştir. Araştırmada çeşitli senaryoları değerlendirmek üzere sistem dinamiği yaklaşımı kullanılmış ve bulgular döngüsel ekonomi modeline yüksek performanslı bir geçiş için kaynakları verimli kullanmanın ve materyallerin tekrar değerlendirilmesinin önemini ortaya koymuştur. Aynı zamanda sonuçlar yakın gelecekte elektrikli araç akülerinin geri kazanılmasında büyük bir pazar potansiyeli olacağını öngörmektedir.

Chaudhary ve Vrat (2020), cep telefon atıklarının çevreye duyarlı şekilde geri dönüştürülmesi sonucunda STZ performansında etkili olan ekonomik, çevresel ve sosyal faydaları araştırmak üzere sistem dinamiği modellemesi yapmıştır. Model, simüle edilen çeşitli senaryolar aracılığıyla, temel değişkenler arasındaki ilişki dinamiklerinin analizini kolaylaştırmış ve çalışmada organize sektörün toplama verimliliği, elektronik atıktan çıkan altın miktarı, altın talebi, ekonomik fayda, çevresel fayda ve sosyal fayda boyutları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda yeni cep telefonları üretmek için gerek duyulan altın malzeme talebinin, atılan cep telefonlarından geri dönüştürülmüş altınla karşılanabileceği gösterilmiş; bu nedenle yöneticilerin ekonomik, sosyal ve çevresel faydalar elde etmek için cep telefonu geri dönüşümüne odaklanması ve organize sektörün toplama verimliliğini artıracak stratejiler geliştirme ihtiyacı vurgulanmıştır.

Beiler vd. (2020), cam şişelerin geri dönüşümüne odaklanarak malzemenin yeniden kullanımı (çevresel), kaynakların israfı (çevresel), depolama maliyeti (ekonomik) ve iş yaratma (sosyal) boyutları üzerinden çeşitli senaryolar altında STZ performansını inceleyebilecekleri model önerisinde bulunmuşlar ve tasarlanan modeli sistem dinamiği yaklaşımı ile incelemişlerdir. Araştırmanın sonunda geri dönüşümle kazanılmayan cam şişelerin enerji ve maliyet açısından kurumlara büyük dezavantaj yarattığı görülmüştür. Bu araştırmanın bulgularından, atık oluşumunu azaltmak için içecek tedarik zincirinde yeniden kullanılabilir malzemelere olan talebi artırma ve tedarik zinciri boyunca tersine lojistik kanallarını iyileştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ayrıca sürdürülebilir tedarik zincirinde kaynak kullanımını optimize etmek için paydaşların desteğinin gerekliliği de vurgulanmıştır.

2.4. Geri Dönüşümün Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Performansı Üzerindeki Etkisine Ait Mevcut Literatürün Analizi

Mevcut literatürde geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri performansına olan etkilerini farklı açılardan inceleyen çalışmalar Bölüm 2.3’de tartışılmıştır. Farklı disiplinler, geri dönüşüm başarısını kendi ilgi alanlarındaki faktörlerle ilişkilendirmiştir (Crocata vd., 2015). Örneğin ekonomistler geri dönüşümün etkilerini fiyatlandırma planlarına ve teşviklere; çevreciler sosyal motivasyona; sosyologlar ahlaki normlar, sosyal baskıları ve çevresel kısıtlamalar, mühendisler alternatif teknolojilerin göreceli etkilerine bağlamıştır (Machete, 2019). Malzemelerin geri kazanılması yalnızca depolama sahalarının yetersiz kalması ve çevre kirliliği açısından çevre performanslarını değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da kaynakların kullanımını iyileştirebilmesi ve bazı yüksek katma değerli işlemlerde yeniden üretim yoluyla kar sağlayabilmesi açısından iki yönden de değerlendirilmesi gereken bir konu olmuştur (Guide, 2020). Ancak tüm sürdürülebilirlik faktörleri göz önüne alındığında, geri dönüşüm endüstrilerinde performans değerlendirmesi için kapsamlı bir çerçeve bulunmamaktadır (Haghighi vd., 2016). Atık üretiminin azaltılmasına dair farklı disiplinlerde yapılan araştırmalara artan ilgi özellikle son yıllarda yaşanmış ve üretilen veya kullanılmış malların yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi daha çok önem kazanmıştır (Hanumante vd., 2019).

Mevcut literatürde sürdürülebilir tedarik zinciri ile ilgili inceleme ve ampirik katkılar hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların çoğunlukla ters zincir yönetimi içinde yer aldığı görülmüştür (Seuring & Müller, 2008; Carter & Liane Easton, 2011; Ilgin & Gupta, 2010; Nidhi & Pillai, 2017). Sürdürülebilir tedarik zincirinde tersine lojistiğin entegre edildiği araştırmalarda zincirin performansının, ekonomik, çevresel ve sosyal önlemler arasındaki dengeyi göz önünde bulundurarak değerlendirilmesi zorunlu kılınmıştır (Nidhi & Pillai, 2019). Tersine lojistik sistemlerinin ve kapalı döngü tedarik zincirlerinin performans değerlendirilmesi, hem akademik çevreler hem de uygulayıcılar arasında artan bir ilgi görmektedir (Govindan vd., 2015). Ancak yine de mevcut literatürün yetersiz olduğu bilinmektedir. Literatür geri dönüşüm endüstrilerinde tedarik zinciri sürdürülebilirlik yönetimi alanında sınırlı araştırma çalışmalarının olduğunu göstermektedir ve bu tür endüstrilerin tüm sürdürülebilirlik faktörlerini göz önünde bulundurarak performans değerlendirmesi için kapsamlı bir çerçeve bulunmamıştır (Haghighi vd., 2016).

Bölüm 2.3’de görüldüğü üzere geri dönüşüm faaliyetlerinin sürdürülebilir tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalar oldukça dar ve kısıtlı bir alanda kalmıştır. Bu sebeple ilgili çalışmaların hem kavramsal hem kapsam hem de yöntem açısından yetersiz kaldığı ifade edilebilir. Çalışmalarda belediye atıkları, cam, inşaat atıkları, kullanım ömrü biten pil, cep telefonları veya elektrikli araç aküleri gibi atıklara dair ürünler yer almasına rağmen tesis içinde oluşan endüstriyel atıkların geri dönüşümünün STZ performansına olan etkilerinin incelendiği çalışmalar neredeyse yok denecek kadar azdır. Literatürdeki boşluk, bu çalışmanın temelini atılmasında ve yürütülmesinde etkili olmuştur. Alandaki çalışmaların birçoğunun ekonomik ve çevresel sürdürülebilir boyutlar üzerinden incelenmesi de fark edilmiş ve özellikle kullanılan boyutların çoğu çalışmada ortak olduğu görülmüştür. Çalışmalarda özellikle atık miktarı, geri dönüşüm oranı, geri dönüştürülmüş ürüne olan talep, kirlilik, geri dönüşüm maliyetleri, depolama alan kullanımı, depolama alan maliyetleri, yatırım ve karlılık boyutları dikkat çekmiştir. Araştırmalarda geri dönüştürülmüş ürünlerin ve birincil üretimle üretilmiş ürünlerin etkilerinin eş zamanlı modele dahil edildiği tek çalışma Farel vd. (2017)’nin çalışmasıyla sınırlı kalmıştır. Bu sebeple ürün geri dönüşümünün STZ performansı açısından değerlendirilmesinde iki üretim olayının hem ekonomik hem çevresel etkilerinin modele dahil edilme ihtiyacı doğmuştur.

Literatür taraması sonucunda fark edilen bir diğer önemli nokta; kullanılan yöntemlerdir. Özellikle alandaki ilk benzersiz çalışmalarda çok amaçlı karmaşık tam sayılı doğrusal/doğrusal olmayan modelleme yöntemleri kullanılırken, son dört senedir eğilim sistem dinamiği yöntemine doğru kaymıştır. Çünkü sistem dinamiği tersine lojistiği analiz etmek için daha kullanışlı bir araç (Beiler vd., 2020) olarak görülmeye başlanmıştır. Performans yönetiminde karar vericilere birden fazla senaryonun kolaylıkla test edebilme imkanını vermesi yöntemin kullanılmasında belirleyici bir etmen olmuştur. Buradan yola çıkarak çeşitli belirsizlikler altında farklı senaryoları test edebilmek için bu çalışmada da sistem dinamiği yöntemine ihtiyaç duyulmuştur.

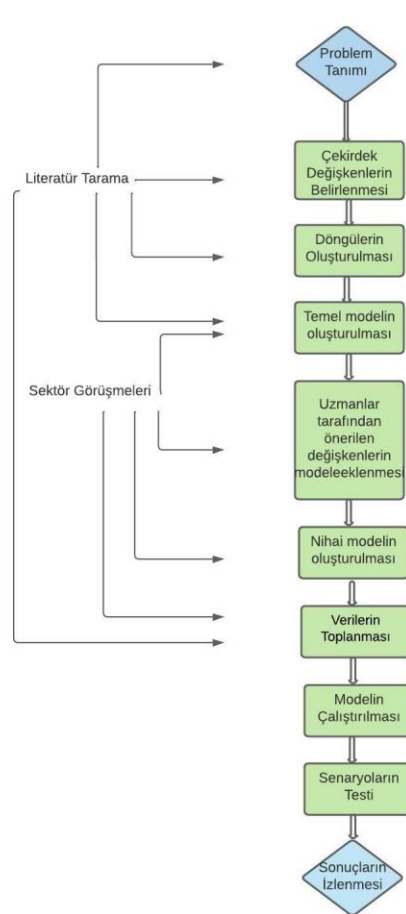
BÖLÜM 3: ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ

Bu bölümde, çalışmanın nihai amaçlarına ulaşılması için uygulamaya kadar olan sürecin yer aldığı araştırma tasarımı, model çözümünde yararlanılan ve kullanılan yöntemler, veri toplama süreçleri ve son olarak ihtiyaç duyulan verilerin kaynaklarından bahsedilmektedir.

3.1. Araştırma Tasarımı

Çalışmada yer verilen uygulama örnekleri için yürütülen süreçler dört farklı ürün grubu için benzer olmasına ve tek bir model kurgulanmasına rağmen her biri için farklı verilere ihtiyaç duyulduğu

gerçeğiyle veri toplama süreci ve analizi birbirlerinden bağımsız yürütülmektedir. Ancak veri toplamaya kadar yürütülen süreçler her bir uygulama için ortaktır. Çalışmada izlenen adımlar sırasıyla aşağıdaki Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2: Çalışma Adımları

Bu akış daha detaylı ifade edilirse araştırmanın adımları aşağıdaki şekilde gerçekleşmiştir:

1. Adım: Kapsamlı bir literatür incelemesi ile araştırma problemi tanımlanmıştır.
2. Adım: Literatür taraması ile çalışmada yer verilecek öncelikli mutlak kriterler belirlenmiştir.
3. Adım: Literatür incelemesi ve uzman görüşleri doğrultusunda, değişkenler arasındaki kapalı döngüleri gösteren Nedensel Döngü Diyagramı oluşturulmuştur. Bu döngüler VENSIM PLE x64 programı aracılığıyla görselleştirilmiştir.
4. Adım: Kurulan döngüler sektörden uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucu değerlendirilerek temel araştırma modeli gelen öneriler doğrultusunda tasarlanmıştır.
5. Adım: Modele istenen amaçlara ulaşılması için yeni boyutların eklenme ihtiyacı doğmuş ve hem literatür incelemeleri hem yapılan gözlemler hem de sektördeki uzmanların değerlendirmeleri ile model haritası son şeklini almıştır.
6. Adım: Kurulan yeni döngüler ile birlikte model tasarımı revize edilerek tamamlanmıştır.
7. Adım: Değişkenlere yönelik ihtiyaç duyulan veriler kaynağına göre ayrılarak veri toplama süreci sağlanmıştır.
8. Adım: Model, STELLA 9.0.1.330 programı üzerinden çalıştırılmıştır.
9. Adım: Farklı senaryolar altında model sonuçları incelenmiştir.
10. Adım: Sonuçlar senaryolara göre değerlendirilerek, potansiyel etkiler tartışılmıştır.

3.2. Yöntem

Bir sistemin gerçek davranışlarını göstermek üzere geliştirilen simülasyon tekniği uygulamalarda önemli yöntemlerdendir. Bu yöntemde belirli zaman dilimi içinde değişen koşullar altında sistemin vereceği tepkiler gözlemlenerek ulaşılan sonuçların analiz edilmesi temel alınmaktadır. Çoğu zaman karar vericiler olası durumlar (senaryolar) altında sistemin davranışını inceleyerek, süreçlerini takip edebilmekte veya yeni kararlar alabilmektedir. Gerçek sistemlerin bir kopyası şeklinde geliştirilen modeller sistemin özelliklerine göre üç şekilde sınıflandırılabilir: statik/dinamik, tanımlayıcı/ kuralcı

ve sürekli/kesikli (Buede, 2000). Statik/dinamik sistemlerde temel nokta değişkenlerin zaman içerisindeki değişimi ile ilgilidir. Dinamik sistemlerde değişkenler zaman içinde değişerek yeni sistem davranışı oluştururken, statik sistemlerde değişkenler sabit değerlere sahip olduğu için sistemde herhangi bir değişim gözlenmez. Tanımlayıcı/kuralcı sistemlerde değişkenler arası etkileşimlerin gösterildiği modeller tanımlayıcı (betimleyici), belirli bir hedefe odaklanılarak hedeflerin optimize edildiği modeller kuralcı olarak kabul edilmektedir (Barlas, 2007). Son olarak sürekli/kesikli sistemlerde modelin değişkenleri zaman içinde herhangi bir anda değişiyorsa sürekli, önceden tanımlanmış zaman aralıklarında değişim meydana gelirse kesikli sistemler olarak ifade edilmektedir (Barlas, 2007).

Çalışmada değişkenlerin zamana bağlı olarak değişmesinden kaynaklı sistem dinamik, değişkenler arası ilişkilere odaklanması sebebiyle tanımlayıcı (betimleyici) ve değişkenlerin zaman içinde değişmesi sebebiyle sürekli'dir. Buradan hareketle dinamik bir model geliştirmek üzere çalışmada sistem dinamiği yaklaşımı kullanılmaktadır. Ayrıca sistem dinamiği yönteminin dışında modelde kriter ağırlıklandırmasına duyulan ihtiyaç sebebiyle Best Worst Method (BWM) da kullanılarak çoklu metodoloji yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu nedenle çalışma metodolojisi iki bölümden oluşmaktadır: sistem dinamiği metodolojisi ve BWM metodolojisi. Gerçekte bu iki yöntem birbirinden ayrı kullanılan ve çoğu zaman farklı amaçlar için tercih edilen orijinal yöntemlerdir. Literatürde iki yöntemin birlikte kullanımına dair tek çalışmaya rastlanmıştır ve bu çalışma da farklı bir disiplinde gerçekleşmiştir. Çalışmada BWM, sürdürülebilirlik gelişimi belirleyen ekonomik ve çevresel boyutları ağırlıklandırmak için kullanılırken, sistem dinamiği yaklaşımı kapalı döngü atık yönetimi modelindeki değişkenlerin davranışlarını ortaya koyma amacıyla kullanılmaktadır.

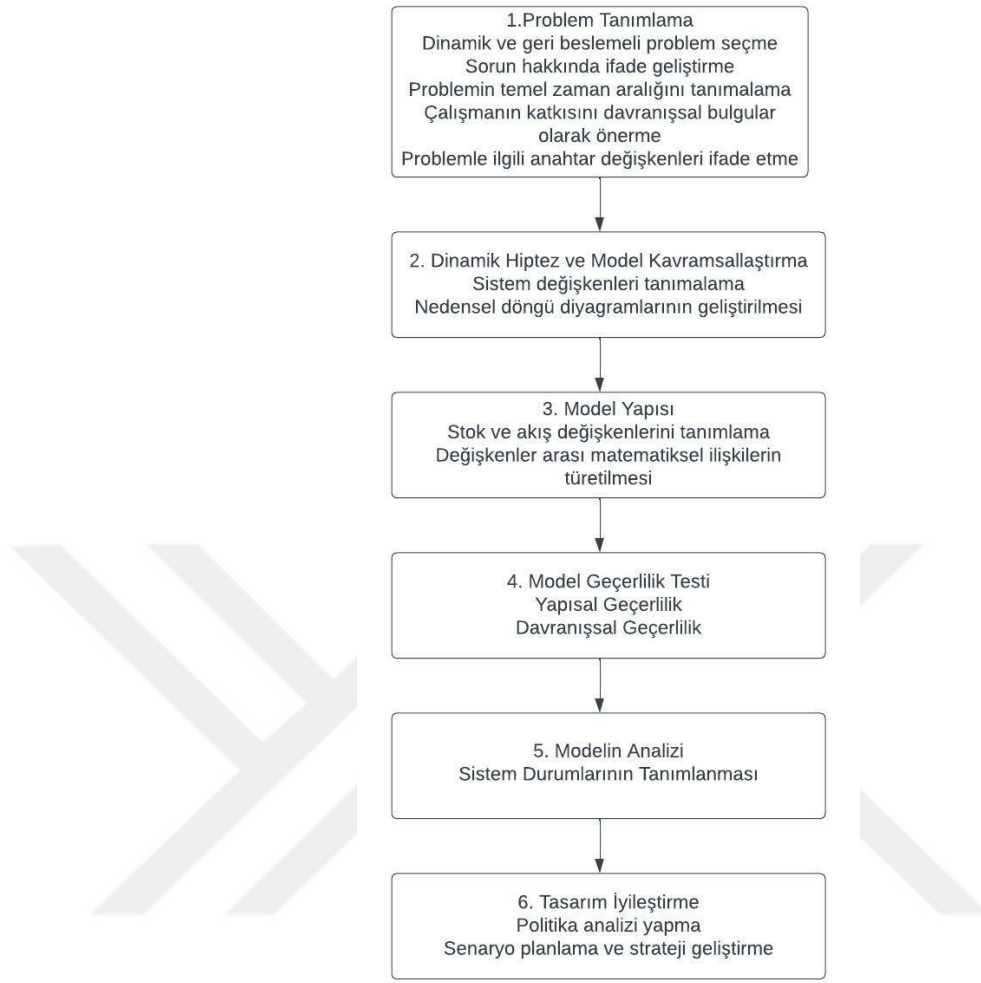
3.2.1. Sistem Dinamiği Metodolojisi

Sistem kavramı, birbiriyle doğrudan veya dolaylı şekilde ilişkili veya bağlantılı olan birçok ögenin belirli kurallara göre yer aldığı bütünselliktir. Gerçekte her şey kendi sistemi içinde yer almaktadır. Bir düşünce olarak ileri sürülen sistem düşüncesi ise en temel açıdan sistem hakkında derinlemesine düşünmeyi, sistemi gözlemlemeyi ve davranışlarını açıklayabilmeyi içermektedir. Sistem düşüncesinin çoğu zaman bileşenleri arasındaki ilişkiyi dengelemesi ve birden çok bakış açısını değerlendirmesi

gerekmektedir. Sistem düşüncesi kavramı, bir davranışın sebep olduğu durumlarla ilgili detaylı fikirler yürütebilme ve güvenilir çıkarımlar yapabilme sanatı olarak tanımlanmaktadır (Richmond, 1994). Bir sistemi oluşturan birçok parçanın varlığı ve birbirini etkileyebilme gücü, sistemde meydana gelen durumlar karşısında çoğu zaman hiç birini soyutlamadan bütün bileşenleri değerlendirmeyi gerektirmektedir.

Sistem düşüncesinden doğan ve bilim olarak kabul edilen sistem bilimi, bilimsel ve düşünsel bir yaklaşımdır. Sistem bilimi, sistemi oluşturan elemanlar arasındaki ilişkileri anlamayı ve mühendislik problemlerini bütünsel olarak çözmeyi sağlamaktadır (Mihelcic vd., 2003). Bu bilimden yola çıkarak sistem davranışını gösterebilen sistem dinamiği disiplini geliştirilmiştir. Sistem dinamiği, Dr. Jay W. Forrester tarafından 1950’li yılların sonunda karmaşık sistemleri modellemek, dinamik geri besleme sistemlerini anlamak, sistemleri görselleştirmek ve analiz etmek için geliştirilmiştir. Yöntem, sistemin zaman içindeki değişimini anlamak için kullanılan metodolojidir. Sterman (2000) tarafından sistem dinamiği, “gerçek dünya problemini çözmek için matematik, fizik ve mühendislikte geliştirilen doğrusal olmayan dinamikler ve geri besleme kontrolü teorisine dayanan, temelde disiplinler arası karmaşık sistemlerde öğrenmeyi geliştiren” bir uygulama olarak tanımlanmaktadır.

Sistem dinamiği, fiziksel ve fiziksel olmayan sistemlerin doğasında var olan karmaşıklık, doğrusallık ve geri besleme döngü yapılarını analiz etmektedir (Forrester, 1994). Sistem dinamiğinin uygulanmasında karmaşık sistemlerdeki etkileşimlerin anlaşılmasını destekleyen bir dizi kavram ve araç kullanılmaktadır (Reynoso-Campos vd., 2004). Yöntem, modeldeki tüm ilişkileri simüle edecek şekilde titiz bir modelleme aracı sunmaktadır ve özellikle sistemde meydana gelen değişimlerin tüm sistemin davranışına olan etkisini analiz edecek araçlar sunmaktadır. Sistem dinamiği yaklaşımında takip edilmesi gereken süreç adımları vardır. Bunlar sırasıyla problemin tanımlanması, problemin doğru anlaşılması ve sistemin tanımlanması, nitel analiz, simülasyon modelleme ve model testleri ve son olarak politika testi ve tasarımıdır (Coyle, 1996). Sistem dinamiği yönteminin adımları Şekil 3’de detaylı gösterilmiştir.



Şekil 3: Sistem Dinamiği Yöntem Adımları

Kaynak: Brailsford, S. C., & Hilton, N. A. (2001). *A Comparison Of Discrete Event Simulation And SD For Modelling Health Care Systems*. In Riley J (ed). Proceedings from ORAHS, Glasgow, 18–39.

3.2.1.1. Sistem Dinamiği Yöntem Adımları

a) Problem Tanımlama

Problem tanımlama adımı sistemdeki mevcut veya olası durumların belirlenmesiyle başlayıp, sorunları ifade edebilecek şekilde tanımlamalarda bulunmasıyla devam etmektedir. Burada önemli olan gerçekte neyi araştırmak ve incelemek isteniyorsa onu net ve doğru şekilde ifade edebilmektir. Model yapısı tanımlanan probleme dayalı olarak gerçek sistemin gösterimi olacak şekilde oluşturulmalıdır (Barlas, 2007). Araştırılmak istenen konuda olması gereken anahtar değişkenleri tanımlayabilmek de önemli kritik noktadır. Ayrıca sistem düşüncesinin doğası gereği sistemin hangi zaman diliminde

çalıştırılacağına karar verilmelidir.

b) Dinamik Hipotezler ve Model Kavramsallaştırma

Sistem dinamiği modelleme, karmaşık davranışa sahip sistemleri modellemeye dayanan yaklaşımdır ve genellikle zamana bağlı olarak sistemin performansını analiz etmek için kullanılmaktadır (Thirupathi vd., 2019). Sistem davranışlarındaki belirsizliklere yol açan doğrusal olmayan ilişkiler ile geri besleme döngüleri içinde bulunan değişkenlerin karmaşık etkileşimi, sistem dinamiği modelleri için karakteristiktir (Forrester, 1994). Geri besleme döngüleri, bu modelin temelini oluşturur ve sistem bileşenlerini ve aralarındaki ilişkileri değerlendirmektedir. Geri besleme döngüleri literatürde nedensel döngüler olarak da ifade edilmektedir. Aynı zamanda geri bildirimi sağlayan bu yapı kapalı bir neden-sonuç zinciri anlamına gelmektedir (Ford, 2010). Modeller, içinde yer aldığı döngüler ile sisteme olumlu veya olumsuz geri bildirim yapısı sağlamaktadır. Bu sebeple sistem dinamiği modelleri, nedensel döngü diyagramlarının oluşturulduğu hem basit hem de karmaşık sistemlerin geri bildirimini incelemek ve yönetmek amacıyla kurulmaktadır (Yuan & Wang, 2014). Nedensel döngüler, sistemin bileşenleri ile arasındaki ilişkileri daha iyi anlamak için kullanılan grafik araçlardır.

Geri besleme, faaliyetlerin birbirini güçlendirebileceğini veya birinin bir diğerinin etkisini yok edebileceğini göstermektedir (Çelik vd., 2010). Geri besleme döngüleri negatif ve pozitif olmak üzere iki türden oluşmaktadır. Negatif geri besleme döngüleri, belirli bir davranışa odaklanarak kendi kendini düzenleyebilen veya adapte olabilen döngülerdir. Dengeleyici döngüler olarak da adlandırılan negatif geri besleme, sistemin mevcut durumunu korumaya odaklanmakta böylelikle olası değişimleri reddetmektedir. Pozitif geri besleme döngüleri (pekiştirici) ise değişkenlerin karşılıklı etki yarattığı ve birbiriyle aynı yönde dönüşümleri etkilediği durumlarda sağlanmaktadır. Herhangi bir değişkendeki artış kendi ilerlemesini büyütme için sürekli kendini besleyecek şekildedir (Morecroft, 2015). Pekiştirici döngülerde, yeni veriler kendinden önceki değişkenlerle aynı yönde dönüşümü etkilemekte ve dönüşüme pozitif ivme kazandırmaktadır. Çalışmada yer alan döngülerin pozitif veya negatif olacak şekilde kurulması dönüşümün etkisini ve büyüklüğünü görebilmek adına önemlidir. Kurulacak model bu bilgiler ışığında, orijinal sistemin net tanımını sunmalıdır (Reed vd., 2013).

c) Model Kurulumu

Nedensel döngü diyagramı kurulduktan sonra sistem, akış haritaları kullanılarak simülasyon araçlarıyla modellenmektedir. Modelleme tekniği, araştırmacıların karmaşık bir sistemin iç dinamiklerini anlamasına yardımcı olmaktadır (Maani, 2000). Bu aşamada değişkenler stok ve akış değişkeni olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çalışma modelindeki akış ve birikim değişkenlerinin belirlenmesi önemli bir süreçtir. Resmi bir modeli kavramsallaştırma, stok akış diyagramlarının geliştirilmesiyle başlar ve matematiksel modelin türetilmesiyle devam eder (Gönül, 2018).

Birikimler, stokların seviyesini değiştiren oranı ifade etmektedir ve belirli bir zamanda mevcut bileşenlerin toplamını oluşturmaktadır. Stoklar ise sistemin durumunu anlaşılır kılmaya yardımcı olmakta, yani sistemin nasıl olduğuna dair bilgi vermektedir. Stoklar Yamaguchi (2013)'nin çalışmasında 6 sınıfa ayrılarak ifade edilmiştir. Bunlar: doğal çevreyi ifade eden doğal stoklar, fiziksel olmayan stokları gösteren bilgi stokları, aşk gibi durumları gösteren duygusal stoklar, satış değerleri gibi endekslenmiş değerlerin bir biçimi olan saklanan bilgi stokları ve tüketim ürünlerini üretmek için ihtiyaç duyulan makine, fabrika fiziksel üretim araçlarını kapsayan sermaye stoklarıdır.

Akışlar ise stoktaki bir artışın veya azalışın gösterildiği, onları dolduran ya da boşaltan değişkenlerdir. Forrester (1961) tarafından akışlar da altı sınıfta toplanmıştır. Bunlar; bilginin yönetimini sağlayan bilgi akışları, fiziksel ürünlerin üretim veya dağıtımını sağlayan malzeme akışları, çalışan sürecini gösteren işgücü akışları, ürün üretiminde gerek duyulan süreçleri ifade eden sermaye akışları, üreticiden tüketiciye giden süreci gösteren sipariş akışları ve son olarak paranın hareketini gösteren para akışlarıdır. Akışların ifade gösterimi literatürde $f(t)$ şeklindedir. Akışlar stoğun değişim oranının bir ifadesidir, yani stoğun parçasıdır.

Literatürde t . zamandaki stok $X(t)$, akışlar $f(t)$ olarak gösterilmektedir. Stok ve akış arasındaki ilişki: $X(t+1)=f(t)+X(t)$, $t= 0,1,2,3..$ olarak gösterilir.

d) Model Geçerlilik/Güvenirlilik Testi

Bir SD modelinin doğrulanması çoğu zaman karmaşık ve zordur. Sistem Dinamiği tabanlı bir modelin sonuçlarının geçerliliği, modelin geçerliliğine bağlıdır (Barlas, 1996). Modelin kütle ve boyut açısından doğru formüle edilmiş olması gerekmektedir. Modelin

doğrulanması genellikle arzu edilen amaca uygunluğun değerlendirilmesi olarak görülmektedir. SD modellerinin geçerliliğine dair birçok farklı görüş bulunmaktadır. Sterman (2000)'e göre sistem dinamiği modellerinin doğrulanması imkansızdır. Coyle (1996) ise özellikle modelleme çabasının doğru amaç için doğru çıktılar üretip üretmediğini, ancak her iki durumda da teknik sağlamlığın ve formülasyonun test edilmesine odaklanmıştır. Çeşitli durumlarda uygulanacak uygun test sayısı ve yöntem hakkında fikir birliği olmaması gelen eleştirilerden biridir (McLucas & Ryan, 2012). Bununla ilgili olarak, model doğrulamanın çok gayri resmi ve niteliksel olduğu da eleştirilmektedir (Barlas, 2007).

Sistem dinamiği modellerinde geçerlilik için çoğunlukla araştırmacıların kabul ettiği iki yöntem vardır. Sistem dinamiğinde kullanılan testlerin geçerliliği yapısal ve davranışsal olmak üzere ikiye ayrılarak incelenmektedir (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Kurulan modelin faydalı olması için yeterli yapısal doğruluğa sahip olduğunun ve modelin makul şekilde davrandığının kabul edilmesi gerekir (McLucas & Ryan, 2012). Araştırmacılar ilk olarak gerçek sistemi ifade eden parametrelerin modele dahil edildiğini ve modelde yer alan her ilişkinin doğruluğu yansıttığını belirleyebilmek için yapısal geçerliliği kontrol etmektedir. Kurulan modellerin her biri gerçek sistemleri yansıtmaya rağmen bu sistemde bulunan bazı değişkenleri hariç tutmak gerekebilmektedir. Sayıca çok fazla değişken kullanarak karmaşık bir problemin temsilini sağlamaya çalışmak, yalnızca model formülasyonu ve analizinde zorluklara katkıda bulunmaktır (Dash, 1994). Araştırmacılar yapısal geçerlilik testi sırasında tüm model parametrelerini betimsel veya sayısal olarak inceleyerek, parametreler makul bulunduktan sonra boyutsal tutarlılığı ölçmektedir (Gönül, 2018). Bu noktada eşitliklerin sağ tarafındaki değişkenlere ait birimlerin, denklemin sol tarafındaki boyutlara eşit olması beklenmektedir (Sterman, 2000).

Yapısal geçerlilik tamamlandıktan sonra ikinci adım olarak davranışsal geçerlilik için model çıktılarının gerçeği yansıtır yansıtmadığı incelenmektedir. Burada parametreler değiştirilerek modelin anormal davranışlar sergileyip sergilemediği gözlemlenir. Sistem dinamiği modellerindeki en yaygın davranışsal testlerden biri, sistem model davranışının geçmiş verilerle karşılaştırılmasıdır. Ancak geçmiş verilerin kopyalanması, güven oluşturma birincil yolu olarak kullanılıyorsa bu bir problemdir (McLucas & Ryan, 2012). Dolayısıyla yapısal geçerliliğin çıktı geçerliliğinden önce gelmesi gerekmektedir,

bazı referans davranışları kopyalayan model çıktısına sahip olmak, gerçek veya tam bir model geçerliliği testi değildir (Barlas, 1996).

e) Model Analizi

Modelin belirli bir zaman aralığında ve istenen koşullar altında incelendiği ve nasıl davranışlar sergileyeceğinin ortaya çıktığı aşama analizin yapıldığı kısımdır. Araştırmacılar tarafından problemin tanımı ve ortaya koyulan hedefin belirlenmesi ile başlayan sürecin bu adımında arzu edilen amaca ulaşıp ulaşılmadığı model sonuçlarına göre belirlenmektedir. Modelin analizinde çoğunlukla matematiksel veya analitik metotlar kullanılarak, sonuçlar takip edilmektedir. Birçok farklı simülasyon tekniğinin kullanılmasıyla potansiyel değişimler ve birimler arası ilişkilerin olası sonuçları sistem hakkında bilgi vermektedir. Araştırmacılar değişen parametre verilerine göre modelin duyarlılık analizlerine ihtiyaç duyabilir.

f) Tasarım İyileştirme

Sistem dinamiğinde önemli bir konu modelin çeşitli senaryolar altında çalıştırılıp gözlemlenebiliyor olmasıdır. Çeşitli durumlar altında modellerde “what-if” senaryoları ve politika testleri keşfedilmektedir (Richardson & Otto, 2008). Araştırmacı gerçek sistemi yansıtarak kurduğu modelde farklı iyimser veya kötümser olasılıkları kolaylıkla test edebilmekte ve değişimi gözlemleyebilmektedir. Model çözümlenmesinde çeşitli olasılıklar denenerek gerçek hayatta karşılaşılabilecek problemler veya iyileştirmeler, araştırmacıları veya uygulamacıları olası durumlara hazırlıklı kılabilir. Bu sayede karar vericiler farklı stratejileri uygulayarak doğru karar verebilmektedir.

Araştırmacıların çeşitli senaryoları zaman kaybetmeden ve maliyetsiz test edebilmeleri sistem dinamiğinin uygulanabilirliğini arttırmıştır. Forrester tarafından üretim dağıtım sistemlerindeki dinamikleri incelemek için geliştirilen sistem dinamiğinin ilk uygulama alanı işletme ve yönetimin çeşitli stratejik ve operasyonel alanlarında olmuştur (Mingers & White, 2010). Özellikle 2000’li yıllardan itibaren üretim sistemlerinin karar süreçlerinde sistem dinamiği yaklaşımının yaygın şekilde kullanılmaya başlandığı görülmüştür (Kantardgi, 2003; Bockermann vd., 2005). Üretimde kaynak yönetimini incelemek üzere sistem dinamiği modellerine dair önemli çalışmalar başta Sterman (2000), Morecroft (2007) ve Größler (2008) olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından

yapılmıştır. Sistem dinamiği ekonomik, çevresel, yönetsel veya endüstriyel sistemleri tanımlama, geliştirme ve gerçek sistemi simüle ederek verileri analiz etme amacıyla birçok çalışmada kullanılmaktadır (Ford, 2001). Zamanla yöntemin sınırları ve uygulama alanları genişleyerek kimyasal, biyolojik ve ekolojik sistemlerin analizinde de yöntem tercih edilmiştir. Sistem dinamiği teorisi ayrıca planlama ve politika tasarımı, kamu yönetimi ve politikası, tıbbi modelleme, sosyal bilimlerde teori geliştirme, dinamik karar verme ve yazılım gibi çeşitli alanlarda da birçok uygulamaya sahiptir (Singh vd., 2015).

3.2.1.2. Sistem Dinamiğinin Sürdürülebilir Tedarik Zinciri'nde Kullanımı

Literatürde sistem dinamiği; kaynakların taşıma kapasitesini ayarlama (He vd., 2011), ulaşım ağları içinde trafik güvenliği sağlama (Goh & Love, 2012), organizasyonlardaki inovasyon yayılımı inceleme (Wunderlich & Größler, 2012), çevresel etkileri analiz etme (Zhan vd., 2012), elektrik ve güneş sistemleri kurma (Hsu, 2012), tedarik zinciri yönetme (Tako & Robinson, 2012), çevresel, ekolojik ve ekonomik kaynaklar arasındaki ilişkileri modelleme (Vidal-Legaz vd., 2013), su kaynaklarını planlama (Xi & Poh, 2013), TZ lojistik planlama (Mula vd., 2013), stratejik yönetim kararları alma (Cosenz & Noto, 2016), üretim sistemleriyle ilişkili karmaşıklık analiz etme ve Altı Sigma aracılığıyla sürecin performansını iyileştirme (Ortega vd., 2017) ve üretim organizasyonunda sürdürülebilir iyileştirme için gerekli alanları belirleme (Thirupathi vd., 2019) gibi çeşitli amaçlarda kullanılmıştır.

Sistem dinamiğinin önemli bir uygulama alanı sürdürülebilir tedarik zinciri üzerinedir. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde özellikle son dönemlerde nicel modelleme yaklaşımlarına giderek artan bir ilgi söz konusudur (Rebs vd., 2019). STZ ile ilgili olarak birçok inceleme, bu alandaki ilerlemeleri ve sürdürülebilir tedarik zincirlerinin önemini vurgulamıştır (Carter & Easton, 2011; Pagell & Shevchenko, 2014). Meadows vd., (1972)'nin "Büyümenin Sınırları" adlı çalışmasında sistem dinamiği yöntemi karmaşık tedarik zincirlerinde ekonomik, çevresel ve sosyal değişkenler arasındaki ilişkileri modellemesi ve simüle etmesi için önemli bir araç olarak önerilmiştir. Özellikle Forrester (2007) STZ etrafında gelişen sorunları tanımlamak ve analiz etmek için sistem dinamiği modellerinden oldukça fazla yararlanmıştır (Forrester, 2007). Forrester gerçek hayattaki tedarik zincirlerini sistem dinamiği modellerine yansıtarak, bilginin yukarıya, ürünlerin aşağıya doğru akışını sağlamak üzere hem fabrikaları hem perakendecileri hem de

müşterileri dahil ettiği bir model tasarlamıştır. Forrester Modeli olarak literatüre geçmiş bu model bilgi, malzeme, sipariş, para, insan gücü ve sermaye akışlarıyla tanımlanan ve fabrika, depo, distribütör ve perakendeciden oluşan 4 seviyeli bir modeldir. Kurulan basit üretim dağıtım modeli, tedarik zincirinde envanter-satış dalgalanmaları arasındaki ilişkinin kamçı etkisini ve bilgi akışını da ortaya koymaktadır (Song vd., 2019). Sistem düşüncesinin STZ’nde kullanımı, bütün sürdürülebilirlik çeşitlerinden kaynaklanan değerlendirme dinamiklerini belirlemeyi amaçlamaktadır (Zhang vd., 2013).

Özellikle yöntemin kurucusu Forrester tarafından sistem dinamiği yaklaşımının sürdürülebilir tedarik zincirinde kullanılması, alandaki diğer çalışmalara yön vermiştir. Sürdürülebilir tedarik zinciri bağlamında sistem dinamiği modelleme, istenen sistem davranışını elde etmek için alternatif politikaları test ederek ve değerlendirerek karar vermeyi desteklemiştir (Forrester, 1994). Sistem dinamiği, sürdürülebilirliğin amaçlandığı sistemlerde, özellikle geri bildirim davranışlarını ve aralarındaki doğru ilişkileri anlamak için güçlü bir teknik olarak önerilmektedir (Nabavi vd., 2017). Ancak Touboullic ve Walker (2015), sürdürülebilir tedarik zincirinde teori oluşturma çabalarının yetersiz olduğunu ve bu alanda yeni çerçevelerin geliştirilmesi gerektiğini söylemektedir. Doğrusal programlama veya çok kriterli karar verme teknikleri gibi diğer modelleme teknikleriyle karşılaştırıldığında, sürdürülebilir operasyonlar ve STZ’ndeki sistem dinamiği modellemelerine ait literatür yetersiz kalmaktadır (Rebs vd., 2019; Besiou & Van Wassenhove, 2015). Bu sebeple STZ uygulamalarında sistem dinamiği alanını geliştirmek önemli bir fırsat olarak görülebilir. Son dönemlerde yöntemin STZ’nde kullanılmasına artan bir ilgi olsa da araştırmacılar çalışmaların yetersizliğine vurgu yapmaktadır (Rebs vd., 2019). Literatürde STZ’nde sistem dinamiğinin kullanıldığı araştırmalar Tablo 7’de özetlenmiştir.

**Tablo 7: Sürdürülebilir Tedarik Zincirinde Sistem Dinamiği Yaklaşımının
Kullanıldığı Çalışmalar**

Çalışmalar	SD'nin Kullanılma Amaçları
Seidel vd. (2008)	Küçük veya orta ölçekli bir şirketin çevresel açıdan sürdürülebilirlik gelişimini nedensel döngü diyagramları ile modellemek,
Kibira vd. (2009)	Finansal, çevresel ve sosyal yönden faaliyetlerin üretime entegrasyonunu sağlayacak model önerisinde bulunmak,
Yu (2011)	Yeşil tedarik zinciri yönetiminde kilit operasyon parçaları simüle etmek,
Kumar & Nigmatullin (2011)	Sürdürülebilir gıda tedarik zinciri ağı tasarlamak,
Wee vd. (2012)	Sürdürülebilir tedarik zincirinde farklı yenilenebilir enerji kaynakları hakkında yönetimsel bilgiler sağlamak,
Bai vd. (2012)	Çevresel riski minimum seviyede tutacak ve kaynak tahsis politikalarını ortaya koyacak model tasarlamak,
Hassini vd. (2012)	Enerji sektöründeki temel yönetim altyapısıyla, paydaşlarla, yani müşteriler ve hükümetle bağlantılı olacak şekilde alternatif politikaların davranışını sürdürülebilirlik çerçevesinde değerlendirmek,
Jain vd. (2013a)	Tedarik zincirinin bölümlerinin uygun ve ayrıntılı analiz edilmesini sağlayan çok çözünürlüklü modelleme yaklaşımı sunmak,
Jain vd. (2013b)	Ürünlerin tedarik zinciri boyunca akmasını sağlamak için enerji tüketimini tahmin etmeye yarayan hiyerarşik simülasyon tabanlı yaklaşım sunmak,
Clark vd. (2013)	Potansiyel yenilenebilir yakıt endüstrisindeki büyüme farklılıklarını simüle ederek biyo-yakıt endüstrisi gelişiminde kaynak koruma programının rolünü incelemek,
Zhang vd. (2013)	Sürdürülebilir üretimdeki temel unsurları tanımlayarak olası stok ve akış için model önermek,
Tian vd. (2014)	Oyun teorisini temellendirerek, işletmelerde yeşil tedarik zinciri yönetimindeki difüzyon problemini araştırarak model oluşturmak,
Li vd. (2015)	Sürdürülebilir tedarik stratejileri altında ürün etkinliğinin dinamik özelliklerini araştırmak ve duyarlılığını modellemek,
Sanches & Gomez (2015)	Yenilenebilir yakıtların etkilerini değerlendirmek ve bağımsız bir araç filosu oluşturmak için geliştirme modelleri belirlemek,
Yang (2015)	Çevreci tedarik zinciri yönetimini uygulayan işletmelere geri bildirim yapısı sunan model geliştirmek,
Franco vd. (2015)	Teknoloji gelişimi ve yakıt belirsizliği altında teşviklerin kaldırılması ve sübvansiyonların kısmen azaltılması olasılığını çeşitli senaryolarda değerlendirmek,
Yan (2016)	Yüksek teknoloji işletmelerin çevreci tedarik yönetimini araştırmak,
Li vd. (2016)	Kapalı döngü tedarik zincirlerinde ürün etkinliğinin içsel dinamik mekanizmasının nicel tanımını sağlayan modeller geliştirmek,
Nabavi vd. (2017)	Sistem dinamiği modellemelerinin sürdürülebilirliği destekleme potansiyelini çalışmanın kısıtlarına ve sınırlarına göre araştırmak,
Melkonyan vd. (2017)	Sürdürülebilir gıda tüketim kalıplarını kolaylaştıran, katılımcı değerlendirmeleri ve verimli bilgi alışverişini sağlayan sürdürülebilir lojistik hizmetler hakkında fikir edinmek,
Shibin vd. (2018)	Sürdürülebilir tedarik zincirleri ile uygun fiyatlı yenilikler arasında bağlantı kurmak için model geliştirmek,
Mubiena & Ma'ruf (2018)	Kumaş endüstrisinde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için dinamik bir model önermek,
Anh & Vo (2019)	Hazır giyim sürdürülebilir tedarik zincirindeki kurumsal sosyal sorumluluk katılımı sorununu araştırmak ve uygun koşulları

	sağlayacak model önerisinde bulunmak,
Ulku vd. (2020)	Esnek ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için riskleri önceliklendirmek ve uygun risk stratejilerini belirlemek,
Beiler vd. (2020)	Tedarik zincirlerinin sürdürülebilirlik performansı için tek yönlü akış için geliştirilen tersine lojistik sistemini analiz etmek

Yukarıdaki tabloda yer aldığı üzere, sistem dinamiği yaklaşımı sürdürülebilir tedarik zincirinin farklı alanlarına nüfus etmiştir. Araştırmalar sayıca yetersiz olmasına rağmen sistem dinamiği yaklaşımı talep yönetimi, risk yönetimi, stok takibi, teknolojik gelişmeler, tedarikçi kararları, belirsizlik altında sürdürülebilir uygulamalar gibi çeşitli tedarik zinciri uygulama alanlarında kullanılmıştır.

Bir diğer önemli konu, bu çalışmanın konusu olan katı atıkların geri dönüşüm sürecinde sistem dinamiği yaklaşımının ne şekilde kullanılabileceği ile ilgilidir. Atık yönetimi çalışmalarının sistem dinamiği ile analiz edilmesine ilişkin büyük araştırma boşlukları vardır (Micky, 2019; Zhao vd., 2018; Maqsoom vd., 2019; Chen & Liu, 2021). Literatür detaylı incelendiğinde genel olarak atık yönetiminde sistem dinamiği yaklaşımının kullanıldığı çalışmaların oldukça az olduğu görülmüştür.

Tablo 8: Atık Yönetiminde Sistem Dinamiği Yaklaşımının Kullanıldığı Çalışmalar

Çalışmalar	SD'nin Kullanılma Amaçları
Ulli-Beer vd. (2007)	Katı atık yönetiminin gerçek dünyasındaki farklı fiyatlandırma sistemlerini geliştirmek,
Chaerul vd. (2008)	Hastane atık yönetim sisteminde yer alan her bir faktörün rolünü değerlendirmek,
Kolikkathara vd. (2010)	Sürdürülebilir kentsel katı atık yönetimi planlamasının, düzenli depolama kapasitesi, çevresel etkiler ve mali harcamalar gibi birbiriyle bağlantılı modelini önermek,
Zhao vd. (2011)	Alternatif geri dönüşüm türlerini değerlendirmek için geri dönüşüm merkezlerinin ekonomik fizibilitesini ve atık yönetiminde tasarrufların maliyetlere etkisini karşılaştırarak bir sistem dinamiği modeli kurmak,
Inghels & Dullaert (2011)	Evsel atık yönetiminin altında yatan dinamik ilişkileri modellemek,
Bala (2012)	Mühendislik katı atık sahası ve kompostlamadan gelen gübreleri simüle etmek için katı atık yönetimini modellemek,
Ye vd. (2012)	İnşaat atık yönetiminin çevresel performansını değerlendirmek üzere model önermek,
Eleyan vd. (2013)	Gelişmekte olan bir kentsel alanda üretilen tıbbi katı atıkları tahmin etmek (Filistin örneği),
Shamsuddoha vd. (2013)	Kümes hayvanlarından üretilen atık ve yan ürün üretiminin fizibilitesini tahmin etmek,
Dace vd. (2014)	Artan geri dönüşüm oranları aracılığıyla ürünlerde ambalaj malzemesi verimliliğini destekleyen politika mekanizmalarını analiz edecek model önermek,

Das & Dutta (2013)	Kapalı döngü tedarik zincirinde ürün değişim ve geri kazanım politikalarının finansal duruma etkisini araştırmak,
Yuan & Wang (2014)	İnşaat sektöründe uygun bir atık bertaraf ücretlendirme ücreti belirlemek için sistem dinamiği tabanlı bir model geliştirmek,
Golroudbary & Zahraee (2015)	STZ'nde geri dönüşüm faaliyetlerinin müşteri sürdürülebilirliği üzerine etkilerini araştırmak,
Dai (2015)	Belediye katı atık üretim sistemini kurmak (Huangshi örneği),
Babader vd. (2016)	Yeniden kullanım davranışının sosyal yönlerini iyileştirmenin etkinliğini araştırma ve yeniden kullanım davranışına yol açan değişkenleri araştırmak,
Grazhdani (2016)	Katı atık üretimi ve geri dönüşüm oranını etkileyen ekonomik, demografik, konut yapısı ve atık yönetimi politikası değişkenlerinin karşılıklı ilişkilerine dayanan bir model geliştirmek,
Ding vd. (2016)	İnşaat atığı azaltma yönetiminin (kaynak azaltma vs.) çevresel faydalarını simüle etmek,
Guo vd. (2016)	Hükümetler tarafından uygulanan yaptırımların evsel atıklar ile ilgili davranışlar üzerindeki etkilerini ölçmek,
Zhao vd. (2017)	Atık sızıntı suyunu buharlaştırmak için düzenli depolama gazı kullanarak bölgesel bir geri dönüşüm tesisinin ekonomik potansiyelini modelleyen bir sistem tasarlamak,
Giannis vd. (2017)	Düzenli depolama kapasitesi ve geri dönüşüm verimliliğini birbirine bağlayarak katı atık yönetimi için alternatif stratejileri değerlendirmek,
Ghisolfi vd. (2017)	Elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının, yasal teşviklerin ve toplanan atık hacmiyle elde edilen pazarlık gücünün, atık toplayıcıların etkin bir şekilde resmileştirilmesi üzerindeki etkisini ölçmek,
Aldemir vd. (2018)	Atık yönetiminde elektrikli ekipman israfını en aza indirmeyi sağlayan model önerisinde bulunmak,
Meng vd. (2018)	Evsel katı atıkların sınıflandırması ve geri dönüşüm için en etkili atık yönetimi politikasını bulmak,
Avsec & Kaucic (2018)	Çevre kirliliği endişesi ve atık geri dönüşümünü dengelemede bütünsel bir yaklaşım sunmak için ömrünü tamamlamış katı atık geri dönüşümü için bir eko-verimlilik karar destek modeli geliştirmek,
Estay-Ossandon vd. (2018)	Belediye katı atık planlama sürecini analiz etmek ve iyileştirmek,
Wang (2018)	Belediye katı atık üretimini ve geri dönüşümünü tahmin etmek için model geliştirmek, (Hong Kong)
Zhao vd. (2018)	Elektronik atıkların geri kazanım faaliyetlerini teşvik etmek, katı malzeme tüketimini azaltmak ve temiz üretimi teşvik edecek model geliştirmek,
Maqsoom vd. (2019)	İnşaat endüstrisinde atık azaltma ve bunun sonucunda maliyet-fayda açısından fayda sağlayacak daha iyi bir atık yönetim tekniği sağlamak,
El Wali vd. (2019)	Kritik bir hammadde olan fosforun akışını ölçmek ve Avrupa'da geri dönüşümünün potansiyel faydalarını göstermek,
Popli vd. (2020)	2000-2030 yılları arasında Güney Kore'de belediye katı atık geri dönüşümünden kaynaklanan sera gazı emisyonunu tahmin etmek,
Chaudhary & Vrat (2020)	Cep telefon atıklarında bulunan altını çevreye duyarlı bir şekilde geri dönüştürerek elde edebileceği ekonomik, çevresel ve sosyal faydaları araştırmak (Hindistan örneği),

Pinha & Sagawa (2020)	Belediye katı atık yönetimi için ilgili kaynaklar, atık hedefleri ve hizmetin/sistemin maliyet yapısının kapsamlı bir görünümünü sağlayan bir model sunmak,
Chen & Liu (2021)	Düzenli depolama sahaları ve geri dönüşüm tesisleri gibi farklı atıklardan çıkan potansiyel sera gazı emisyonlarını değerlendirmek,
Chaves vd. (2021)	Atıktan enerji (yakıt) üretimi için belediye ve endüstriyel sektörlerden potansiyel geri dönüştürülebilir atık akışlarını tahmin etmek,
Zhou vd. (2021)	Covid 19'un uzun vadeli etkilerini nicel olarak simüle etmek, atık geri dönüşümüne yönelik yatırım ve teşviklerin artmasına yönelik atık yönetimi senaryoları denemek,
Tian vd. (2021)	İkincil bir kaynak geri kazanım sistemi modeli oluşturmak için 2000'den 2015'e kadar Çin'in kurşun asitli kullanılmış pilleri örnek olarak geri dönüşümünün çevresel ve ekonomik etkilerini hükümet politikaları doğrultusunda analiz etmek.

(Ayrıca Bölüm 2’de anlatıldığı üzere sistem dinamiği yöntemi geri dönüşüm uygulayan işletmelerin STZ performansına etkilerini inceleme amacıyla da kullanılmıştır.)

Yukarıdaki tabloda sistem dinamiği yaklaşımının atık yönetiminde uygulandığı birçok çalışma gösterilmiştir. Atık yönetimi içerisinde atık yönetim fiyatlandırma, atık üretim tahminleme, belediye katı atık ağı tasarlama, atık düzenli depolama alanları yönetimi, çevresel etkiler gibi çeşitli uygulama alanlarında çalışmalar yapılmıştır. Kısıtlı bir şekilde küçük bir grup araştırmacı atık yönetiminde malzeme geri dönüşümüne (kazanımına) odaklanmıştır. Ancak bu şekildeki modelleme çabalarına rağmen araştırmacılar tarafından endüstriyel katı atıkların geri dönüşümünde (geri kazanımı) veya yönetiminde sistem dinamiği yaklaşımına neredeyse hiç yer verilmediği görülmüştür.

3.2.2. Best Worst Method (BWM)

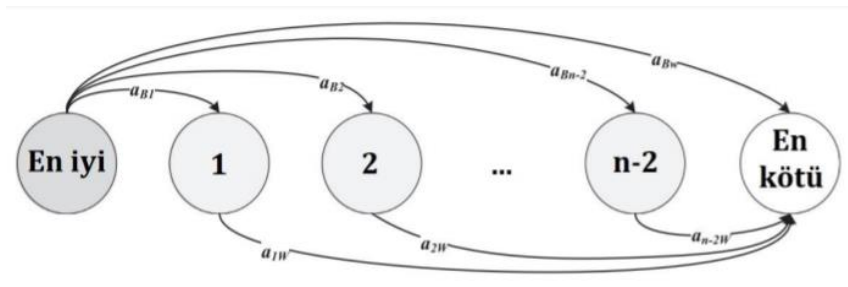
Bu çalışmada karar vermeyi sağlayacak birçok farklı kriterin mevcudiyeti, kriterlerin eş zamanlı değerlendirilme ihtiyacı, birçok durum altında problemin kısa zamanda çözümlenmesi ve sonuçların tutarlılığına güvenilmesi amacıyla çok kriterli karar verme yöntemlerinden “Best Worst Yöntemi” ne ihtiyaç duyulmuştur. Çalışmada, endüstriyel atıklarını geri dönüştürmek isteyen işletmelerin sürdürülebilirlik kararlarını vermelerinde birçok farklı kriterin varlığı ve bu kriterlerin her birinin karar üzerinde farklı etkileri söz konusudur. BWM ile bu çalışmada, işletmelerin geri dönüşüm faaliyetlerini üretim süreçlerine dahil etme kararı vermesinde etkili olan birçok farklı kriterin önem derecelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yöntemin birçok farklı kriterin ağırlıkladığını kısa zamanda yapabilmesi ve özellikle sonuç tutarlılığını araştırması (Rezaei, 2015) verilecek kararlardaki doğruluk için önemli bir adımdır ve bu sebeple

çalışmada öncelikli tercih edilmiştir.

Maksimum fark ölçekleme olarak da literatürde geçen BWM, her bir kritere katsayı veren kolay bir yöntemdir. Yöntemin temelinde çeşitli kriterlerin nihai ağırlıklarını belirlemek için doğrusal programlama tekniği önerilmiş ve uygulanmıştır. BWM, doğrusal programlama ile uzaklık analizinin birlikte geliştirildiği bir yöntemdir. Karar vericiler ilk olarak uzaklık analizini kullanmakta, ardından kriter ağırlıklandırması ve sıralaması için doğrusal programlama yöntemine ihtiyaç duymaktadır.

En İyi-En Kötü Yöntem (BWM), karar vericinin en iyi ve en kötü kriterleri seçtiği ve en iyi ve en kötü kriterler için ikili karşılaştırma vektörünün karar verici tarafından sağlandığı yöntemdir. Bu nedenle yöntemde daha az karşılaştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Sadjadi & Karimi, 2018). BWM'nin karşılaştırma yapısı Şekil 4'de gösterilmiştir. SMART gibi tek vektörün kullanıldığı yöntemler birçok verinin ikili kıyaslamasında zaman açısından fırsat sunarken, tutarlılığı kontrol edememesi sebebiyle eksik görülmektedir (Bilgiç vd., 2021). AHP'nin olumsuzluklarını ortadan kaldırma amacıyla geliştirilen BWM'de, AHP'den farklı olarak yöntemde sadece en iyi kriterin diğer tüm kriterlere göre avantajını ve bu tür diğer kriterlerin en kötü kritere göre avantajını göstermek üzere referans karşılaştırmaları gerçekleştirilmektedir (Pamucar vd., 2020). BWM'de diğer kriterlerle ikili karşılaştırma yapabilmesi için belirlenen en iyi ve en kötü kriter, referans noktalarını temsil etmektedir.

BWM'nin diğer birçok yöntemle göre en büyük avantajı çözüm bulmak için daha az veriye ihtiyaç duyması ve karar kriterlerini daha anlamlı şekilde karşılaştırarak tutarlılığı sağlayabilmesidir (Thugudam, 2020). BWM'nin öne çıkan özelliği tutarlılık oranını hesaba katmasıdır, bu durum birçok yöntemle nazaran daha az sapmaya neden olmaktadır.



Şekil 4: BWM'de Kriter Karşılaştırma Yapısı

Kaynak: Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.

Ortaya çıktığı dönemden itibaren geçen yedi yılda BWM, farklı çalışmalarda farklı amaçları gerçekleştirmek üzere kullanılmıştır. BWM'nin uygulanmasının kolay olması sebebiyle hem zaman açısından hem de tutarlılığı kontrol etmesi açısından verimli olduğu ifade edilebilir. En İyi En Kötü Yöntem (BWM), ÇKKV alanında optimal kararların verilmesinde güvenilir sonuçlar sağlayabilmesi açısından önemlidir (Pamucar vd., 2020). Yeni bir yöntem olmasına rağmen BWM'ye lojistik, turizm, yer seçimi, enerji, sağlık, finans, teknoloji, tedarik zinciri, projelendirme veya sürdürülebilirlik çalışmaları gibi birçok araştırmada yer verilmiştir. Yöntemin özellikle 2019 yılından sonra artan bir ivmeyle çalışılmasına rağmen hala büyüme evresinde olduğu söylenebilir.

BWM modelinin çözüm adımları şu şekildedir:

Adım 1. Çalışmada ağırlıklandırma yapılacak tüm kriterlerin listesi yapılır ($C_1, C_2, \dots, C_n$).

Adım 2. Karar vericiler tarafından n adet kriter içinden en iyi (best) ve en kötü (worst) kritere karar verilir.

Adım 3. En iyi kriter ile çalışmadaki diğer kriterlere önemine ya da karar vericinin tercihine bağlı olarak 1'den 9'a kadar puan verilir. Kriterlerin ikili kıyaslanmasında Saaty (1987)'nin AHP için geliştirdiği ölçekten yararlanılır (Tablo 9).

Tablo 9: BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği

Önem Derecesi	Tanımı
1	Eşit Derecede Önemli
3	Orta Derecede Önemli
5	Kuvvetli Derecede Önemli
7	Çok Kuvvetli Derecede Önemli
9	Mutlak Derecede Önemli
2,4,6,8	Ara Değerler

Kaynak: Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathl Modelling*, 9(3-5), 161-176.

Karar vericiler tarafından yapılan değerlendirmeler sonucunda, en iyi kritere göre oluşan vektör:

$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ 'dir.

a_{Bj} : kriter j üzerinden, en iyi kriterin B tercihini göstermektedir.

Adım 4. Bütün kriterlere, Adım 2'de belirlenen en kötü kritere bağlı olarak, önem

düzeyine ya da karar vericinin tercihinine bağlı olarak 1’den 9’a kadar puan verilir. Bunun için de Tablo 9’dan yararlanılır. Karar vericiler tarafından yapılan değerlendirmeler sonucunda, en kötü kritere göre oluşan vektör:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \text{ ‘dir.}$$

a_{jW} = kriter j’nin, en kötü kriter W üzerindeki tercihini göstermektedir.

Adım 5. Optimal ağırlıklar ($w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$) elde edilir.

Tüm j kriteri için maksimum mutlak $\left| \frac{w_B}{w_j}, -a_{BJ} \right|$ ve $\left| \frac{w_j}{w_W}, -a_{jW} \right|$ farkları minimize edilecek şekilde kriterlerin optimal ağırlıkları belirlenmekte ve bu durum aşağıdaki minmax modeline çevrilmiştir:

$$\min \max_j \left(\left| \frac{w_B}{w_j}, -a_{BJ} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W}, -a_{jW} \right| \right)$$

s.t.

(1)

$\sum_j w_j = 1; w_j \geq 0$, bütün j’ler için.

($\frac{w_B}{w_j}$: en iyi kriterin ağırlığının j.kriterin ağırlığına oranını gösterirken, $\frac{w_j}{w_W}$: j. kriterin ağırlığının en kötü kriterin ağırlığına oranını ifade etmektedir.)

Modeldeki temel amaç, tutarlılık oranını (ξ) 0’a yaklaştırmak; yani olabildiğince minimum seviyede kalmasını sağlamaktır. Bu nedenle modeldeki amaç fonksiyonu tutarlılık oranının en küçüklendiği (min) formda yer almaktadır. Eşitlik 1’de ağırlıkların negatif olmaması gerektiğinden doğrusal model Eşitlik (2) şeklinde revize edilmiştir. Aşağıda yer alan Eşitlik (2), basit bir basit doğrusal programlama (Lineer Programming (LP)) modelidir.

$\min \xi$

s.t.

(2)

$$\left| \frac{w_B}{w_j}, -a_{BJ} \right| \leq \xi, \text{ bütün j’ler}$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W}, -a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ bütün j’ler}$$

$$\sum_j w_j = 1$$

$w_j \geq 0$, bütün j 'ler için.

$(|WB - W_j - aB_j| \leq \xi$ denklemi; en iyi kriterin ağırlığının, j .kriterin ağırlığı ile kriter j üzerinden, en iyi kriterin B tercihinin çarpımı arasındaki farkın tutarlılık oranından küçük veya eşit olduğunu göstermektedir.)

$(|W_j - WW_{ajw}| \leq \xi$ denklemi; j . kriterin ağırlığının, en kötü kriterin ağırlığı ile kriter j 'nin, en kötü kriter W üzerindeki tercihinin çarpımı arasındaki farkın tutarlılık oranından küçük veya eşit olduğunu göstermektedir.)

$(\sum W_j = 1$ ve $W_j \geq 0$: tüm kriterlerin ağırlık değerlerinin 0'dan büyük ve herbir ağırlığın toplamının 1'e eşit olduğunu ifadeleridir.)

Çalışmada ulaşılmak istenen ξ değerinin 0'a olan yakınlığı çalışmanın tutarlılığını gösterirken, bu değer 1'e yaklaşması tutarlılığın az olduğunu gösterir.

3.3. Veri Toplama Süreci

Çalışmada plastik, cam, çelik ve alüminyum olmak üzere dört farklı ürün grubuna ait uygulamalar yapılmıştır. Araştırmada birden çok ürün grubuna yer verilmesi ve birçok farklı değişkenin yer alması sebebiyle çok aşamalı veri toplanmıştır. Bu nedenle her ürün grubuna ait veriler diğerlerinden bağımsız olarak farklı kaynaklardan sağlanmıştır. Modelde ihtiyaç duyulan tüm veriler için üç aşamalı süreç yürütülmüştür. Süreçler birbirine bağlı olmasına rağmen eş zamanlı yürütülebilmektedir. Ayrıca çalışmada hem birincil verilere hem de ikincil verilere ihtiyaç duyulduğundan, veriler farklı şekillerde toplanmıştır. Genel hatlarıyla uygulamanın veri toplama adımları Şekil 5'te özetlenmiştir.

Tüm değişkenler veri toplama kaynağına göre ayrılır.

Bir kısım değişkene ait veriler sektörden ve literatürden toplanır.

Kalan değişkenlere ait verilere sektördeki uzmanlar tarafından ulaşılır.

Çalışmada aynı zamanda ihtiyaç duyulan kriter ağırlıklandırma için uzmanlar tarafından değerlendirme yapılır.

Şekil 5: Veri Toplama Süreci

1. Modelde yer alan tüm değişkenler listenmiş, ilgili değişkenlere ait veriler yalnızca sektörden sağlanacak ve hem sektörden hem literatürden toplanacak şekilde iki gruba ayrılmıştır.

2. İlgili ürün grubuna ait bir kısım veriler literatürden ve sektörden toplanarak analiz edilmiştir. Bu aşamada literatürden ulaşılabilecek veriler ikincil veri olup, ilgili verilere ulaşabilmek için mevcut çalışmalara detaylı ve titiz şekilde ulaşılmıştır. Bu bağlamda her ürün grubu için literatürdeki uygulamaların incelenmesiyle sağlanan veriler, çalışmadaki ürün grupları için yapılan varsayımlar etrafında şekillenmiştir. Bu veriler için yalnızca çeşitli veri tabanlarında yer alan bilimsel çalışmalar incelenmemiş, ayrıca her ürün grubunun ait olduğu sektördeki firmaların uzmanları tarafından da veriler sağlanmıştır.

Bu veriler; enerji tüketim miktarı, birim enerji tüketim miktarı (birincil üretim için), salınan gaz miktarı (CO₂), birim gaz salınım miktarı (birincil üretim için), su tüketim miktarı ve birim su tüketim miktarıdır (birincil üretim için).

3. Diğer değişkenlere ait gerçek veriler ise sektörde geri dönüşüm faaliyetlerinde çalışan firma çalışanları veya yöneticileri ile görüşmeler sonucunda toplanmıştır. Bu veriler; ayrıştırma oranı, birim hurda değeri, harcama ve birincil üretimle üretilmiş malzemenin satış fiyatıdır. Bu aşamadaki veriler birincil olup, birebir sektördeki gerçek geri dönüşüm firmalarından sağlanmıştır. Her ürün grubunun farklı geri dönüşüm sektörlerinde işleme alınması sebebiyle toplamda 6 şehirden 16 adet firma ile bağlantı kurulmuştur. Firmaların biri (A) hem plastik hem çelik hem de alüminyum için verileri sağlarken biri de (F) hem çelik hem de alüminyum için verileri paylaşmıştır. Farklı sektörlerin ilgili firmalarından da sadece kendi ürün grubu için veriler alınmıştır.

Aşağıdaki tablolarda görüşme yapılan firmaların bulunduğu şehirler ürün gruplarına göre ayrılarak gösterilmiştir.

Tablo 10: Sektörden Toplanan Verilerin Kaynakları

Plastikler için		Çelikler için		Camlar için		Alüminyum için	
A	Bursa	A	Bursa	İ	Kocaeli	A	Bursa
B	Bursa	F	İstanbul	J	İstanbul	F	İstanbul
C	Bursa	G	İstanbul	K	İstanbul	M	Ankara
D	Bursa	H	İstanbul	L	Ankara	N	Eskişehir
E	Tekirdağ	I	Tekirdağ				

4. Sektörden ve literatürden sağlanan verilerin ardından, sürdürülebilirlik gelişimi değişkenini oluşturan beş sürdürülebilirlik boyutunun (*gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı, su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı, karlılık ekonomik kazancı veya kaybı*) ağırlıklarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu aşamada her ürün grubu için birbirinden farklı 10 uzman olacak şekilde toplamda 40 kişiyle birebir görüşmeler yapılarak, BWM uygulaması sonucunda ağırlık değerlerine ulaşılmıştır. Uzmanlar bulunduğu sektördeki ürün grubunun geri dönüşüm firmalarında en az 5 senedir tam zamanlı çalışan, endüstri veya çevre mühendisi eğitimi almış kişilerden oluşmaktadır.



BÖLÜM 4: UYGULAMA

Çalışmanın uygulama bölümünde, nedensel döngü diyagramlarının ve model haritasının yer aldığı model tasarımına, model boyutlarına, çalışma varsayımlarına ve plastik, cam, çelik ve alüminyum ürün grupları için ayrı olacak şekilde uygulamalarına ve sonuçlarına yer verilmiştir. Modeldeki tüm boyutlar açıkça ifade edilirken, bu boyutlara ait verilere ulaşmak için ihtiyaç duyulan yöntemler de ele alınmıştır. Araştırmanın dört farklı ürün grubu için ayrı yapılacak olması, toplanan verileri ve bu kapsamda değerlendirilen bazı durumları da gündeme getirerek, her bir sürecin özel ve detaylı olarak yürütülmesini gerektirmiştir.

Uygulama temelde iki büyük senaryo altında gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoda atık sahibi işletmelerin mevcut geri dönüşüm sistemini uygulamasıyla sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca senaryo 1’de aynı çalışma modeli ve değişkenler kullanılarak iki alt senaryo altında sonuçlar incelenmiştir. Senaryo 1a; işletmeleri sürdürülebilir kalkınma açısından geri dönüşüme teşvik etmek üzere ihtiyaç duyulan verileri gerçek performans sonuçlarıyla ortaya koymayı amaçlarken, modelde sürdürülebilir gelişimi etkileyen beş alt kriterin gerçek ağırlık değerlerine yer verilmiştir. Atık sahibi işletmelerin geri dönüşüm kararı vermesinde etkili olan kriterlerin sürdürülebilirlik tedarik zinciri performansı üzerindeki önem derecesini göstermek amacıyla her ürün grubunda ayrı olacak şekilde uzmanlara BWM uygulanmıştır. Senaryo 1a için program 4 sene çalıştırılmıştır. Bunun temel sebebi atık geri dönüşüm oranının %100’e ulaşma durumundaki sonuçların da ortaya koyulmak istenmesidir.

Senaryo 1b ise; dört ürün grubunun geri dönüşümünün sürdürülebilirlik gelişimi üzerindeki farklı etkilerini belirleyerek ulaşılan bu farklılığın literatüre katkı sağlamasını amaçlamış ve bu sebeple dört ürün grubu için kriter ağırlıkları eşit kabul edilerek sonuçlar incelenmiştir. Bu senaryoda çevresel sürdürülebilirlik kriterlerinin toplam ağırlık değeri 0.50; ekonomik sürdürülebilirlik kriterlerinin toplam ağırlık değeri 0.50 olacak şekilde tasarlanmıştır. Senaryo 1b’nin sonuçları aynı zamanda Senaryo 2’de uygulanacak olan geri dönüşüm teşvik sisteminin etkilerini ortaya koyma açısından önemlidir. Bu sebeple Senaryo 2’nin iki senelik çalışma süresi temel alınarak, Senaryo 1b için program iki sene çalıştırılmıştır.

Diğer taraftan Senaryo 2, dünyanın birçok ülkesinde sürdürülebilir kalkınma hedefleri

doğrultusunda uygulanan geri dönüşüm teşvik sistemlerinin ülkemizde uygulanması durumundaki etkilerini incelemektedir. Bu senaryodaki teşvik sisteminde; hükümetin ilgili birimleri aracılığıyla atık sahibi işletmeler, geri dönüşüm şirketlerinin üretim kaynaklarını belirlenen süre boyunca kullanmakta ve projede yalnızca işletim maliyetlerini ödemektedir. Bu koşullar altında uygulama sonuçları değerlendirilmektedir. Mevcut geri dönüşüm teşvik sistemlerini içeren projelerin çoğunlukla iki sene süre boyunca yapılıyor olması, programın da iki senelik çalıştırılmasını etkilemiştir. Bu sebeple Senaryo 2 sonuçları olası bir geri dönüşüm teşvik sistemi projesinin iki senelik uygulanma durumunu ortaya koymaktadır.

Çalışmadaki iki senaryonun farklı amaçlarla yapılıyor olması model tasarımında birkaç ufak değişikliğe sebep olurken, aynı zamanda bu durum veri toplama sürecinde ve uygulama basamaklarında kısmen bazı değişiklikleri gerektirmiştir.

4.1. Model Tasarımı

Model tasarımında, çalışmada ihtiyaç duyulan nedensel döngü diyagramları ve model haritası yer almaktadır.

4.1.1. Nedensel Döngü Diyagramları

Çalışmada nihai modelin hazırlanması için ilk olarak modeldeki tüm ilişkileri gösteren nedensel döngülerin kurulmasına ihtiyaç duyulmuştur. Döngü diyagramlarının doğru oluşturulması karmaşık sistemlerdeki ilişkilerin daha kolay anlaşılmasını ve çözümlenmesini sağladığı için oldukça kritiktir. Döngülerin kurulabilmesi için sürdürülebilir tedarik zincirinde sistem dinamiğini kullanan çalışmaların yer aldığı literatür incelemesi detaylı yapılmış olup, modelde yer alacak temel sürdürülebilirlik boyutlarına ve boyutlar arası ilişkilere ait kurulacak alt döngülere karar verilmiştir. Bu aşamada özellikle sistem dinamiği yaklaşımının “sürdürülebilirlik”, “sürdürülebilir tedarik zinciri” ve “geri dönüşüm” araştırmalarında kullanıldığı tüm modeller ayrıntılı şekilde incelenmiştir. İnceleme sonrası ilk olarak alt döngüler kurulmuş olup, ardından kavramsal model ile ilgili süreçlerin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.

Tasarlanan kavramsal modelin mantıksal doğrulaması, geri dönüşüm sektöründeki 15 uzman tarafından yapılmış olup, çalışmanın amacına ulaşabilmeyi sağlayacak farklı değişkenlerin döngülere eklenmesi önerilmiş ve bu doğrultuda model revize edilmiştir.

Yeni değişkenlerle tasarlanan modelde benzer süreçler tekrarlanmış ve nihai model aynı uzmanlar tarafından doğrulaması yapıldıktan sonra çalışma ilerlemiştir. Ayrıca görüşülen uzmanların özellikle farklı ürün gruplarının (plastik, cam ve metal) geri dönüşüm süreçlerinde çalışan kişilerden seçilmesine dikkat edilmiştir.

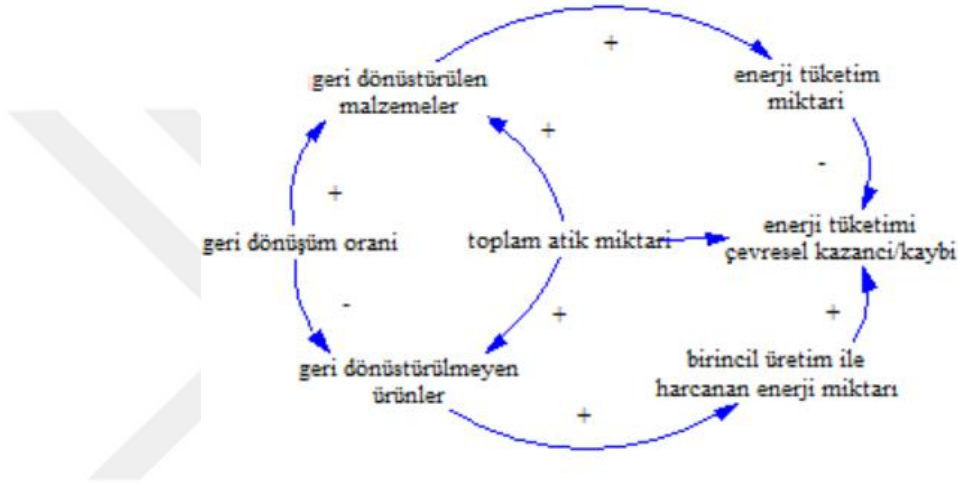
Çalışma modeli üretim tesisinde meydana gelen endüstriyel katı atıkların birikmesi ile başlamış olup, belirli bir ayrıştırma oranında geri dönüşüm sürecine dahil olan malzemelerin belirlenmesi şeklinde devam etmektedir. Bu atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüştürülmesinin mevcut çevresel ve ekonomik performansa olan etkileri, birincil üretimin etkileri ile kıyaslanarak modelde yer almaktadır. Modelde hem çevresel performans hem de ekonomik performans eş zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada sürdürülebilirlik gelişimi olarak tanımlanan performans kriteri, aynı kaynak için ihtiyaç duyulan geri dönüşümün ve birincil üretimin etkilerini çeşitli kriterler altında ortaya koymaktadır.

Çalışma modelinde kapalı döngülü tasarlanan üç adet çevresel ve iki adet ekonomik modeli bulunurken, ayrıca sürdürülebilirlik gelişimin geri dönüştürülecek atık miktarının girdisi olması sebebiyle model tam kapalı döngü şeklinde tasarlanmıştır. Ana kriterler, alt kriterler, değişkenler arası ilişkileri gösteren alt modeller ve kapalı döngüler VENSIM PLE x64 programı aracılığıyla görselleştirilmiştir (Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10). Aynı zamanda döngüleri oluşturan birbirleriyle ilişkili değişkenlerin pekiştirici veya dengeleyici olma özellikleri neden-sonuç ilişkisinin yönüne bağlı kalarak +/- yön işaretleriyle akışlar üzerinde gösterilmiştir.



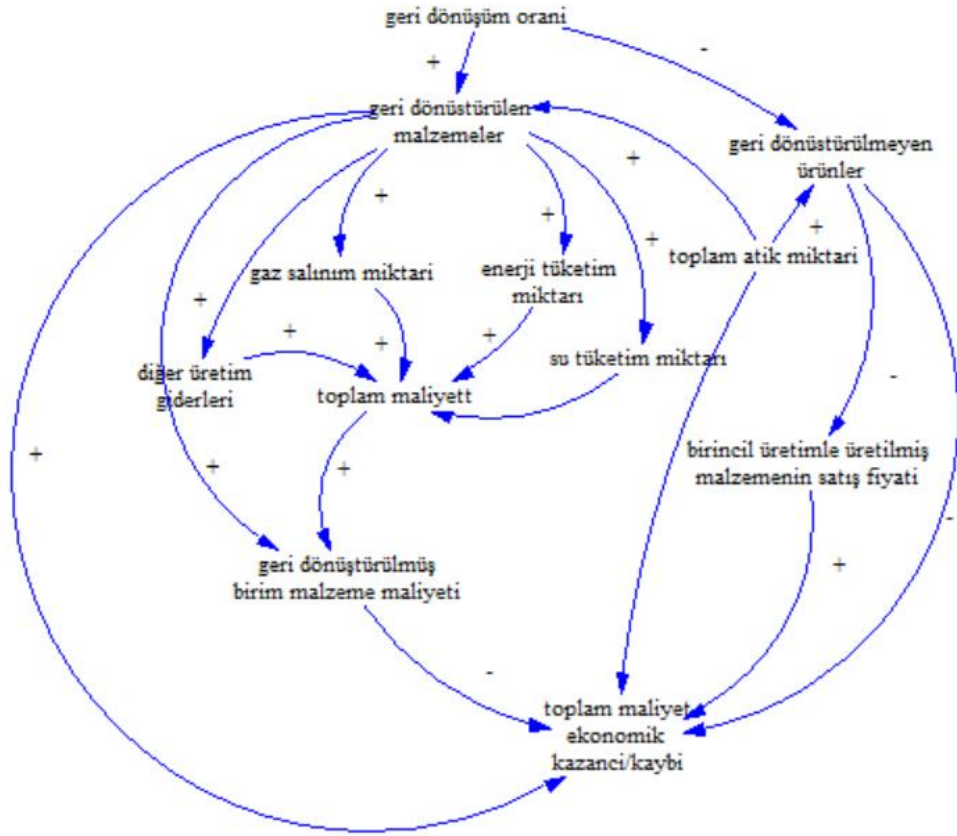
Şekil 6: Çevresel Sürdürülebilirlik Su Tüketimi Alt Modeli

Şekil 6'daki nedensel döngü diyagramı, atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde ihtiyaç duyulan su tüketim miktarının, aynı kaynağın birincil üretim ile üretilmesinde harcanacak su tüketimine göre etkisini göstermektedir. “Su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı” değişkeni, endüstriyel katı atıkların malzeme geri kazanımı sürecinde harcadığı su miktarı ile aynı kaynağın birincil üretimde ihtiyaç duyduğu su miktarı arasındaki farkın gösterildiği kriterdir. Döngüdeki su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, geri dönüşüm sürecinde harcanan su tüketimi tarafından dengelenirken, birincil üretimde ihtiyaç duyulan su tüketimi tarafından pekiştirilmektedir.



Şekil 7: Çevresel Sürdürülebilirlik Enerji Tüketimi Alt Modeli

Şekil 7'deki nedensel döngü diyagramı, atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde ihtiyaç duyulan enerji tüketim miktarının, aynı kaynağın birincil üretim ile üretilmesinde harcanacak enerji tüketimine göre etkisini göstermektedir. “Enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı” değişkeni, endüstriyel katı atıkların malzeme geri kazanımı sürecinde harcadığı enerji miktarı ile aynı kaynağın birincil üretimde ihtiyaç duyduğu enerji miktarı arasındaki farkın gösterildiği kriterdir. Döngüdeki enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, geri dönüşüm sürecinde harcanan enerji tüketimi tarafından dengelenirken, birincil üretimde ihtiyaç duyulan enerji tüketimi tarafından pekiştirilmektedir.



Şekil 9: Ekonomik Sürdürülebilirlik Toplam Maliyet Alt Modeli

Şekil 9'daki nedensel döngü diyagramı, ekonomik boyutun bir alt kriteri olan toplam maliyete dayanmaktadır. Modelin bu kesitindeki döngüler, atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde işletmenin katlanacağı toplam maliyetin, birincil üretimle üretilmiş aynı kaynağın satın alınmasıyla katlanılacak toplam maliyete göre etkisini göstermektedir. Bu değişken, endüstriyel katı atıkların malzeme geri kazanımı sürecinde işletmede sebep olduğu maliyet yükü ile birincil üretimde üretilmiş aynı kaynağın satın alınmasının işletmeye vereceği maliyet yükü arasındaki farkı ifade etmektedir.

Modelde geri dönüşüm sürecinin çıktısı olan toplam maliyet üzerinde, çevresel sürdürülebilirlik boyutlarının sebep olduğu maliyetler ve diğer üretim giderleri pekiştirici etki yaratmaktadır. Araştırmada geri dönüşüm teşvik sistemiyle olası sonuçların değerlendirildiği diğer senaryoda ise toplam maliyet üzerinde sadece "harcama" değişkeni etkili olmakta, bu da firmanın geri dönüşüm tesisine ödeyeceği tutarı

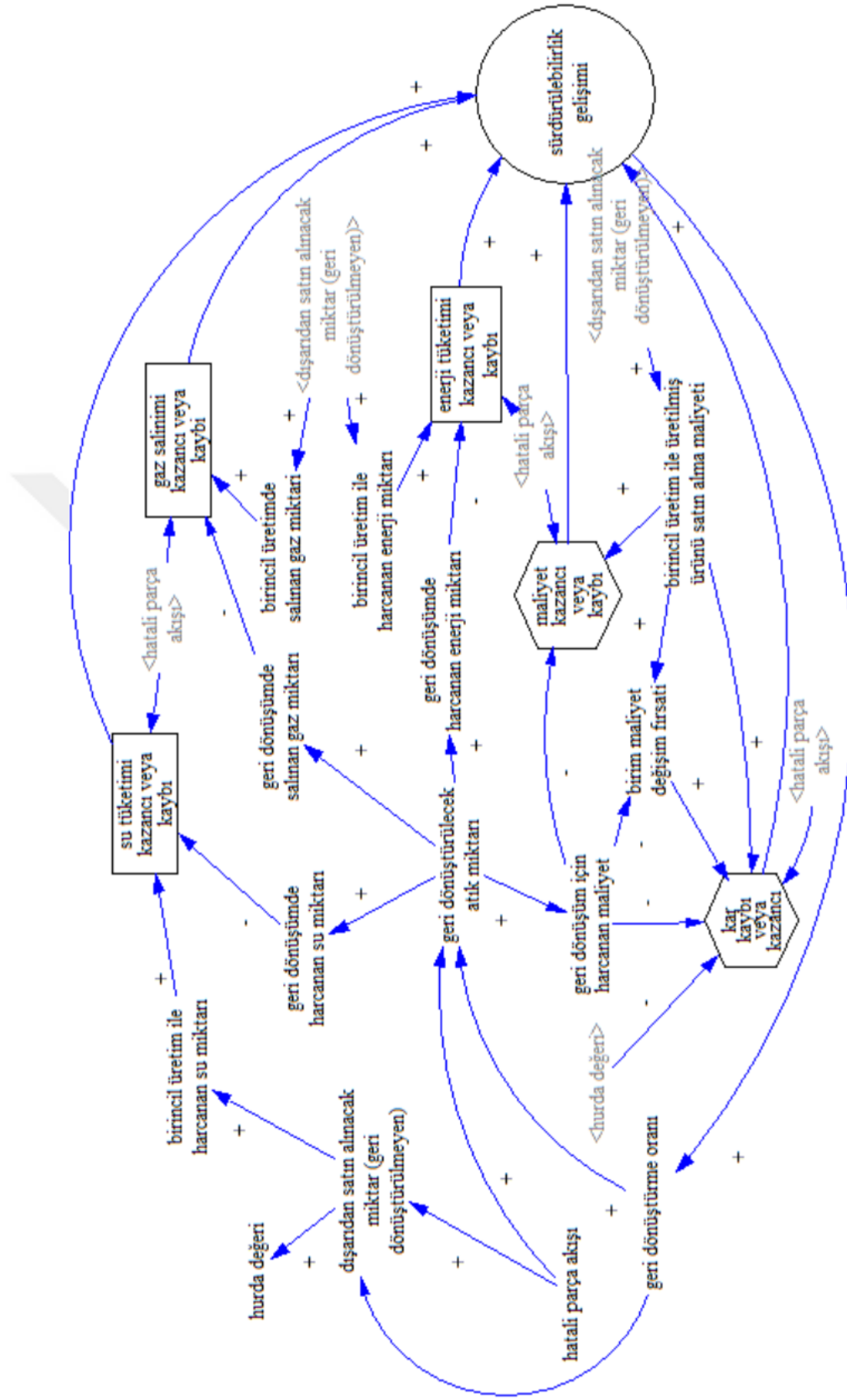
dönüştürülmüş birim malzeme maliyeti, hurda değeri ve geri dönüştürülmeyen malzeme miktarı (satın alınan) dengeleyici etki yaratmaktadır.



Şekil 11: Sürdürülebilirlik Gelişimi Değişkenine Yönelik Temel İlişkiler

Çalışmanın nihai sonucuna götürecek sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde 5 temel kriter etkili olmaktadır ve bu kriterlerin her biri ilgili kriterin etkisini pekiştirmektedir. Yani kriterlerin herhangi birinin değerindeki artış (diğerlerinin değerinin azalmaması koşuluyla) sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde olumlu etki yaratmaktadır. Benzer şekilde azalış da değer üzerinde olumsuz etkiye sebep olmaktadır.

Bu aşamaya kadar incelenen değişkenler ve kurulan alt modeller doğrultusunda çalışmanın nedensel döngü diyagramı oluşturulmuş ve Şekil 12’de gösterilmiştir.



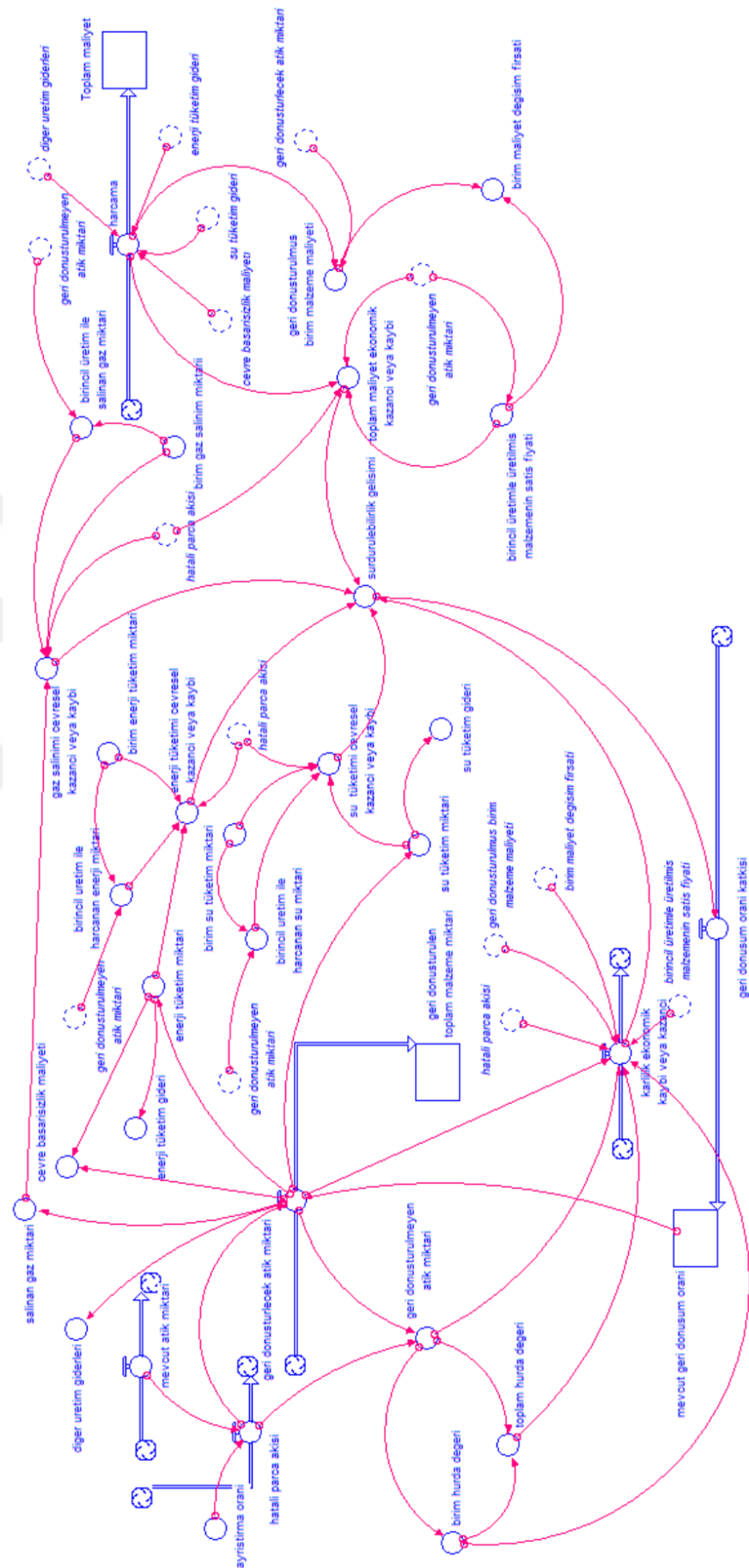
Şekil 12: Nihai Modelin Nedensel Döngü Diyagramı

4.1.2. Model Haritası

Çalışmada tüm kriterlerin ve ilişkilerin yer aldığı nedensel döngülerin kurulmasından sonraki adım, nihai modelin yer aldığı model haritasının oluşturulmasıdır. Özellikle stok ve akışların yeterince anlaşılmadığı alt modellerde doğrudan model haritası çıkarılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Bu aşamada araştırma probleminin ve tüm değişkenler arası ilişkilerin açık şekilde gösterildiği model haritasının oluşturulabilmesi için nedensel döngülerden yararlanılarak ilgili kriterin ihtiyaç duyduğu tüm alt kriterlerin bir listesi oluşturulmuştur. Örneğin Senaryo 2’de (geri dönüşüm teşvik sistemi altında) yer alan *su tüketim gideri* değişkenin hesaplanması için hem su tüketim miktarına hem de su tüketiminin birim maliyetine; *enerji tüketim gideri* değişkenin hesaplanması için hem enerji tüketim miktarına hem de enerji tüketiminin birim maliyetine ihtiyaç duyulmaktadır. Birim maliyet ücretleri ile ilgili ulaşılmak istenen veriler, nihai model içinde yeni değişken olarak yer almıştır. Bütün kriter listesi tamamlandıktan sonraki adımda kriterler arası gerçek ilişkileri gösteren stok ve akışlar gösterilmiş ve böylelikle çalışmanın genel model haritası tasarlanmıştır. Modele ait tüm değişkenlerin ve döngülerin yer aldığı stok ve akış diyagramlarının tamamlanması ile STELLA 9.0.1.330 Programından yararlanılarak model simülasyonuna geçilmiştir.

Şekil 13: Genel Model Haritası (Senaryo 1)



Şekil 14: Genel Model Haritası (Senaryo 2)

4.2. Model Boyutları

Çalışmada ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performansı gösteren 5 ana kriter ve bu kriterlere ulaşmayı sağlayan birçok değişken bulunmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik performansı; gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı, su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı ve son olarak enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı boyutları üzerinden incelenmektedir. Bu üç ana çevresel sürdürülebilirlik performansa ulaşmayı sağlayan diğer çevresel sürdürülebilirlik kriterleri mevcut atık miktarı, ayrıştırma oranı, hatalı parça akışı, geri dönüştürülecek atık miktarı, geri dönüştürülen toplam malzeme miktarı, geri dönüştürülmeyen atık miktarı, salınan gaz miktarı (geri dönüşüm için), birim gaz salınım miktarı, birincil üretim ile salınan gaz miktarı, enerji tüketim miktarı (geri dönüşüm için), birim enerji tüketim miktarı, birincil üretim ile harcanan enerji miktarı, su tüketim miktarı (geri dönüşüm için), birim su tüketim miktarı ve birincil üretim ile harcanan su miktarıdır.

Modele ait tüm boyutların listesi ve tanımları aşağıda yer almıştır. Bütün kriterlere ait değerler ve denklemler tezin son bölümündeki “EKLER” kısmında detaylı gösterilmiştir.

Mevcut Atık Miktarı (x1): Üretim tesisinde ortaya çıkan toplam atık miktarıdır.

Ayrıştırma oranı (x2): Toplam atık miktarı içinde geri dönüşüm sürecine katılacak malzeme miktarını gösteren orandır. Bu kriterle ait değerlere geri dönüşüm firmaları tarafından ulaşılmış olup, sürecin başında kalite kaybına sebep olacak malzemelerin uzaklaştırılmasını ifade etmektedir.

Hatalı parça akışı (x3): Üretim tesisinde ortaya çıkan hatalı parçalardan oluşan atık miktarıdır. Kriterin denklemi: $x_3 = x_1 * x_2$

Mevcut geri dönüşüm oranı (x4): Atık sahibi işletmenin dönemsel geri dönüşüm oranını göstermektedir.

Geri dönüştürülecek atık miktarı (kg) (x5): Hatalı parça akışı içinde atıkların birim kg başına doğrudan geri dönüştürülecek kısmıdır. Kriterin denklemi $x_5 = \text{IF}(x_4 > 1) \text{ THEN } 1 * x_3 \text{ ELSE } (\text{IF}(x_4 < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } x_4 * x_3)$ şeklindedir. Yani mevcut atık miktarının 1’den büyük olduğu durum altında geri dönüştürülecek atık miktarı yalnızca hatalı parça akışı kadar olacakken; geri dönüşüm oranının 0’dan küçük değer alması durumunda geri dönüşüm sürecine giren malzeme olmayacaktır. Bu iki durum dışında ise geri dönüştürülecek atık miktarı, mevcut geri dönüşüm oranıyla hatalı parça akışının çarpımına eşittir.

Geri dönüştürülen toplam malzeme miktarı (x6): Geri dönüştürülecek atık miktarının birikimli toplamını ifade etmektedir.

Geri dönüştürülmeyen atık miktarı (kg) (x7): Hatalı parça akışı içinde geri dönüştürülmeyecek olan atık miktarını göstermektedir. Bu atık miktarı, aynı zamanda işletmenin birincil üretimle üretilmiş malzemeyi satın alacağı miktardır.

Salınan gaz miktarı (CO₂ kg/kg)(x8): Geri dönüşüm işlemleri sırasında çevreye yayılan toplam CO₂ gazı miktarıdır. Kriterin denklemi $x8 = x5 * A$ şeklindedir. (A: birim ağırlıktaki ilgili ürün grubu tarafından geri dönüşüm sürecinde salınan ortalama CO₂ kg/kg miktarıdır, ilgili veri sektörden ve literatür incelemelerinden sağlanmıştır ve sabit bir değerdir. Bu değerler Bölüm 4.4.2, Bölüm 4.5.2, Bölüm 4.6.2 ve Bölüm 4.7.2’de yer almaktadır.)

Birim gaz salınım miktarı (x9): Birim ağırlıktaki ilgili ürün grubunun birincil üretimle üretilmesi sonucunda salınan ortalama CO₂ kg/kg miktarıdır. Bu değer her ürün grubu için sektörden ve literatür incelemelerinden sağlanmıştır ve sabit bir değerdedir.

Birincil üretim ile salınan gaz miktarı (CO₂ kg/kg)(x10): Birincil üretim işlemleri sırasında çevreye yayılan toplam CO₂ gazı miktarıdır. Kriterin denklemi $x10 = x7 * x9$ şeklindedir.

Gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı (x11): Atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde salınacak gaz miktarının, aynı kaynağın birincil üretim ile üretilmesinde salınacak gaz miktarına göre kazanç/kayıp etkisini göstermektedir. Bir başka ifadeyle ilgili kriter, geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünün birincil üretimle üretilmiş ürüne göre gaz salınımı açısından çevreye olan etkisini göstermektedir. Değişkenin alacağı değer $0 < x11 < 1$ olması, geri dönüşüm faaliyetinin birincil üretime göre çevreye yaydığı gaz miktarı açısından avantajlı olduğunu ifade etmektedir. Kriterin denklemi $x11 = \text{IF } (x3=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 - ((x8+x10)/(x3*x9))$ şeklindedir.

Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg) (x12): Geri dönüşüm işlemleri sırasında tüketilen toplam enerji miktarıdır. Kriterin denklemi $x12 = x5 * B$ şeklindedir. (B: birim ağırlıktaki ilgili ürün grubu tarafından geri dönüşüm sürecinde harcanan ortalama enerji (kwh/kg) miktarıdır, ilgili veri sektörden ve literatür incelemelerinden sağlanmıştır ve sabit bir değerdir. Bu değerler Bölüm 4.4.2, Bölüm 4.5.2, Bölüm 4.6.2 ve Bölüm 4.7.2’de yer almaktadır.)

Birim enerji tüketim miktarı (x13): Birim ağırlıktaki ilgili ürün grubunun birincil üretimle

üretilmesi sonucunda tüketilen birim enerji miktarıdır. Bu değer her ürün grubu için sektörden ve literatür incelemelerinden sağlanmıştır ve sabit bir değerdedir.

Birincil üretim ile harcanan enerji miktarı (kwh/kg) (x14): Birincil üretim işlemleri sırasında harcanan toplam enerji miktarıdır. Kriterin denklemi $x14 = x7 * x13$ şeklindedir.

Enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı (x15): Atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde tüketilecek enerji miktarının, aynı kaynağın birincil üretim ile üretilmesinde harcanacak enerji miktarına göre kazancını/kaybını göstermektedir. Bir başka ifadeyle ilgili kriter, geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünün birincil üretimle üretilmiş ürüne göre enerji tüketimi açısından çevresel etkisini göstermektedir. Değişkenin alacağı değer $0 < x15 < 1$ olması, geri dönüşüm faaliyetinin birincil üretime göre enerji tüketimi açısından avantajlı olduğunu ifade etmektedir. Kriterin denklemi $x15 = \text{IF } (x3=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 - ((x12 + 14) / (x3 * x13))$ şeklindedir.

Su Tüketim Miktarı (litre/kg) (x16): Geri dönüşüm işlemlerinde tüketilen toplam su miktarıdır. Kriterin denklemi $x16 = x5 * C$ şeklindedir. C: ilgili ürün grubu tarafından geri dönüşüm sürecinde tüketilen ortalama su miktarıdır (litre/kg), ilgili veri sektörden ve literatür incelemelerinden sağlanmıştır. Bu değerler Bölüm 4.4.2, Bölüm 4.5.2, Bölüm 4.6.2 ve Bölüm 4.7.2’de yer almaktadır.

Birim su tüketim miktarı (x17): Birim ağırlıktaki ilgili ürün grubunun birincil üretimle üretilmesi sonucunda tüketilen birim su miktarıdır. Bu değer her ürün grubu için sektörden ve literatür incelemelerinden sağlanmıştır ve sabit bir değerdedir.

Birincil üretim ile harcanan su miktarı (litre/kg)(x18): Birincil üretim işlemleri sırasında tüketilen toplam su miktarıdır. Kriterin denklemi $x18 = x7 * x17$ şeklindedir. Birincil üretim ile harcanan su miktarına, birim su tüketim miktarı ile geri dönüştürülmeyen (dışarıdan satın alacak malzame miktarı) atık miktarının çarpımıyla ulaşılmaktadır.

Su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı (x19): Atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde ihtiyaç duyulan su tüketim miktarının, aynı kaynağın birincil üretim ile üretilmesinde harcanacak su miktarına göre kazancını/kaybını göstermektedir. Bir başka ifadeyle ilgili kriter, geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünün birincil üretimle üretilmiş ürüne göre su tüketimi açısından çevreye olan etkisini göstermektedir. Değişkenin alacağı değer $0 < x19 < 1$ olması, geri dönüşüm faaliyetinin birincil üretime göre su tüketimi açısından avantajlı olduğunu ifade etmektedir. Kriterin denklemi $x19 = \text{IF } (x3=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 - ((x18 + x16) / (x3 * x17))$ şeklindedir.

Çalışmada yer alan ekonomik sürdürülebilirlik performansı ise toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı ile karlılık ekonomik kazancı veya kaybı isimli değişkenlerle ele alınmıştır. Çevresel boyutlarda olduğu gibi ekonomik sürdürülebilirliğin iki kriteri de ilgili malzemeyi elde etmek üzere geri dönüşümün sebep olacağı yük ile birincil üretimin sebep olacağı yükün ilişkisiyle oluşturulmuştur. Çalışmada iki ana senaryo planının olması farklı ekonomik alt boyutların olmasını etkilemiştir.

İlk senaryo için ilgili alt kriterler:

Harcama (TL) (x20): İşletmenin geri dönüşüm faaliyetleri için ayırdığı toplam harcamayı göstermektedir. Bu kriterin denklemi $x20 = (a \cdot x5 + B) \cdot x5$ şeklindedir. a: katsayı, B: sabit değerdir. Fonksiyon, her ürün grubu için geri dönüşüm firmalarından alınan verilerin ortalamaları alınarak oluşturulmuştur. Fonksiyonun içeriği her ürün grubu için ayrı şekildedir. Kritere ait denklemler her ürün grubunda ayrı olacak şekilde tezin “EKLER” bölümünde yer almaktadır.

Toplam Maliyet (TL) (x21): İşletmenin geri dönüşüm faaliyetleri için toplam birikimli harcamasını göstermektedir.

Geri dönüştürülmüş birim malzeme maliyeti (TL/kg) (x22): Geri dönüşüm işlemleri sonucunda elde edilen malzemenin birim kg maliyetidir. Kriterin denklemi $x28 = \text{IF}(x5=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } x20/x5$ şeklindedir.

Birincil üretimle üretilmiş malzemenin satış fiyatı (TL) (x23): Birincil üretimle üretilmiş malzemenin birim kilogramının piyasadaki satış fiyatıdır. Değişkenin alacağı değerler her ürün grubu için ayrı olarak denklem şeklinde girilmektedir. Bu denklem geri dönüşüm firmalarının veri tabanı üzerinden miktara bağlı olarak alınan değerler ile türetilmiştir. Kritere ait denklemler her ürün grubunda ayrı olacak şekilde tezin “EKLER” bölümünde yer almaktadır.

Toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı (x24): Atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünde işletmenin katlanacağı toplam maliyetin, birincil üretimle üretilmiş aynı kaynağı satın almasıyla katlanacağı toplam maliyete göre kazancı/kaybı göstermektedir. Bir başka ifadeyle ilgili kriter, geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünün birincil üretimle üretilmiş ürünün satın alınmasına göre maliyet açısından işletme ekonomisine olan etkisini göstermektedir. Değişkenin alacağı değerin $0 < x24 < 1$ olması, geri dönüşüm faaliyetinin birincil üretime göre toplam maliyet açısından avantajlı olduğunu ifade etmektedir. Kriterin denklemi $x24 = \text{IF}(x3=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 -$

$((x7*x23)+(x20)/(x3*x23))$ şeklindedir.

Birim maliyet değişim fırsatı (TL) (x25): Birim kilogram malzeme başına birincil üretimle üretilmiş malzemenin piyasadaki birim satış fiyatı ile geri dönüşüm işlemleri sonucunda elde edilen birim malzemenin maliyeti arasındaki farktır. Kriterin denklemi $x25= x29-x28$ şeklindedir.

Birim hurda değeri (TL) (x26): Oluşan atık miktarına bağlı olarak geri dönüştürülmeyen atıkların birim hurda değerini göstermektedir. Değişkenin alacağı değerler her ürün grubu için ayrı olarak denklem şeklinde girilmektedir. Bu denklem geri dönüşüm firmaları tarafından miktara bağlı olarak alınan değerler tarafından türetilmiştir. (Kritere ait denklemler her ürün grubunda ayrı olacak şekilde tezin “EKLER” bölümünde yer almaktadır.)

Toplam Hurda değeri (TL) (x27): Ortaya çıkan geri dönüştürülmeyen atıkların toplam hurda değerini göstermektedir. Kriterin denklemi $x27= x7*x26$ şeklindedir.

Karlılık ekonomik kaybı veya kazancı (x28): Atıkların (belirli bir geri dönüşüm oranı ile) geri dönüşümünün karlılığa olan etkisinin, işletmenin birincil üretimle üretilmiş aynı kaynağı satın alarak karlılık üzerindeki etkisine göre kazancı/kaybı göstermektedir. Bir başka ifadeyle ilgili kriter, geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünün birincil üretimle üretilmiş ürünün satın alınmasına göre işletmenin karlılığına olan etkisini göstermektedir. Bu kriter, işletmenin mevcut atığını değerlendirmek yerine malzemeyi tekrar dışarıdan satın alması ile kaçırıldığı ekonomik fırsatın (fırsat maliyeti) karlılık üzerindeki etkisini de içermektedir. Kriterin denklemi $x28= 1- (((x7*x23)+(x7*x25)-x27)+(x5*x22)) / ((x3*x23)+(x3*x25)-(x26*x3))$ şeklindedir.

Sürdürülebilirlik gelişimi (x29): Çalışmanın nihai sonucunu gösteren bu kriter, 5 temel kriterin (gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı, enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, su tüketim çevresel kazancı veya kaybı, kar kaybı çevresel kazancı veya kaybı ve toplam maliyet çevresel kazancı veya kaybı) bir fonksiyonudur. Sürdürülebilirlik gelişimi, endüstriyel katı atıkların belirli oranda geri dönüşümünün, işletmenin birincil üretim ile üretilmiş aynı kaynağı satın almasına göre sürdürülebilirlik performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu kriter, endüstriyel atıkları geri dönüştürmenin işletmenin sürdürülebilirlik performansına yapacağı etkinin göstergesidir. Kriterin denklemi $x29= C_{11}*(x11) + C_{15}*(x15)+ C_{19}*(x19)+ C_{24}*(x24)+ C_{28}*(x28)$ şeklindedir. (C_n : İlgili kriterlerin ağırlıkları)

Geri dönüşüm oranı katkısı (x30): Geri dönüşümün sürdürülebilirlik performansı açısından avantajlı olduğu durum altında işletmenin bir sonraki dönemde geri dönüşüm oranındaki artışı ifade etmektedir. Bu kriterin denklemi $x30 = \text{IF}(x29 < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.040$ şeklindedir. Sürdürülebilirlik gelişiminin 0'dan küçük olması geri dönüşümün avantajlı bir durum yaratmadığını gösterir. Bu koşul altında programda geri dönüşümün sürdürülebilirlik performansına olan etkisinin 0'dan küçük olma durumu altında çalışma sonlanacaktır.

Geri dönüşüm teşvik sisteminin incelendiği ikinci senaryo için ilgili alt kriterler:

Bu senaryoda çalışmaya dahil olan bir kısım alt ekonomik parametreler bulunmaktadır. Eklenecek parametreler ilk senaryo planına göre modelin sadece “harcama” kısmını etkilemektedir. Çünkü çalışmada yer alan teşvik sistemi atık sahibi işletmere teknik ve finansal açıdan fırsat sağlamaktadır. Çalışmanın çevresel kriterleri ise aynı kalmaktadır.

Çevre Başarısızlık Maliyeti (TL): Geri dönüşüm faaliyetleri sırasında tüketilen enerji miktarına bağlı olarak ortaya çıkan gaz emisyonundan kaynaklanan maliyettir. Kritere ait denklem geri dönüşüm firmalarının enerji tüketimine bağlı olarak gaz salınımından kaynaklanan cezai işlemlerine göre oluşturulmuştur. (Kritere ait denklemler her ürün grubunda ayrı olacak şekilde tezin “EKLER” bölümünde yer almaktadır.)

Enerji tüketim gideri (TL): Geri dönüşüm sürecinde harcanan toplam enerji miktarının gideridir. Kriterin denklemi: $x12 * D$ şeklindedir. D: Birim enerji tüketimi (kwh) maliyetidir. İlgili veriye geri dönüşüm firmalarının son 6 ay için ödemiş oldukları faturaların ortalaması (birim için) alınarak ulaşılmıştır.

Su tüketim gideri (TL): Geri dönüşüm sürecinde tüketilen toplam su miktarının gideridir. Kriterin denklemi: $x16 * E$ şeklindedir. E: Birim su tüketimi (litre) maliyetidir. İlgili veriye geri dönüşüm firmalarının son 6 ay için ödemiş oldukları faturaların ortalaması (birim için) alınarak ulaşılmıştır.

Diğer üretim giderleri (TL): Süreçteki iş gücü maliyetleri, aynı ürün kalitesine ulaşmak için ihtiyaç duyulan dolgu malzeme maliyetleri, alışımların ortalama maliyetleri ve taşınma maliyetlerinin toplamını içeren işlem maliyetlerinden oluşmaktadır. Değişkenin alacağı değerler her ürün grubu için ayrı olarak denklem şeklinde girilmektedir. Bu denklem geri dönüşüm firması tarafından miktara bağlı olarak alınan değerler tarafından türetilmiştir. (Kritere ait denklemler her ürün grubunda ayrı olacak şekilde tezin “EKLER” bölümünde yer almaktadır.)

4.3. Çalışmanın Varsayımları

Katı atık yönetiminde geri dönüşüm süreçlerinin oldukça geniş uygulama alanlarına sahip olması sebebiyle çalışmada bir takım varsayımlarda bulunulması gerekmiştir. Aşağıdaki tüm varsayımlar çalışmadaki dört ürün grubu (plastik, cam, çelik ve alüminyum) için de ortaktır. Özel olarak her ürün grubuna ait varsayımlar kendi uygulama alanları içinde açıklanmıştır. Kabul edilen genel varsayımlar:

- ❖ Çalışmadaki bütün endüstriyel katı atıklar tehlikesiz atık sınıfında yer almaktadır.
- ❖ İşletmelerin üretim süreçlerinde oluşan atıklarını geri dönüştürmek yerine satın alacakları malzemelerin tamamının birincil üretimle üretilme koşulu vardır.
- ❖ Ürün gruplarına dair yapılan çalışma sonuçlarının anlamlı ve karşılaştırılabilir olması için hatalı parça akışı birim kilogramlık malzeme üzerinden yürütülmüş ve ilgili tüm veriler kilogram başına girilmiştir.
- ❖ Uygulamada çevresel kriterlerden olan sera gazı yayılımı için Kyoto Protokolü'nde belirtilen 6 çeşit gaz içinden sadece CO₂ salınımına ait veriler kullanılmıştır. Çünkü CO₂ gazı, diğer gazlara oranla çok daha yüksek miktarlarda salınımına sahiptir ve çevreye verdiği zarar açısından en tehlikeli gaz olarak görülmektedir (Kyoto Protocol, 2005).
- ❖ Mevcut atık miktarı (x1), programın başlangıç döneminde 100 birim (kg) atık malzeme girişi olacak şekilde planlanmıştır.
- ❖ Çalışmanın başlangıcında mevcut geri dönüşüm oranı (x4) %30 (0.30) olarak kabul edilmiştir. Bu varsayım, “endüstriyel katı atık” olarak sınıflandırılan dört ürün grubunun ürün değerini koruyacak şekilde ülkemizdeki geri dönüşüm oranlarının ortalamasına dayanmaktadır. Literatürde sürdürülebilir kalkınma ile ilişkili olarak döngüsel ekonominin potansiyel etkilerini çalışan bazı araştırmacılar, başlangıç geri dönüşüm oranlarına ilişkin tahminleme ve kabulde bulundukları bölgenin veya ülkenin geri dönüşüm oranlarını alarak araştırmalarını sürdürmüşlerdir.
- ❖ Çalışmadaki “geri dönüşüm oranı katkısı” (x30) değişkeni geri dönüşümün avantajlı olduğu her iki ay için (t=1) geri dönüşüm oranını bir önceki döneme göre ortalama %4 oranında arttırmaktadır. Bu varsayımın dayanağı işletmelerin sürdürülebilirlik raporları içinde yer alan “Atık yönetimi verileri”dir. İncelenen sürdürülebilirlik raporlarına göre birçok firmanın atık yönetiminde geri dönüşüm

oranlarında her sene %20-24 oranlarında artış olduğu ya da gelecek dönemlerde bu oranları hedef aldığı görülmüştür.

4.4. Plastik Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları

Plastikler, sahip olduğu önemli fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı farklı ihtiyaçlara cevap verecek şekilde birçok sektöre nüfus etmiş malzeme grubudur. Endüstriyel ürün olarak özellikle beyaz eşya ve otomotiv endüstrisinde plastiğin yoğun olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu ürün gruplarında kullanılan plastiğin onlarca farklı çeşidi bulunmaktadır. Bu sebeple plastiklerin farklı çeşitlerde ve özelliklerde olması, çalışmaya özel kısıtlar getirilme ihtiyacını doğurmuştur.

4.4.1. Plastik Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları

Plastik atıklara yönelik gerçekleştirilen uygulamada bir takım varsayımlarda bulunulmuştur. Bunlar:

1. Plastiğin uygulama alanı detaylı literatür incelemeleri, sektör raporları ve uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucunda uygulama alanı termoplastik çeşitlerinden PP (Polipropilen) ve ABS (Akrilonitril Bütadiyen Stiren) olarak daraltılmıştır. İki termoplastik çeşidinin seçilmesinde, özellikle endüstriyel ürünlerde çoğu zaman oran olarak en fazla kullanılan iki çeşit olması etkili olmuştur (American Chemistry Council, 2016; TPA Plast Global Engineering; Feng vd., 2020).
2. Plastik geri dönüşüm faaliyetlerinde, ürün grubuna dair getirilen özelleştirme sebebiyle yöntem açısından kısıta gidilme ihtiyacı doğmuş ve termoplastiklerin geri kazanımı için mekanik geri dönüşüm yöntemi temel alınmıştır. Özellikle PP (Storm, 2017; Lin vd., 2020; Schyns & Shave, 2021) ve ABS termoplastikleri (Rahimi vd., 2014; PAGEV, 2015; Adam vd., 2017) mekanik geri dönüşüm potansiyeli çok yüksek olan malzeme gruplarıdır. Bu malzemelerin geri dönüşüm sürecinde mekanik geri dönüşümün özelliği gereği polimerlerin molekül yapısında bozunma yaşanmadan süreç tamamlanmaktadır (Wäger & Hischier, 2015; Plastics Europe, 2020; Davidson vd., 2021). Bu sebeple termoplastikler mekanik geri dönüşümle yüksek miktarlarda ve neredeyse kalite kaybı yaşanmadan geri kazanılmaktadır.

4.4.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Plastik Ürün Grubu)

Enerji tüketim miktarı, birincil üretim ile harcanan enerji miktarı, salınan gaz miktarı (CO₂), birincil üretim ile salınan gaz miktarı, su tüketim miktarı ve birincil üretim ile harcanan su miktarı verileri literatürdeki mevcut uygulamalardan ve sektördeki dört firmadan (A, B, C ve D) sağlanmıştır. Kriterlere ait ulaşılan birincil (sektörden) ve ikincil veriler (literatürden) aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 11: Plastik Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Birincil Üretimde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Kaynaklar
388 kwh/t (1.4 MJ/t) (0.388 kwh/kg)		Raadal vd. (2008)
333 kwh/t (1.20 GJ/t) (0.333 kwh/kg)		Ren (2012)
372 kwh/t (1.34 GJ/t) (0.372 kwh/kg)	1.056 kwh/kg	Liljenström & Finnveden (2015)
Ort. 305 kwh/t (0.305 kwh/kg)		Gu vd. (2017)
	1.000 kwh/kg	D Firması (2020)
	0.833 kwh/kg	The Association of Plastic Recyclers (2020)
1.19 GJ/t (0.330 kwh/kg)	1.116 kwh/kg	A Firması (2021)
0.434 kwh/kg	1.260 kwh/kg	B Firması (2021)
0.370 kwh/kg	0.973 kwh/kg	C Firması (2021)
Ort= 0.361 kwh/kg	Ort=1.040 kwh/kg	

Tablo 12: Plastik Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri

Geri Dönüşümde Sera Gazı Salınımı (CO2 kg/kg)	Birincil Üretimde Sera Gazı Salınımı (CO2 kg/kg)	Kaynaklar
0.27 kg/kg	1.30 kg/kg	Benner vd. (2007)
0.315 kg/kg		Helmann vd. (2015)
0.21 kg/kg	1 kg/kg	Gradus vd. (2017)
0.376 kg/kg	2.052 kg/kg	Storm (2017)
0.354 kg/kg	2.008 kg/kg	
0.38 kg/kg	1.80 kg/kg	The Association of Plastic Recyclers (2018)
0.40 kg/kg	1.92 kg/kg	Khoo (2019)
0.40 kg/kg	1.92 kg/kg	Jahnke vd. (2020)
0.56 kg/kg	1.68 kg/kg	The Association of Plastic Recyclers Report(2020)
0.53 kg/kg	1.59 kg/kg	
Ort= 0.380 kg/kg	Ort=1.70 kg/kg	

Tablo 13: Plastik Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Su Tüketimi Miktarı (litre/kg)	Birincil Üretimde Su Tüketim Miktarı (litre/kg)	Kaynaklar
0.88 lt/kg	%33=1.170 litre/kg	The Association of Plastic Recyclers (2018, 2020)
0.87 lt/kg	1.157 litre/kg	
1.03 lt/kg	1.370 litre/kg	
1 lt/kg		Benavides vd. (2018)
	1.360 litre/kg	A Firması (2021)
Ort= 0.945 lt/kg	Ort=1.360 litre/kg	

Modeldeki birçok kritere ait değerler beş farklı plastik geri dönüşüm firmasından sağlanan verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. “Ayrıştırma oranı”, yapılan uzman görüşmeleri neticesinde plastikler için %85 oranıyla kabul edilmiştir. Modeldeki “birim hurda değeri” ve “birincil üretimle üretilmiş malzemenin satış fiyatı” değişkenlerine firmaların ortak kullandığı veri tabanı üzerinden son 6 aya ait verilerin ortalaması alınarak ulaşılmıştır. Bu veriler plastik sektörünün genel pazarı hakkında bilgi verecek niteliktedir.

Çalışmada Senaryo 1a ve 1b’de geri dönüşüm maliyetlerini gösteren “harcama” değişkenine ait veriler beş geri dönüşüm firmasından ölçek ekonomisini hesaba katarak sağlanmıştır. Toplanan bu verilere ilişkin denklemler tek değişkenli regresyon analizi ile

oluşturulmuştur. Diğer taraftan Senaryo 2’de kullanılan aynı “harcama” değişkeni farklı girdilerin fonksiyonu şeklinde yer almış olup, bu fonksiyonda etkisi olan “çevre başarısızlık maliyeti” ile “diğer üretim giderleri” için de regresyon analizi yapılarak ilgili denklemlere ulaşılmıştır. İlgili tüm veriler “EKLER” bölümünde gösterilmiştir.

4.4.3. Plastik Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi

Atık sahibi işletmelerin geri dönüşüm kararı vermesinde etkili olan ilgili alt kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amaçlanarak modeldeki beş kriter için ağırlıklandırma yapılmıştır. Bu ağırlıklar sadece Senaryo 1 veri girişinde ilgili kriterler için kullanılmıştır. Plastik geri dönüşümü faaliyetinde bulunan firmalarla yapılan görüşmelerde 10 uzman karar verici ile birebir BWM uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulamada, çalışmanın nihai sonucuna götüren operasyonel yükü belirleyen 5 alt boyut (*enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı, gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı, toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı ve karlılık kazancı veya kaybı*) listelenmiş ve BWM’nin adımlarına bağlı kalacak şekilde her uzman tarafından süreç bağımsız yürütülmüştür.

Adım 1: Tüm kriterlerin bir listesi oluşturulmuştur.

C1: *enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı*

C2: *su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı*

C3: *gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı*

C4: *toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı*

C5: *karlılık kazancı veya kaybı*

Adım 2: Her karar verici (uzman) listelenen kriterlerden en önemli ve önemsiz olana karar vermiştir.

Adım 3: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en iyi kriterin diğer kriterlere göre önemini gösterecek şekilde 1 ile 9 arasında değer atanmıştır. Bu aşamada Tablo 9’daki BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği’nden yararlanılmıştır.

Tablo 14: En İyi Kritere Göre Değerlendirme (Plastik Ürün Grubu)

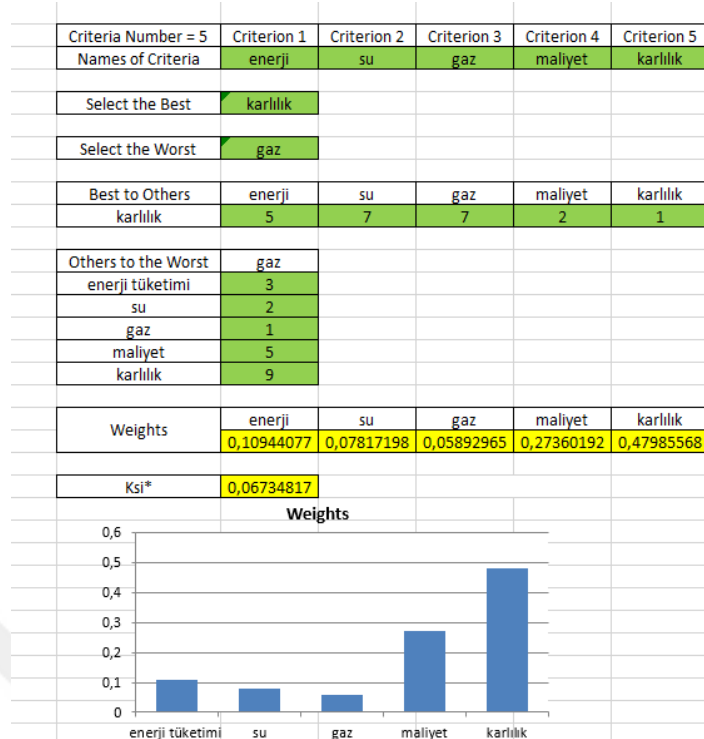
Karar Vericiler	En İyi	C1	C2	C3	C4	C5
KV ₁	C5	5	7	7	2	1
KV ₂	C4	5	5	9	1	3
KV ₃	C4	3	7	9	1	2
KV ₄	C4/5	3	5	9	1	1
KV ₅	C5	3	9	5	2	1
KV ₆	C5	5	9	7	3	1
KV ₇	C4/5	3	5	9	1	1
KV ₈	C4	5	9	9	1	2
KV ₉	C4	3	9	7	1	2
KV ₁₀	C4/5	3	9	9	1	1

Adım 4: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en kötü kritere göre önemini gösterecek şekilde 1 ile 9 arasında değer atanmıştır. Bu aşamada da Tablo 15'deki BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği'nden yararlanılmıştır.

Tablo 15: En Kötü Kritere Göre Değerlendirme (Plastik Ürün Grubu)

	KV ₁	KV ₂	KV ₃	KV ₄	KV ₅	KV ₆	KV ₇	KV ₈	KV ₉	KV ₁₀
Kriterler	En kötü:C3	En kötü:C3	En kötü:C3	En kötü:C3	En kötü:C2	En kötü:C2	En kötü:C3	En kötü:C2/3	En kötü:C2	En kötü:C2/3
C1	3	5	4	5	5	5	5	5	5	5
C2	2	5	3	3	1	1	3	1	1	1
C3	1	1	1	1	3	3	1	1	2	1
C4	5	9	9	9	7	5	9	9	9	9
C5	9	7	5	9	9	9	9	7	7	9

Adım 5: Optimal ağırlıklar elde edilmiştir. Bu aşamada BWM'ye ait doğrusal fonksiyonlardan yararlanılmaktadır (Rezaei vd., 2016). Doğrusal fonksiyon ifadelerinin yer aldığı Excel çözücü dosyası Rezaei tarafından oluşturularak, <https://bestworstmethod.com/software/> aracılığıyla doğrudan erişim için sunulmaktadır. Aşağıda KV₁'den alınmış bilgilerin Excel'e işlenmiş örneği bulunmaktadır.



Şekil 15: BWM Doğrusal Çözümüne Ait Excel Görüntüsü

Programdan elde edilen ağırlık çıktıları, her karar verici için ayrı hesaplanarak aşağıdaki tabloya işlenmiştir.

Tablo 16: Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Plastik Ürün Grubu)

	C1	C2	C3	C4	C5	CR
KV₁	0.1094	0.0781	0.0589	0.2736	0.4798	0.0673
KV₂	0.1225	0.1225	0.0444	0.5062	0.2042	0.1065
KV₃	0.1711	0.0733	0.0440	0.4547	0.2567	0.0586
KV₄	0.1382	0.0829	0.0363	0.3711	0.3711	0.0436
KV₅	0.1657	0.0432	0.0994	0.2485	0.4430	0.0540
KV₆	0.1264	0.0465	0.0903	0.2107	0.5258	0.1064
KV₇	0.1382	0.0829	0.0363	0.3711	0.3711	0.0436
KV₈	0.1165	0.0429	0.0647	0.4844	0.2913	0.0981
KV₉	0.1705	0.0444	0.0730	0.4560	0.2558	0.0556
KV₁₀	0.1435	0.0377	0.0478	0.3853	0.3853	0.0453
W_j	0.1402	0.0654	0.0595	0.3762	0.3584	0.0679

Tablo 16'ya göre genel tutarlılık oranının 0.0679 çıkmasıyla, sonucun 0'a oldukça yakın olduğu görülmektedir. Rezaei'nin (2015, 2016) çalışmalarında yer aldığı ve kabul ettiği şekliyle sonuçlar oldukça tutarlı ve güvenilirdir. Uygulama sonucunda kriterlerin

ortalama ağırlıkları;

C1 (*enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı*) = **0.1402**

C2 (*su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı*) = **0.0654**

C3 (*gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı*) = **0.0595**

C4 (*toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı*) = **0.3762**

C5 (*karlılık kazancı veya kaybı*) = **0.3584** olarak belirlenmiştir.

Bu doğrultuda plastik ürün grubu için sürdürülebilirlik gelişimine etki eden 5 boyuttan en yüksek ağırlığa sahip kriter 0.3762 (%38) oranıyla toplam maliyet olarak belirlenmiştir. Diğer kriterler ise sırasıyla 0.3584 (%36) oranıyla karlılık, 0.1402 (%14) oranıyla enerji tüketimi ve 0,0595 (%6) su tüketimi olarak tespit edilirken, en düşük ağırlığa sahip olan kriter ise 0.0595 (%5) oranıyla gaz salınımı olarak ortaya çıkmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde en fazla etkiye yaklaşık %73 oranıyla ekonomik kriterlerin sebep olacağı görülmektedir.

Kriter ağırlıklarının belirlenmesinden sonraki adımda programa veri girişi yapılmıştır. Tüm değişkenlere ait toplanan veriler ve elde edilen fonksiyonlar STELLA Programına girilmiştir (EK 1).

4.4.4. Plastik Ürün Grubuna Yönelik Bulgular

Çalışmada her ürün grubuna yönelik üç farklı senaryo incelenmektedir. Bunlardan Senaryo 1a ve Senaryo 1b, atık sahibi işletmelerin geri dönüşüm firmaları aracılığıyla yönettiği geri dönüşüm sürecinin sürdürülebilirlik performansına etkilerini değerlendirmektedir. Senaryo 2 ise birçok ülkede örnekleri olan geri dönüşüm teşvik sisteminin ülkemizde uygulanması durumunda sürdürülebilirlik performans sonuçlarını incelemektedir. Bu senaryoda yer alan teşvik sisteminde; devletin ilgili kanalları aracılığıyla atık sahibi işletmeler, geri dönüşüm şirketlerinin kaynaklarını (tesis, ekipman) sadece kullanım dönemindeki işletim maliyetlerini ödeyerek kullanabilmektedir.

Senaryo 1a için model dört sene çalıştırılmış ve her bir zaman birimi iki aylık dönem kapsamıştır. Modelin uzun çalıştırılmasının sebebi, “mevcut geri dönüşüm oranı”nın dönem içerisinde %100 olma durumu altında çalışmanın incelenmek istenmesidir.

Senaryo 1b ve Senaryo 2 ise yine her t zamanı iki ay olacak şekilde, toplamda 2 sene için çalıştırılmıştır. Buradaki en önemli etki geri dönüşüm teşvik sistemlerinin 2 seneyi aşmayacak şekilde organize edilmesidir ve bu durum doğrudan Senaryo 2'yi etkilemektedir. Diğer taraftan iki senaryonun uygulama sonucunda karşılaştırılma ihtiyacı Senaryo 1b için de benzer kabulü gerektirmiş ve sonuçlar iki yıl sürecinde değerlendirilmiştir.

Üç senaryo altında yürütülen uygulamalara yönelik program çıktıları ilgili her alt bölümde tablolar şeklinde sunulmuştur.

4.4.4.1. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular

Aşağıda plastik malzemeli katı atıkların dört senelik periyotundaki sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerleri BWM ile ulaşılan şekliyle uygulanmıştır.

Tablo 17: Plastik Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.15	0.20	0.23	0.09	0.12	0.15
2	0.17	0.22	0.26	0.10	0.14	0.17
3	0.19	0.25	0.30	0.12	0.16	0.19
4	0.21	0.27	0.33	0.13	0.17	0.21
5	0.23	0.30	0.36	0.14	0.19	0.23
6	0.25	0.33	0.39	0.15	0.21	0.25
7	0.27	0.35	0.42	0.16	0.22	0.27
8	0.29	0.38	0.45	0.18	0.24	0.29
9	0.31	0.40	0.48	0.19	0.26	0.31
10	0.33	0.43	0.51	0.20	0.27	0.34
11	0.35	0.46	0.54	0.21	0.29	0.34
12	0.37	0.48	0.57	0.23	0.31	0.36
13	0.39	0.51	0.61	0.24	0.32	0.38
14	0.41	0.54	0.64	0.25	0.34	0.40
15	0.43	0.56	0.67	0.26	0.35	0.42
16	0.45	0.59	0.70	0.27	0.37	0.44
17	0.47	0.61	0.73	0.29	0.39	0.46
18	0.49	0.64	0.76	0.30	0.41	0.48
19	0.50	0.65	0.78	0.31	0.41	0.50
20	0.50	0.65	0.78	0.31	0.41	0.51
21	0.50	0.65	0.78	0.31	0.41	0.51
22	0.50	0.65	0.78	0.31	0.41	0.51
23	0.50	0.65	0.78	0.31	0.41	0.51
Final	0.50	0.65	0.78	0.31	0.41	0.51

Tablo 18: Plastik Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.148	0.496
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.152	0.510
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.123	0.413
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.092	0.305
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.196	0.653
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.233	0.776

Plastik ürün grubuna dair model çıktıları yukarıdaki tablolarda gösterilmiştir. Bu tablolardaki verilerin yorumlanmasında temel husus; işletmelerin aynı kaynağı dışarıdan satın alması ile geri dönüşümle kazanması arasındaki çeşitli faktörlerdeki farkın kendi ekonomik durumuna ve çevreye olan etkilerini göstermek olduğu bilinmelidir. Senaryo 1a sonucunda benzer plastik malzemeli atıklara sahip işletmeler, geri dönüşümün potansiyel etkileri doğrultusunda ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşmaktadır.

Çevresel sürdürülebilirlik performans sonuçları ilk olarak değerlendirildiğinde plastik atıklar için geri dönüşümün avantajlı olduğu ve plastik geri dönüşümün çevresel açıdan kritik iyileştirmeler yapacağı görülmüştür. Plastik katı atık geri dönüşümünün su tüketimi açısından başlangıçta %9.2 olan katkısı çalışma dönemi sonunda %30.5'e, enerji tüketimi açısından başlangıçta %19.6 olan katkısı çalışma dönemi sonunda %65.3'e ve son olarak gaz salınımı açısından başlangıçta %23.3 katkısı çalışma dönemi sonunda %77.6'ya ulaşmıştır. Bu veriler aynı zamanda plastik endüstriyel atık geri dönüşümünün birincil üretimle üretilmiş malzemenin satın alınmasına göre su tüketimi açısından %31, enerji tüketimi açısından %65 ve gaz salınımı açısından %78 oranlarında çevreye verilen zararlı etkinin önlenebileceğini göstermektedir.

Bir diğer önemli konu ekonomik sürdürülebilirlik performansı üzerine olası etkilerin incelenmesidir ve hem toplam maliyet hem de karlılık üzerinde geri dönüşümün oldukça avantajlı durum yarattığı ifade edilebilir. İlk olarak plastik atıkların belirli bir oranda geri dönüşümünde işletmenin katlanacağı toplam maliyetin, birincil üretimle üretilmiş aynı kaynağı satın almasıyla katlanacağı toplam maliyete göre başlangıçta %12.3 olan kazancı

dönem sonunda %29 artışla %41.3 oranına ulaşmaktadır. Bu oranlar, geri dönüşüm faaliyetlerinin birincil üretimle üretilmiş ürünün satın alınmasına göre işletmeye verdiği ekonomik yükün %12.3-41.3 oranlarında azaltılabileceği şeklinde de yorumlanabilir. Fırsat maliyeti ve atıkların hurda değeri tarafından etkilenen karlılık değişkeninin ise dönem içerisinde %15.2 oranından %51 oranlarına çıkacağı görülmektedir. %51'e varan oran, plastik malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşümle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan olumlu etkisini göstermektedir.

Çalışmanın nihai amacını gösteren “sürdürülebilirlik gelişimi” değişkeni, işletmeleri geri dönüşüme teşvik edecek anahtar bir kriter olarak tanımlanmıştır. Genel çerçevede plastik geri dönüşümün ilgili ekonomik ve çevresel faktörler açısından kurumlara avantajlı durum yarattığı çalışmanın önemli bir sonucudur. Modelin çalıştırılması ile ulaşılan genel sürdürülebilirlik gelişimi değerinin 1'den küçük olacak şekilde 0.148 ve 0.496 arasında kalması, geri dönüşüm faaliyetinin sürdürülebilir tedarik zinciri üzerinde olumlu etki yarattığının en büyük göstergesidir. İşletmelerin üretim kaynağını satın almaları yerine aynı kaynağa mevcut atıklarını geri dönüştürerek sahip olmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %50 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

Bu sonuçlar uygulamacıların sürdürülebilir kalkınma hedeflerini atık yönetimi açısından belirleyebilmelerine, sürdürülebilirlik planlarını/programlarını hazırlayabilmelerine ve uluslararası faaliyetlerde, ihalelerde, anlaşmalarda gereklilik haline gelen sürdürülebilirlik raporlamalarında rehberlik edebilmesine destek olacaktır.

4.4.4.2. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular

Aşağıda plastik malzemeli katı atıkların iki senelik dönem içerisinde sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 19: Plastik Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.16	0.20	0.23	0.09	0.12	0.15
2	0.18	0.22	0.26	0.10	0.14	0.17
3	0.20	0.25	0.30	0.12	0.16	0.19
4	0.22	0.27	0.33	0.13	0.17	0.21
5	0.24	0.30	0.36	0.14	0.19	0.23
6	0.26	0.33	0.39	0.15	0.21	0.25
7	0.28	0.35	0.42	0.16	0.22	0.27
8	0.30	0.38	0.45	0.18	0.24	0.29
9	0.32	0.40	0.48	0.19	0.26	0.31
10	0.34	0.43	0.51	0.20	0.27	0.34
11	0.36	0.46	0.54	0.21	0.29	0.36
Final	0.38	0.48	0.57	0.23	0.31	0.38

Tablo 20: Plastik Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.156	0.385
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.152	0.376
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.123	0.305
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.092	0.226
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.196	0.483
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.233	0.575

Bu sonuçların senaryo 1a'den farklılaşmasının temel sebebi sürdürülebilirlik gelişimini etkileyen beş alt kriterin ağırlığından ve program çalışma zamanının yarıya düşürülmesinden kaynaklanmaktadır. Senaryo 1b, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performans boyutlarının ağırlığını eşit kabul etmekte ve bu şartlar altında senaryoyu test etmektedir. Ulaşılan sonuçlara göre, plastik atık geri dönüşümü işletmenin toplam maliyeti üzerinde çalışma dönemi boyunca %30.5, karlılığı üzerinde %37.6 daha fazla katkı sağlamaktadır. Genel sürdürülebilirlik performansını gösteren sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde ise plastik geri dönüşümün birincil üretime göre etkisi %38.5 daha fazladır.

Senaryo 1b sonuçları farklı ürün gruplarındaki geri dönüşümün potansiyel etkilerini kıyaslayarak karşılaştırabilmesi ve farklılığın ortaya koyulabilmesi açısından önemlidir. Dört ürün grubunun geri dönüşümünün sürdürülebilirlik gelişimi üzerindeki farklı etkilerini araştırma amacıyla yapılan bu test, Bölüm 4.8 'de detaylı tartışılmaktadır.

4.4.4.3. Plastik Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular

Aşağıda iki sene boyunca plastik sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin işletmelerin sürdürülebilirlik performansına yönelik sonuçları ortaya koyulmuştur. Bu uygulamada Senaryo 1b'de olduğu gibi sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 21: Plastik Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.19	0.20	0.23	0.09	0.19	0.22
2	0.22	0.22	0.26	0.10	0.22	0.25
3	0.24	0.25	0.30	0.12	0.24	0.28
4	0.27	0.27	0.33	0.13	0.27	0.31
5	0.29	0.30	0.36	0.14	0.29	0.34
6	0.32	0.33	0.39	0.15	0.32	0.37
7	0.34	0.35	0.42	0.16	0.34	0.40
8	0.37	0.38	0.45	0.18	0.37	0.43
9	0.39	0.40	0.48	0.19	0.40	0.46
10	0.42	0.43	0.51	0.20	0.42	0.49
11	0.44	0.46	0.54	0.21	0.44	0.52
Final	0.47	0.48	0.57	0.23	0.47	0.55

Tablo 22: Plastik Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.191	0.469
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.233	0.549
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.191	0.469
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.092	0.226
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.196	0.483
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.233	0.575

Ülkemizde teşvik sisteminin uygulanması sonucunda plastik atıklara yönelik model çıktıları yukarıdaki tablolarda yer almaktadır. Bu verilerin yorumlanmasında, işletmelerin yalnızca işletim maliyetlerini ödeyerek geri dönüşüm firmalarının tesisinden ve ekipmanlarından yararlanabildikleri sistemin etkileri olduğu unutulmamalıdır. Senaryo 2 sonucunda plastik sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin potansiyel etkileri doğrultusunda hükümetin karar birimlerinin ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşılmıştır.

Geri dönüşüm teşvik sisteminin özünde teknik ve maddi teşviklere sahip olması, plastik atıklara sahip işletmelerin ekonomik performansını etkileyecek bir durum yaratmaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik performansı açısından sonuçlar incelendiğinde işletmeler ilk dönemde toplam maliyetinde %19'a varan iyileştirme sağlarken, iki sene teşvikten yararlanmaları sonucunda %47'e varan kazanç elde edebilmektedir. Fırsat maliyetinin dahil edildiği karlılık değişkeninde ise bu oran %55 seviyelerine ulaşmaktadır. İki sene sonunda %55'e varan oran, plastik malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşüm teşvik sisteminin desteğiyle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Çalışmanın amacını gösteren ve anahtar kriter olarak tanımlanan “sürdürülebilirlik gelişimi” açısından plastik atık sahibi işletmelerde geri dönüşüm teşvik sisteminin uygulanmasıyla işletmelerin sürdürülebilirlik performansı iki sene içinde %47 oranına çıkabilecektir. İşletmelerin üretim kaynağını satın almaları yerine aynı kaynağa teşvik sisteminden yararlanarak ulaşmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %47 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir. İşletmelerin plastik atıklarını geri dönüştürebilmeleri için bu teşvik sisteminden yararlanabiliyor olması ekonomik performanslarını geliştirilmesiyle birlikte sürdürülebilirlik performansı açısından oldukça büyük öneme sahiptir.

4.5. Cam Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları

Cam, farklı renklerde farklı çeşitlerde özellikle inşaat yapılarında, mobilyalarda, ulaşım endüstrilerinde kullanılan önemli bir malzemedir. Camın içeriğinde bulunan %70 silis kumu sayesinde cam geri dönüşümü oldukça kolaydır ve bu malzeme neredeyse sonsuz kere geri dönüştürebilme özelliğe sahiptir.

4.5.1. Cam Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları

Cam atıklara yönelik gerçekleştirilen uygulamada bir takım varsayımlarda bulunulmuştur. Bunlar:

1. Uygulamadaki camlar, camın üç renk çeşidinden biri olan şeffaf (çakmaktaşı) renkte olanlardır. Bu camlar, endüstriyel ürünlerde en yaygın kullanılan (Khazhiakhmetova vd., 2020), en fazla uygulama alanına sahip olan ve genellikle cam üreticileri tarafından en fazla üretilen çeşittir (Larsen vd., 2009; Peng vd., 2019).
2. Bir diğeri araştırmadaki camların sadece lamine cam sınıfında yer alan grubu için uygulama yapılmıştır. Lamine camlar, otomobil gibi özellikle ulaşım kanallarındaki ürünler için sağlam ve yüksek güvenlik özelliklerine sahip olup kolay geri dönüşüm işlemine girebilen çeşittir (Farel vd., 2013; Swain vd., 2015; Soos vd., 2021).
3. Cam geri dönüşüm sürecine giren ürünler ortalama 10-30 mm kalınlığında ve kirlilik içermeyen küçük camlardan oluşmaktadır.

4.5.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Cam Ürün Grubu)

Enerji tüketim miktarı, birincil üretim ile harcanan enerji miktarı, salınan gaz miktarı (CO₂), birincil üretim ile salınan gaz miktarı, su tüketim miktarı ve birincil üretim ile harcanan su miktarı verileri literatürdeki mevcut uygulamalardan ve sektördeki dört firmadan (İ, J, K ve L) sağlanmıştır. Kriterlere ait ulaşılan birincil (sektörden) ve ikincil veriler (literatürden) aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 23: Cam Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Birincil Üretimde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Kaynaklar
522 kwh/t (0.522 kwh/kg)	720 kwh/t (0.720 kwh/kg) (%25-30 tasarruf)	FPFIS (2012)
383 kwh/t (0.383 kwh/kg)		Consorzio Recupero Vetro (CoReVe), (2016)
	0.520 kwh/kg	K Firması (2019)
0.450 kwh/kg	0.600 kwh/kg-0.500 kwh/kg	Leblanc (2019)
0.430 kwh/kg	0.580 kwh/kg	J Firması (2021)
0.440 kwh/kg	0.585 kwh/kg	L Firması (2021)
Ort= 0.445 kwh/kg	Ort=0.600 kwh/kg	

Tablo 24: Cam Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri

Geri Dönüşümde Gaz Salınım Miktarı (kg/kg)	Birincil Üretimde Gaz Salınım Miktarı (kg/kg)	Kaynaklar
0.575 kg/kg (575 kg/t)	0.815 kg/kg (815 kg/ton -%25 tasarruf)	British Glass Recycling (2003)
0.60 kg/kg (600 kg/t)		Larsen vd. (2009)
0.50 kg/kg (500 kg/t)	0.9 kg/kg (900 kg/t)	Hilmann vd. (2015)
0.56 kg/kg (560 kg/t)	0.70 kg/kg (700 kg/t)	Lin (2018)
0.530 kg/kg	0.665 kg/kg	İ Firması (2020)
0.575 kg/kg (575 kg/t)	0.82 kg/kg (820 kg/t)-%30 tasarruf	J Firması (2021)
0.52 kg/kg (520kg/t)	0.84 kg/kg (835 kg/t)- %20 tasarruf	K Firması (2021)
0.506 kg/kg (506 kg/t)	0.779 kg/kg (779 kg/t)	L Firması (2021)
Ort=0.55 kg/kg	Ort=0.79 kg/kg	

Tablo 25: Cam Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Su Tüketim Miktarı (lt/kg)	Birincil Üretimde SuTüketim Miktarı (lt/kg)	Kaynaklar
0.200 lt/kg	0.400 lt/kg	Landi vd. (2019)
	0.450 lt/kg	İ Firması (2020)
0.250 lt/kg	500 lt/kg	J Firması (2021)
0.200 lt/kg	0.400 lt/kg	K Firması (2021)
0.250 lt/kg	0.500 lt/kg	L Firması (2021)
Ort= 0.225 lt/kg	Ort=0.450 lt/kg	

Modeldeki birçok kritere ait değerler dört cam geri dönüşüm firmasından sağlanan verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. “Ayrıştırma oranı”, uzmanlarla yapılan görüşmeler neticesinde %95 oranıyla kabul edilmiştir. Modeldeki “birim hurda değeri” ve “birincil üretimle üretilmiş malzemenin satış fiyatı” değişkenlerine firmaların ortak kullandığı veri tabanı üzerinden son 6 aya ait verilerin ortalaması alınarak ulaşılmıştır. Bu veriler cam sektörün genel pazarı hakkında bilgi verecek niteliktedir.

Çalışmada Senaryo 1a ve 1b’de cam geri dönüşüm maliyetlerini gösteren “harcama” değişkenine ait veriler de dört geri dönüşüm firmasından ölçek ekonomisini hesaba

katarak sağlanmıştır. Toplanan bu verilere ilişkin denklemler regresyon analizi ile oluşturulmuştur. Diğer taraftan Senaryo 2’de kullanılan aynı “harcama” değişkeni farklı girdilerin fonksiyonu şeklinde yer almış olup, bu fonksiyonda etkisi olan “çevre başarısızlık maliyeti” ile “diğer üretim giderleri” için de regresyon analizi yapılarak ilgili denklemlere ulaşılmıştır. İlgili tüm veriler Ekler Bölümü’nde program girdisi olarak gösterilmiştir.

4.5.3. Cam Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi

Cam atığa sahip işletmelerin geri dönüşüm kararı vermesinde etkili olan ilgili alt kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amaçlanarak modeldeki beş kriter için ağırlıklandırma yapılmıştır. Bu ağırlıklar sadece Senaryo 1 veri girişinde ilgili kriterler için kullanılmıştır. Cam geri dönüşümü faaliyetinde bulunan firmalarla yapılan görüşmelerde 10 uzman karar verici ile birebir BWM uygulaması gerçekleştirilmiştir. BWM uygulamasında plastik ürün grubunda ifade edildiği şekliyle Adım 1 ve Adım 2 ortak yürütülmüştür (Bölüm 4.4.3.).

Adım 3: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en iyi kriterin diğer kriterlere göre önemini gösterecek şekilde Tablo 9’daki BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği’nden yararlanılarak 1 ile 9 arasında değer atanmıştır.

Tablo 26: En İyi Kritere Göre Değerlendirme (Cam Ürün Grubu)

Karar Vericiler	En İyi	C1	C2	C3	C4	C5
KV ₁	C5	7	5	9	2	1
KV ₂	C4/ C5	5	9	7	1	1
KV ₃	C5	5	9	7	3	1
KV ₄	C5	3	5	9	2	1
KV ₅	C4	3	9	9	1	2
KV ₆	C5	5	7	9	3	1
KV ₇	C4	3	5	9	1	2
KV ₈	C4/ C5	3	9	7	1	1
KV ₉	C4/ C5	5	5	9	1	1
KV ₁₀	C5	5	7	9	3	1

Adım 4: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en kötü kritere göre önemini

gösterecek şekilde 1 ile 9 arasında değer atanmıştır.

Tablo 27: En Kötü Kriteria Göre Değerlendirme (Cam Ürün Grubu)

	KV ₁	KV ₂	KV ₃	KV ₄	KV ₅	KV ₆	KV ₇	KV ₈	KV ₉	KV ₁₀
Kriterler	En kötü: C3	En kötü: C2	En kötü: C2	En kötü: C3	En kötü: C2 /C3	En kötü: C3	En kötü: C3	En kötü: C2	En kötü: C3	En kötü: C3
C1	5	3	5	7	5	3	5	7	7	3
C2	3	1	1	5	1	2	5	1	5	3
C3	1	7	3	1	1	1	1	3	1	1
C4	9	9	7	7	9	7	9	9	9	9
C5	9	9	9	9	7	9	9	9	9	9

Adım 5: Optimal ağırlıklar elde edilmiştir. Bu aşamada yine Excel’de oluşturulan model ve çözücüsünden yararlanılmıştır. Programdan elde edilen ağırlık çıktıları, her karar verici için ayrı hesaplanarak aşağıdaki tabloya işlenmiştir.

Tablo 28: Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Cam Ürün Grubu)

	C1	C2	C3	C4	C5	CR
KV₁	0.0832	0.1166	0.0394	0.2915	0.4690	0.1139
KV₂	0.1051	0.0293	0.0751	0.3951	0.3951	0.1306
KV₃	0.1270	0.0460	0.0907	0.2116	0.5245	0.1104
KV₄	0.1725	0.1035	0.0375	0.2588	0.4276	0.0900
KV₅	0.1733	0.0452	0.0577	0.4635	0.2600	0.0565
KV₆	0.1270	0.0907	0.0460	0.2116	0.5245	0.1104
KV₇	0.1719	0.1031	0.0380	0.4289	0.2579	0.0868
KV₈	0.1514	0.0329	0.0649	0.3753	0.3753	0.0790
KV₉	0.0995	0.0995	0.0303	0.3852	0.3852	0.1125
KV₁₀	0.1319	0.0942	0.0407	0.2199	0.5131	0.1466
W_j	0.1340	0.0760	0.0520	0.3340	0.4130	0.1037

Yukarıdaki tabloya göre; 0.1037 değeri ile genel tutarlılık oranının 0’a oldukça yakın bir değerde çıktığı görülmektedir. Rezaei’nin (2015, 2016) çalışmalarında ifade ettiği üzere bu değer 0’a olan yakınlığı sonuçların oldukça tutarlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Uygulama sonucunda kriterlerin ortalama ağırlıkları;

C1 (enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı) = **0.1340**

C2 (su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı) = **0.0760**

C3 (gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı) = **0.0520**

C4 (toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı) = **0.3340**

C5 (karlılık kazancı veya kaybı) = **0.4130** olarak hesaplanmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, cam ürün grubu için kritik sürdürülebilirlik gelişimine etki eden 5 boyuttan en yüksek ağırlığa sahip olan kriter 0.4130 (%41) oranıyla karlılık kazancı veya kaybı değişkeni olarak belirlenmiştir. Diğer kriterler ise sırasıyla 0.3340 (%33) oranıyla toplam maliyet, 0.1340 (%13) oranıyla enerji tüketimi ve 0.0760 (%7) oranıyla su tüketimi olarak tespit edilirken, en düşük ağırlığa sahip olan kriter 0.0520 (%5) oranıyla gaz salınımı olarak belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik performansı üzerinde en fazla etkiye yaklaşık % 75 oranıyla ekonomik kriterlerin sebep olduğu görülmektedir.

Ulaşılan tüm kriter ağırlıklarının ardından uygulamanın bir sonraki adımı programa veri girişinin yapılmasıdır. Veri girişi aşamasında, kurulan döngülerde yer alan tüm değişkenlere ait toplanan veriler veya denklemler STELLA Programına girilmiştir. Cam ürün grubuna ait veri girişi Ek 2’de yer almaktadır.

4.5.4. Cam Ürün Grubuna Yönelik Bulgular

Senaryo 1a ve Senaryo 1b, cam atık sahibi işletmelerin geri dönüşüm firmaları aracılığıyla yönettiği geri dönüşüm sürecinin sürdürülebilirlik performansına etkilerini değerlendirmektedir. Senaryo 2 ise birçok ülkede örnekleri olan geri dönüşüm teşvik sisteminin ülkemizde uygulanması durumunda sürdürülebilirlik performans sonuçlarını incelemektedir. Bu senaryoda yer alan teşvik sisteminde; devletin ilgili kanalları aracılığıyla atık sahibi işletmeler, geri dönüşüm şirketlerinin kaynaklarını (tesis, ekipman) sadece kullanım dönemindeki işletim maliyetlerini ödeyerek kullanabilmektedir.

Senaryo 1a için model dört sene olacak şekilde çalıştırılmış ve her bir zaman birimi iki aylık dönemi kapsamıştır. Modelin uzun çalıştırılmasının sebebi, “mevcut geri dönüşüm oranı”nın dönem içerisinde %100 olma durumu altında çalışmanın incelenmek istenmesidir. Senaryo 1b ve Senaryo 2 ise yine her t zamanı iki ay olacak şekilde, toplamda 2 dönem için çalıştırılmıştır. Buradaki en önemli etki geri dönüşüm teşvik

sistemlerinin 2 seneyi aşmayacak şekilde organize edilmesidir ve bu durum doğrudan Senaryo 2'yi etkilemektedir. Diğer taraftan iki senaryonun uygulama sonucunda karşılaştırılma ihtiyacı Senaryo 1b için de benzer kabulü gerektirmiş ve sonuçlar iki dönem şeklinde değerlendirilmiştir.

Üç senaryo altında yürütülen uygulamalara yönelik program çıktıları ilgili her alt bölümde tablolar şeklinde sunulmuştur

4.5.4.1. Cam Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular

Aşağıda cam malzemeli katı atıkların dört sene periyotundaki sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerleri cam sektöründe BWM ile ulaşılan şekliyle uygulanmıştır.

Tablo 29: Cam Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.13	0.08	0.09	0.15	0.12	0.16
2	0.15	0.09	0.10	0.17	0.14	0.18
3	0.17	0.10	0.12	0.19	0.15	0.21
4	0.19	0.11	0.13	0.21	0.17	0.23
5	0.21	0.12	0.14	0.23	0.19	0.25
6	0.22	0.13	0.15	0.25	0.20	0.27
7	0.24	0.14	0.16	0.27	0.22	0.29
8	0.26	0.15	0.18	0.29	0.24	0.32
9	0.28	0.16	0.19	0.31	0.25	0.34
10	0.30	0.17	0.20	0.33	0.27	0.36
11	0.32	0.18	0.21	0.35	0.29	0.38
12	0.33	0.19	0.22	0.37	0.30	0.40
13	0.35	0.20	0.24	0.39	0.32	0.43
14	0.37	0.21	0.25	0.41	0.34	0.45
15	0.39	0.22	0.26	0.43	0.35	0.47
16	0.41	0.23	0.27	0.45	0.37	0.49
17	0.42	0.24	0.29	0.47	0.39	0.51
18	0.44	0.25	0.30	0.49	0.40	0.54
19	0.45	0.26	0.30	0.50	0.41	0.55
20	0.45	0.26	0.30	0.50	0.41	0.55
21	0.45	0.26	0.30	0.50	0.41	0.55
22	0.45	0.26	0.30	0.50	0.41	0.55
23	0.45	0.26	0.30	0.50	0.41	0.55
Final	0.45	0.26	0.30	0.50	0.41	0.55

Tablo 30: Cam Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.134	0.452
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.162	0.548
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.122	0.411
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.150	0.500
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.077	0.258
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.091	0.304

Cam ürün grubuna yönelik model çıktıları yukarıdaki tablolarda gösterilmiştir. Bu tablolardaki verilerin yorumlanmasında temel husus; işletmelerin aynı cam kaynağı dışarıdan satın alması ile geri dönüşümle kazanması arasındaki çeşitli faktörlerdeki farkın kendi ekonomik durumuna ve çevreye olan etkilerini göstermek olduğu bilinmelidir. Senaryo 1a sonucunda benzer cam katı atıklara sahip işletmelerin, geri dönüşümün potansiyel etkileri doğrultusunda ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşılmıştır.

Çevresel sürdürülebilirlik performans sonuçları ilk olarak değerlendirildiğinde cam malzemeli atıklar için geri dönüşümün avantajlı olduğu ve cam geri dönüşümün çevresel açıdan kritik iyileştirmeler yapacağı görülmüştür. Cam katı atık geri dönüşümünün su tüketimi açısından başlangıçta %15 olan katkısı çalışma dönemi sonunda %50'ye, enerji tüketimi açısından başlangıçta %7.7 olan katkının çalışma dönemi sonunda %25.8'e ve son olarak saz salınımı açısından başlangıçta %9.1 katkı çalışma dönemi sonunda %30.4'e ulaşmıştır. Bu veriler cam endüstriyel atık geri dönüşümünün birincil üretimle üretilmiş malzemenin satın alınmasına göre su tüketimi açısından ortalama %50, enerji tüketimi açısından %26 ve gaz salınımı açısından %30 oranlarında çevreye verilen zararlı etkilerin önlenebileceğini göstermektedir.

Bir diğer önemli konu cam geri dönüşümünün ekonomik sürdürülebilirlik performansı üzerine olası etkilerin incelenmesidir ve hem toplam maliyet hem de karlılık üzerinde cam geri dönüşümün avantajlı olduğu ifade edilebilir. İlk olarak atıkların belirli bir oranda geri dönüşümünde işletmenin katlanacağı toplam maliyetin, birincil üretimle üretilmiş aynı kaynağı satın almasıyla katlanacağı toplam maliyete göre başlangıçta %12.2 olan

kazancı dönem sonunda %29 artışla %41.1 oranına ulaşmaktadır. Bu oranlar, geri dönüşüm faaliyetlerinin birincil üretimle üretilmiş ürünün satın alınmasına göre işletmeye verdiği ekonomik yükün %12.2-41.1 oranlarında azaltılabileceği şeklinde de yorumlanabilir. Fırsat maliyeti ve atıkların hurda değeri tarafından etkilenen karlılık değişkeninin ise dönem içerisinde %16.2 oranından %54.8 oranlarına çıkacağı görülmektedir. %55'e varan oran, cam malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşümle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Çalışmanın nihai amacını gösteren “sürdürülebilirlik gelişimi” değişkeni, işletmeleri geri dönüşüme teşvik edecek anahtar bir kriter olarak tanımlanmıştır. Genel çerçevede cam geri dönüşümün ilgili ekonomik ve çevresel faktörler açısından işletmelere avantajlı durum yarattığı çalışmanın önemli bir sonucudur. Modelin çalıştırılması ile ulaşılan genel sürdürülebilirlik gelişimi değerinin 1'den küçük olacak şekilde 0.134 ve 0.452 arasında kalması, cam geri dönüşüm faaliyetinin sürdürülebilir tedarik zinciri üzerinde olumlu etki yarattığının göstergesidir. İşletmelerin cam üretim kaynağını satın almaları yerine aynı cam kaynağa mevcut atıklarını geri dönüştürerek sahip olmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %45 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

Bu sonuçlar uygulamacıların sürdürülebilir kalkınma hedeflerini atık yönetimi açısından belirleyebilmelerine, sürdürülebilirlik planlarını/programlarını hazırlayabilmelerine ve uluslararası faaliyetlerde, ihalelerde, anlaşmalarda gereklilik haline gelen sürdürülebilirlik raporlamalarına rehberlik edebilmesine destek olacaktır.

4.5.4.2. Cam Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular

Aşağıda cam malzemeli katı atıkların iki senelik dönem içerisinde sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 31: Cam Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.12	0.08	0.09	0.15	0.12	0.16
2	0.14	0.09	0.10	0.17	0.14	0.18
3	0.16	0.10	0.12	0.19	0.15	0.21
4	0.17	0.11	0.13	0.21	0.17	0.23
5	0.19	0.12	0.14	0.23	0.19	0.25
6	0.21	0.13	0.15	0.25	0.20	0.27
7	0.22	0.14	0.16	0.27	0.22	0.29
8	0.24	0.15	0.18	0.29	0.24	0.32
9	0.26	0.16	0.19	0.31	0.25	0.34
10	0.27	0.17	0.20	0.33	0.27	0.36
11	0.29	0.18	0.21	0.35	0.29	0.38
Final	0.31	0.19	0.22	0.37	0.30	0.40

Tablo 32: Cam Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.124	0.308
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.162	0.404
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.122	0.303
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.150	0.370
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.077	0.191
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.091	0.225

Bu sonuçların senaryo 1a'dan farklılaşmasının temel sebepleri sürdürülebilirlik gelişimini etkileyen beş alt kriterin ağırlığından ve programın çalışma zamanının iki seneye düşürülmesinden kaynaklanmaktadır. Senaryo 1b, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performans boyutlarının ağırlığını eşit kabul etmekte ve bu senaryoyu test etmektedir. Ulaşılan sonuçlara göre, cam atık geri dönüşümü işletmelerin toplam maliyeti üzerinde çalışma dönemi boyunca %30.3; karlılığı üzerinde %40.4 daha fazla katkı sağlamaktadır. Genel sürdürülebilirlik performansını gösteren sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde ise cam geri dönüşümün birincil üretime göre etkisi %30.8 daha fazladır.

Senaryo 1b sonuçları, farklı ürün gruplarındaki geri dönüşümün potansiyel etkilerini kıyaslayarak karşılaştırabilmesi ve farklılığın ortaya koyulabilmesi açısından önemlidir. Dört ürün grubunun geri dönüşümünün sürdürülebilirlik gelişimi üzerindeki farklı etkilerini araştırma amacıyla yapılan bu test, Bölüm 4.8 'de detaylı tartışılmaktadır.

4.5.4.3. Cam Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular

Aşağıda iki sene boyunca cam sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin işletmelerin sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Bu uygulamada Senaryo 1b'de olduğu gibi sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 33: Cam Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.16	0.08	0.09	0.15	0.20	0.23
2	0.18	0.09	0.10	0.17	0.22	0.27
3	0.20	0.10	0.12	0.19	0.25	0.30
4	0.23	0.11	0.13	0.21	0.28	0.33
5	0.25	0.12	0.14	0.23	0.30	0.36
6	0.27	0.13	0.15	0.25	0.33	0.39
7	0.29	0.14	0.16	0.27	0.35	0.42
8	0.31	0.15	0.18	0.29	0.38	0.45
9	0.33	0.16	0.19	0.31	0.40	0.48
10	0.35	0.17	0.20	0.33	0.43	0.51
11	0.37	0.18	0.21	0.35	0.46	0.54
Final	0.40	0.19	0.22	0.37	0.48	0.57

Tablo 34: Cam Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.161	0.395
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.234	0.573
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.198	0.483
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.150	0.370
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.077	0.191
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.091	0.225

Ülkemizde teşvik sisteminin uygulanma durumu altında cam atıklara yönelik model çıktıları yukarıdaki tablolarda yer almaktadır. Bu verilerin yorumlanmasında, işletmelerin yalnızca işletim maliyetlerini ödeyerek, geri dönüşüm firmalarının tesisinden ve ekipmanlarından yararlanabildikleri geri dönüşümün sistemin etkileri olduğu unutulmamalıdır. Senaryo 2 sonucunda cam sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin potansiyel etkileri doğrultusunda hükümetin karar birimlerinin ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşılmıştır.

Geri dönüşüm teşvik sisteminin özünde teknik ve maddi teşviklere sahip olması, endüstriyel cam atıklara sahip işletmelerin ekonomik performansını etkileyecek bir durum yaratmaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik performansı açısından sonuçlar incelendiğinde işletmeler ilk dönemde toplam maliyetinde %20'ye varan iyileştirme sağlarken, iki sene teşvikten yararlanmaları sonucunda %48.3'e varan kazanç elde edebilmektedir. Fırsat maliyetinin dahil edildiği karlılık değişkeninde ise bu oran %57 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu oran, cam atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşüm teşvik sisteminin desteğiyle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Çalışmanın amacını gösteren ve anahtar kriter olarak tanımlanan “sürdürülebilirlik gelişimi” açısından cam atık sahibi işletmelerde geri dönüşüm teşvik sisteminin uygulanmasıyla işletmelerin sürdürülebilirlik performansı iki sene içinde %40 oranına çıkabilecektir. İşletmelerin üretim kaynağını satın almaları yerine aynı kaynağa teşvik sisteminden yararlanarak ulaşmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %40 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

4.6. Çelik Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları

Çeliklerin doğada diğer metallere göre çok daha kolay bulunabilmesi ve farklı alaşımlarla farklı özellikli ürünlerin üretiminde kullanabilen önemli bir malzeme olması sebebiyle sanayide çok fazla kullanılmaktadır. Çeliklerin farklı alaşımlarda üretiliyor olması birçok endüstride değişik formlarda kullanılmasını etkilemiştir. Bu sebeple çalışmanın mantıksal ilerleyebilmesi için çelik ürün grubuna dair bir takım varsayımlar altında uygulama yapılmıştır.

4.6.1. Çelik Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları

Çelik atıklara yönelik gerçekleştirilen uygulamada bir takım varsayımlarda bulunulmuştur. Bunlar:

1. Çelik geri dönüşümünde kullanılan atık malzemeler “Yeni Hurda” sınıfında yer almaktadır.
2. Çelik malzemeli atıklar, düşük karbonlu (C oranı %0.13 ve daha düşük) yüksek mukavemetli (HS) (özellikle karbon-manganez) çeliklerdir.
3. Çelik metal atıkların geri dönüşümünde EAO (Elektrikli Ark Ocağı) kullanılmaktadır. EAO’nın çelik geri dönüşüm endüstrisinde en büyük uygulama alanına sahip olan (Echterhof, 2021) ve çeliğin tamamını kabul eden yöntem olduğu bilinmektedir (World Steel Association, 2018; Kovacic vd., 2019).
4. Geri dönüşüm faaliyetleri sonucunda elde edilen çelik malzemelerin ortalama 1-5 mm kalınlığında ve 600-1250 mm genişliğinde düz levhalardan (plaka) oluştuğu kabul edilmektedir.

4.6.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Çelik Ürün Grubu)

Elektrik tüketimi, enerji tüketimi, birincil üretimde gereken enerji miktarı, sera gazı salınımı (CO₂), birincil üretimde salınan gaz miktarı, su tüketimi ve birincil üretimde gereken su miktarı verileri literatürdeki mevcut uygulamalardan ve sektördeki dört firmadan (A, F, H ve I) sağlanmıştır. Kriterlere ait ulaşılan birincil (sektörden) ve ikincil veriler (literatürden) aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 35: Çelik Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Birincil Üretimde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Kaynaklar
0.698 kwh/kg		Mohsen & Akash (1998), Güncelleştirilmiş çalışma (2020)
0.594 kwh/kg	Ortalama 3 kat= 1.780 kwh/kg	Yellishetty vd. (2011)
0.636 kwh/kg	1.54 kwh/kg	Martelaro (2016)
0.695 kwh/kg		Kim & Worell (2020)
0.705 kwh/kg	1.780 kwh/kg	A Firması (2021)
0.679 kwh/kg	1.650 kwh/kg	F Firması (2021)
0.800 kwh/kg	1.90 kwh/kg	H Firması (2021)
0.695 kwh/kg	1.70 kwh/kg	I Firması (2021)
0.690 kwh/kg		Norstar Steel Recyclers (2021)
Ort= 0.688 kwh/kg	=1.725 kwh/kg	

Tablo 36: Çelik Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri

Geri Dönüşümde Gaz Salınım Miktarı (kg/kg)	Birincil Üretimde Gaz Salınım Miktarı (kg/kg)	Kaynaklar
0.6 kg/kg		Yellishetty vd. (2011)
0.63 kg/kg		Hasanbeigi vd. (2016)
0.88 kg/kg		
0.600 kg/kg	4.2 kg/kg	Holappa (2020)
0.620 kg/kg	4 kg/kg	World Steel Association (2020)
0.706 kg/kg	3.7 kg/kg	A Firması (2021)
0.700 kg/kg	4.6 kg/kg	F Firması (2021)
	4.4 kg/kg	H Firması (2021)
0.720 kg/kg	4.9 kg/kg	I Firması (2021)
Ort=0.682 kg/kg	4.3 kg/kg	

Tablo 37: Çelik Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Su Tüketim Miktarı (lt/kg)	Birincil Üretimde Su Tüketim Miktarı (lt/kg)	Kaynaklar
3.75 lt/kg		European Commission (2008b)
3.65 lt/kg	6.0 lt/kg	World Steel Association (2020)
3.65 lt/kg	6.80 lt/kg	A Firması (2021)
3.70 lt/kg	6.70 lt/kg	F Firması (2021)
	6.20 lt/kg	H Firması (2021)
3.30 lt/kg	6.50 lt/kg	I Firması (2021)
Ort=3.65 lt/kg	Ort=6.40 lt/kg	

Modeldeki birçok kritere ait değerler beş adet çelik geri dönüşüm firmasından sağlanan verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. “Ayrıştırma oranı”, yapılan görüşmeler neticesinde çelikler için %90 oranıyla kabul edilmiştir. Modeldeki “birim hurda değeri” ve “birincil üretimle üretilmiş malzemenin satış fiyatı” değişkenlerine firmaların ortak kullandığı veri tabanı üzerinden son 6 aya ait verilerin ortalaması alınarak ulaşılmıştır. Bu veriler çelik sektörünün genel pazarı hakkında bilgi verecek niteliktedir.

Çalışmada Senaryo 1a ve 1b’de çelik geri dönüşüm maliyetlerini gösteren “harcama” değişkenine ait veriler de beş adet çelik geri dönüşüm firmasından ölçek ekonomisini hesaba katarak sağlanmıştır. Toplanan bu verilere ilişkin denklemler regresyon analizi ile oluşturulmuştur. Diğer taraftan Senaryo 2’de kullanılan aynı “harcama” değişkeni farklı girdilerin fonksiyonu şeklinde yer almış olup, bu fonksiyonda etkisi olan “çevre başarısızlık maliyeti” ile “diğer üretim giderleri” için de regresyon analizi yapılarak ilgili denklemlere ulaşılmıştır. İlgili tüm veriler Ek 3’de program girdisi olarak gösterilmiştir.

4.6.3. Çelik Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi

Çelik metal atıklara sahip işletmelerin geri dönüşüm kararı vermesinde etkili olan ilgili alt kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amaçlanarak modeldeki beş kriter için ağırlıklandırma yapılmıştır. Bu ağırlıklar sadece Senaryo 1 veri girişinde ilgili kriterler için kullanılmıştır. Çelik geri dönüşümü faaliyetinde bulunan firmalarla yapılan görüşmelerde 10 uzman karar verici ile birebir BWM uygulaması gerçekleştirilmiştir. BWM uygulamasında plastik ve cam atık grubunda ifade edildiği şekliyle Adım 1 ve

Adım 2 ortak yürütülmüştür (Bölüm 4.4.3.).

Adım 3: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en iyi kriterin diğer kriterlere göre önemini gösterecek şekilde Tablo 9'daki BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği'nden yararlanılarak 1 ile 9 arasında değer atanmıştır.

Tablo 38: En İyi Kritere Göre Değerlendirme (Çelik Ürün Grubu)

Karar Vericiler	En İyi	C1	C2	C3	C4	C5
KV ₁	C5	3	9	7	3	1
KV ₂	C4	5	3	9	3	1
KV ₃	C5	9	3	9	2	1
KV ₄	C5	5	5	9	3	1
KV ₅	C4/C5	5	5	9	1	1
KV ₆	C4	5	3	9	1	2
KV ₇	C4/C5	5	5	9	1	1
KV ₈	C5	7	7	9	3	1
KV ₉	C4/C5	3	5	9	1	1
KV ₁₀	C5	5	5	9	3	1

Adım 4: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en kötü kritere göre önemini gösterecek şekilde 1 ile 9 arasında değer atanmıştır.

Tablo 39: En Kötü Kritere Göre Değerlendirme (Çelik Ürün Grubu)

	KV ₁	KV ₂	KV ₃	KV ₄	KV ₅	KV ₆	KV ₇	KV ₈	KV ₉	KV ₁₀
Kriterler	En kötü: C2	En kötü: C3	En kötü: C1 /C3	En kötü: C3	En kötü: C3	En kötü: C3	En kötü: C3	En kötü: C3	En kötü: C3	En kötü: C3
C1	3	3	3	3	7	3	3	3	5	3
C2	1	5	5	3	7	5	3	3	3	3
C3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C4	5	5	5	5	9	9	9	5	9	7
C5	9	9	9	9	9	5	9	9	9	9

Adım 5: Optimal ağırlıklar elde edilmiştir. Bu aşamada yine Excel'de oluşturulan model ve çözücüsünden yararlanılmıştır. Programdan elde edilen ağırlık çıktıları, her karar verici için ayrı hesaplanarak aşağıdaki tabloya işlenmiştir.

Tablo 40: Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Çelik Ürün Grubu)

	C1	C2	C3	C4	C5	CR
KV₁	0.1871	0.0481	0.0802	0.1871	0.4973	0.0641
KV₂	0.1081	0.1802	0.0474	0.1802	0.4838	0.0569
KV₃	0.0587	0.1761	0.0430	0.2641	0.4579	0.0704
KV₄	0.1165	0.1165	0.0511	0.1942	0.5214	0.0613
KV₅	0.0995	0.0995	0.0303	0.3852	0.3852	0.1125
KV₆	0.0992	0.1653	0.0435	0.4438	0.2480	0.0522
KV₇	0.0857	0.0857	0.0400	0.3942	0.3942	0.0342
KV₈	0.0898	0.0898	0.0538	0.2095	0.5568	0.0718
KV₉	0.1382	0.0829	0.0363	0.3711	0.3711	0.0436
KV₁₀	0.1225	0.1225	0.0444	0.2042	0.5062	0.1065
W_j	0.1105	0.1167	0.0470	0.2671	0.4420	0.0674

Yukarıdaki tabloya göre; 0.0674 değeri ile genel tutarlılık oranının 0'a oldukça yakın bir değerde çıktığı görülmektedir. Rezaei'nin (2015, 2016) çalışmalarına göre bu değer 0'a olan yakınlığı; sonuçların oldukça tutarlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Uygulama sonucunda kriterlerin ortalama ağırlıkları;

C1 (enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı) = **0.1105**

C2 (su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı) = **0.1167**

C3 (gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı) = **0.0470**

C4 (toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı) = **0.2671**

C5 (karlılık kazancı veya kaybı) = **0.4420** olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, çelik ürün grubu için sürdürülebilirlik gelişimini etki eden 5 boyuttan en yüksek ağırlığa sahip olan kriter 0.4220 (%42) oranıyla karlılık kazancı veya kaybı olarak belirlenmiştir. Diğer kriterler ise sırasıyla 0.2671 (% 27) oranıyla toplam maliyet, 0.1167 (%12) oranıyla su tüketimi ve 0.1105 (%11) oranıyla enerji tüketimi tespit edilirken, en düşük ağırlığa sahip olan kriter 0.0470 (%5) oranıyla gaz salınımı olarak belirlenmiştir. Veriler değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde en fazla etkiye yaklaşık %69 oranıyla ekonomik kriterlerin sebep olacağı görülmektedir. Ulaşılan tüm kriter ağırlıklarının ardından programa veri girişi yapılmıştır. Çelik ürün

grubuna ait veri girişi Ek 3’de yer almaktadır.

4.6.4. elik Ürün Grubuna Yönelik Bulgular

Senaryo 1a ve Senaryo 1b, elik atık sahibi şişletmelerin geri dönüşüm firmaları aracılığıyla yönettiği geri dönüşüm sürecinin sürdürülebilirlik performansına etkilerini değerlendirmektedir. Senaryo 2 ise birçok ölkede örnekleri olan geri dönüşüm teşvik sisteminin ölkemizde uygulanması durumunda sürdürülebilirlik performans sonuçlarını incelemektedir. Bu senaryoda yer alan teşvik sisteminde; devletin ilgili kanalları aracılığıyla atık sahibi şişletmeler, geri dönüşüm şirketlerinin kaynaklarını (tesis, ekipman) sadece kullanım dönemindeki şişletim maliyetlerini ödeyerek kullanabilmektedir.

Senaryo 1a için model dört sene olacak şekilde çalıştırılmış ve her bir zaman birimi iki aylık dönemi kapsamıştır. Modelin uzun çalıştırılmasının sebebi, “mevcut geri dönüşüm oranı”nın dönem içerisinde %100 olma durumu altında çalışmanın incelenmek istenmesidir. Senaryo 1b ve Senaryo 2 ise yine her t zamanı iki ay olacak şekilde, toplamda 2 sene için çalıştırılmıştır. Buradaki en önemli etki geri dönüşüm teşvik sistemlerinin 2 seneyi aşmayacak şekilde organize edilmesidir ve bu durum doğrudan Senaryo 2’yi etkilemektedir. Diğer taraftan iki senaryonun uygulama sonucunda karşılaştırılma ihtiyacı Senaryo 1b için de benzer kabulü gerektirmiş ve sonuçlar iki yıl sürecinde değerlendirilmiştir.

Üç senaryo altında yürütölen uygulamalara yönelik program ıktıları ilgili her alt bölümde tablolar şeklinde sunulmuştur.

4.6.4.1. elik Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular

Aşağıda elik malzemeli katı atıkların dört sene periyotundaki sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerleri elik sektöründe BWM ile ulaşılan şekliyle uygulanmıştır.

Tablo 41: Çelik Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.17	0.18	0.25	0.13	0.15	0.18
2	0.19	0.20	0.29	0.15	0.17	0.21
3	0.21	0.23	0.32	0.16	0.19	0.23
4	0.23	0.25	0.35	0.18	0.21	0.26
5	0.26	0.28	0.39	0.20	0.23	0.28
6	0.28	0.30	0.42	0.21	0.25	0.30
7	0.30	0.32	0.45	0.23	0.27	0.33
8	0.32	0.35	0.49	0.25	0.29	0.35
9	0.35	0.37	0.52	0.27	0.31	0.38
10	0.37	0.40	0.56	0.28	0.32	0.40
11	0.39	0.42	0.59	0.30	0.34	0.43
12	0.41	0.44	0.62	0.32	0.36	0.45
13	0.43	0.47	0.66	0.34	0.38	0.48
14	0.46	0.49	0.69	0.35	0.40	0.50
15	0.48	0.52	0.72	0.37	0.42	0.52
16	0.50	0.54	0.76	0.39	0.44	0.55
17	0.52	0.57	0.79	0.40	0.46	0.57
18	0.55	0.59	0.82	0.42	0.48	0.60
19	0.56	0.60	0.84	0.43	0.49	0.61
20	0.56	0.60	0.84	0.43	0.49	0.61
21	0.56	0.60	0.84	0.43	0.49	0.61
22	0.56	0.60	0.84	0.43	0.49	0.61
23	0.56	0.60	0.84	0.43	0.49	0.61
Final	0.56	0.60	0.84	0.43	0.49	0.61

Tablo 42: Çelik Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.167	0.558
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.182	0.611
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.147	0.494
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.129	0.430
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.180	0.601
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.252	0.841

Çelik metal grubuna yönelik sonuçlar yukarıdaki tablolarda gösterilmiştir. Bu tablolardaki verilerin yorumlanmasında temel husus; işletmelerin aynı çelik metalini

dışarıdan satın alması ile geri dönüşümle kazanması arasındaki çeşitli faktörlerdeki farkın kendi ekonomik durumuna ve çevreye olan etkilerini göstermek olduğu bilinmelidir. Senaryo 1a sonucunda benzer çelik endüstriyel atıklara sahip işletmelerin, geri dönüşümün potansiyel etkileri doğrultusunda ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşılmıştır.

Çevresel sürdürülebilirlik performans sonuçları ilk olarak değerlendirildiğinde çelik metal atıklar için de geri dönüşümün avantajlı olduğu ve çelik geri dönüşümün çevresel açıdan kritik iyileştirmeler yapacağı görülmüştür. Çelik katı atık geri dönüşümünün su tüketimi açısından başlangıçta %12.9 olan katkısı çalışma dönemi sonunda %43'e, enerji tüketimi açısından başlangıçta %18 olan katkının çalışma dönemi sonunda %60.1'e ve son olarak saz salınımı açısından başlangıçta %25.2 etki çalışma dönemi sonunda %84.1'e ulaşmıştır. Bu veriler çelik endüstriyel atık geri dönüşümünün birincil üretimle üretilmiş malzemenin satın alınmasına göre su tüketimi açısından ortalama %43, enerji tüketimi açısından %60 ve gaz salınımı açısından %84 oranlarında çevreye verilen zararlı etkinin önlenebileceğini göstermektedir.

Bir diğer önemli konu çelik geri dönüşümünün ekonomik sürdürülebilirlik performansı üzerine olası etkilerin incelenmesidir ve hem toplam maliyet hem de karlılık üzerinde çelik geri dönüşümün oldukça avantajlı durum yarattığı ifade edilebilir. İlk olarak atıkların belirli bir oranda geri dönüşümünde işletmenin katlanacağı toplam maliyetin, birincil üretimle üretilmiş aynı kaynağı satın almasıyla katlanacağı toplam maliyete göre başlangıçta %14.7 olan kazancı dönem içerisinde %34.7 artışla %49.4 oranına ulaşmaktadır. Bu oranlar, geri dönüşüm faaliyetlerinin birincil üretimle üretilmiş ürünün satın alınmasına göre işletmeye verdiği ekonomik yükün %15-50 oranlarında azaltılabileceği şeklinde de yorumlanabilir. Fırsat maliyeti ve atıkların hurda değeri tarafından etkilenen karlılık değişkeninin ise dönem içerisinde %18.2 oranından %61.1 oranlarına çıkacağı görülmektedir. %61'e varan oran, alüminyum malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşümle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Çalışmanın nihai amacını gösteren “sürdürülebilirlik gelişimi” değişkeni, işletmeleri geri dönüşüme teşvik edecek anahtar bir kriter olarak tanımlanmıştır. Genel çerçevede çelik metal geri dönüşümün ilgili ekonomik ve çevresel faktör açısından kurumlara avantajlı

durum yarattığı çalışmanın önemli bir sonucudur. Modelin çalıştırılması ile ulaşılan genel sürdürülebilirlik gelişimi değerinin 1’den küçük olacak şekilde 0.167 ve 0.558 arasında kalması, çelik geri dönüşüm faaliyetinin sürdürülebilir tedarik zinciri üzerinde olumlu etki yarattığının en büyük göstergesidir. İşletmelerin çelik üretim kaynağını satın almaları yerine aynı çelik üretim kaynağına mevcut atıklarını geri dönüştürerek sahip olmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %56 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

Bu sonuçlar uygulamacıların sürdürülebilir kalkınma hedeflerini atık yönetimi açısından belirleyebilmelerine, sürdürülebilirlik planlarını/programlarını hazırlayabilmelerine ve uluslararası faaliyetlerde, ihalelerde, anlaşmalarda gereklilik haline gelen sürdürülebilirlik raporlamalarına rehberlik edebilmesine destek olacaktır.

4.6.4.2. Çelik Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular

Aşağıda çelik metalli katı atıkların iki senelik dönem içerisinde sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 43: Çelik Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.18	0.18	0.25	0.13	0.15	0.18
2	0.20	0.20	0.29	0.15	0.17	0.21
3	0.22	0.23	0.32	0.16	0.19	0.23
4	0.25	0.25	0.35	0.18	0.21	0.26
5	0.27	0.28	0.39	0.20	0.23	0.28
6	0.29	0.30	0.42	0.21	0.25	0.30
7	0.32	0.32	0.45	0.23	0.27	0.33
8	0.34	0.35	0.49	0.25	0.29	0.35
9	0.36	0.37	0.52	0.27	0.31	0.38
10	0.39	0.40	0.56	0.28	0.32	0.40
11	0.41	0.42	0.59	0.30	0.34	0.43
Final	0.44	0.44	0.62	0.32	0.36	0.45

Tablo 44: Çelik Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.176	0.435
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.182	0.451
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.147	0.365
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.129	0.318
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.180	0.445
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.252	0.623

Sonuçların senaryo 1a'dan farklılaşmasının temel sebepleri sürdürülebilirlik gelişimini etkileyen beş alt kriterin ağırlığından ve programın çalışma zamanının yarıya düşürülmesinden kaynaklanmaktadır. Senaryo 1b, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performans boyutlarının ağırlığını eşit kabul etmekte ve bu senaryoyu test etmektedir. Ulaşılan sonuçlara göre, çelik atık geri dönüşümü işletmenin toplam maliyeti üzerinde çalışma dönemi boyunca %36.5, karlılığı üzerinde %45.1 daha fazla katkı sağlamaktadır. Genel sürdürülebilirlik performansını gösteren sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde ise çelik geri dönüşümün birincil üretime göre sağlayacağı katkı %43.5 daha fazladır.

Senaryo 1b sonuçları, farklı ürün gruplarındaki geri dönüşümün potansiyel etkilerini kıyaslayarak karşılaştırabilmesi ve farklılığın ortaya koyulabilmesi açısından önemlidir. Dört ürün grubunun geri dönüşümünün sürdürülebilirlik gelişimi üzerindeki farklı etkilerini araştırma amacıyla yapılan bu test, Bölüm 4.8 'de detaylı tartışılmaktadır.

4.6.4.3. Çelik Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular

Aşağıda iki sene boyunca çelik sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin işletmelerin sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Bu uygulamada Senaryo 1b'de olduğu gibi sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 45: Çelik Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.20	0.18	0.25	0.13	0.21	0.24
2	0.23	0.20	0.29	0.15	0.23	0.27
3	0.26	0.23	0.32	0.16	0.26	0.30
4	0.29	0.25	0.35	0.18	0.29	0.33
5	0.31	0.28	0.39	0.20	0.32	0.36
6	0.34	0.30	0.42	0.21	0.34	0.39
7	0.37	0.32	0.45	0.23	0.37	0.43
8	0.40	0.35	0.49	0.25	0.40	0.46
9	0.42	0.37	0.52	0.27	0.43	0.49
10	0.45	0.40	0.56	0.28	0.45	0.52
11	0.48	0.42	0.59	0.30	0.48	0.55
Final	0.50	0.44	0.62	0.32	0.51	0.58

Tablo 46: Çelik Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.205	0.505
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.237	0.585
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.206	0.508
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.129	0.318
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.180	0.445
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.252	0.623

Ülkemizde teşvik sisteminin uygulanma durumu altında çelik atıklara yönelik model çıktıları yukarıdaki tablolarda yer almaktadır. Bu verilerin yorumlanmasında, işletmelerin yalnızca işletim maliyetlerini ödeyerek, geri dönüşüm firmalarının tesisinden ve ekipmanlarından yararlanabildikleri geri dönüşümün sistemin etkileri olduğu unutulmamalıdır. Senaryo 2 sonucunda çelik sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin potansiyel etkileri doğrultusunda hükümetin karar birimlerinin ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşılmıştır.

Geri dönüşüm teşvik sisteminin özünde teknik ve maddi teşviklere sahip olması, çelik

endüstriyel atıklara sahip işletmelerin ekonomik performansını etkileyecek bir durum yaratmaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik performansı açısından sonuçlar incelendiğinde işletmeler ilk dönemde toplam maliyetinde %21'e varan iyileştirme sağlarken, iki sene teşvikten yararlanmaları sonucunda %51'e varan kazanç elde edebilmektedir. Fırsat maliyetinin dahil edildiği karlılık değişkeninde ise bu oran %59 seviyelerine ulaşmaktadır. İki sene sonunda %59'a varan oran, çelik malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşüm teşvik sisteminin desteğiyle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Çalışmanın amacını gösteren ve anahtar kriter olarak tanımlanan “sürdürülebilirlik gelişimi” açısından çelik atık sahibi işletmelerde geri dönüşüm teşvik sisteminin uygulanmasıyla işletmelerin sürdürülebilirlik performansı 2 sene sonunda %51 oranına çıkabilecektir. İşletmelerin üretim kaynağını satın almaları yerine aynı kaynağa teşvik sisteminden yararlanarak ulaşmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %51 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

4.7. Alüminyum Ürün Grubuna İlişkin Uygulama ve Sonuçları

Alüminyum, küresel ölçekte çelikten sonra en fazla üretilen ve endüstrilerde kullanılan malzemedir. Alüminyum tıpkı çelikler gibi farklı alaşım formlarıyla birçok endüstriye nüfus etmiş önemli bir metal grubudur. İnşaat, ulaşım, elektrik/elektronik ürün gruplarında oldukça fazla kullanılan alüminyumun geri dönüşümle tekrar kazanılması önemli bir konudur. Ancak alüminyumun farklı alaşımlarda kullanılması ve her biri için ihtiyaç duyulan kaynak miktarlarının değişmesi sebebiyle çalışmaya bir takım sınırlamalar getirilerek uygulama yapılmıştır.

4.7.1. Alüminyum Ürün Grubuna İlişkin Çalışma Varsayımları

Alüminyum atıklara yönelik gerçekleştirilen uygulamada bir takım varsayımlarda bulunulmuştur. Bunlar:

1. Alüminyum geri dönüşümünde kullanılan malzemeler "Yeni Hurda" sınıfında yer almaktadır.
2. Alüminyum geri dönüşümünde ihtiyaç duyulan ergitme adımı küçük ve temiz hurdaların kullanımı gereği indüksiyon fırınlar kullanılmaktadır.
3. Çalışmadaki ürün grupları A5xxx (A5083 gibi) ve A6xxx alüminyum levha

alaşımlardır. Çünkü bu alaşımlar alüminyum endüstrisinde kullanım alanı en yaygın olan gruplardan biridir ve alaşımların geri dönüşümü diğer ürünlere göre daha yaygın şekilde yapılmaktadır (TMMOB, 2020).

4. Geri dönüşüm faaliyetleri sonucunda elde edilen alüminyum malzemelerin ortalama 0.5-10 mm kalınlığında ve 1000-2000 mm genişliğinde düz levhalardan (plaka) oluştuğu kabul edilmektedir.

4.7.2. Literatürden & Sektörden Ulaşılan Veriler (Alüminyum Ürün Grubu)

Elektrik tüketimi, enerji tüketimi, birincil üretimde gereken enerji miktarı, sera gazı salınımı (CO₂), birincil üretimde salınan gaz miktarı, su tüketimi ve birincil üretimde gereken su miktarı verileri literatürdeki mevcut uygulamalardan ve sektördeki dört firmadan (A, F, M ve N) sağlanmıştır. Kriterlere ait ulaşılan birincil (sektörden) ve ikincil veriler (literatürden) aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 47: Alüminyum Ürün Grubu İçin Enerji Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Birincil Üretimde Enerji Tüketim Miktarı (kwh/kg)	Kaynaklar
2.50 kwh/kg	180 MJ/kg= 50 kwh/kg.	Norgate & Haque (2010)
	174 GJ/t= 48 kwh/kg	Gupta (2014)
4.5 kwh/kg		Global Aluminium Cycle from World Aluminium (2017)
7.85 MJ/kg= 2.17 kwh/kg	157 MJ/kg= 43 kwh/kg	Stacey, M. (2017)
18414 MJ/t= 5 kwh/kg	14772 MJ/t = 40 kwh/kg	Tianduo vd. (2019)
2.10 kwh/kg	150 MJ/kg* = 42 kwh/kg	Material Economics (2020)
4.45 kwh/kg	175 MJ/kg= 49 kwh/kg4.6.2.	Sportifshop A.Ş. (2020)
4.6 kwh/kg	52 kwh/kg	A Firması (2021)
2.48 kwh/kg	42 kwh/kg	F Firması (2021)
2 kwh/kg	39 kwh/kg	M Firması (2021)
	45 kwh/kg	N Firması (2021)
2.20 kwh/kg	42 kwh/kg	Assan Alüminyum (2021)
= 3.20 kwh/kg	=46 kwh/kg	

Tablo 48: Alüminyum Ürün Grubu İçin Gaz Salınımı Verileri

Geri Dönüşümde Gaz Salınım Miktarı (kg/kg)	Birincil Üretimde Gaz Salınım Miktarı (kg/kg)	Kaynaklar
0.70 kg/kg	11.80 kg/kg	Brinstengel vd. (2008)
0.46 kg/kg	11 kg/kg	PE Americas (2010)
0.33 kg/kg	11 kg/kg	Frischenschlager vd. (2010)
0.4 kg/kg	11 kg/kg	Hilman vd. (2015)
0.657 kg/kg	14.77 kg/kg	Peng vd. (2019)
0.67 kg/kg	12 kg/kg	A Firması (2021)
0.63 kg/kg		F Firması (2021)
0.50 kg/kg	10 kg/kg	Weresch (2021)
0.42 kg/kg	14 kg/kg	Alupro Recycling (2021)
Ort= 0.53 kg/kg	= 12 kg/kg	

Tablo 49: Alüminyum Ürün Grubu İçin Su Tüketimi Verileri

Geri Dönüşümde Su Tüketim Miktarı (lt/kg)	Birincil Üretimde Su Tüketim Miktarı (lt/kg)	Kaynaklar
0.25 litre/kg		Liljenström & Finnveden (2015)
	502 litre/ton	Aluminum Association (2013)
	0.50 litre/kg	
0.30 litre/kg	0.48 litre/kg	A Firması (2021)
0.30 litre/kg	%40 tasarruf 0.50 litre/kg	M Firması (2021)
Ort= 0.28 lt/kg	=0.50 litre/kg	

Modeldeki birçok kritere ait değerler dört farklı alüminyum geri dönüşüm firmasından sağlanan verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. “Ayrıştırma oranı”, uzmanlarla yapılan görüşmeler neticesinde %90 oranıyla kabul edilmiştir. Modeldeki “birim hurda değeri” ve “birincil üretimle üretilmiş malzemenin satış fiyatı” değişkenlerine firmaların ortak kullandığı veri tabanı üzerinden son 6 aya ait verilerin ortalaması alınarak ulaşılmıştır. Bu veriler alüminyum sektörünün genel pazarı hakkında bilgi verecek niteliktedir.

Çalışmada Senaryo 1a ve 1b’de alüminyum geri dönüşüm maliyetlerini gösteren

“harcama” değişkenine ait veriler de dört geri dönüşüm firmasından ölçek ekonomisini hesaba katarak sağlanmıştır. Toplanan bu verilere ilişkin denklemler regresyon analizi ile oluşturulmuştur. Diğer taraftan Senaryo 2’de kullanılan aynı “harcama” değişkeni farklı girdilerin fonksiyonu şeklinde yer almış olup, bu fonksiyonda etkisi olan “çevre başarısızlık maliyeti” ile “diğer üretim giderleri” için de regresyon analizi yapılarak ilgili denklemlere ulaşılmıştır. (Alüminyum ait tüm bilgiler Ek 4’de program girdisi olarak gösterilmiştir.).

4.7.3. Alüminyum Sektöründe Kriter Ağırlıklandırma için BWM Analizi

Alüminyum metal atığa sahip işletmelerin geri dönüşüm kararı vermesinde etkili olan ilgili alt kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amaçlanarak modeldeki beş kriter için ağırlıklandırma yapılmıştır. Bu ağırlıklar sadece Senaryo 1 veri girişinde ilgili kriterler için kullanılmıştır. Alüminyum geri dönüşümü faaliyetinde bulunan firmalarla yapılan görüşmelerde 10 uzman karar verici ile birebir BWM uygulaması gerçekleştirilmiştir. BWM uygulamasında plastik, cam ve çelik ürün grubunda ifade edildiği şekliyle Adım 1 ve Adım 2 ortak yürütülmüştür (Bölüm 4.4.3.).

Adım 3: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en iyi kriterin diğer kriterlere göre önemini gösterecek şekilde Tablo 9’daki BWM İkili Karşılaştırma Ölçeği’nden yararlanılarak 1 ile 9 arasında değer atanmıştır.

Tablo 50: En İyi Kritere Göre Değerlendirme (Alüminyum Ürün Grubu)

Karar Vericiler	En İyi	C1	C2	C3	C4	C5
KV ₁	C5	3	9	7	2	1
KV ₂	C5	3	9	5	2	1
KV ₃	C5	5	9	7	3	1
KV ₄	C4	5	9	9	1	2
KV ₅	C4-5	5	9	9	1	1
KV ₆	C4	5	7	9	1	3
KV ₇	C4-5	3	9	7	1	1
KV ₈	C5	7	9	7	3	1
KV ₉	C4-5	3	9	7	1	1
KV ₁₀	C5	3	9	7	2	1

Adım 4: Karar vericiler tarafından listedeki tüm kriterlere, en kötü kritere göre önemini gösterecek şekilde 1 ile 9 arasında değer atanmıştır.

Tablo 51: En Kötü Kritere Göre Değerlendirme (Alüminyum Ürün Grubu)

	KV ₁	KV ₂	KV ₃	KV ₄	KV ₅	KV ₆	KV ₇	KV ₈	KV ₉	KV ₁₀
Kriterler	En kötü:C2	En kötü:C2	En kötü:C2	En kötü:C2/3	En kötü:C2/3	En kötü:C3	En kötü:C2	En kötü:C2	En kötü:C2	En kötü:C2
C1	7	3	5	3	7	5	7	5	5	5
C2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1
C3	5	3	5	1	1	1	3	3	3	3
C4	9	7	7	9	9	9	9	9	9	9
C5	9	9	9	7	9	7	9	9	7	9

Adım 5: Optimal ağırlıklar elde edilmiştir. Bu aşamada yine Excel’de oluşturulan model ve çözücüsünden yararlanılmıştır. Programdan elde edilen ağırlık çıktıları, her karar verici için ayrı hesaplanarak aşağıdaki tabloya işlenmiştir.

Tablo 52: Kriter Ağırlıkları ve Tutarlılık Oranları (Alüminyum Ürün Grubu)

	C1	C2	C3	C4	C5	CR
KV₁	0.1803	0.0366	0.0772	0.2705	0.4352	0.1057
KV₂	0.1657	0.0432	0.0994	0.2485	0.4430	0.0540
KV₃	0.1291	0.0437	0.0922	0.2152	0.5195	0.1262
KV₄	0.1117	0.0485	0.0620	0.4981	0.2792	0.0607
KV₅	0.1041	0.0317	0.0578	0.4031	0.4031	0.1177
KV₆	0.1951	0.0836	0.0424	0.4836	0.1951	0.1018
KV₇	0.1514	0.0329	0.0649	0.3753	0.3753	0.0790
KV₈	0.0979	0.0423	0.0979	0.2285	0.5332	0.1523
KV₉	0.1521	0.0407	0.0652	0.3799	0.3742	0.0570
KV₁₀	0.1769	0.0393	0.0758	0.2654	0.4424	0.0884
W_j	0.1464	0.0443	0.0735	0.3368	0.4000	0.0988

Yukarıdaki tabloya göre; 0.0988 değeri ile genel tutarlılık oranının 0’a oldukça yakın bir değerde çıktığı görülmektedir. Rezaei’nin (2015, 2016) çalışmasına göre CR’nin 0’a olan yakınlığı sonuçların oldukça tutarlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Uygulama sonucunda kriterlerin ortalama ağırlıkları;

C1 (enerji tüketimi çevresel kazancı veya kaybı) = **0.1464**

C2 (su tüketimi çevresel kazancı veya kaybı) = **0.0443**

C3 (gaz salınımı çevresel kazancı veya kaybı) = **0.0735**

C4 (toplam maliyet ekonomik kazancı veya kaybı) = **0.3368**

C5 (karlılık kazancı veya kaybı) = **0.4000** olarak hesaplanmıştır.

Bu doğrultuda alüminyum metal ürün grubu için sürdürülebilirlik gelişimine etki eden 5 boyuttan en yüksek ağırlığa sahip olan kriter 0.40 (%40) oranıyla karlılık kazancı veya kaybı olarak belirlenmiştir. Diğer kriterler ise sırasıyla 0.3367 (%34) oranıyla toplam maliyet, 0.1464 (%15) oranıyla enerji tüketimi ve 0.0735 (%7) oranıyla gaz salınımıdır. En düşük ağırlığa sahip olan kriter ise 0.0443 (%4) oranıyla su tüketimi olarak tespit edilmiştir. Veriler değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde en fazla etkiye sahip kriterin yaklaşık %74 oranıyla ekonomik kriterler olduğu görülmüştür.

Ulaşılan tüm kriter ağırlıklarının ardından programa veri girişi yapılmıştır. Alüminyum ürün grubuna ait veri girişi Ek 4’de yer almıştır.

4.7.4. Alüminyum Ürün Grubuna Yönelik Bulgular

Senaryo 1a ve Senaryo 1b, alüminyum atık sahibi işletmelerin geri dönüşüm firmaları aracılığıyla yönettiği geri dönüşüm sürecinin sürdürülebilirlik performansına etkilerini değerlendirmektedir. Senaryo 2 ise birçok ülkede örnekleri olan geri dönüşüm teşvik sisteminin ülkemizde uygulanması durumunda sürdürülebilirlik performans sonuçlarını incelemektedir. Bu senaryoda yer alan teşvik sisteminde; devletin ilgili kanalları aracılığıyla atık sahibi işletmeler, geri dönüşüm şirketlerinin kaynaklarını (tesis, ekipman) sadece kullanım dönemindeki işletim maliyetlerini ödeyerek kullanabilmektedir.

Senaryo 1a için model dört sene olacak şekilde çalıştırılmış ve her bir zaman birimi iki aylık dönemi kapsamıştır. Modelin uzun çalıştırılmasının sebebi, alüminyum geri dönüşüm oranının dönem içerisinde %100’ ulaşmasını altında çalışmanın incelenmek istenmesidir. Senaryo 1b ve Senaryo 2 ise yine her t zamanı iki ay olacak şekilde, toplamda 2 sene için çalıştırılmıştır. Buradaki en önemli etki geri dönüşüm teşvik sistemlerinin iki seneyi aşmayacak şekilde organize edilmesidir ve bu durum doğrudan

Senaryo 2'yi etkilemektedir. Diğer taraftan iki senaryonun uygulama sonucunda karşılaştırılma ihtiyacı Senaryo 1b için de benzer kabulü gerektirmiş ve sonuçlar iki yıl sürecinde değerlendirilmiştir.

Üç senaryo altında yürütülen uygulamalara yönelik program çıktıları ilgili her alt bölümde tablolar şeklinde sunulmuştur.

4.7.4.1. Alüminyum Ürün Grubunda Senaryo 1a İçin Bulgular

Aşağıda alüminyum malzemeli katı atıkların dört sene periyotundaki sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerleri alüminyum sektöründe BWM ile ulaşılan şekliyle uygulanmıştır.

Tablo 53: Alüminyum Atıklar için Senaryo 1a Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.18	0.28	0.29	0.13	0.14	0.16
2	0.20	0.32	0.32	0.15	0.16	0.18
3	0.22	0.35	0.36	0.17	0.18	0.20
4	0.25	0.39	0.40	0.18	0.19	0.22
5	0.27	0.43	0.44	0.20	0.21	0.24
6	0.30	0.47	0.48	0.22	0.23	0.26
7	0.32	0.50	0.52	0.24	0.25	0.28
8	0.34	0.54	0.55	0.26	0.27	0.30
9	0.37	0.58	0.59	0.27	0.29	0.33
10	0.39	0.61	0.63	0.29	0.31	0.35
11	0.42	0.65	0.67	0.31	0.33	0.37
12	0.44	0.69	0.71	0.33	0.34	0.39
13	0.46	0.73	0.75	0.34	0.36	0.41
14	0.49	0.76	0.78	0.36	0.38	0.43
15	0.51	0.80	0.82	0.38	0.40	0.45
16	0.53	0.84	0.86	0.40	0.42	0.48
17	0.56	0.87	0.90	0.41	0.44	0.50
18	0.58	0.91	0.94	0.43	0.46	0.52
19	0.59	0.93	0.96	0.44	0.47	0.53
20	0.59	0.93	0.96	0.44	0.47	0.53
21	0.59	0.93	0.96	0.44	0.47	0.53
22	0.59	0.93	0.96	0.44	0.47	0.53
23	0.59	0.93	0.96	0.44	0.47	0.53
Final	0.59	0.93	0.96	0.44	0.47	0.16

Tablo 54: Alüminyum Atıklar için Senaryo 1a'nın En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.177	0.595
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.157	0.529
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.139	0.466
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.132	0.440
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.279	0.930
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.287	0.956

Alüminyum metal grubuna yönelik sonuçlar yukarıdaki tablolarda gösterilmiştir. Senaryo 1a sonucunda benzer alüminyum metal atıklara sahip işletmeler, geri dönüşümün potansiyel etkileri doğrultusunda ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği verilere ulaşmaktadır. İlk olarak çevresel sürdürülebilirlik performansı değerlendirildiğinde alüminyum metal atıklar için de geri dönüşümün avantajlı olduğu ve alüminyum geri dönüşümün çevresel açıdan kritik iyileştirmeler yapacağı görülmüştür.

Alüminyum katı atık geri dönüşümünün su tüketimi açısından başlangıçta %13.2 olan katkısı çalışma dönemi sonunda %44'e, enerji tüketimi açısından başlangıçta %27.9 olan katkısı çalışma dönemi sonunda %93'a ve son olarak saz salınımı açısından başlangıçta %28.7 etkisi çalışma dönemi sonunda %95.6 oranına ulaşmıştır. Bu veriler alüminyum atık geri dönüşümünün birincil üretimle üretilmiş malzemenin satın alınmasına göre su tüketimi açısından ortalama %44, enerji tüketimi açısından %93 ve gaz salınımı açısından %96 oranlarında çevreye verilen zararlı etkinin önlenebileceğini göstermektedir.

Diğer taraftan alüminyum geri dönüşümünün ekonomik sürdürülebilirlik performansı üzerine etkileri incelendiğinde; hem toplam maliyet hem de karlılık üzerinde alüminyum geri dönüşümün oldukça avantajlı durum yarattığı ifade edilebilir. İlk olarak atıkların belirli oranda geri dönüşümünde işletmenin katlanacağı toplam maliyetin, birincil üretimle üretilmiş aynı alüminyum kaynağı satın almasıyla katlanacağı toplam maliyete göre başlangıçta %13.9 olan kazancı dönem sonunda %32.7 artışla %46.6 oranına ulaşmaktadır. Bu oranlar, geri dönüşüm faaliyetlerinin birincil üretimle üretilmiş ürünün

satın alınmasına göre işletmeye verdiği ekonomik yükün %14-47 oranlarında azaltılabileceği şeklinde de yorumlanabilir. Fırsat maliyeti ve atıkların hurda değeri tarafından etkilenen karlılık değişkeninin ise dönem içerisinde %15.7 oranından %52.9 oranına çıktığı görülmektedir. %53'e varan oran, alüminyum malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşümle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Genel olarak alüminyum metal geri dönüşümün çalışmadaki ekonomik ve çevresel faktör açısından kurumlara avantajlı durum yarattığı çalışmanın önemli bir sonucudur. Modelin çalıştırılması ile ulaşılan genel sürdürülebilirlik gelişimi değerinin 1'den küçük olacak şekilde 0.177 ve 0.595 arasında kalması, alüminyum geri dönüşüm faaliyetinin sürdürülebilir tedarik zinciri üzerinde olumlu etki yarattığının göstergesidir. İşletmelerin alüminyum üretim kaynağını satın almaları yerine aynı üretim kaynağına mevcut atıklarını geri dönüştürerek sahip olmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %60 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

Bu sonuçlar uygulamacıların sürdürülebilir kalkınma hedeflerini atık yönetimi açısından belirleyebilmelerine, sürdürülebilirlik planlarını/programlarını hazırlayabilmelerine ve uluslararası faaliyetlerde, ihalelerde, anlaşmalarda gereklilik haline gelen sürdürülebilirlik raporlamalarına rehberlik edebilmesine destek olacaktır.

4.7.4.2. Alüminyum Ürün Grubunda Senaryo 1b İçin Bulgular

Aşağıda alüminyum malzemeli katı atıkların iki senelik dönem içerisinde sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Her zaman birimi iki aylık dönemi içermektedir. Bu senaryoda sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 55: Alüminyum Atıklar için Senaryo 1b Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.19	0.28	0.29	0.13	0.14	0.16
2	0.22	0.32	0.32	0.15	0.16	0.18
3	0.24	0.35	0.36	0.17	0.18	0.20
4	0.27	0.39	0.40	0.18	0.19	0.22
5	0.29	0.43	0.44	0.20	0.21	0.24
6	0.32	0.47	0.48	0.22	0.23	0.26
7	0.34	0.50	0.52	0.24	0.25	0.28
8	0.37	0.54	0.55	0.26	0.27	0.30
9	0.39	0.58	0.59	0.27	0.29	0.33
10	0.42	0.61	0.63	0.29	0.31	0.35
11	0.45	0.65	0.67	0.31	0.33	0.37
Final	0.47	0.69	0.71	0.33	0.34	0.39

Tablo 56: Alüminyum Atıklar için Senaryo 1b'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.190	0.471
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.157	0.390
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.139	0.344
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.132	0.326
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.279	0.689
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.287	0.707

Bu sonuçların senaryo 1a'dan farklılaşmasının temel sebepleri sürdürülebilirlik gelişimini etkileyen beş alt kriterin ağırlığından ve programın çalışma zamanının yarıya düşürülmesinden kaynaklanmaktadır. Senaryo 1b, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performans boyutlarının ağırlığını eşit kabul etmekte ve bu senaryoyu test etmektedir. Ulaşılan sonuçlara göre, alüminyum atık geri dönüşümü işletmenin toplam maliyeti üzerinde çalışma dönemi boyunca %34.4 ve karlılığı üzerinde %39 oranında daha fazla katkı sağlamaktadır. Genel sürdürülebilirlik performansını gösteren sürdürülebilirlik gelişimi üzerinde ise alüminyum geri dönüşümün birincil üretime göre etkisi %47.1 daha fazladır.

Senaryo 1b sonuçları, farklı ürün gruplarındaki geri dönüşümün potansiyel etkilerini kıyaslayarak karşılaştırabilmesi ve farklılığın ortaya koyulabilmesi açısından önemlidir. Dört ürün grubunun geri dönüşümünün sürdürülebilirlik gelişimi üzerindeki farklı etkilerini araştırma amacıyla yapılan bu test, Bölüm 4.8 'de detaylı tartışılmaktadır.

4.7.4.3. Alüminyum Ürün Grubunda Senaryo 2 İçin Bulgular

Aşağıda iki sene boyunca alüminyum sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin işletmelerin sürdürülebilirlik performansına ilişkin sonuçları ortaya koyulmuştur. Bu uygulamada Senaryo 1b'de olduğu gibi sürdürülebilir kalkınmayı etkileyen 5 temel alt boyuttan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performanslarının ağırlık değerlerinin eşit olduğu kabulü (%50) vardır.

Tablo 57: Alüminyum Atıklar için Senaryo 2 Program Çıktıları

Zaman	Sürdürülebilirlik Gelişimi	Enerji Tüketimi	Gaz Salınımı ⁴	Su Tüketimi	Toplam Maliyet	Karlılık
1	0.22	0.28	0.29	0.13	0.20	0.22
2	0.25	0.32	0.32	0.15	0.23	0.25
3	0.28	0.35	0.36	0.17	0.25	0.28
4	0.31	0.39	0.40	0.18	0.28	0.31
5	0.34	0.43	0.44	0.20	0.31	0.34
6	0.37	0.47	0.48	0.22	0.33	0.37
7	0.40	0.50	0.52	0.24	0.36	0.41
8	0.43	0.54	0.55	0.26	0.39	0.44
9	0.46	0.58	0.59	0.27	0.41	0.47
10	0.49	0.61	0.63	0.29	0.44	0.50
11	0.52	0.65	0.67	0.31	0.47	0.53
Final	0.55	0.69	0.71	0.33	0.49	0.56

Tablo 58: Alüminyum Atıklar için Senaryo 2'nin En Düşük ve En Yüksek Performans Verileri

Kriterler	En Düşük Değeri (Min)	En Büyük Değeri (Max)
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.223	0.550
Karlılık Kazancı veya Kaybı	0.225	0.555
Toplam Maliyet Ekonomik Kazancı veya Kaybı	0.200	0.494
Su Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.132	0.326
Enerji Tüketimi Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.279	0.689
Gaz Salınımı Çevresel Kazancı veya Kaybı	0.287	0.707

Ülkemizde teşvik sisteminin uygulanma durumu altında alüminyum atıklara yönelik model çıktıları yukarıdaki tablolarda yer almaktadır. Bu verilerin yorumlanmasında, işletmelerin yalnızca işletim maliyetlerini ödeyerek, geri dönüşüm firmalarının tesisinden ve ekipmanlarından yararlanabildikleri geri dönüşümün sistemin etkileri olduğu unutulmamalıdır. Senaryo 2'nin çalıştırılması ile alüminyum sektöründe uygulanan geri dönüşüm teşvik sisteminin potansiyel etkileri doğrultusunda hükümetin karar birimlerinin ihtiyaç duyabilecekleri, yararlanabileceği/referans alabileceği veriler sunulmaktadır.

Geri dönüşüm teşvik sisteminin özünde teknik ve finansal desteklere sahip olması, alüminyum malzemeli endüstriyel atıklara sahip işletmelerin ekonomik performansını etkileyecek bir durum yaratmaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik performansı açısından sonuçlar incelendiğinde; işletmeler ilk dönemde toplam maliyetinde %20'ye varan iyileştirme sağlarken, iki sene boyunca teşvikten yararlanmaları sonucunda %50'ye varan kazanç elde edebilmektedir. Fırsat maliyetinin dahil edildiği karlılık değişkeninde ise sağlanan katkı %56 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu oran, alüminyum malzemeli atıkların yerine geçecek yeni malzemenin satın alınması yerine geri dönüşüm teşvik sisteminin desteğiyle kazanılmasının işletmenin karlılığına olan etkisini ifade etmektedir.

Çalışmanın amacını gösteren ve anahtar kriter olarak tanımlanan “sürdürülebilirlik gelişimi” açısından alüminyum atık sahibi işletmelerde geri dönüşüm teşvik sisteminin uygulanmasıyla işletmelerin sürdürülebilirlik performansı 2 sene sonunda %55 oranına çıkabilecektir. İşletmelerin üretim kaynağını satın almaları yerine aynı kaynağa teşvik

sisteminden yararlanarak ulaşmaları durumunda sürdürülebilirlik performansını %55 oranında arttırabileceği tahmin edilmektedir.

4.8. Dört Ürün Grubunun Senaryo 1b'deki Sonuçlarını Değerlendirme

Senaryo 1b'de ürün geri dönüşümünün sürdürülebilirlik performansına olan etkileri ekonomik ve çevresel kriterlerin eşit ağırlık değerleri altında tartışılmaktadır. Aşağıda her ürün grubunun potansiyel sonuçları özet tablo şeklinde sunulmuştur. Dört ürün grubundaki farklı etkilerin özellikle ilgili literatür için faydalı olduğu ifade edilebilir.

Tablo 59: Senaryo 1b'nin Uygulanmasına İlişkin Genel Sonuç Tablosu

Ürün Grupları	Alüminyum	Çelik	Plastik	Cam
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.190-0.471	0.186-0.435	0.156-0.385	0.124-0.308
Maliyet	0.139-0.344	0.147-0.365	0.123-0.305	0.122-0.303
Karlılık	0.157-0.390	0.182-0.451	0.152-0.376	0.162-0.404
Su Tüketim	0.132-0.326	0.129-0.318	0.092-0.226	0.150-0.370
Enerji Tüketimi	0.279-0.689	0.180-0.445	0.196-0.483	0.077-0.191
Gaz Salınımı	0.287-0.707	0.252-0.623	0.233-0.575	0.091-0.225

Çalışmanın sistem dinamiği yaklaşımı ile ulaşılan sonuçları yukarıdaki tabloda özetlenmiştir. Çalışmada işletmelerin tüm ürün gruplarında yeni malzeme satın almaları yerine atıklarını geri dönüştürmelerinin, sürdürülebilirlik performansları açısından avantajlı olduğu gösterilmiştir. Fakat geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri performansında etkili olan çevresel ve ekonomik performans ölçütlerinin alacağı değerler ürün gruplarına bağlı olarak farklılık göstermiştir.

Sonuçlar ilk olarak çevresel sürdürülebilirlik performansı açısından incelenmektedir. Geri dönüşümün enerji tüketimi üzerindeki potansiyel etkisi %69'a varan oranda en çok alüminyum metalinde gerçekleşirken, en az etki dönem sonunda %19.1 oranıyla cam ürün grubunda olmuştur. Alüminyum metalinin birincil üretimle üretilmesinde gereken enerji miktarının diğer gruplarına nazaran fazla olması ve geri dönüşüm ile birlikte bu oransal etkinin daha büyük olması muhtemel sonucu etkilemiştir. Bu bulgu Dahlström ve Ekins (2007)'nin çalışmasındaki "Enerji tüketim oranları açısından potansiyel olarak en yaygın uygulanabilirliğin alüminyum metali olarak gösterilmesi" bulgusunu desteklemektedir. Diğer taraftan enerji tüketiminde sağlanacak fırsatın %19 katkı oranıyla en az cam ürün

grubunda olması, cam malzemeli ürünlerin birincil üretiminde de gerek duyulan enerji miktarının diğerlerine nazaran az olmasının muhtemel sonucudur. Geri dönüşümle birlikte enerji tüketimi oranında sağlanan fırsatın %48.3 oranıyla en yüksek olduğu ikinci ürün grubu plastikler olarak belirlenmiştir. Uygulamada yalnızca termoplastiklerin olması sebebiyle bu geri dönüşüm sonuçları yalnızca ilgili plastik çeşidi için geçerlidir ve termoplastikler alüminyum metalinin ardından enerji tüketimindeki en yüksek fayda oranını sağlamaktadır. Bu sonuç plastik atık geri dönüşümünün birçok malzemeye göre enerji tüketiminde büyük oranlarda sağlayacağı tasarrufu konu edinen PAGEV (2015)'in bulgularıyla desteklenmektedir.

İkinci olarak geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünlerin birincil üretimle üretilmiş ürünlere göre gaz salınım oranlarındaki katkı açısından en büyük etkinin %71 oranıyla yine alüminyum metalinde olduğu görülmüştür. Bu bulgu, alüminyum atıkların geri dönüştürülmesini değer zinciri boyunca fırsatlarını tartışan Dahlström ve Ekins (2007)'in çalışmasını desteklemektedir. Geri dönüşümle birlikte sera gazı salınım oranında sağlanan etkinin %62.3 oranıyla en yüksek olduğu ikinci ürün grubu çeliklerdir. Bu sonuçlar, endüstriyel atık geri dönüşümünün salınacak gaz miktarı açısından en büyük orandaki katkısını metallerin sağlayacağını göstermektedir. Diğer taraftan endüstriyel atık geri dönüşümünün sera gazı açısından en düşük faydasını %22.5 oranıyla cam ürünler sağlamaktadır. Cam ürün grubunun birincil üretiminde salınan gaz miktarının diğer ürün gruplarına nazaran daha az olması, cam malzemelerin ilgili kriter açısından çevreci görülmesine katkı sağlamıştır. Bu mevcut durum da cam atık geri dönüşümünün gaz salınımı açısından sağlayacağı fayda oranını diğer ürün gruplarına nazaran düşük çıkmasında etkili olmuştur.

Üçüncü çevresel performans kriteri olarak geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünlerin birincil üretimle üretilmiş ürünlere göre su tüketimi oranlarındaki katkı açısından en büyük etki %37 oranına ulaşacak şekilde cam ürün grubundadır. Su tüketimi oranındaki en büyük katkının cam atık işlemlerinde görülüyor olması, Zarrinpoor (2021)'un cam geri dönüşümüne yönelik tedarik zinciri ağını tasarladığı çalışmada vurgulanan ve desteklenen bir bulgu olmuştur, ancak bu büyük katkının miktar açısından değil, oransal açıdan olduğu da ifade edilmelidir. Alüminyum ve çelik metallerin geri dönüşümünde de su tüketimi açısından %30 oranlarında sağlanan çevresel fayda, plastik ürün gruplarının ilgili kriter açısından en başarısız ürün grubu olmasıyla sonuçlanmıştır. Plastik içerikli

endüstriyel atıkların geri dönüşümünde ihtiyaç duyulan su miktarının nispeten yüksek olması ve birçok ürün grubuna göre avantajlı görülemiyor olması Benavides vd. (2018)'in bulgusunu desteklemektedir.

Toplam maliyet kazanç/kayıp kriterine yönelik sonuçlar ekonomik performans açısından incelenmektedir. Birincil üretimle üretilmiş ürünlerin satın alınması yerine ürünlerin geri dönüşümle elde edilmesinin işletmenin toplam maliyeti üzerindeki en büyük katkısı %36.5 oranıyla çelikler, ardından %34.4 oranıyla alüminyumlar tarafından gerçekleşmektedir. Bir başka şekilde çelik geri dönüşümü işletmelerin toplam maliyet yükünü %36.5 oranında; alüminyum metali %34.4 oranında azaltmaktadır. Maliyet fayda oranı açısından çelik metal geri dönüşümü avantajlı gözükse de toplam miktar açısından bu fırsatın büyüklüğü alüminyumlarda daha yüksektir. Çünkü alüminyum malzemelerin ortalama satış fiyatı çelik malzemeli ürünlere göre 1.3-2 kat daha yüksektir. Buradan hareketle geri dönüşümün ekonomik performansı etkileyen toplam maliyet değişkeninde en yüksek katkı oranını çalışmanın doğrudan iki metali tarafından verildiği görülmektedir. Metal geri dönüşümün diğer birçok malzemeye nazaran toplam maliyet üzerine yüksek oranlardaki katkısı Seshappa ve Prasad (2020)'in çalışma sonuçlarıyla paraleldir. Geri dönüşümün toplam maliyet oranına en az katkısı ise cam ürün gruplarındadır. Cam atıkların yerine geçecek aynı malzemenin satın alınması yerine geri dönüştürülmesiyle işletmenin toplam maliyet açısından sağlayacağı katkı oranı yalnızca %30 olarak sonuçlanmıştır. Bu malzeme grubundaki atıkların geri dönüşümünün yeterince ekonomik görülmemesi Farel vd., (2013)'in çalışmasını desteklemektedir.

Geri dönüşüm ile elde edilmiş ürünlerin birincil üretimle üretilmiş ürünlerin satın alınmasına göre işletmenin karlılık oranına en büyük katkısı %45.1 oranıyla çelikler tarafından sağlanmaktadır. Bu bulgu, 2020 yılında BIR tarafından yayınlanan çelik geri dönüşüm raporunu desteklemektedir (BIR, 2020). Diğer taraftan cam atık geri dönüşümünün karlılık açısından sağlayacağı fırsatın %40 oranına ulaşmasında, camın hurda değerinin ekonomik olmaması ve bu sebeple fırsat maliyetini yükseltmesi muhtemel etkili olmuştur. Fırsat maliyetinin etki ettiği karlılık oranı üzerindeki en az etkiye de %37.6 oranıyla plastik geri dönüşümün neden olduğu görülmektedir. Her ne kadar plastik geri dönüşümünün diğer üç ürün grubuna göre karlılık oranı açısından katkısı geride kalsa da, bu oranların her biri geri dönüşümün oldukça fırsat yaratan durumunu da ortaya koymaktadır.

Geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkisini inceleyen ve çalışmanın nihai sonucuna götüren sürdürülebilirlik gelişimi verilerine göre endüstriyel katı atık geri dönüşümünün sürdürülebilirlik performansı üzerindeki en büyük katkısı alüminyum malzeme grubunda görülmektedir. Alüminyum malzemeli atıkların geri dönüşümü sürdürülebilirlik performansını 100 br kg'lık atık girişiyle başlangıçta %19 oranında, iki senelik çalışma sonunda ise %47 oranında arttırmaktadır. Alüminyum atık sahibi işletmeler doğrudan yeni malzeme satın almaları yerine geri dönüşüm faaliyetini tedarik zincirlerine dahil etmeleri durumunda sürdürülebilirlik performansını neredeyse %50 oranında iyileştirebilmektedir. Geri dönüşümün sürdürülebilirlik performansındaki diğer en büyük katkısı çeliklerde görülmüştür. Çelik malzemeli atıkların geri dönüşümü işletmelerin sürdürülebilirlik performansını iki senelik çalışma sonunda %43.5 oranında arttırarak ikinci önemli malzeme grubu olmuştur.

İki metalin sonuçlarına bakarak, metal geri dönüşümün işletmenin sürdürülebilirlik performansına olan etkisi cam ve plastik malzemeli atıkların geri dönüşümünün sebep olacağı katkı oranlarına nazaran daha yüksektir. Plastik malzemeli atıkların geri dönüşümü işletmenin sürdürülebilirlik gelişimine %38.5 oranında katkı sağlarken, cam atıklarda bu etki diğerlerine nazaran daha düşük oranlarda (%30) görülmektedir.

4.9. Dört Ürün Grubunun Senaryo 2'deki Sonuçlarını Değerlendirme

Bu bölümde Senaryo 2'nin dört ürün grubunda uygulanmasıyla ulaşılan sonuçların değerlendirilmesi birlikte yapılmaktadır. Aşağıda her ürün grubunun ilgili senaryodaki potansiyel sonuçları özet tablo şeklinde sunulmuştur. Bu bölümle birlikte sunulan veriler özellikle geri dönüşüm teşvik sisteminin belirli amaçlar altında en çok işe yaradığı ürün grubu kararı verilmesinde önemlidir.

Tablo 60: Senaryo 2'nin Uygulanmasına İlişkin Genel Sonuç Tablosu

Ürün Grupları	Alüminyum	Çelik	Plastik	Cam
Sürdürülebilirlik Gelişimi	0.223-0.550	0.205-0.505	0.191-0.469	0.161-0.395
Maliyet	0.200-0.494	0.206-0.508	0.191-0.469	0.198-0.483
Karlılık	0.225-0.555	0.237-0.585	0.233-0.549	0.234-0.573
Su Tüketim	0.132-0.326	0.129-0.318	0.092-0.226	0.150-0.370
Enerji Tüketimi	0.279-0.689	0.180-0.445	0.196-0.483	0.077-0.191
Gaz Salınımı	0.287-0.707	0.252-0.623	0.233-0.575	0.091-0.225

Yukarıdaki tablonun önemi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda planlanan geri dönüşüm teşvik sisteminin ülkemizde uygulanması sonucunda politika yapıcılara fikir verebilecek olmasıdır. Bu sonuçlar özellikle teşvik sisteminin belirli amaçlar doğrultusunda hangi ürün grubu üzerinde daha etkili olduğunu (yararlı olduğunu) göstermektedir. Model çıktılarının ilk senaryodakilere göre en temel farkı sonuçların kapsamı olmuştur. Bu uygulamadaki sonuçların daha kapsamlı olması sebebiyle yapılan değerlendirmeler ‘makro’ ölçütte gerçekleştirilmektedir.

Tablo 60 özellikle sürdürülebilir kalkınmanın 9. Alanı “Sanayi, Yenilikçilik ve Alt Yapı” ile 12. Alanı “Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim” ve Atık Yönetimi gereğince planlanan geri dönüşüm teşvik sistemlerinin sürdürülebilirlik performansına etkisini ortaya koymaktadır. Tablodaki sonuçların yorumlanmasında farklı amaçlar gözetilmelidir. Benzer geri dönüşüm teşvik sistemini içeren projelerin amaçlarından biri bölgedeki/şehirdeki/ülkedeki geri dönüşüm oranı en düşük olan gruba odaklanarak, ilgili malzeme gruplarına yönelik ikincil ürünleri kazanma olmaktadır. Böylelikle teşvik sisteminin uygulanacağı bölgenin mevcut atık verilerine göre önceliklendirilecek ürün grubu değişebilecektir. Örneğin; cam geri dönüşüm oranlarının bölgesel olarak çok düşük olduğu eyaletlerde Güneydoğu Geri Dönüşüm Geliştirme Konseyi (SERDC) tarafından projeler geliştirilmiş ve seçilen pilot bölgede 15 cam üreticisi teşvik sisteminden faydalanarak camlara yönelik atık geri dönüşüm oranları yükselmiştir. Hükümetin karar birimleri tarafından geri dönüşüm oranlarının arttırılmaya odaklanması ile bu çalışmanın verilerinin projede hedeflenen toplam geri dönüşüm miktarı dikkate alınarak kullanılması beklenmektedir. Çünkü uygulama verilerinin kullanımı geri dönüşüm teşvik sistemi projelerinin su tüketim miktarı (lt/br), enerji tüketim miktarı (kwh/br), gaz salınım miktarı (CO₂ gr/br) ve diğer yandan ekonomik performans sonuçlarını daha gerçekçi tahmin edilebilir kılacaktır.

Teşvik sisteminin diğer örneklerine bakıldığında, devletlerin amaçlarından biri işletmelerin sürdürülebilirlik performanslarının gelişimine destek olarak işletmeleri “sürdürülebilir üretime ve tüketime” yönlendirmektir. Sürdürülebilirlik performansı açısından geri dönüşüm teşvik sisteminin en büyük katkısı alüminyum atıklara sahip işletmelerde, en küçük katkısı ise cam atıklara sahip işletmelerde görülmektedir. Alüminyum malzemeli atıklara sahip işletmeler, bu teşvik sisteminin desteğiyle sürdürülebilirlik performansını %22 oranından iki dönem sonunda %55 oranına kadar

arttırabilmektedir. Bu sebeple teşvik sisteminde endüstrileri sürdürülebilir üretime ve tüketime teşvik etmek amaçlanıyorsa katkı oranının en yüksek olması sebebiyle alüminyuma öncelik verilmesi önemlidir. Aynı amaçla projeye ikinci bir ürün grubu dahil edilmek istendiğinde de katkı oranının %51'lere ulaşması sebebiyle çelikler öncelikli olmalıdır. Diğer taraftan plastik atık geri dönüşümünde de bu avantajın %47 oranına ulaşması açısından sonucun önemli olduğu ifade edilebilir. Bu değerlendirmelerin ışığında birincil hedefin işletmeleri sürdürülebilir üretime ve tüketime teşvik etmek olduğu durumlarda öncelik verilmesi muhtemel ürün grupları metaller olarak görülmelidir. Aynı zamanda ülkemizdeki endüstriyel atık miktarının en çok çelik (tüm endüstriyel atıkların %29) ve alüminyum metalinde (tüm endüstriyel atıkların yaklaşık %9'u) olması, geri dönüşüm oranlarının oldukça yetersiz görülmesi ve bunlarla beraber teşvik sisteminin sürdürülebilirlik performansına olan etkilerinin en yüksek olduğu ürün grupları olması, karar vericilerin bu atıklara öncelikli olarak yönelmesini güçlendirmektedir.

Karar birimleri tarafından işletmeleri geri dönüşüme teşvik etmek amacıyla işletmelerin ekonomik performans gelişimi de temel bir kriter olarak görülmektedir. Her bir ürün grubunun ekonomik sürdürülebilirlik performansındaki avantajına rağmen çelik ürünlerin performansındaki katkı oranının yüksek olması karar birimlerinin bu ürün grubuna öncelikle yönelmesine etki edebilmektedir. Örneğin toplam maliyet açısından durum değerlendirildiğinde; çelik malzemeli atıklara sahip işletmelerde geri dönüşüm teşvik sisteminin uygulamaya başlamasıyla %51 oranında fayda sağlanabilmektedir. Diğer ürün gruplarında uygulanacak teşvik sistemi ise toplam maliyet oranındaki iyileştirme açısından alüminyumlarda %49, camlarda %48 ve plastiklerde %47 seviyesindedir. Hükümetin işletmeleri geri dönüşüme teşvik edebilmeleri için çoğu zaman ekonomik açıdan fayda yaratması önemlidir. Görüldüğü gibi dört ürün grubundaki ekonomik performans gelişimi, oransal olarak birbirine çok yakındır. Buradaki verilerden hareketle, teşvik sisteminin ekonomik olarak toplam maliyet açısından en büyük katkı oranının çeliklerde olması, öncelikli ürün grubuna ilişkin verilecek kararı etkileyebilmektedir. Ancak projede ekonomik değer olarak “kazanç miktarına” odaklanıldığında yapılan hesaplamalar sonucu alüminyum malzemeli atıkların öncelikli ürün grubu olarak belirlenmesi önerilir. Çünkü alüminyum metalinin satış değeri, çelik metalinkine nazaran ortalama 1.3-2 kat daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu bulguları destekleyecek

şekilde ABD’de Kuzey Carolina Çevre Kalitesi Departmanı’nın desteğiyle yapılan projede, çoğunluğun metal sektöründe olduğu 17 işletmeye odaklanılmış ve 1.3 milyon doları aşan kazanç sağlanmıştır (deq.nc.gov, Erişim Tarihi: 21.01.2022). Benzer projelerin varlığı çalışmanın bulgularını destekleyecek şekilde metalleri önceliklendirmiştir.

Hükümetlerin öncelik verdiği atık çeşidine ve projede hedefledikleri atık miktarına göre çevresel açıdan ve ekonomik açıdan sağlanacak etkilerin büyüklüğü değişebilmektedir ve bu durum da teşviğin uygulanacağı sektörü etkilemektedir. Bu hususta aşağıda bazı senaryolar değerlendirilmiştir:

Çevresel sürdürülebilirlik performansını artırma amacıyla enerji tüketimine odaklanmak birçok projede öncelikli öneme sahiptir. Ülkemizde de politika yapıcılarının son dönemlerde özellikle enerji tasarrufu sağlaması sebebiyle atık yönetimine odaklandığı görülmektedir (PAGEV, 2015). Bu doğrultuda karar birimlerinin ana hedefi enerji tasarrufu sağlamak ve geri dönüşümün etki ettiği enerji tüketimine odaklanmaksa; alüminyum malzemeli ürünlerin geri dönüşümünde çevresel açıdan büyük fırsatlar sunulmaktadır. Alüminyum endüstriyel atıkları geri dönüştürmek enerji tüketim performansında %69’luk fırsat sağlarken, ikinci büyük fırsatı veren plastik ürünlerde ise bu etki oranı %48 seviyesinde kalmıştır. Bu sonuç, karar vericilerin alüminyuma yönelimini güçlendirmektedir. İkinci ürün grubu için çelikler ve plastikler arasındaki %4’lük farka bakılarak, teşvik sisteminde plastik atıklar öncelikli görülse de miktarsal açıdan enerji tüketiminde çelik atıkların geri dönüşümü daha avantajlıdır. Çünkü çelik üretiminde ihtiyaç duyulan enerji miktarı ortalama 1.5-2 kat arasında daha yüksektir.

Bir diğeri çevresel sürdürülebilirlik performansını artırma amacıyla sera gazı salınımına odaklanmak birçok projede öncelikli önemdedir (Dahlström ve Ekins, 2007). Sera gazı salınımını azaltmaya yönelik yapılan projelerin birçoğu enerji tüketim kriteri ile birlikte değerlendirilmiştir. Eğer karar birimlerinin ana hedefi gaz salınımını düşürmekse çevresel kazanımın yüksek olması ve birincil üretimde salınan gaz miktarının çevresel riskini daha çok düşürebilmesi sebebiyle öncelikli ürün grubu olarak alüminyum atıklara odaklanmak doğru bir seçim olarak görülmektedir. İkinci olarak diğeri metal atık grubu olan çelikler de geri dönüşümün gaz salınımı açısından çevresel riskini düşüren grup olarak belirlenmiştir. Hem enerji tüketimi hem de sera gazı salınımına yönelik bulguları

destekleyecek şekilde Polonya’da “Altyapı ve Çevre Operasyonel Programı” kapsamında enerji tüketiminde ve CO₂ gaz salınımında çevresel riskleri azaltmak amacıyla alüminyum içeriği yüksek atıklara odaklanılmıştır (TÜDAM, 2016). Cam atıklar bu hedef doğrultusunda teşvikte önceliğe girecek malzemelerden değildir.

4.10. Senaryo Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde işletmelerin sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkileri hem mevcut geri dönüşüm teşvik sistemi varlığında hem de geri dönüşüm teşvik sistemi varlığında ortaya koyularak sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Tablo 61, iki senaryoyu iki sene boyunca çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçları göstermektedir.

Tablo 61: Senaryo 1b ve Senaryo 2 Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ürün Grupları	Senaryo 1b			Senaryo 2		
	Sürdürülebilirlik Gelişim	Karlılık	Maliyet	Sürdürülebilirlik Gelişim	Karlılık	Maliyet
Alüminyum	0.190-0.471	0.157-0.390	0.139-0.344	0.223-0.550	0.225-0.555	0.200-0.494
Çelik	0.176-0.435	0.182-0.451	0.147-0.365	0.205-0.505	0.237-0.585	0.206-0.508
Plastik	0.156-0.385	0.152-0.376	0.123-0.305	0.191-0.469	0.233-0.549	0.191-0.469
Cam	0.124-0.308	0.162-0.404	0.122-0.303	0.161-0.395	0.234-0.573	0.198-0.483

Yukarıdaki tabloda senaryolar karşılaştırılırken çevresel sürdürülebilirlik performans kriterlerine hiç yer verilmemiştir, çünkü geri dönüşüm teşvik sisteminin ilgili dört sektörde uygulanması durumunda çevresel sürdürülebilirlik performansında herhangi bir değişim gerçekleşmemektedir. Geri dönüşüm teşvik sistemi işletmelerin yalnızca ekonomik performansını etkileyecek bir durum yaratmaktadır. Bu sebeple iki senaryonun sürdürülebilirlik gelişimi açısından farklılığına yalnızca ekonomik sürdürülebilirlik boyutları neden olmaktadır.

Tablo 61 teşvik sisteminin mevcut geri dönüşüm sistemlerine göre ekonomik sürdürülebilirlik performansına olan etkisini ve bu bağlamda sürdürülebilirlik gelişimine olan katkısını göstermektedir. Bu veriler aynı zamanda işletmelerin (geri dönüşüm tesislerinde) kendi atıklarını geri dönüştürmesi ile teşvik sistemi desteği alarak geri

dönüştürmesinin farkını ortaya koymaktadır. Nitekim teşvik sistemi desteği, işletmelere ekonomik açıdan fırsat sunacağı için sürdürülebilirlik performansındaki katkının daha büyük olması beklenmektedir ve sonuçlar bunu doğrulayacak şekilde çıkmıştır.

Alüminyum atıklara yönelik gerçekleştirilen bir teşvik sisteminin mevcut geri dönüşüm sistemlerine nazaran işletmenin maliyetinde %15, karlılık üzerinde %16.5 oranında daha fazla fayda sağladığı görülmüştür. Çelik atık sahibi işletmelerde uygulanacak teşvik sisteminin, atıkların doğrudan üretici sorumluluğunda geri dönüştürülmesine göre maliyet açısından %14.3, karlılık açısından %13.4 daha yüksek fayda düzeyinde çıkmıştır. Mevcut karşılaştırmada plastik atık sahibi işletmelerin maliyetinde %16.4, karlılığında %17.3; cam atık sahibi işletmelerin maliyetinde %18, karlılığında %17 oranında daha fazla katkı sağlanabilmektedir. Eğer geri dönüşüm teşvik sistemi, atıklarını geri dönüşüm firmalarıyla aracılığıyla geri dönüştüren işletmeler üzerinde uygulansaydı geri dönüşüm teşvik sisteminin maliyet oranı üzerinde en büyük avantajının cam ürün gruplarında, fırsat maliyetinin etki ettiği karlılık oranı üzerindeki fırsatının plastik ürün gruplarında olması beklenirdi.

Özetle geri dönüşüm teşvik sistemi, işletmelerin kendi sorumluluğunda atıklarını geri dönüştürdüğü geleneksel geri dönüşüm sistemlerine göre karlılık oranlarında %13.4-17.3 daha fazla katkı sağlarken, toplam maliyet oranlarında elde edilecek katkı %14.3-18 daha fazla olmaktadır. Bu sonuçlar geri dönüşüm teşvik sisteminin potansiyel faydasını ortaya koymaktadır. Sürdürülebilirlik performansı açısından ise durum; mevcut geri dönüşüm sisteminin sağlayacağı katkının en az %7-8.7 fazlası teşvik sisteminin etkisiyle sağlanmaktadır. Bu veriler geri dönüşüm teşvik sisteminden tesis ve kaynak olarak yararlanan işletmeler üzerindeki etkiyi gösterirken, teşvik sistemlerinin kapsamı ve büyüklüğünün değişmesi durumunda sonuçlarda farklılıklar olacaktır. Bu noktada teşvik sistemi eğer işletmelerin daha çok maliyete katlanacağı şekilde programlanırsa mevcut geri dönüşüm sistemlerine nazaran sürdürülebilirlik performansına olan katkısı %7-8.4'nin altına düşebilecektir. Aynı zamanda teşvik miktarının daha büyük olması, sonuçları pozitif yönde etkileyerek bu etkinin %7-8.4 seviyelerinin üstüne çıkmasına katkı sağlayacaktır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürdürülebilir atık yönetimi ile birlikte atıkları geri dönüştürerek malzemeleri geri kazanmanın etkileri zamanla çok fazla tartışılan bir konu olmuştur. Her ne kadar konu ilgi çekse de ilk olarak alandaki veri eksikliği ve yanlış varsayımlar atık sahibi işletmelerin bu uygulamayı ihmal ettiği ve çekindiği bir durum haline getirmiştir. Günümüzde atık bertarafı birçok ülkede daha çok tercih edilen yöntem olarak sürdürülebilir yönetimin önündeki büyük bir engel olarak görülmektedir. Bu noktada işletmelere kendi atıklarını tekrar üretimde kullanabilecekleri şekilde değerlendirmeleri ile sahip olacakları etkileri gösteren gerçek performans verilerinin sunulmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Diğer taraftan devletler sürdürülebilir kalkınmaya yönelik özellikle “Atık Yönetimi”nde son yıllarda özel bir çaba göstermektedir. Dünyanın birçok ülkesinde sürdürülebilir kalkınmaya destek verecek şekilde geri dönüşüm oranlarını artırma, döngüsel ekonomi alt yapısını güçlendirme, doğal kaynakları koruma ve çevresel riskleri azaltma gibi hedefler doğrultusunda hükümetler çeşitli politikalar geliştirmeye ve işletmelerin yararlanabileceği teşvik sistemlerini uygulamaya başlamıştır. Türkiye’de ise politika yapıcılar tarafından atık yönetimine yönelik çalışmalar ve projeler yapılsa da henüz küresel ölçekte örnekleri olan uygulamalara yer verilmemiştir. Bu noktada sürdürülebilir kalkınmanın hedeflendiği ülkemizde, karar vericiler için geri dönüşüm teşvik sistemlerinin uygulanması sonucunda ulaşılabilecek etkilerin ortaya koyulma ihtiyacı oluşmuştur.

Literatürde geri dönüşümün tedarik zinciri performansına etkileri detaylı şekilde tartışılrsa da üretimde oluşan atıkların üretici sorumluluğuyla geri dönüştürülmesine odaklanılmamış ve endüstriyel atık geri dönüşümünün işletmelerin tedarik zinciri performansını izlemeye yönelik detaylı bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmada endüstriyel katı atıkların geri dönüştürülmesinin sürdürülebilir tedarik zinciri performansına olan etkilerini ortaya koyan performans ölçüm modeli önerilmiştir. Aynı zamanda dört farklı ürün grubu (plastik, cam, çelik ve alüminyum) için çalışma ayrı sürdürülmüştür ve önerilen modelin kullanımı ile farklı çeşitlerdeki endüstriyel atık geri dönüşümünün tedarik zinciri performansına etkilerinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. Çalışmanın diğer amaçları ise; dünyada bazı uygulama örnekleri olan

geri dönüşüm teşvik sistemi benzerlerinin ülkemizde uygulanması sonucunda ulaşılabilecek çevresel ve ekonomik sonuçları tartışmak ve bu sonuçlara göre ilgili karar birimlerinin öncelik vereceği ürün gruplarını belirlemektir. Özetle bu çalışma, “üretici sorumluluğu” ve “teşvik sistemi” durumlarında endüstriyel atık geri dönüşümün sürdürülebilir tedarik zinciri performansına yönelik bakış açısı sunmaktadır.

Araştırmanın amaçlarına ulaşabilmek için sistem dinamiği yaklaşımı kullanılmıştır. Geri besleme döngülerinin yer aldığı bu yaklaşım kullanılarak sistem davranışları takip edilmiş ve zamana bağlı olarak yaşanacak değişimler tahmin edilmiştir. Araştırmada ihtiyaç duyulan birincil veriler her ürün grubuna yönelik geri dönüşüm firmalarının uzmanlarından toplanmıştır. Plastik ve çelik atık geri dönüşümü için ihtiyaç duyulan veriler beş, cam ve alüminyum atık geri dönüşümü için dört firmadan sağlanmış olup toplamda on beş farklı firmayla görüşülmüştür. Firmalardan sağlanamayan diğer verilere ise literatürdeki benzer uygulamaların incelenmesiyle ulaşılmıştır. Bunlara ek olarak modelde kriterlere yönelik ağırlıklandırma yapabilmek için her ürün grubunun geri dönüştürülmesinde uzman olan 10’ar kişiye BWM yaklaşımı uygulanmıştır. Çalışmada farklı ürün gruplarının yer alması veri toplama ile birlikte analiz sürecinin bağımsız yürütülmesini etkilemiştir.

Çalışmada farklı amaçlara cevap şekilde üç farklı senaryo incelenmiştir. Bunlardan ilki; işletmelerin “üretici sorumluluğu” ile atıklarını geri dönüştürmesinin sürdürülebilir tedarik zinciri performansına etkileri hakkında bakış açısı sunulmasına yöneliktir. Bu senaryo için “Endüstriyel katı atık geri dönüşümünün işletmenin çevresel sürdürülebilirlik performansına, ekonomik sürdürülebilirlik performansına ve toplam sürdürülebilirlik performansına olan etkileri nedir?” sorularına cevap verilmiştir. İşletmelerinin sürdürülebilirlik hedeflerini belirleyebilmelerine, ilgili programlar hazırlayabilmelerine ve sürdürülebilirlik raporlamalarında kullanmalarına yarayacak verilerin hepsi ayrı ayrı her ürün grubuna özel olarak değerlendirilmelidir. Her bir ürün grubunda atık geri dönüşümü, işletmelerin hem ekonomik hem çevresel sürdürülebilirlik performanslarına katkı sağlayacak şekilde sonuçlanmıştır. Plastik endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesinin sürdürülebilirlik performansına etkisi çalışma dönemi sonunda %50’ye, cam atıkların %45’e, çelik atıkların %56’ya ve alüminyum atıkların %60’a ulaşmaktadır.

Araştırma kapsamında “Endüstriyel katı atık geri dönüşümünün ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik performansı üzerindeki etkisi ürün gruplarına (plastik, cam, çelik ve alüminyum) göre ne ölçüde farklılık/benzerlik gösterir?” sorusuna da cevap aranmıştır. Geri dönüşümün enerji tüketimi üzerindeki en büyük potansiyel etkisi alüminyum en az cam ürün grubunda; su tüketimi üzerindeki en büyük etkisi cam en az plastik ürün grubunda ve son çevresel kriter olan sera gazı salınımındaki en büyük etkisi alüminyum ve en az cam ürün grubunda gerçekleşmiştir. Bu bulgular birçok açıdan Dahlström ve Ekins (2007), PAGEV (2015) ve Zarrinpoor (2021)’in çalışmaları tarafından desteklenmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik açısından ise geri dönüşümün toplam maliyet üzerine en büyük katkısını çelikler en az cam ürün grupları verirken; fırsat maliyetinin de yer aldığı karlılık açısından en büyük katkısını alüminyum en az katkısını plastik ürün grupları sağlamıştır. Bu bulgular yine birçok açıdan Farel vd. (2013), BIR (2020) ve Seshappa ve Prasad (2020)’in çalışmalarıyla desteklenmektedir.

Son olarak araştırma kapsamında kurgulanan senaryolardan birinde “Dünyada örnekleri olan atık teşvik sistemlerinin ülkemizde uygulanması sonucunda geri dönüşümün potansiyel etkisi nasıl olacaktır?” sorusuna cevap aranmıştır. Ayrıca “Önerilen teşvik sistemi içinde öncelik verilmesi muhtemel ürün grupları hangileridir?” sorusuna bütüncül bir yaklaşım sunulmuş ve soruya yönelik verilecek birçok farklı cevap çeşitli senaryolarla değerlendirilmiştir. Dolayısıyla bu soruya doğrudan tek bir cevabın verilmesi mümkün olmamaktadır. Politika yapıcıların işletmelerdeki sürdürülebilirlik performanslarını geliştirmeyi ve onları “sürdürülebilir üretime ve tüketime” yönlendirmeyi amaçladığı durumlar altında alüminyum metale yönelmeleri doğru bir seçenek olarak görülmektedir. Çünkü alüminyum malzemeli endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesinin diğer ürün gruplarına göre sürdürülebilirlik performansına etkisi daha büyüktür. Diğer taraftan karar birimleri, geri dönüşüme teşvik etmek amacıyla işletmelerin ekonomik performans gelişimine odaklandığında çelik metale öncelik verilmesi muhtemeldir. Çünkü çelik malzemeli atıkların geri dönüştürülmesi sonucunda işletmenin ekonomik performansına sağlayacağı katkı diğer ürün gruplarına nazaran daha yüksektir. Yani teşvik sisteminin uygulanacağı bölgenin mevcut atık verilerine, amaçlarına ve kısıtlarına göre öncelik verilmesi gereken ürün grubu değişebilecektir ve bu bulgu teşvik sistemlerinde farklı çeşitlerdeki ürün gruplarının yer alması sebebiyle desteklenmektedir.

Bütün senaryolardan hareketle diğer araştırmacılar açısından faydalı olacak bir takım önerilerde bulunulabilir. Bunlardan ilki döngüsel ekonomiyi kuvvetlendirecek “endüstriyel simbiyoz” ilişkisinin önerilen modele eklenerek çalışma alanının genişletilebileceğidir. Bu döngüde geri dönüştürülen atıkların süreç sonrası geri kazanılan kısmını işletme kendi kullanabildiği gibi kalan üretim kaynağını başka bir işletmenin hammaddesi olacak şekilde satabilir/verebilir. Böyle bir durumda yeni çevresel, sosyal ve ekonomik kriterler modele dahil edilerek çalışma kapsamı genişletilebilir. Bir diğeri sürdürülebilirlik performansı ile ilişkili olarak işletmenin satış hacmine etkisinin de modelde değerlendirilebilecek olmasıdır. Tasarlanan model aynı kalacak şekilde satışa ilişkin ilgili değişkenler kolaylıkla çalışmaya eklenerek test edilebilmektedir. Farklı ürün gruplarını kullanan işletmelerin sürdürülebilirlik performansına bağlı olarak talep üzerine etkisini test etmesi çalışmaya aynı zamanda pazarlama disiplinin dahil edilmesini sağlayabilir. Ayrıca çalışmada farklı bir senaryoda işlenen geri dönüşüm teşvik sisteminin olası sonuçları işletme seviyesinde değerlendirilirken, gelecek çalışmalarda GSYİH gibi ekonomik büyüme oranlarına etkilerinin de incelenmesi araştırmanın seviyesini ve kapsamını genişletecektir. Son olarak endüstride çok kullanılan diğer metallerin (bakır gibi) çalışmaya eklenerek tekrarlanması sürdürülebilirlik performansını en iyi yapacak yeni malzeme grubunu değiştirebilir. Bu önerilerin alandaki araştırmacılara fikir vereceği ve yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Aynı zamanda uygulamacılar için de birkaç pratik öneri sunulması faydalı olacaktır. Tedarik zincirinin karmaşık yapısı “sürdürülebilirlik kriterlerinin” zincire dahil edilmesiyle modeli daha karmaşıktır ve zorlaştırmıştır. Önerilen model gerçek geri dönüşüm sistemlerini yansıtsa da modelin dinamik ortamda oluşturulması ve değişkenlerin eklenip/çıkarılmasına fırsat vermesi sebebiyle farklı amaçlara, önceliklere ve kısıtlara sahip işletmeler için de kullanılması mümkündür. Çünkü model endüstriyel katı atık sahibi işletmelerin ilgili kısıtlar doğrultusunda kullanımına uygun olsa da işletmeler için değişen koşullara uyum sağlayabilecek esnekliktedir. Benzer şekilde ilgili kriterlere ait verilerin toplanmasında ve analizinde titizlikle yaklaşılsa da değişkenlere ait veriler ve matematiksel denklemlerde işletmelere göre farklılıklar olabilir, bu sebeple işletmeye özgü veriler çalışmaya kolaylıkla dahil edilebilecektir. Önerilen model işletmelere benzer sonuçları sunuyor olsa da sahip olunan farklılıklar (teknoloji düzeyi, gelişmişlik düzeyi vs.) ile beraber sonuçlara objektif yaklaşmak önemlidir.

Ayrıca geri dönüşüm teşvik sisteminin yer aldığı diğer senaryo için de benzer önerilerin sunulması mümkündür. Tasarlanan modelde hükümetlerin geri dönüşüm teşvik sistemlerini uygulama amaçları doğrultusunda farklı değişkenleri değerlendirebilecek olması olasıdır. Bu esnek koşullar altında politika yapıcılar sonuçlara ve ilgili kararlara daha objektif yaklaşabilecektir. Diğer taraftan politika yapıcılar bu teşvik sistemini uygulamaları için çevresel performans sonuçlarına daha fazla önem verme ihtimali ile model sonuçları tekrar değerlendirilebilir. Böyle bir durum altında BWM uygulaması ile ulaşılan sürdürülebilirlik kriter ağırlıklarının sürdürülebilirlik performansına yapacağı yeni katkı oranlarına ulaşılabilir. Kısacası, hem mevcut geri dönüşüm sistemleri hem de geri dönüşüm teşvik sistemleri için önerilen modelin dinamik ve esnek yapısı ilgili karar birimlerinin amaçları doğrultusunda tekrarlanabilir ve sonuçlar takip edilebilir.

KAYNAKÇA

- Abdelaziz, F.B., Alaya, H., & Dey, P.K. (2020). A multi-objective particle swarm optimization algorithm for business sustainability analysis of small and medium sized enterprises, *Annals of Opr. Res.*, (293), 557-86.
- Acquaye, A., Feng, K., Oppon, E., Salhi, S., Ibn-Mohammed, T., Genovese, A., & Hubacek, K. (2017). Measuring the environmental sustainability performance of global supply chains: A multi-regional input-output analysis for carbon, sulphur oxide and water footprints. *J. Environ. Manag.*, 187, 571–585.
- Adam, A.P., Gonçalves, J.V.R.V., Robinson, L.C., Rosa, L.C., & Schneider, E.L. (2017). Recycling and mechanical characterization of polymer blends present in printers, *Mat. Res.* 20 (Suppl 2).
- Adel El-Baz, M. (2011). Fuzzy performance measurement of a supply chain in manufacturing companies, *Expert Systems with Applications*, 38, 6681–6688.
- Agarwal, A., F., Giraud-Carrie,, & Li, Y. (2018). A Mediation Model of Green Supply Chain Management Adoption: The Role of Internal Impetus. *International Journal of Production Economics*, 205, 342–358.
- Agrawal, S., Singh, R.K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resour. Conserv. Recycl.*, 97, 76-92.
- Aguezzoul, A. (2014). Third-party logistics selection problem: A literature review on criteria and methods. *Omega*, 49, 69-78.
- Ahi, P., & Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, (52), 329-341.
- Ahmadi, M. (2017). Evaluating the performance of 3Rs waste practices: case study-region one municipality of Tehran. *Adv Recycling Waste Manag*, 2(2).
- Aid, G., Eklund, M., Anderberg, S., & Baas, L. (2017). Expanding roles for the Swedish waste management sector in inter-organizational resource management, *Resour. Conserv. Recycl.*, 124, 85-97.
- Al-Salem, S., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste Manag.*, 29, 2625-2643.
- Alamerew, Y.A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254.
- Aldemir, G., Beldek, T., & Çelebi, D. (2018). A closed-loop sustainable supply chain network design with system dynamics for waste electrical and electronic *Equipment. Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era*. Book Series lecture notes in management and industrial engineering, 173-184.

- Ali, S.S., Paksoy, T., Torğul, B., & Kaur, R. (2020). Reverse logistics optimization of an industrial air conditioner manufacturing company for designing sustainable supply chain: a fuzzy hybrid multi-criteria decision-making approach. *Wireless Networks*, 26, 5759–5782.
- Allesch, A., & Brunner, P.H. (2014). Assessment methods for solid waste management: A literature review, *ISWA*, <https://doi.org/10.1177/0734242X14535653>.
- Aluminum Association. (2019). Get The Facts About Aluminum. 29.09.2021 Tarihinde Erişildi: <https://www.aluminum.org/>
- Ameer, R., & Othman, R. (2012). Sustainability practices and corporate financial performance: a study based on the top global corporations. *Journal of Business Ethics*, 108 (1), 61–79.
- American Chemistry Council. (2016). 15.07.2021 Tarihinde Erişildi: <https://www.americanchemistry.com/chemistry-in-america/chemistry-in-everyday-products/automotive>.
- American Forest & Paper Association. (2017). AF&PA, paper recycling, Erişim Tarihi: 07.07.2021, [http:// www.afandpa.org/our-industry/paper-recycling](http://www.afandpa.org/our-industry/paper-recycling).
- Anand, S., & Sen, A. (2000). Human development and economic sustainability. *World Development*, 2029-2049.
- Angioletti, C.M., Despeisse, M., & Rocca, R. (2017). Product circularity assessment methodology. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*.
- Anh, T. L., & Vo, T.H.L. (2019). CSR implementation for the sustainable supply chain performance: A system dynamic approach. 9th IFAC/IFIP/IFORS/IISE/INFORMS Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM), 1949-1954.
- Arponen, J., Granskog, A., Pantsar Kallio, M., Stuchtey, M., Törmanen, A., & Vanthournout, H. (2015). *The Opportunities of a Circular Economy for Finland*, Sitra, Helsinki.
- Ashby, A., Leat, M., Hudson-Smith, M. (2012). Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17 (5), 497-516.
- Ashby, A. (2018). Developing closed loop supply chains for environmental sustainability: insights from a UK clothing case study. *J. Manuf. Technol. Manag.*, 29 (4), 699-722.
- Awasthi, A., Govindan, K., & Gold, S. (2018). Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Prod. Econ.* 195, 106-117.
- Aynur, E. (2011). *İstanbul'da oluşan kentsel katı atıklar için yakma ve gazlaştırma sistemlerinin karşılaştırmalı analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Avsec, S., & Kaucic, B. (2018). Eco-Efficient decision support model of solid waste recycling. *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(5), 1149-1159.
- Babader, A., Ren, J., Jones, K. O., & Wang, J. (2016). A system dynamics approach for enhancing

- social behaviours regarding the reuse of packaging. *Expert Systems with Applications*, 46, 417-425.
- Badi, I., & Ballem, M. (2018). Supplier selection using the rough BWM-MAIRCA model: A case study in pharmaceutical supplying in Libya. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(2).
- Bai, Y., Ouyang, Y.F., & Pang, J.S. (2012). Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium. *Energy Econ.*, (34), 1623-1633.
- Bala, B. K. (2012). Modeling of solid waste management systems. *Energy, Environment and Sustainable Development*, 265-289.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12 (3), 183-210.
- Barlas, Y. (2007). System dynamics: systemic feedback modeling for policy analysis. *System*, 59, 1-29.
- Bârsan L., & Bârsan, A. (2014). *Ecodesign education – a necessity towards sustainable products. Sustainable energy in the built environment – steps towards nZEB proceedings of the conference for sustainable energy (CSE) 2014*. Springer, Cham, 495–502.
- Bartl, A. (2014). Moving from recycling to waste prevention: A review of barriers and enables. *Waste Management & Research*, 32, 3–18.
- Baser, T. A. (2013). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(535), 51-58.
- Beiler, B.C., Ignácio, P.S.A., Júnior, A.C.P., Anholon, R., & Rampasso, I.S. (2020). Reverse logistics system analysis of a Brazilian beverage company: An exploratory study. *Journal of Cleaner Production*, 274, 20.
- Benavides, P.T., Dunn, J.B., Han, J., Biddy, M., & Markham, J. (2018). Exploring comparative energy and environmental benefits of virgin, recycled, and bio-derived pet bottles. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, 9725–9733.
- Benner, J.H.B., Otten, M., Wielders, L.M.L., & Vroonhof, J.T.W. (2007). *CO2-kentallen Afvalscheiding*, CE Delft, Delft.
- Bertram, M., Hryniuk, M., Kirchner, G., & Pruvost, F. (2006). *Aluminium Recycling in Europe*. EAA/OEA Recycling Division, Brussels.
- Besiou, M., & Wassenhove, L.N. (2015). Addressing the challenge of modeling for decision-making in socially responsible operations. *Production and Operation*, 24(9), 1390-1401.
- Bhagwat, R., & Sharma, M.K. (2007). Performance measurement of supply chain management: A balanced scorecard approach. *Journal Computers and Industrial Engineering*, 53(1), 43-62.
- BIR (Bureau of International Recycling). (2013). *World Steel Recycling in Figures 2008 – 2012*, Brüksel.

- BIR (Bureau of International Recycling). (2020). *World steel recycling in figures 2015 – 2019*. 18.05.2022 Tarihinde Erişildi: <https://www.bir.org/publications/facts-figures/download/643/175/36?method=view>.
- Bianco, L., & Porisiensi, S. (2016). Trasformazione da lineare a circolare del processo eaf. Esperienza in ferriere nord spa: IL caso della scoria siviera e dei carboni. *La Met. Ital.* 108, 1–26.
- Bilgiç, S., Toğrul, B., & Paksoy, T. (2021). Sürdürülebilir Enerji Yönetimi İçin Bwm Yöntemi İle Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi. *Verimlilik Dergisi*, 2, 95 – 110.
- Biswas, I., Raj, A., & Srivastava, S.K. (2018). Supply chain channel coordination with triple bottom line approach. *Transport. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 115, 213-226.
- Blomberg J., & Söderholm P. (2009). The economics of secondary aluminium supply: An econometric analysis based on European data. *Resour Conserv Recycle*, 53, 455–63.
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The emergence of circular economy: a new framing around prolonging resource productivity. *J. Ind. Ecol.*, (21), 603-614.
- Bortoleto, A.P., Kurisu, K., & Hanaki, K. (2012). Model development for household waste prevention behaviour. *Waste Management*, 32(12), 2195-2207.
- Bouchery, Y., Ghaffari, A., & Jemai, Z. (2010). *Key performance indicators for sustainable distribution supply chains: set building methodology and application*, Laboratoire Génie Industriel, Ecole Centrale Paris.
- Bocken, N.M., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 33, 308–320.
- Bowyer, J., Bratkovich, S., Fermholz, K., Frank, M., Groot, H., Howe, J., & Pepke, E. (2015). *Understanding Steel Recovery and Recycling Rates and Limitations to Recycling*. Dovetail Partners INC.
- Brailsford, S. C., & Hilton, N. A. (2001). *A Comparison Of Discrete Event Simulation And SD For Modelling Health Care Systems*. In Riley J (ed). Proceedings from ORAHS, Glasgow, 18–39.
- Branca, T.A., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillom, A., Pietuck, R., & Rosedahl, S. (2020). Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe. *Metals*, (10), 344-360.
- Brent, A., & Labuschagne, C. (2006). Social indicators for sustainable project and technology life cycle management in the process industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, (11), 3-15.
- British Glass Recycling. (2003). Glass recycling - life cycle carbon dioxide emissions. 05.06.2021 Tarihinde erişildi: http://www.packagingfedn.co.uk/images/reports/Enviros_Report.pdf
- Buede, M. D. (2000). *The Engineering Design of Systems Models and Methods*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

- Bui, T.D., Tsai, F.M., Tseng, M.L., & Ali, M.H. (2020). Identifying sustainable solid waste management barriers in practice using the fuzzy Delphi method, *Resour. Conserv. Recycl.*, 154.
- Bulkeley, H., & Gregson, N. (2009). Crossing the threshold: Municipal waste policy and household waste generation. *Environment and Planning*, (41), 929-945.
- Bundesamt, U. (2017). Plastics waste in Germany. Erişim Tarihi: 10.09.2021 <https://www.umweltbundesamt.de/en/print/topics/waste-resources/product-stewardship-waste-management/plastics>.
- Butler, J. H., & Hooper, P.D. (2019). Chapter 15: Glass Waste. *A handbook for Management*, Second Edition.
- Cachon, G.P., & Lariviere, M. (2005). Supply chain coordination with revenue sharing contracts: strengths and limitations. *Management Science*, 51 (1), 30-44.
- Cantor, D.E. (2008). Workplace safety in the supply chain: a review of the literature and call for research. *The International Journal of Logistics Management*, 19(1), 65-83.
- Carter, C.R., & Jennings, M.M. (2004). The role of purchasing in the socially responsible management of the supply chain: a structural equation analysis. *Journal of Business Logistics*, 25 (1), 145-186.
- Carter, C.R., & Rogers, D.S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38 (5), 360-387.
- Carter, C.R., & Liane Easton, P. (2011). Sustainable supply chain management: Evolution and future directions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41 (1), 46-62.
- Carter, C.R. & Easton, L. (2011). Sustainable supply chain management: evolution and future directions. *Int J Phys Distrib Logist Manag*, 41, 46-62.
- Chaerul, M., Tanaka, M., & Shekdar, A.V. (2008). A system dynamics approach for hospital waste management. *Waste Management*, 28(2), 442-449.
- Chandler, D., & Werther, W. B. (2014). *Strategic corporate social responsibility – stakeholders, globalization, and sustainable value creation*. SAGE Publications, Thousand Oaks.
- Chardine-Baumann, E., & Botta-Genoulaz, V. (2014). A Framework for Sustainable Performance Assessment of Supply Chain Management Practices. *Computers and Industrial Engineering*, 76, 138-147.
- Chaudhary, K., & Vrat, P. (2020). Circular economy model of gold recovery from cell phones using system dynamics approach: a case study of India. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 173–200.
- Chaves, G.D.D., Siman, R.R., & Chang, N. B. (2021). Policy analysis for sustainable refuse-derived fuel production in Espirito Santo. *Brazil. Journal of Cleaner Production*, 294.
- Chen, M.Y., Huang, M.J. & Cheng, Y.C. (2009). Measuring knowledge management

- performance using a competitive perspective: An empirical study. *Expert Systems with Applications*, 36, 8449–8459.
- Chowdhury A.H., Mohammad, N., Haque, R.U., & Hossain, T. (2014). Developing 3Rs (Reduce, Reuse And Recycle) strategy for waste management in the urban areas of Bangladesh: socioeconomic and climate adoption mitigation option. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(5), 9-18.
- Ciliberti, F., Pontrandolfo, P., & Scozzi, B. (2007). Investigating corporate social responsibility in supply chains: an SME perspective. *Journal of Cleaner Production*, 16 (15), 1579-1588.
- Clark, C.M., Lin, Y. Bierwagen, B.G., Eaton, L.M., Langholtz, M. H., & Morefield, P.E. (2013). Growing a sustainable biofuels industry: economics, environmental considerations, and the role of the conservation reserve program. *Environ Res Lett*, 8, 25016.
- Closs, D. J., Speier, C., & Meacham, N. (2011). Sustainability to Support end-to-end value chains: the role of supply chain management. *Journal of The Academy of Marketing Science*, 39(1), 101-116.
- Corbett, C. J., & Kleindorfer, P. R. (2003). Environmental management and operationsmanagement: introduction to the third special issue. *Production and Operations Management*, 12(3), 287-289.
- Cosenz, F., & Noto, G. (2016). Applying system dynamics modelling to strategic management: a literature review. *Syst. Res. Behav. Sci.*, 33, 703-741.
- Coyle, G. R. (1996). *System Dynamics Modelling: A practical approach*. London, UK: Chapman & Hall.
- Crociata, A., Agovino, M., & Sacco, P.L. (2015). Recycling waste: does culture matter?. *Journal of Behavioral and Experimental Economics*, 55, 40–47.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Lenny Koh, S. C. (2014). Implementation of a real option in a sustainable supply chain: an empirical study of alkaline battery recycling. *International Journal of Systems Science*, 45, 6, 1268-1282.
- Cullen, J. M., & Allwood, J.M. (2013). Mapping the global flow of aluminum: from liquid aluminum to end-use goods. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 3057-3064.
- Çelik, B., Erkenekli, M., Şeşen, H., Yılmaz, C., Polat, M., Sığı, Ü., & Tabak, A. (2010). *Sistem Dinamikleri*, Detay Yayıncılık, 92, Ankara.
- Chen, Ying-C., & Liu, HM. (2021). Evaluation of greenhouse gas emissions and the feed-in system of waste-to-energy facilities using a system dynamics model. *Science of the Total Environment*, 792.
- Dace, E., Bazbauers, G., Berzina, A., & Davidsen, P.I. (2014). System dynamics model for analyzing effects of eco-design policy on packaging waste management system. *Resour. Conserv. Recycl.* 87, 175-190.
- Dahlström, K., & Ekins, P. (2007). Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK aluminium flows. *Resources Conservation and Recycling*, 51(3),

- Das, S.K., Green, J.A.S., & Kaufman, G. (2010). Aluminum recycling: Economic and environmental benefits, *Light Metal Age*, 22-24.
- Das, D. (2018). The impact of sustainable supply chain management practices on firm performance: Lessons from Indian organizations. *Journal of Cleaner Production*, 203, 179-196.
- Dash, D. P. (1994). *System Dynamics: Changing Perspectives*. *Systems Practice*, 7 (1), 87-98.
- Davidson, M.G., Furlong, R.A., & McManus, M.C. (2021). Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste—A review, *J. Clean. Prod.*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126163>.
- Davis, J. R. (1998). *Metals handbook*. ASM International.
- De, S., & Debnath, B. (2016). Prevalence of health hazards associated with solid waste disposal—a case study of Kolkata, India, *Procedia Environ. Sci.*, 35, 201-208.
- De Brito, M. P., & Dekker, R. (2003). *A Framework for Reverse Logistics* Erasmus Research Institute of Management, Rotterdam, The Netherlands.
- Ding, N., Gao, F., Wang, Z., Gong, X., & Nie, Z. (2012). Environment impact analysis of primary aluminum and recycled aluminum, *Procedia Eng.*, 27, 465.
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V. W. Y., & Huang, T. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste Manag.*, 51, 130-141.
- Dong, J., Chi, Y., Zou, D., Gu, C., Huang, Q., & Ni, M. (2014). Energy–environment–economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study. *Applied Energy*, 114, 400-408.
- Dou, Y., & Sarkis, J. (2010). A Joint Location and Outsourcing Sustainability Analysis For A Strategic Offshoring Decision. *International Journal of Production Research*, 48(2), 567-592.
- Dreher, J., Lawler, M., Stewart, J., Strassorier, G., & Thorne, M. (2009). General motors: metrics for sustainable manufacturing, *Laboratory for Sustainable Business, Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, MA.
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Papadopoulos T., Luo, Z., & Roubaud, D. (2020). Upstream supply chain visibility and complexity effect on focal company's sustainable performance: Indian manufacturers' perspective. *Annals of Opr. Res.*, 290, 343-67.
- Dyer, T. D. (2014). Chapter 14: Glass Recycling, *Handbook of Recycling*, 191-209.
- Echterhof, T. (2021). Review on the use of alternative carbon sources in EAF steelmaking. *Metals* 2021, 11, 222. <https://doi.org/10.3390/met11020222>.
- Eldridge, D. (2015). *JLR tries out recycled PP on Class A interiors*. Erişim Tarihi: 18.03.2021 <http://www.plasticsnewseurope.com/article/20150415/PNE/304159975>.

- Eleyan, D., Al-Khatib, Issam A., & Garfield, J. (2013). System dynamics model for hospital waste characterization and generation in developing countries. *Waste Management & Research*, 31(10), 986-995.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Opportunities for the Consumer Goods Sector*, Ellen MacArthur Found, 2, 1-112.
- EPA. (2019). *Plastics: material-specific data*. 03.03.2021 Tarihinde erişildi: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>.
- EPD. (2015). *Waste Statistics of Hong Kong in 2013*. Environmental Protection Department (EPD), Hong Kong.
- Epstein, M.J., & Roy, M. J. (2001). Sustainability in action: identifying and measuring the key performance drivers. *Long. Range Plan.* 34, 585-604.
- Eriksson, D., & Svensson, G. (2015). Elements affecting social responsibility in supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 20, 561-566.
- Erol, I., Cakar, N., Erel, D., & Sari, R. (2009). Sustainability in the Turkish Retailing Industry. *Sustainable Development*, 17, 49-67.
- Esa, M. R., Halog, A., & Rigamonti, L. (2017). Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 19, 1144-1154.
- Estay-Ossandon, C., Mena-Nieto, A., & Harsch, N. (2018). Using a fuzzy TOPSIS-based scenario analysis to improve municipal solid waste planning and forecasting: A case study of Canary archipelago (1999-2030), 176, 1198-1212.
- Eurofer, The European Steel Association (2013). *European steel scrap specification*. 12.08.2021 Tarihinde erişildi: www.eurofer.eu/docs/.
- European Commission. (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives*, Erişim Tarihi: 07.09.2021: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>.
- Ezeah, C., Fazakerley, A.J., & Roberts, L.C. (2013). Emerging trends in informal sector recycling in developing and transition countries. *Waste Manag.*, 33, 2509–2519.
- Farel, R., Yannou, B., Ghaffari, A., & Leroy. Y. (2013). A cost and benefit analysis of future end-of-life vehicle glazing recycling in France: A systematic approach. *Resources. Conservation and Recycling*, 74, 54-65.
- Farooq, A., Haputta, P., Silalertruksa, T., & Gheewala, S.H. (2021). A Framework for the Selection of Suitable Waste to Energy Technologies for a Sustainable Municipal Solid Waste Management System. *Sustainability*, 2, 1-17.
- Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 341, 69-91.

- Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 151, 206-217.
- Feng, S.C., Joung, C., & Li, G. (2010). *Development overview of sustainable manufacturing metrics*, Proceedings of the 17th CIRP international conference on life cycle engineering, Hefei, China
- Feng, J., Yuan, Q., Sun, X., Yang, F., Cui, K., Li, W., & Yao, Z. (2021). Improving the properties of ABS by blending with PP and using PP-g-PS as a compatibilizer, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60 (7), 798-806.
- FEVE European Container Glass Federation. (2015). EU Container Glass Production Growth Shows Industry Resilience, Brussels.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.a.E.E., & Van Wassenhove, L.N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: a review. *Eur. J. Oper. Res.*, 103 (1), 1-17.
- Florea, M. V. A., & Brouwers, H. J. H. (2013). Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use. *Cem Concr Res.*, 52, 11–21.
- Flynn, B.B., Huo, B. ve Zhao, X. (2010). The Impact of supply chain integration on performance: a contingency and configuration approach. *Journal of Operations Management*, 28(1), 58-71.
- Ford, A. (2001). Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California. *Energy Policy*, 29(11), 847–869.
- Ford, A. (2010). *Modeling the Environment*, 2nd ed.; Island Press: Washington, DC, USA.
- Forrester J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Portland: Productivity Press.
- Forrester, J.W. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *Syst. Dynam. Rev.* 10 (2–3), 245–256.
- Forrester, J.W. (2007). System dynamics – the next fifty years. *Syst. Dynam. Rev.*, 23 (2–3), 359-370.
- Franco, C.J., Zapata, S., & Dyer, I. (2015). Simulation for assessing the liberalization of biofuels. *Renew Sustain Energy Rev*, 41, 298-307.
- Freise, M., & Seuring, S. (2015). Social and Environmental Risk Management in Supply Chains: A Survey in the Clothing Industry. *Logist. Res.* 8, 1–12.
- Gaiardelli, P., Saccani, N., & Songini, L. (2007). Performance measurement of the after-sales service network—Evidence from the automotive industry, *Computers in Industry*, 58, 698–708.
- Gao, C.K., Gao, C.B., Song, K.H., & Fang, K.J. (2020). Pathways towards regional circular economy evaluated using material flow analysis and system dynamics. *Resources Conservation and Recycling*, 154.

- García-Rodríguez, F.J., Castilla-Gutiérrez, C., & Bustos-Flores, C. (2013). Implementation of reverse logistics as a sustainable tool for raw material purchasing in developing countries: the case of Venezuela. *Int. J. Prod. Econ.*, 141 (2), 582-592.
- Garlapati, V.K. (2016). E-waste in India and developed countries: Management, recycling, business and biotechnological initiatives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 874-881.
- Garg, C. P., & Kashav, V. (2021). Modeling the supply chain finance (SCF) barriers of Indian SMEs using BWM framework. *Journal of Business & Industrial Marketing*, doi: 10.1108/JBIM-05-2020-0248.
- Gehin, A., Zwolinski, P., & Brissaud, D. (2008). A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *J. Clean. Prod.*, 16 (5) (2008), 566-576.
- Geng, Y., & Cote, R.P. (2002). Scavengers and decomposers in an eco-industrial park. *The International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 9(4), 333-340.
- Geng, Y., & Doberstein, B. (2008). Developing the circular economy in China: challenges and opportunities for achieving 'leapfrog' development, *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, 15, 231-239,
- Genovese, A., Acquaye, A.A., Figueroa, A., & Koh, S.L. (2017). Sustainable Supply Chain Management And The Transition Towards A Circular Economy: Evidence and Some Applications. *Omega*, 66, 344-357.
- George, D.A.R., Lin, B.C., & Chen, Y. (2015). A Circular Economy Model of Economic Growth. *Environmental Modelling & Software*, 73, 60-63.
- Geyer, R., Kuczenski, B., Zink, T., & Henderson, A. (2016). Common misconceptions about recycling, *J. Ind. Ecol.*, 20 (5), 1010-1017.
- Gharfalkar, M., Ali, Z., & Hillier, G. (2015). *Resource Effectiveness Indicator: A Decision Making Tool for Reducing Waste and Resource Consumption*. 15th International Waste Management and Landfill Symposium At: S. Margherita di Pula - Cagliari, Sardinia, Italy.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2014). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.*, 114, 11-32.
- Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review, *Jour. of Cleaner Prod*, 178, 618-43.
- Ghisolfi, V., Chaves, G., Siman, R.R., & Xavier, L.H. (2017). System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: a perspective for social inclusion of waste pickers. *Waste Manag.* 60, 14-31.
- Giannis, A., Chen, M., Yin, K., Tong, H., & Veksha, A. (2017). Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 1177–1185.
- Gimenez, C., Sierra, V., & Rodon, J. (2012). Sustainable operations: their impact on the triple

- bottom line. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 149-159.
- Glass Pack Solutions (2016). *Lightweight glass*, Pontypool, 19.04.2021 Tarihinde erişildi: <http://www.glasspacksolutions.com/> <http://www.glasspacksolutions.com/>.
- Glavas, A. ve Mish, J. (2015). Resources and Capabilities of Triple Bottom Line Firms: Going Over Old or Breaking New Ground? *Journal of Business Ethics*, 127(3), 623-642.
- Goede, M., Stehlin, M., Rafflenbeul, L., Kopp, G., & Beeh, E. (2008). Super Light Car—lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 1, 5-10.
- Goh, Y. M., & Love, P.E.D. (2012). Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. *Saf. Sci.* 50, 1594–1605.
- Gold, S., Seuring, S., & Beske, P. (2010). The constructs of sustainable supply chain management – a content analysis based on published case studies. *Progress in industrial ecology – An International Journal*, 7(2), 114-137.
- Golroudbary, S.R., & Zahraee, S.M. (2015). System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 88-102.
- Goodland, R. (1995). The Concept of Environmental Sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26, 1-24.
- Gopalakrishnan, K., Yusuf, Y. Y., Musa, A., Abubakar, T., & Ambursa, H. M. (2012) Sustainable supply chain management: a case study of British aerospace (Bae) systems. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 193-203.
- Goren, S. (2005). *Sanitary Landfill*, Istanbul, Fatih University Press.
- Govindan, K., Khodaverdi, R., & Jafarian, A. (2013). A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 47, 345-354.
- Govindan, K., & Popiuc, M. N. (2014). Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 326-336.
- Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Opr. Res.*, 240, 603-626.
- Govindan, K., Jha, P.C., Agarwal, V., & Darbari, J.D. (2019). Environmental management partner selection for reverse supply chain collaboration: a sustainable approach. *Journal of Environmental Management*, 236, 784-797.
- Gönül, E.D. (2018). *Clinical Laboratory Performance Analysis: A System Dynamics Approach*. Doctorial Thesis, Yeditepe University, Istanbul.
- Gradus, R.H.J.M., Nillesen, P.H.L., Dijkgraaf, E., & Koppen, R.J. (2017). A cost-effectiveness analysis for incineration or recycling of Dutch household plastic waste. *Ecological*

Economics, 135, 2017, 22-28.

- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K. (2011). What do we know about metal recycling rates? *J. Ind. Ecol.*, 15 (3), 355-366.
- Grazhdani, D. (2016). Assessing the variables affecting on the rate of solid waste generation and recycling: An empirical analysis in Prespa Park. *Waste Management*, 48, 3-13.
- Größler, A. (2008). The development of strategic manufacturing capabilities in emerging and developed markets. *Oper. Manag. Res.*, 3 (1-2), 60-67.
- Gruszecka-Tiesluk A. (2013). Zrownowazony lancuch dostaw: trendy I innowacje. Analiza Tematyczna. Forum Odpowiedzialnego Biznesu. 3, 1-9.
- Gu, F., Hall, P., & Miles, M.J., (2016). Performance evaluation for composites based on recycled polypropylene using principal component analysis and cluster analysis. *J. Clean. Prod.* 115, 343-353.
- Gu, F., Hall, P., Guo, J-F., & Summers, P.A. (2017). From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Sci. Total Environ*, 601-602, 192-1207.
- Gualandris, J., & M. Kalchschmidt. (2014). customer pressure and innovativeness: their role in sustainable supply chain management. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 20, 92-103.
- Guide Jr, V. D. R. (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *J. Oper. Manag.*, 18, 467-483.
- Gunasekaran, A., Patel, C., & Mcgaughey, R. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 87(3), 333-347.
- Guo, H., Hobbs, B. F., Lasater, M. E., Parker, C. L., & Winch, P. J. (2016). System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study. *Waste Management*, 56, 547-560.
- Gülenç, F. (2004). *Sürdürülebilir üretime geçişte işletmelerdeki değişim gerekliliği*, Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği Kongresi, 15-18 Haziran 2004, Adana, 4.
- Haake, H., Seuring, S. (2009). Sustainable procurement of minor items e exploring limits to sustainability. *Sustainable Development*, 17 (5), 284-294.
- Haghighi, S. M., Torabi, S. A., & Ghasemi, R. (2016). An integrated approach for performance evaluation in sustainable supply chain networks (with a case study). *Journal of Cleaner Production*, 137, 579-597
- Hajmohammad, S., Vachon, S., Klassen, R. D., & Gavronski, I. (2013). Lean management and supply management: Their role in green practices and performance. *Journal of Cleaner Production*, (39), 312-320.
- Hart, S. L. (1995). A natural-resource-based view of the firm. *Academy of Management, Review*, 20 (4), 986-1014.

- Haryani, T., & Subriadi, A.P. (2021). E-commerce acceptance in the dimension of sustainability. *Journal of Modelling in Management*. doi 10.1108/JM2-05-2020-0141.
- Hassan, M. N., Rahman, R. A., Chong, T. L., Zakaria, Z., & Awang, M. (2000). Waste recycling in Malaysia: problems and prospects. *Waste Manage Res.*, 18, 320-328.
- Hassan, A., Bruining, H., Musa, T., & Chahardowli, M. (2017). The use of RFID technology to measure the compositions of diethyl ether-oil-brine mixtures in enhanced imbibition experiments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156(1).
- Hassini, E., Surti, C., & Searcy, C. (2012). A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. *Int. J. Prod. Econ.* 140(1), 69–82.
- He, R., Liu, S., & Liu, Y. (2011). Application of SD model in analyzing the cultivated land carrying capacity: a case study in Bijie Prefecture, Guizho Province, China. *Prog. Environmental Sciences*, 10, 1985-1991.
- Hervani, A. A., Helms, M. M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An International Journal*, 12(4), 330-353.
- Hilman, K., Damgaard, A., Eriksson, O., Jonsson, D., & Fluck, L. (2015). *Climate Benefits of Material Recycling Inventory of Average Greenhouse Gas Emissions for Denmark, Norway and Sweden*. Norden, ISBN 978-92-893-4218-6.
- Hirsch, J. (2011). Aluminium in innovative light-weight car design. *Mater. Trans.*, 52, 818-824.
- Hoole, R. (2005). Five ways to simplify your supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 10 (1), 3-6.
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, 364, 2115.
- Horvath, B., Mallingu, E., & Fogarassy, C. (2018). Designing business solutions for plastic waste management to enhance circular transitions in Kenya. *Sustainability*, 10, 1664, 10.3390/su10051664.
- Höhn, M.I. (2010). *Relational supply contracts, lecture notes in economics and mathematical systems*, 629, Springer-Verlag, Berlin.
- <https://webdosya.csb.gov.tr/db/bolu/icerikler/atiklar-20180222082452.pdf>, Erişim Tarihi: 20.09.2021.
- Hsu, C. W. (2012). Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. Special issue: Clean Energy for Future Generations. *Appl. Energy*, 100, 205–217.
- Hu, J., Liu, Y., Yuen, T., Lim, M., & Hu, J. (2019). Do Green Practices Really Attract Customers? The Sharing Economy from the Sustainable Supply Chain Management Perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 177–187.
- Huang, Y.A., & Matthews, H.S. (2008). *Seeking opportunities to reduce life cycle impacts of consumer goods – an economy-wide assessment*. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. IEEE Computer Society,

1–6.

- Hubbard, G. (2009). Measuring organizational performance: beyond the triple bottom line. *Bus. Strateg. Environ.* 18, 177-191.
- Huq, F.A., Stevenson, M., Zorzini, M., & Hendry, L. (2013). *Social sustainability in the apparel supply chain: an institutional theory perspective*. In Proceedings of the 20th European Operations Management Association (EurOMA), Dublin, Ireland, 9–12, 1–10.
- Hussain, L. B., & Hakim, I. (2007). Recycling and Formulation of Aluminum Scrap via Mass Balance Die Casting and Forming. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(7-8), 916-921.
- Hussain, M., Awasthi, A., & Tiwari, M. K. (2016). Interpretive structural modeling analytic network process integrated framework for evaluating sustainable supply chain management alternatives, *Applied Mathematical Modelling*, 40(5), 3671-3687.
- Iacovidou, E., Velenturf, A.P., & Purnell, P. (2019). Quality of resources: a typology for supporting transitions towards resource efficiency using the single-use plastic bottle as an example. *Sci. Total Environ.*, 647, 441-448.
- Ikhlayel, M. (2018). Indicators for establishing and assessing waste management systems in developing countries: A holistic approach to sustainability and business opportunities. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*.
- Ilgin, M.A., & Gupta, S.M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art, *Journal of Environmental Management*, 91 (3), 563-591.
- Inghels, D., & Dullaert, W. (2011). An analysis of household waste management policy using system dynamics modelling. *Waste Management & Research*, 29(4), 351-370.
- Jabbar, M.A., & Hassan, A.D. (2021). New prediction model of tempered martensite hardnesses for quenched and tempered low-alloy steel, *Materials Performance and Characterization*, 10(1), 267-277.
- Jacoby, M. (2019). Why glass recycling in the US is broken?. C & EN, 97(6). Erişim adresi: <https://cen.acs.org/materials/inorganic-chemistry/glass-recycling-US-broken/97/i6> (18.12.2021).
- Jafari, H. R.; Seifbarghy, M.; & Omidvari, M. (2017). *Sustainable supply chain design with water environmental impacts and justice-oriented employment considerations: A case study in textile industry*. Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering; Tehran 24(4), 2119-2137.
- Jain, S., Sigurdardottir, S., Lindskog, E., Andersson, J., Skoogh, A., & Johansson, B. (2013a). *Multi-resolution modeling for supply chain sustainability analysis*. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 1996-2007.
- Jain, S., Lindskog, E., Andersson, J., & Johansson, B. (2013b). A hierarchical approach for evaluating energy trade-offs in supply chains. *Int. J. Prod. Econ.*, 146, 411-422.
- Jawahir, I.S., & Bradley, R. (2016). Technological elements of circular economy and the

- principles of 6R-based closed-loop material flow in sustainable manufacturing. *Procedia Cirp*, 40(1), 103-108.
- Jayaraman, V., Guide J. V. D. R., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50(5), 497–508.
- Jordan, J. (2019). *Recycled vs. virgin resin: Total energy*. Erişim adresi: <https://www.plasticsnews.com/article/20190215/FYI/190219885/recycled-vs-virgin-resin-total-energy> (20.02.2021).
- Jørgensen, I. L., & Knudsen, J.S. (2006). *Sustainable Competitiveness in Global Value Chains: How do Danish Small Firms Behave*, The Copenhagen Centre, Copenhagen.
- Julien-Saint-Amand, F., & Moenner, P.L. (2009). *Industrial ecology, an innovative approach serving spatial planning: the example of the tool presteo (a program to research synergies on a territory)*. 6th Annual International Conference of Territorial Intelligence, October.
- Kannan, G., Sasikumar, P., & Devika, K. (2010). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. *Applied Mathematical Modelling*, 34 (3), 655-670.
- Kannan, G., Diabat, A., & Popiuc, M.N. (2012). Contract analysis: a performance measures and profit evaluation within two-echelon supply chains. *Computers and Industrial Engineering*, 63 (1), 58-74.
- Kantardgi, I. (2003). *Dynamic modelling of environment-industry systems*, Sloot, P., Abramson, D., Bogdanov, A., Gorbachev, Y., Dongarra, J., & Zomaya, A (Eds.), Computational Science – ICCS 2003, Springer Berlin, Heidelberg, 673.
- Kaplan, R.S., & Nort, D.P. (1996). Using the balanced scorecard as a strategic management system. *Harvard Business Review*, 74(2), 74-85.
- Kaur, A., Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2009). A coordination theoretic model for the three level supply chains using contracts. *Sadhana*, 34 (5), 767-798.
- Kawai, K., & Tasaki, T. (2016). Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18, 1-13.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
- Ketchen, D. J., & Hult, G.T.M. (2011). Building theory about supply chain management: Some tools from the organizational sciences. *J. Supply Chain Manag.*, 47, 12–18.
- Khazhiakhmetova, R., Kashuba, I., Vlasova, S., Kapustin, F., & Hela, R. (2020). *The transparent discolored glass for industrial and high-speed transport*. MATEC Web of Conferences 329.
- Khoo, H. H. (2019). LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation & Recycling*, 145, 67-77.

- Kibira, D., Jain, S., & McLean, C. (2009). A system dynamics modeling framework for sustainable manufacturing. Proceedings of the 27th Annual System Dynamics Society Conference, Albuquerque, NM.
- Khoo, H. H. (2019). LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 67-77.
- Kircherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- Koberg, E., & A. Longoni. (2019). A Systematic Review of Sustainable Supply Chain Management in Global Supply Chains. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1084–1098. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.033.
- Kocasoy, G. (1999). *Solid Waste Management in Developing Countries - A Case Study Of Turkey, Sustainable Solid Waste Management*, Nato Science Series, Bulgaria.
- Koksharov, V., Starodubets, N., & Ponomareva, M. (2019). Assessment of an enterprise circular economy development. *WSEAS Trans. Bus. Econ.*, 16, 559–567.
- Kolekar, K. A., Hazra, T., & Chakeabarty, S. N. (2017). Prediction of municipal solid waste generation for developing countries in temporal scale: A fuzzy inference system approach, *Global NEST Journal*, 19.
- Kolikkathara, N., Feng, H., & Yu, D. (2010). A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. *Waste Management*, 30(11), 2194-2203.
- Kothari, R., Tyagi, V. V., & Pathak, A. (2010). Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3164–3170.
- Kovacic, M., Stopar, K., Vertnik, R., & Šarler, B. (2019). Comprehensive electric arc furnace electric energy consumption modeling: a pilot study. *Energies*, 12(11), 2142.
- Kumar, D., & Garg, C.P. (2016). Evaluating sustainable supply chain indicators using fuzzy AHP Case of Indian automotive industry. *Benchmarking: An International Journal*, 24(6).
- Kuo, J. H., Lin, C. L., Chen, J. C., Tseng, H. H., & Wey, M. Y. (2011). Emission of carbon dioxide in municipal solid waste incineration in Taiwan: a comparison with thermal power plants. *Int. J. GHG Control.*, 5, 889-898.
- Kurilova, A.A., & Zelinskaya, M.V. (2021). A New mathematical model for redesigning the reverse supply chain with social sustainability. *Industrial Engineering and Management Systems*, 20(2), 236-247.
- Kyoto Protocol. (2005). Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention On Climate Change. Erişim adresi: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (11.11.2021).
- Lagarda-Leyva, E. A., Morales-Mendoza, L. F., Ríos-Vázquez, N. J., Ayala-Espinoza, A., & Nieblas-Armenta, C. K. (2019). Managing plastic waste from agriculture through reverse logistics and dynamic modeling. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21,

- Lai, K.-h., & Wong, C. W. Y. (2012). Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters. *Omega*, 40(3), 267-282.
- Lambert, D. M., Croxton, K. L., Garcí a-Dastugue, S. J., Knemeyer, M., & Rogers, D. S. (2006). *Supply chain management processes, partnerships, performance*, 2nd ed., Hartley PressInc., Jacksonville, FL.
- Landi, D., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Analyzing the environmental sustainability of glass bottles reuse in an Italian wine consortium. *Procedia CIRP* 80, 399-404.
- Larsen, A. W., Merrild, H., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of glass: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *ISWA*, <https://doi.org/10.1177/0734242X09342148>.
- Leblanc, R. (2019). Quick Facts About Glass Recycling, Glass recycling facts you should know. Sustainable Businesses. *Sustainability*, 12.
- Lenort, R., Staš, D., Wicher, P., Holman, D., & Ignatowicz, K. (2017). Comparative Study of sustainable key performance indicators in metallurgical industry. *Annual Set the Environment Protection*, 19, 36-51.
- Leslie, H. A., Leonards, P. E. G., Brandsma, S. H., De Boer, J., & Jonkers, N. (2016). Propelling plastics into the circular economy—weeding out the toxics first. *Environment International*, 94, 230-234.
- Li, C., Xiang, X. D., & Qu, Y.L. (2015). *Product quality dynamics in closed-loop supply chains and its sensitivity analysis*. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS), 479-484.
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *J. Clean. Prod.*, 115, 36-51.
- Liljenström, C., & Finnveden, G. (2015). Data for separate collection and recycling of dry recyclable materials, *KTH Architecture and the Built Environment*.
- Lin, T.A., Lin, J-H., & Bao, L. (2020). Effect of melting–recycling cycles and mechanical fracture on the thermoplastic materials composed of thermoplastic polyurethane and polypropylene waste blends. *Applied Sciences*, 10(17), 5810.
- Linton, J.D., Klassen, R., Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: an introduction. *Journal of Operational Management*. 25, 1075-1082.
- Littig, B., & Griessler, E. (2005). Social Sustainability: A Catchword Between Political Pragmatism and Social Theory. *International Journal of Sustainable Development*, 8(1-2), 65-79.
- Liu, H. T., & Wang, W. K. (2009). An Integrated fuzzy approach for provider evaluation and selection in third-party logistics. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4387-4398.
- Logožar K., Radonjič G., & Bastič, M. (2006). Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: A case of aluminium industry. *Resour Conserv Recycle*, 49, 49–

67. doi:10.1016/j.resconrec.2006.03.008.

- Longoni, A., & Cagliano, R. (2018). Inclusive environmental disclosure practices and firm performance: the role of green supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 38, 1815-1835.
- Lowe, E. (1993). Industrial ecology—an organizing framework for environmental management. *Environ. Qual. Manag.*, 3 (1), 73-85.
- Lu, T., Gupta, A., Jayal, A.D., Badurdeen, F., Feng, S.C., Dillon, Q.W. et al. (2010). A framework of product and process metrics for sustainable manufacturing, Proceedings of the eighth international conference on sustainable manufacturing, Abu Dhabi, UAE, 22–24.
- Maani, K.E. (2000). *Systems thinking and modelling: understanding change and complexity*. Auckland: Prentice Hall, 2.
- Machete, F. (2019). A review of the influence of municipal sustainable supply chain management on South Africa's recycling performance. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 11 (5), 643-651.
- Mai, J., & Hipel, K. W. (2016). Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe – A systematic literature review. *Waste Management*, 56, 3-12.
- Mani, V., Gunasekaran, A, Papadopoulos, T., Hazen, B., & Dubey, R. (2016a). Supply chain social sustainability for developing nations: evidence from India. *Resour. Conserv. Recycl.*, 111, 42-52.
- Mani, V., Agarwal, R., Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., Dubey, R., Childe, S.J. (2016b). Social sustainability in the supply chain: construct development and measurement validation. *Ecol. Indic.*, 71, 270-279.
- Margolis, J. D., & Walsh, J. P. (2003). Misery Loves Companies: Rethinking Social Initiatives by Business. *Administrative Science Quarterly*, 48(2), 268-305.
- Markley, M. J., & Davis, L. (2007). Exploring future competitive advantage through sustainable supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(9), 763-774.
- Martin, G., & MacFarlane, A. (2002). *The Glass Bathyscaphe: How Glass Changed the World*. Profile Books.
- Masi, D., Kumar, V., Garza-Reyes, J.A., Godsell, J. (2018). Towards a more circular economy: exploring the awareness, practices, and barriers from a focal firm perspective. *Prod. Plann. Contr.*, 29 (6), 539-550.
- Maqsoom, A., Hashmi, A.A.Q., Zeeshan, M., Arshad, Q., Zeeshan, B.U., & Salahuddin, H. (2019). A system dynamics-based economic performance simulation of construction waste reduction management: effective application of prefabrication. *Environmental Engineering and Management Journal*. 18 (11), 2363-2376.
- Maxwell, D., & van der Vorst, R. (2003). Developing sustainable products and services. *Journal*

of Cleaner Production, 11(8), 883-895.

- McLucas, A., & Ryan, M. (2012). *On the Validation of System Dynamics Models*. SETE Apocose.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: remaking the way we make things*, North Point Press, New York, NY.
- Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III., W. W. (1972). *The Limits to growth: a report for the club of Rome's project on the predicament of mankind*, first ed. Universe Books, New York.
- Melkonyan, A., Krumme, K., Gruchmann, T., & De la Torre, G. (2017). Sustainability assessment and climate change resilience in food production and supply. *Energy Procedia*, 123, 131-138.
- Melnyk, S. A., Sroufe, R.P., & Calantone, R. (2003). Assessing the impact of environmental management systems on corporate and environmental performance. *J. Oper. Manag.* 21 (3), 329-353.
- Meng, X., Wen, ZG., & Qian, Y. (2018). Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior. *Resources Conservation and Recycling*, 128, 535-545.
- Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Jour. of Cleaner Prod.*, 178, 703-22.
- Micky, A. B. (2019). A System Dynamics-Based Approach to Help Understand the Role of Food and Biodegradable Waste Management in Respect of Municipal Waste Management Systems, *Sustainability*, 11(12), 3456.
- Mihelcic, J. R., Crittenden, J.C., Small, M.J., Shonnard, D.R., Hokanson, D.R. & Zhang, Q. et al. (2003). Sustainability science and engineering: the emergence of a new metadiscipline. *Environmental Science and Technology*, 37, 5314-5324.
- Milios, L., Holm, L., Christensen, D., McKinnon, C., Christensen, M.K., Rasch, M., & Hallstrøm, E. (2018). Plastic recycling in the Nordics: a value chain market analysis. *Waste Manag.*, 76, 180-189.
- Mingers, J., & White, L. (2010). A review of the recent contribution os systems thinking to operational research and management science. *Eur. J. Oper. Res.*, 207(3), 1147-1161.
- Mohanty, C.R.C. (2011). *Reduce, Reuse and Recycle (the 3Rs) and Resource Efficiency as the basis for Sustainable Waste Management*. United Nations Centre for Regional Development, NewYork.
- Morecroft, J. (2007). *Strategic Modelling and Business Dynamics: a Feedback Systems Approach*. John Wiley & Sons.
- Morecroft, J. D. (2015). *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Morelli, J. (2013). Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals, *Journal of Environmental Sustainability*, 1(1), 1-9.

- Morlet, A., Opsomer, R., Herrmann, S., Balmond, L., Gillet, C., & Fuch, L. (2017). A new textiles economy: redesigning fashion's future. Ellen MacArthur Foundation.
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153.
- Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., Diaz-Madroñero, M., & Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51 (13), 4087–4104.
- Mutingi, M. (2013). Developing green SCM strategies: a taxonomic approach. *J. Ind. Eng. Manag.*, 6 (2), 525-546.
- Müller, D. B., Wang, T., Duval, B., & Graedel, T. E. (2006). Exploring the engine of anthropogenic iron cycles. *PANS*, 103 (944), 16111-16116.
- Nabavi, E., Daniell, K. A., Najafi, H. (2017). Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability? *J. Clean. Prod.*, 140, 312-323.
- Nagalingam, S. V., Kuik, S. S., & Amer, Y. (2013). Performance measurement of product returns with recovery for sustainable manufacturing. *Rob. Comput. Integr. Manuf.*, 29 (6), 473-483.
- Nappi, C. (2013). The global aluminium industry 40 years from 1972. *World Alum.* 1-27.
- Ni, W., & Sun, H. (2019). The Effect of sustainable supply chain management on business performance: implications for integrating the entire supply chain in the chinese manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production* 232, 1176–1186.
- Nidhi, M. B., & Pillai, V. M. (2019). Product disposal penalty: Analysing carbon sensitive sustainable supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 8-23.
- Ngoc, U.N., & Schnitzer, H. (2009). Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Manag.*, 29 (6), 1982-1995.
- Norgate, T. E., Jahanshahi, S., & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *J. Clean. Prod.*, 15, 838-848.
- Okorie, O. (2019). Simulation to enable a data-driven circular economy. *Sustainability*, 11, 3379.
- Olugu, E. U., & Wong, K. Y. (2012). An expert fuzzy rule-based system for closed-loop supply chain performance assessment in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 375-384.
- Ortega, J. C., Serrato, R. B., & Lizarraga-Morales, R. (2017). Development of a system dynamics model based on Six Sigma methodology. *Ingeniería e Investigación*, 37(1), 80.
- Osiro, L., Lima-Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. R. (2018). A group decision model based on quality function deployment and hesitant fuzzy for selecting supply chain sustainability metrics. *Journal of Cleaner Production*, 183, 964-978.
- Paes, L.A.B., Bezerra, B.S., Deus, R.M., Jugend, D., & Battistelle, R.A.G. (2019). Organic solid

waste management in a circular economy perspective – A systematic review and SWOT analysis. *Jour. Of Cleaner Production*, 239.

Pagell, M., & Wu, Z. (2009), Building A More Complete Theory of Sustainable Supply Chain Management Using Case Studies of 10 Exemplars. *Journal of Supply Chain Management*, 45(2), 37-56.

Pagell, M., & Shevchenko, A. (2014). Why research in sustainable supply chain management should have no future. *Journal of Supply Chain Management*, 50(1), 44-55.

PAGEV. (2015). *Plastiklerle ilgili güncel konular ve pratik öneriler*. Erişim adresi: <https://pagev.org/plastiklerle-ilgili-guncel-konular-ve-pratik-oneriler> (21.03.2022).

Palpa Recycling. (2016). The Finish Reuse System for Beverage. Packages, Helsinki.

Pamucar, D., Ecer, F., Cirovic, G., & Alrasheedi, M. (2020). Application of improved Best Worst Method (BWM) in real-world problems. *Mathematics*, 8, 1342.

Patwa, N., Sivarajah, U., Seetharaman, A. (2021). Towards a circular economy: An emerging economies context, *Journal of Business Research*, 122, 725-735.

Pearce, D. W., Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*, John Hopkins University Press, Balt.

Peng, J., Curcija, D., & Thanachareonkit, A. (2019). Study on the overall energy performance of a novel c-Si based semitransparent solar photovoltaic window. *Applied Energy* 243, 854–872.

Perugini, F., Mastellone, M.L., & Arena, U. (2005). A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. *Environ. Prog.*, 24, 137-154.

Petrudi, S., Abdi, M., & Goh, M. (2018). An integrated approach to evaluate suppliers in a sustainable supply chain. *Uncertain Supply Chain Management*, 6, 423-444.

Piemonte, V. (2011). Bioplastic wastes: the best final disposition for energy saving. *J. Polym. Environ.*, 19, 988-994.

Pinha, A.C., Sagawa, J.K. (2020). A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 269.

Pires, A., Martinho, G., Rodrigues, S., & Gomes, M.I. (2019). *Sustainable solid waste collection and management*, Springer, ISBN 978-3-319-93200-2 (eBook).

Plastics. (2019). *Plastics- the Facts*. Erişim adresi:

<https://www.plasticseurope.org/fr/resources/publications/1804-plastics-facts-2019> (22.06.2021).

Plastics Europe. (2020). *Recycling and energy recovery: Plastics Europe*. Erişim adresi: <https://www.plasticseurope.org/en/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery> (07.04.2021).

- Plastic Oceans International. (2020). The Facts. Erişim adresi: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20181212STO21610/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures> (03.03.2021).
- Pochampally, K. K., Gupta, S. M., & Govindan, K. (2009). Metrics for performance measurement of a reverse/closed-loop supply chain. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 1 (1), 8–32.
- Popli, K., Lim, J., Kim, H. K., Kim, Y. M., Tuu, N.T., & Kim, S. (2020). Prediction of greenhouse gas emission from municipal solid waste for South Korea. *Environmental Engineering Research*, 25(4), 462-469.
- Porter, M.E., & Kramer, M.R. (2006). Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, 84 (12), 78-92.
- Raadal, H. L., Brekke, A., & Mohdal, I. S. (2008). Miljøanalyse av ulike behandlingsformer for plastemballasje fra husholdninger. Fredrikstad, Norway: Østfoldforskning AS.
- Rada, E.C. (2016). Solid Waste Management: Policy and Planning for a Sustainable Society, Apple Academic Press, New Jersey, USA.
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. *Waste Manag.*, 69, 24-58.
- Rahimi, M., Esfahanian, M., & Moradi, M. (2014). Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2359–2365.
- Ramjohn, K. (2008). *Some terminology and definitions: sustainability, land use and impact assessment*, Erişim adresi: <https://sustainablelanduse.wordpress.com/2008/07/23/some-terminology-definitions-sustainability-land-use-impact-assessment/> (18.05.2020).
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega*, 48, 60-74.
- Rao, P. (2002). Greening the supply chain: A new initiative in South East Asia. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(5), 631-655.
- Raut, R. D., Kamble, S. S., Kharat, M. G., & Kamble, S. J. (2015). Decision support system framework for performance based evaluation and ranking system of carry and forward agents. *Strategic Outsourcing: An International Journal*, 8(1), 23-52.
- Reza, A., & Yousuf, T. B. (2013). *3R (Reduce, Reuse and Recycle) action plan for the city corporations in Bangladesh: paradigm shift of waste management to resource management*. 3rd International Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries, Khulna, Bangladesh
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49–57.
- Rezaei, J., Nispeling, T., Sarkis, J. & Tavasszy, L. (2016). A supplier selection life cycle approach

- integrating traditional and environmental criteria using the Best Worst Method. *Journal of Cleaner Production*, 135, 577–588.
- Rezaei, J., van Roekel, W. S. & Tavasszy L. (2018). Measuring the relative importance of the logistics performance index indicators using Best Worst Method. *Transport Policy*, 68, 158-169.
- Rebs, T., Brandenbyrg, M., & Seuring, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production* 208, 1265-1280.
- Reed, M. S., Kenter, J., Bonn, A., Broad, K., Burt, T. P., Fazey, I. R., & Ravera, F. (2013). Participatory scenario development for environmental management: a methodological framework illustrated with experience from the UK uplands. *J. Environ. Manag.*, 128, 345-362.
- Reike, D., Vermeulen, W.J., & Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resour. Conserv. Recycl.*, 135, 246-264.
- Ren, H. (2012). *Plastic waste recycling and greenhouse gas reduction*. Taking Copenhagen as an example from life cycle assessment perspective. Aalborg University, Denmark: Department of Development and Planning. Master thesis.
- Reynoso-Campos, O., Fox, D. G., Blake, R. W., Barry, M.C., Tedeschi, L.O., Nicholson, C.F., Kaiser, H.M., & Oltenacu, P.A. (2004). Predicting nutritional requirements and lactation performance of dual-purpose cows using a dynamic model. *Agricultural Systems*, 80(1), 67-83.
- Richardson, G. P., & Otto, P. (2008). Applications of system dynamics in marketing: editorial. *J. Bus. Res.* 61 (11), 1099–1101.
- Richmond, B. (1994). Systems thinking/system dynamics: Let's just get on with it. *System Dynamics Review*, 10(2/3), 135-157.
- Rinsatitnon, N., Dijaroen, W., Limpiwun, T., Suktavee, G., & Chinda, T. (2018) Reverse logistics implementation in the construction industry: Paper waste focus. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 40(4), 798.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathl Modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Sadjadi, S., & Karimi, M. (2018). Best-worst multi-criteria decision-making method: A robust approach. *Decision Science Letters* 7(4), 323-340.
- Sakai, S., Yoshida, H., Yoshida, Y., Asari, M., Takigami, H., Takahashi, S., & Tomoda, K. (2011). International comparative study of 3R and waste management policy developments. *J Mater Cycles Waste Manag.*, 13, 86–102.
- Sancha, C, Longoni, A., & Giménez, C. (2015). Sustainable supplier development practices: Drivers and enablers in a global context. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 21 (2), 95-102.

- Sanches-Pereira, A., Gómez, M. F. (2015). The dynamics of the Swedish biofuel system toward a vehicle fleet independent of fossil fuels. *J Clean Prod*, 96, 452-466.
- Santos, M.a.D., Svensson, G., & Padin, C. (2013). Indicators of sustainable business practices: Woolworths in South Africa. *Supply Chain Manag.: Int. J.* 18 (1), 104-108.
- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K-H. (2011). An organizational theoretic review of green SCM literature, *Int. J. Prod. Econ.*, 130 (1), 1-15.
- Schlesinger, M. E. (2014). *Aluminium Recycling, Second Edition*, CRC Press.
- Schyns, Zoé O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromol. Rapid Commun.*, 42(3).
- Schultmann, F., Zumkeller, M., & Rentz, O. (2006). Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry. *European Journal of Operational Research*, 171 (3), 1033-1050.
- Seidel, M., Seidel, R., Tedford, D., Cross, R., & Wait, L. (2008). A systems modeling approach to support environmentally sustainable business development in manufacturing SMEs. *Int. Scholarly Sci. Res. Innov.*, 2 (12), 800-808.
- Seshappa & Prasad (2020). Characterization and investigation of mechanical properties of aluminium hybrid nano-composites: novel approach of utilizing silicon carbide and waste particles to reduce cost of material, *Silicon*, 13 (12), 4355-4369.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*. 16 (15), 1699-1710.
- Shamsuddoha, M., Quaddus, M., & Klass, D. (2013). *A system dynamics approach for poultry operation to achieve additional benefits*. Winter Simulation Conference Proceedings, 1824-1834.
- Sharholly, M., Ahmad, K., Vaishya, R. C., & Gupta, R. D. (2007). Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India, *Journal of Waste Management*, 27, 490-496.
- Shou, Y. Shao, J., Lai, K., Kang, M., & Park, Y. (2019). The impact of sustainability and operations orientations on sustainable supply management and the triple bottom line. *J. Clean. Prod.*, 240.
- Shen, L., & Worell, E. (2014). *Plastic recycling*. In book: Handbook of Recycling, doi: 10.1016/B978-0-12-396459-5.00013-1.
- Shibin, K. T., Dubey, R., Gunasekaran, A., Luo, Z W., Papadopoulos, T., & Roubaud, D. (2018). Frugal innovation for supply chain sustainability in SMEs: multi-method research design. *Production Planning & Control*, 29 (11), 908-927.
- Shukla, R. K. (2016). Coordination practices in supply chain management. *J. Manag. Res.* 16(1), 44-54.
- Silva, D. A. L., Renó, G. W. S., Sevegnani, G., Sevegnani, T. B., & Truzzi, O. M. S. (2013).

- Comparison of disposable and returnable packaging: a case study of reverse logistics in Brazil, *J. Clean. Prod.*, 47, 377-387.
- Simon, B. (2019). What are the most significant aspects of supporting the circular economy in the plastic industry? *Resour. Conserv. Recycl.*, 141, 299-300.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A.K. (2007). Development of composite sustainability performance index for steel industry. *Ecol. Indicat.* 7, 565-588.
- Singh, S., Sharma, P. C., Pinto Barcellos, P. F., Rodrigues, M. (2015). System dynamics as a tool for green supply chain management: a theoretical ransom. *Int J Humanit Sci*, 5, 121-133.
- Skowronska, A. (2008). Technologie logistyczne jako przykład technologii środowiskowych na drodze do zrównoważonego rozwoju. *Logistyka—nauka* 1, 85–90.
- Sommerhuber, P.F., Wang, T., & Krause, A. (2016). Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard. *J. Clean. Prod.* 121, 176–185.
- Sooš, L., Matuš, M., Pokusová, M., Cacko, V., & Bábics, J. (2021). The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies. *Recycling*, 6, 26. <https://doi.org/10.3390/recycling6020026>.
- Soosay, C. A., & Cahpman, R .L. (2006). An empirical examination of performance measurement for managing continuous innovation in logistics, Special Issue: Continuous Innovation, *Performance and Knowledge Management*, 13(3), 192–205.
- Sopadang, A., Wichaisri, S., & Banamyong, R. (2017). *Sustainable supply chain performance measurement a case study of the sugar industry*. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Rabat, Morocco, April 11-13.
- Srivas, S. K., & Raj, A. (2018). Sustainability Performance Assessment of an Aircraft Manufacturing Firm. *Benchmarking An International Journal*, 25(5).
- Sterman, D. (2000). *Business Dynamics*, McGraw-Hill.
- Storm, B. K. (2017). *Production of recyclates – compared with virgin plastics – a LCA Study*, MATEC Web of Conferences 112, 04024.
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation, *J. Clean. Prod.*, 42, 215-227.
- Suttibak, S., & Nitivattananon, V. (2008). Assessment of factors influencing the performance of solid waste recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling* 53, 45–56.
- Swain, B., ark, J.R., Shin, D.Y., Park, K-S., Hong, M. H., & Lee, C. G. (2015). Recycling of waste automotive laminated glass and valorization of polyvinyl butyral through mechanochemical separation, *Environmental Research*, 142, 615-623.
- Szekely, F., & Knirsch, M. (2005). Responsible leadership and corporate social responsibility: metrics for sustainable performance. *Eur. Manag. J.* 23 (6), 628-647.

- Tajbakhsh, A., & Hassini, E. (2015). Performance Measurement of Sustainable Supply Chains: A Review and Research Questions. *Int. J. Product. Perform. Manag.* 64, 744–783.
- Tako, A. A., & Robinson, S. (2012). The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decis. Support Syst.*, 52, 802-815.
- Tam, V. W., Tam, C. M., Zeng, S. X., & Chan, K. K. (2006). Environmental Performance Measurement Indicators in Construction. *Building and Environment*, 41(2), 164-173.
- Tandy, B. C., & Way, A. G. J. (2004). R&D to improve site practices for collection and clean separation of composite (glass) materials in the construction and demolition industry. *Waste and Resources Action Programme*.
- Tavana, M, Mirzagoltabar, H., Mirhedayatian, S.M., Farzipoor Saen, R., & Azadi, M. (2013). A new network epsilon-based DEA model for supply chain performance evaluation. *Comput. Ind. Eng.*, 66, 501-513.
- Tavana, M., Zareinejad, M., Di Caprio, D. ve Kaviani, M.A. (2016). An integrated intuitionistic fuzzy AHP and SWOT method for outsourcing reverse logistics. *Applied Soft Computing*, 40, 544-557.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F., & Williams, M.E. (2002). *Chapter 1:Introduction, Handbook of Solid Waste Management*, Second Edition, The McGraw-Hill Companies, 19-45.
- Teece, D. J. (2010). Business models, business strategy and innovation. *Long Range Plann.*, 43, 172-194.
- Teuscher, P., Grüninger, B., & Ferdinand, N. (2006). Risk management in sustainable supply chain management: lessons learnt from the case of gmo- free soybeans, *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 13(1), 1-10.
- The Association of Plastic Recyclers. (2018). Life Cycle Impacts for Postconsumer Recycled Resins: Pet, HDPE, and PP. Erişim adresi: <https://www.jdsupra.com/legalnews/life-cycle-impacts-for-postconsumer-98256/> (24.12.2021)
- The Association of Plastic Recyclers. (12.05.2020). Virgin vs. Recycled Plastic Life Cycle Assessment Energy Profile and Life Cycle Assessment Environmental Burdens. Erişim adresi: <https://plasticsrecycling.org/images/library/APR-Recycled-vs-Virgin-May2020.pdf> (11.10.2021).
- Theisen, H. (2000). Chapter 7: Collection of solid waste, *Handbook of Solid Waste Management*, *Handbook of Solid Waste Management*, Second Edition, The McGraw-Hill Companies.
- Theyel, G. (2000). Management practices for environmental innovation and performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(2), 249-266.
- Thirupathi, R. M., Vinodh, S., & Dhanasekaran, S. (2019). Application of system dynamics modelling for a sustainable manufacturing system of an Indian automotive component manufacturing organisation: a case study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1055–1071.
- Tian, Y. H., Govindan, K., & Zhu, Q. H. (2014). A system dynamics model based on evolutionary game theory for green supply chain management diffusion among Chinese

- manufacturers. *J. Clean. Prod.*, 80 (1), 96-105.
- Tian, X., Xiao, H., Liu, Y. B., & Ding, W. R. (2021). Design and simulation of a secondary resource recycling system: A case study of lead-acid batteries. *Waste Management*, 126, 78-88.
- Tsai, W., & Hung, S. (2009). A fuzzy goal programming approach for green supply chain optimisation under activity-based costing and performance evaluation with a value-chain structure. *International Journal of Production Research*, 47 (18), 4991–5017.
- Touboulic, A., & Walker, H. (2015). Theories in sustainable supply chain management: a structured literature review. *Int J Phys Distrib Logist Manag*, 45, 16-42.
- TPA Plast Global Engineering. (2016). *Engineering polymers in the underhood*. Erişim adresi: http://www.tpacomponents.com/uploads/pdf/en/0205_EN.pdf (12.05.2021).
- Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021, Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf> (10.04.2022).
- Ulusal Çevre Ajansı. (2017). Waste Statistics and Overall Recycling, Erişim adresi: <http://www.nea.gov.sg/energy-waste/waste-management/waste-statistics-and-overall-recycling> (17.05.2021).
- Ulku, M. A., Akgun, M., Venkatadri, U., Diallo, C., & Chadha, S. S. (2020). Managing environmental and operational risks for sustainable cotton production logistics: system dynamics modelling for a textile company. *Logistics-Basel*, 4(4).
- Ulli-Beer, S., Andersen, D.F., & Richardson, G. P. (2007). Financing a competitive recycling initiative in Switzerland. *Ecological Economics*. 62(3/4), 727-739.
- UNEP. (2018). *Single-Use plastics, a road map for sustainability*. Erişim Adresi: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/25523;jsessionid=B4CA54CAE22002E7AE3A4857766417F8>
- U.S. Department of Energy (US DOE). (2008). Waste heat recovery: technology and opportunities in the U.S.Industry.
- U.S.G.S. (Geological Survey). (2014). Iron and Steel Scrap. *Mineral Commodity Summaries 2014*. Erişim adresi: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf> (18.06.2021).
- Wäger, P. A., & Hirsch, R. (2015). Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Sci. Total Environ.*, 529, 158–167.
- Wang, Z., Yao, D.Q., & Huang, P. (2007). A new location inventory policy with reverse logistics applied to B2C e-markets of China. *International Journal of Production Economics*, 107 (2), 350-363.
- Wang, H. F., & Hsu, H. W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based

- genetic algorithm. *Comput. Oper. Res.*, 37 (2), 376-389.
- Wang, J., Zhang, Y., & Goh, M. (2018). Moderating the role of firm size in sustainable performance improvement through sustainable supply chain management. *Sustainability*, 10, 1654.
- Wang, Z., Wang, Y., Liu, Z., Cheng, J., & Chen, X. (2019). Strategic management of product recovery and its environmental impact. *Int. Journal of Prod. Research*, <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1804637>.
- Wang, Y., Gu, Y., Wu, Y., Zhou, G., Wang, H., Han, H., & Chang, T. (2020). Performance simulation and policy optimization of waste polyethylene terephthalate bottle recycling system in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 162.
- Water, N. (2009). Wastewater recycling: Swedish steel plant goes green. *Filtr. Sep.* 46, 42–43.
- Wee, H.-M., Yang, W.-H., Chou, C.-W., & Padilan, M. V. (2012). Renewable energy supply chains, performance, application barriers, and strategies for further development. *Renew Sustain Energy Rev*, 16, 5451-5465.
- Weeks, J. G., Wasil, J. C. M., Llamas, K. M., & Agrinzoni, C. M. (2021). Solid waste management system for small island developing states. *Global J. Of Env. Science And Management*, 7(2), 259- 72.
- Wei, F., Sifeng, L., Lijun, Y., Weizhao, L., Zhengyang, Y. (2014). Research on performance evaluation system for green supply chain management based on the context of recycled economy-taking guangxi's manufacturing industry as example. *Journal of Grey System*, 26(2), 177-187.
- Wei, F., & Xiong, Z. (2020). Review of sustainable supply chain performance evaluation. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 126.
- Wen, L., Lin, C-h., & Lee, S-c. (2009). Review of recycling performance indicators: A study on collection rate in Taiwan, *Waste Management*, 29(8), 2248-2256.
- Wimmer, W., & Züst, R. (2003). *Ecodesign pilot: product investigation, learning and optimization tool for sustainable product development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Wittstruck, D., & Teuteberg, F. (2012). Understanding the Success Factors of Sustainable Supply Chain Management: Empirical Evidence from The Electrics and Electronics Industry. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 19(3), 141-158.
- Wolf, J. (2011). Sustainable supply chain management integration: a qualitative analysis of the German manufacturing industry. *Journal of Business Ethics*, 102 (2), 221-235.
- World Economic Forum. (2016). *The new plastics economy: rethinking the future of plastics*, Ellen MacArthur Foundation, McKinsey & Company. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>.
- World Steel Association. (2010). The three Rs of sustainable steel, World Steel Association September 2009, 2.

- World Steel Association. (2018). Steel Facts. Erişim adresi: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:ab8be93e-1d2f-4215-91434eba6808bf03/20190207_steelFacts.pdf (15.05.2021).
- Worrell, E., & Reuter, M.A. (2014). *Recycling in Context Handbook of Recycling*, Elsevier, 1-61.
- Wu, Z., Zhai, S., Hong, J., Zhang, Y., & Shi, K. (2018). Building Sustainable Supply Chains for Organizations Based on QFD: A Case Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15(12), 2834.
- Wunderlich, P., & Größler, A. (2012). Using system dynamics to analyze innovation diffusion processes within intra-organizational networks. *International System Dynamics Conference*, St. Gallen.
- Xi, X., & Poh, K. L. (2013). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Proc. Comput. Sci.*
- Xu, S., Chu, C., Zhang, Y., Ye, D., Wang, Y., & Ju, M. (2018). Entangled Stakeholder Roles and Perceptions of Sustainable Consumption: An Evaluation of Sustainable Consumption Practices in Tianjin, China. *Journal of Environmental Management* 223, 841–848.
- Vachon, S., & Mao, Z. (2008). Linking supply chain strength to sustainable development: a country-level analysis. *J. Clean. Prod.*, 16 (15), 1552-1560.
- Van Wassenhove, L.N., & Guide Jr., V.D.R. (2009). The evolution of closed-loop supply chain research, *Oper. Res.*, 57 (1), 10-18.
- Varsei, M., Soosay, C., Fahimnia, B., & Sarkis, J. (2014). Framing sustainability performance of supply chains with multidimensional indicators. *Supply Chain Manag.* 19, 242–257.
- Velenturf, A. P. M., & Jopson, J. S. (2019). Making the business case for resource recovery. *Science of The Total Environment*, 648, 1031-1041.
- Veleva, V., & Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Clean. Prod.* 9, 519-549.
- Vidal-Legaz, B., Martínez-Fernández, J., Picón, A. S., & Pugnaire, F. I. (2013). Trade-offs between maintenance of ecosystem services and socio-economic development in rural mountainous communities in southern Spain: a dynamic simulation approach. *J. Environ. Manag.*, 131, 280-297.
- Volkswagen Group. (2009). *Innovative Developments for Lightweight Vehicle Structures*. Wolfsburg, Germany.
- Yamaguchi, K. (2013). *Money and macroeconomic dynamics-accounting system dynamics approach*. Awaji Island, Japan: Japan Future Research Center.
- Yan, J., & Feng, C. (2014). Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench. *Clean Technol. Environ. Policy*, 16 (1), 95-109.
- Yang, G., Wang, Z., & Li, X. (2009). The optimization of the closed-loop supply chain network. *Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review*, 45 (1), 16-28.

- Yao, S., Wu, S., Song, B., Kou, M., Zhou, H., & Gu, K. (2018). Multi-objective optimization of cost saving and emission reduction in blast furnace ironmaking process. *Metals*, 8, 979.
- Yawar, S.A., & Seuring, S. (2017). Management of social issues in supply chains: a literature review exploring social issues, actions and performance outcomes. *J. Bus. Ethics*, 141, 621–643.
- Ye, G., Yuan, H., Shen, L., & Wange, H. (2012). Simulating effects of management measures on the improvement of the environmental performance of construction waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 56–63.
- Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P. G., & Tharumarajah, A. (2011). Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. *Journal of Environmental science and policy* 14, 650–663.
- Yeung, A.C. L. (2008). Strategic supply management, quality initiatives, and organizational performance, *Journal of Operations Management*, 26, 490–502.
- Yu, H., & Solvang, W.D. (2018). Incorporating flexible capacity in the planning of a multi-product multi-echelon sustainable reverse logistics network under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 198, 285–303.
- Yuan, H., & Wang, J. (2014). A system dynamics model for determining the waste disposal charging fee in construction. *Eur. J. Oper. Res.* 237, 988–996.
- Zacho, K.O., & Mosgaard, M.A. (2016). Understanding the role of waste prevention in local waste management: A literature review, *ISWA*, <https://doi.org/10.1177/0734242X16652958>.
- Zarrinpoor, N. (2021). Designing a sustainable supply chain network for producing high-value products from waste glass. *Waste Management & Research*, 39 (12), 1489–1500.
- Zhan, S.F., Zhang, X.C., Ma, C., & Chen, W. P. (2012). Dynamic modelling for ecological and economic sustainability in a rapid urbanizing region. *Prog. Environ. Sci.*, 13, 242–251.
- Zhang, H., Calvo-Amodio, J., Haapala, K.R. (2013). A conceptual model for assisting sustainable manufacturing through system Dynamics. *J. Manuf. Syst.*, 32 (4), 543–549.
- Zhang, H.S., & Chen, M. (2014). Current recycling regulations and technologies for the typical plastic components of end-of-life passenger vehicles: a meaningful lesson for China. *Journal Of Material Cycles and Waste Management*, 16 (2), 187–200.
- Zhang, J., Zhang, X.Q., & Wang, Q.Y. (2019). Research on the relationship between institutional pressure, green supply chain management practice and enterprise performance, *Journal Of Wuhan Textile University*, 32 (05), 24–30.
- Zhao, W., Ren, H., & Rotter, V. S. (2011). A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center - The case of Chongqing, China. *Resources Conservation and Recycling*, 55(11), 933–944.
- Zhao, R., Zhou, X., Jin, Q., Wang, Y., & Liu, C. (2017). Enterprises' compliance with government carbon reduction labelling policy using a system dynamics approach. *J. Clean. Prod.* 163, 303–319.

- Zhao, Y., Cao, Y., Li, H., Wang, S., Liu, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2018). Bullwhip effect mitigation of green supply chain optimization in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 180, 888-912.
- Zhong-wu, L. U., Jiu-ju, C. A. I., & Qing-bo, Y. U. (2000). The Influence of Materials Flows in Steel Manufacturing Process on Its Energy Intensity. *Acta Metallurgical Sinica*, 36(4), 370.
- Zhou, C., Yang, G., Ma, S. J., Liu, Y. J., & Zhao, Z. L. (2021). The impact of the COVID-19 pandemic on waste-to-energy and waste-to-material industry in China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 139.
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises, *J. Oper. Manag.*, 22 (3), 265-289.
- Zhu, Q., Geng, Y., & Lai, K .H. (2010). Circular economy practices among Chinese manufacturers varying in environmental-oriented supply chain cooperation and the performance implications. *J. Environ. Manag.* 91, 1324–133.
- Zhu, Q., Liu, J., & Lai, K. H. (2016). Corporate social responsibility practices and performance improvement among Chinese national state-owned enterprises. *Int. J. Prod. Econ.*, 171 (3), 417-426.
- Zia, K. M., Bhatti, H. N., & Bhatti, I. A. (2007). Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: a review. *React. Funct. Polym.* 67, 675-692.

EKLER

EK 1: Plastik Ürün Grubuna Yönelik STELLA Programındaki Tüm Eşitlikler

EK 1.1: Plastik Ürün Grubuna Ait Senaryo 1a Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{hatali_parca_akisi} * \text{mevcut_geri_donusum_orani})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 3000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} * 9.5 \text{ ELSE}$$

$$(-0.0005 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} + 11.586) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci = 1-
((((geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-
toplam_hurda_degeri)+(geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_maliyet_degisim_firsati)))+(geri_donusturulecek_atik_miktari*geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti)/((hatali_parca_akisi*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-(hatali_parca_akisi*birim_hurda_degeri)+(hatali_parca_akisi*birim_maliyet_degisim_firsati))))

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.85

birim_enerji_tuketim_miktari = 1.040

birim_gaz_salinim_miktari = 1.70

birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 4.65 ELSE
((0.0001*geri_donusturulmeyen_atik_miktari) + 4.2502)

birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati-
geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti

birim_su_tuketim_miktari = 1.360

birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari =
geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_enerji_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari =
geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_su_tuketim_miktari

birincil_üretim_ile_salnan_gaz_miktari =
birim_gaz_salinim_miktari*geri_donusturulmeyen_atik_miktari

birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati =
IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 16 ELSE (-

0.0011*geri_donusturulmeyen_atik_miktari + 19.681)

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.361

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_salnan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturlecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturlecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturlecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.38

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.945

surdurulebilirlik_gelisimi =

0.0595*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.1402*(enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.3762*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.3584*(karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.0654*(su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_mik
tari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiy
ati))



EK 1.2: Plastik Ürün Grubuna Ait Senaryo 1b Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{hatali_parca_akisi} * \text{mevcut_geri_donusum_orani})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} * 9.5 \text{ ELSE}$$

$$(-0.0005 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} + 11.586) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazancı} = 1 - (((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} * \text{birincil_üretimle_üretilmiş_malzemenin_satış_fiyatı}) -$$

toplam_hurda_degeri+(geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_maliyet_degisim_fir
 sati)))+(geri_donusturulecek_atik_miktari*geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti)
)/((hatali_parca_akisi*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-
 (birim_hurda_degeri*hatali_parca_akisi)+(hatali_parca_akisi*birim_maliyet_degisim_f
 irsati)))

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayrıştırma_orani = 0.85

birim_enerji_tüketim_miktari = 1.040

birim_gaz_salinim_miktarii = 1.70

birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 4.65 ELSE
 ((0.0001*geri_donusturulmeyen_atik_miktari) + 4.2502)

birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati-
 geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti

birim_su_tüketim_miktari = 1.360

birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari =
 geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_enerji_tüketim_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari =
 geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_su_tüketim_miktari

birincil_üretim_ile_salnan_gaz_miktari =
 birim_gaz_salinim_miktarii*geri_donusturulmeyen_atik_miktari

birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati =
 IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 16 ELSE (-
 0.0011*geri_donusturulmeyen_atik_miktari + 19.681)

enerji_tüketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.361

enerji_tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
 ELSE 1-

$$\frac{((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktarı} + \text{enerji_tüketim_miktarı}) / (\text{hatalı_parca_akisi} * \text{birim_enerji_tüketim_miktarı}))}{\text{gaz_salınımı_cevresel_kazancı_veya_kaybı}} =$$

$$\text{IF}(\text{hatalı_parca_akisi}=0) \quad \text{THEN} \quad 0 \quad \text{ELSE} \quad 1 - \frac{((\text{birincil_üretim_ile_salınan_gaz_miktarı} + \text{salınan_gaz_miktarı}) / (\text{hatalı_parca_akisi} * \text{birim_gaz_salınım_miktarı}))}{\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktarı}} = \text{hatalı_parca_akisi} - \text{geri_donusturulecek_atik_miktarı}$$

$$\text{geri_donusturulmuş_birim_malzeme_maliyeti} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktarı}=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{harcama} / \text{geri_donusturulecek_atik_miktarı}$$

$$\text{salınan_gaz_miktarı} = \text{geri_donusturulecek_atik_miktarı} * 0.38$$

$$\text{su_tüketimi_cevresel_kazancı_veya_kaybı} =$$

$$\text{IF}(\text{hatalı_parca_akisi}=0) \quad \text{THEN} \quad 0 \quad \text{ELSE} \quad 1 - \frac{((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktarı} + \text{su_tüketim_miktarı}) / (\text{hatalı_parca_akisi} * \text{birim_su_tüketim_miktarı}))}{\text{su_tüketim_miktarı}} = \text{geri_donusturulecek_atik_miktarı} * 0.945$$

$$\text{surdurulebilirlik_gelisimi} = 0.167 * (\text{gaz_salınımı_cevresel_kazancı_veya_kaybı}) + 0.167 * (\text{enerji_tüketimi_cevresel_kazancı_veya_kaybı}) + 0.25 * (\text{toplam_maliyet_ekonomik_kazancı_veya_kaybı}) + 0.25 * (\text{karlılık_ekonomik_kaybı_veya_kazancı}) + 0.167 * (\text{su_tüketimi_cevresel_kazancı_veya_kaybı})$$

$$\text{toplam_hurda_değeri} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktarı} * \text{birim_hurda_değeri}$$

$$\text{toplam_maliyet_ekonomik_kazancı_veya_kaybı} = \text{IF}(\text{hatalı_parca_akisi}=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 - \frac{((\text{birincil_üretimle_üretmiş_malzemenin_satis_fiyatı} * \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktarı}) + (\text{harcama})) / (\text{hatalı_parca_akisi} * \text{birincil_üretimle_üretmiş_malzemenin_satis_fiyatı})}{\text{toplam_maliyet_ekonomik_kazancı_veya_kaybı}}$$

EK 1.3: Plastik Ürün Grubuna Ait Senaryo 2 Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktari}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktari} = \text{IF } (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{hatali_parca_akisi} * \text{mevcut_geri_donusum_orani})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{cevre_basarisizlik_maliyeti} + \text{diger_uretim_giderleri} + \text{enerji_tuketim_gideri}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktari} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazanci} = 1 - (((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktari} * \text{birincil_üretimle_üretilmiş_malzemenin_satis_fiyatı}) -$$

$$\text{toplam_hurda_degeri} + (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_maliyet_degisim_firsati}) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} \times \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti}) / ((\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birincil_üretimle_ürettilmis_malzemenin_satis_fiyati}) - (\text{birim_hurda_degeri} \times \text{hatali_parca_akisi}) + (\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birim_maliyet_degisim_firsati}))$$

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayrıştırma_orani = 0.85

birim_enerji_tüketim_miktari = 1.040

birim_gaz_salinim_miktari = 1.70

$$\text{birim_hurda_degeri} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 4.65 \text{ ELSE } ((0.0001 \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}) + 4.2502)$$

$$\text{birim_maliyet_degisim_firsati} = \text{birincil_üretimle_ürettilmis_malzemenin_satis_fiyati} - \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti}$$

birim_su_tüketim_miktari = 1.360

$$\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_enerji_tüketim_miktar}$$

$$\text{birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktar} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_su_tüketim_miktar}$$

$$\text{birincil_üretim_ile_salinan_gaz_miktar} = \text{birim_gaz_salinim_miktari} \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}$$

$$\text{birincil_üretimle_ürettilmis_malzemenin_satis_fiyati} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 16 \text{ ELSE } (-0.0011 \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} + 19.681)$$

$$\text{cevre_basarisizlik_maliyeti} = \text{IF} (\text{enerji_tüketim_miktar} < 20) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } (0.1159 \times \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} - 0.9374)$$

$$\text{diger_uretim_giderleri} = \text{IF} (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 5.50 \times \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

ELSE ((-0.0003*geri_donusturlecek_atik_miktari) +
6.4375)*geri_donusturlecek_atik_miktari

enerji_tuketim_gideri = enerji_tuketim_miktari*1.89

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.361

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturlecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturlecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturlecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.38

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_gideri = su_tuketim_miktari*0.0015

su_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.945

surdurulebilirlik_gelisimi =
0.167*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.167*(enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(k

arlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.167*(su__tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_miktari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati))



EK 2: Cam Ürün Grubuna Yönelik STELLA Programındaki Tüm Eşitlikler

EK 2.1: Cam Ürün Grubuna Ait Senaryo 1a Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktari}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktari} = \text{IF } (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{mevcut_geri_donusum_orani} * \text{hatali_parca_akisi})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktari} > 4000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktari} * 4.65 \text{ ELSE}$$

$$(-0.0006 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktari} + 7.0808) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktari}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktari} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci = 1-
((((geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-

toplam_hurda_degeri+(geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_maliyet_degisim_firsati))+(geri_donusturulecek_atik_miktari*geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti)
)/((hatali_parca_akisi*birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati)+(hatali_parca_akisi*birim_maliyet_degisim_firsati))-birim_hurda_degeri*hatali_parca_akisi))

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.95

birim_enerji_tuketim_miktari = 0.600

birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 1.60 ELSE
((0.0001*geri_donusturulmeyen_atik_miktari) + 1.2712)

birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati-
geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti

birim_su_tuketim_miktari = 0.450

birincil_uretilm_ile_salinan_gaz_miktari =

birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari*geri_donusturulmeyen_atik_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari =

geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_enerji_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari =

geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_su_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari = 0.790

birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati =

IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 10.70 ELSE

(-0.0003*geri_donusturulmeyen_atik_miktari)+11.917

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.445

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0

ELSE 1-

$$((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktarı} + \text{enerji_tüketim_miktarı}) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birim_enerji_tüketim_miktarı}))$$

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatalı_parça_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

$$((\text{birincil_uretilm_ile_salinan_gaz_miktarı} + \text{salinan_gaz_miktarı}) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktarı}))$$

geri_donusturulmeyen_atik_miktarı = hatalı_parça_akisi - geri_donusturulecek_atik_miktarı

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturulecek_atik_miktarı=0) THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturulecek_atik_miktarı

salinan_gaz_miktarı = geri_donusturulecek_atik_miktarı*0.55

su__tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatalı_parça_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

$$((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktarı} + \text{su_tüketim_miktarı}) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birim_su_tüketim_miktarı}))$$

su_tüketim_miktarı = geri_donusturulecek_atik_miktarı*0.225

surdurulebilirlik_gelisimi =

$$0.052 * (\text{gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi}) + 0.134 * (\text{enerji_tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi}) + 0.334 * (\text{toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi}) + 0.4130 * (\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazanci}) + 0.0760 * (\text{su_tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi})$$

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktarı*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatalı_parça_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-(

$$((\text{birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyatı} * \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktarı}) + (\text{harcama})) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyatı}))$$

EK 2.2: Cam Ürün Grubuna Ait Senaryo 1b Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{mevcut_geri_donusum_orani} * \text{hatali_parca_akisi})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} * 4.65 \text{ ELSE } (-0.0006 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} + 7.0808) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazancı} = 1 - (((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} * \text{birincil_uretim_ile_uretilmiş_malzemenin_sati$$

s_fiyati)-

toplam_hurda_degeri+(geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_maliyet_degisim_firsati))+(geri_donusturulecek_atik_miktari*geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti)/((hatali_parca_akisi*birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati)+(hatali_parca_akisi*birim_maliyet_degisim_firsati))-birim_hurda_degeri*hatali_parca_akisi))

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.95

birim_enerji_tuketim_miktari = 0.600

birim_gaz_salinim_miktar = 0.790

birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 1.60 ELSE ((0.0001*geri_donusturulmeyen_atik_miktari) + 1.2712)

birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati-geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti

birim_su_tuketim_miktari = 0.450

birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_enerji_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_su_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari = birim_gaz_salinim_miktar*geri_donusturulmeyen_atik_miktari

birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati = IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 10.70 ELSE

(-0.0003*geri_donusturulmeyen_atik_miktari)+11.917

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.445

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_a

kisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturulecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturulecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturulecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.55

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.225

surdurulebilirlik_gelisimi =
0.167*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.167*(enerji_tuketimi_cevresel_
kazanci_veya_kaybi)+0.25*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(k
arlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.167*(su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_
kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_m
iktari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_
_fiyati))

EK 2.3: Cam Ürün Grubuna Ait Senaryo 2 Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplaml_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{mevcut_geri_donusum_orani} * \text{hatali_parca_akisi})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{cevre_basarisizlik_maliyeti} + \text{diger_uretim_gideri} + \text{enerji_tuketim_gideri} + \text{su_tuketim_gideri}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayristirma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci} = 1 -$$

$$\frac{(((geri_donusturulmeyen_atik_miktar \times birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati) - toplam_hurda_degeri + (geri_donusturulmeyen_atik_miktar \times birim_maliyet_degisim_firsati)) + (geri_donusturulecek_atik_miktar \times geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti))}{((hatali_parca_akisi \times birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati) + (hatali_parca_akisi \times birim_maliyet_degisim_firsati)) - birim_hurda_degeri \times hatali_parca_akisi}$$

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayrıştırma_orani = 0.95

birim_enerji_tuketim_miktari = 0.600

birim_gaz_salinim_miktari = 0.790

$$birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktar > 4000) THEN 1.60 ELSE ((0.0001 \times geri_donusturulmeyen_atik_miktar) + 1.2712)$$

$$birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati - geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti$$

birim_su_tuketim_miktari = 0.450

$$birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar = geri_donusturulmeyen_atik_miktar \times birim_enerji_tuketim_miktar$$

$$birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktar = geri_donusturulmeyen_atik_miktar \times birim_su_tuketim_miktar$$

$$birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati = IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktar > 4000) THEN 10.70 ELSE (-0.0003 \times geri_donusturulmeyen_atik_miktar) + 11.917$$

$$birincli_uretim_ile_salinan_gaz_miktar = birim_gaz_salinim_miktar \times geri_donusturulmeyen_atik_miktar$$

$$cevre_basarisizlik_maliyeti = IF(enerji_tuketim_miktar < 20) THEN 0 ELSE (0.1159 \times geri_donusturulecek_atik_miktar - 0.9374)$$

diger_uretim_gideri = IF (geri_donusturlecek_atik_miktari>4000) THEN
2.30*geri_donusturlecek_atik_miktari

ELSE (-0.0003*geri_donusturlecek_atik_miktari +
3.2126)*geri_donusturlecek_atik_miktari

enerji_tuketim_gideri = enerji_tuketim_miktari*1.89

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.445

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_a
kisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturlecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturlecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturlecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.55

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_gideri = su_tuketim_miktari*0.015

su_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.225

surdurulebilirlik_gelisimi =

$0.167 * (\text{gaz_salinimi_cevreseel_kazanci_veya_kaybi}) + 0.167 * (\text{enerji_tüketimi_cevreseel_kazanci_veya_kaybi}) + 0.25 * (\text{toplaml_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi}) + 0.25 * (\text{karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci}) + 0.167 * (\text{su_tüketimi_cevreseel_kazanci_veya_kaybi})$

$\text{toplaml_hurda_degeri} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktarl} * \text{birim_hurda_degeri}$

$\text{toplaml_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi} = \text{IF}(\text{hatali_parca_akisi}=0) \text{ THEN } 0$
 $\text{ELSE } 1 - ($

$((\text{birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati} * \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktarl}) + (\text{harcama})) / (\text{hatali_parca_akisi} * \text{birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati}))$

EK 3: Çelik Ürün Grubuna Yönelik STELLA Programındaki Tüm Eşitlikler

EK 3.1: Çelik Ürün Grubuna Ait Senaryo 1a Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t) =$$
$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar})$$
$$* dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar = 0

INFLOWS:

IF (mevcut_geri_donusum_orani>1) THEN 1*hatali_parca_akisi ELSE
(IF(mevcut_geri_donusum_orani<0) THEN 0 ELSE
hatali_parca_akisi*mevcut_geri_donusum_orani)

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) +$$
$$(\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN}$$
$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} * 16.5 \text{ ELSE}$$

$$(-0.0014 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} + 22.296) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazancı} = 1 -$$
$$(((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} * \text{birincil_üretimle_üretilmiş_malzemenin_satis_}$$
$$\text{fiyatı}) -$$

$$\text{toplam_hurda_degeri} + (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_maliyet_degisim_firsati}) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} \times \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti}) / ((\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati}) - (\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birim_hurda_degeri}) + (\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birim_maliyet_degisim_firsati}))$$

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.9

birim_enerji_tuketim_miktari = 1.725

birim_gaz_salinim_miktari = 4.3

$$\text{birim_hurda_degeri} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 11.3 \text{ ELSE } ((0.0007 \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}) + 8.4992)$$

$$\text{birim_maliyet_degisim_firsati} = \text{birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati} - \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti}$$

birim_su_tuketim_miktari = 6.4

$$\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_enerji_tuketim_miktar}$$

$$\text{birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktar} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_su_tuketim_miktar}$$

$$\text{birincil_üretim_ile_salinan_gaz_miktar} = \text{birim_gaz_salinim_miktar} \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}$$

$$\text{birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 37 \text{ ELSE } (-0.0017 \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} + 43.8)$$

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari * 0.688

$$\text{enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi} = \text{IF} (\text{hatali_parca_akisi} = 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 -$$

$$((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar} + \text{enerji_tuketim_miktar}) / (\text{hatali_parca_a}$$

kisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturulecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturulecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturulecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.682

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*3.65

surdurulebilirlik_gelisimi =
0.0470*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.1105*(enerji_tuketimi_cevrese
l_kazanci_veya_kaybi)+0.2671*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.4
420*(karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.1167*(su_tuketimi_cevresel_kazanci
_veya_kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_uretimle_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_mik
tari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_uretimle_uretilmis_malzemenin_satis_fiy
ati))

EK 3.2: Çelik Ürün Grubuna Ait Senaryo 1b Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{hatali_parca_akisi} * \text{mevcut_geri_donusum_orani})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} * 16.5 \text{ ELSE}$$

$$(-0.0014 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} + 22.296) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazancı} = 1 - (((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} * \text{birincil_üretimle_üretilmiş_malzemenin_satis_fiyatı}) -$$

$$\text{toplam_hurda_degeri} + (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_maliyet_degisim_firsati}) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} \times \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti})$$

$$) / ((\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birincil_üretimle_ürettilmis_malzemenin_satis_fiyati}) - (\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birim_hurda_degeri}) + (\text{hatali_parca_akisi} \times \text{birim_maliyet_degisim_firsati}))$$

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.9

birim_enerji_tuketim_miktari = 1.725

birim_gaz_salinim_miktari = 4.3

$$\text{birim_hurda_degeri} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 11.3 \text{ ELSE } ((0.0007 \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}) + 8.4992)$$

$$\text{birim_maliyet_degisim_firsati} = \text{birincil_üretimle_ürettilmis_malzemenin_satis_fiyati} - \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti}$$

birim_su_tuketim_miktari = 6.4

$$\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_enerji_tuketim_miktar}$$

$$\text{birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktar} = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} \times \text{birim_su_tuketim_miktar}$$

$$\text{birincil_üretim_ile_salinan_gaz_miktar} = \text{birim_gaz_salinim_miktar} \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}$$

$$\text{birincil_üretimle_ürettilmis_malzemenin_satis_fiyati} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } 37 \text{ ELSE } (-0.0017 \times \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar} + 43.8)$$

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari * 0.688

$$\text{enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi} = \text{IF} (\text{hatali_parca_akisi} = 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1 -$$

$$((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar} + \text{enerji_tuketim_miktar}) / (\text{hatali_parca_a}$$

kisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*bi
rim_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturulecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturulecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturulecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.682

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*3.65

surdurulebilirlik_gelisimi =
0.167*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.167*(enerji_tuketimi_cevresel_
kazanci_veya_kaybi)+0.25*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(k
arlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.167*(su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_
kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_uretimle_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_mik
tari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_uretimle_uretilmis_malzemenin_satis_fiy
ati))

EK 3.3: Çelik Ürün Grubuna Ait Senaryo 2 Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktari}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktari} = \text{IF } (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } \text{mevcut_geri_donusum_orani} * \text{hatali_parca_akisi}$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{cevre_basarisizlik_maliyeti} + \text{diger_uretim_giderleri} + \text{enerji_tuketim_gideri} + \text{su_tuketim_gideri}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktari} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlılık_ekonomik_kaybi_veya_kazanci} = 1 - (((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktari} * \text{birincil_üretile_üretilmis_malzemenin_satis_fi})))$$

yati)-

toplam_hurda_degeri+(geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_maliyet_degisim_firsati))+(geri_donusturulecek_atik_miktari*geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti)/((hatali_parca_akisi*birincil_uretile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-(hatali_parca_akisi*birim_hurda_degeri)+(hatali_parca_akisi*birim_maliyet_degisim_firsati)))

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.9

birim_enerji_tuketim_miktari = 1.725

birim_gaz_salinim_miktari = 4.3

birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 11.3 ELSE ((0.0007*geri_donusturulmeyen_atik_miktari) + 8.4992)

birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_uretile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati-geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti

birim_su_tuketim_miktari = 6.4

birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_enerji_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_su_tuketim_miktari

birincil_uretile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 37 ELSE (-0.0017*geri_donusturulmeyen_atik_miktari + 43.8)

birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari = birim_gaz_salinim_miktari*geri_donusturulmeyen_atik_miktari

cevre_basarisizlik_maliyeti = IF(enerji_tuketim_miktari<20) THEN 0 ELSE (0.1159*geri_donusturulecek_atik_miktari-0.9374)

```

diger_uretim_giderleri = IF (geri_donusturlecek_atik_miktari>4000) THEN
9*geri_donusturlecek_atik_miktari

ELSE ((-0.0008*geri_donusturlecek_atik_miktari) +
12.312)*geri_donusturlecek_atik_miktari

enerji_tuketim_gideri = enerji_tuketim_miktari*1.89

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.688

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_a
kisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturlecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturlecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturlecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.682

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_gideri = su_tuketim_miktari*0.015

su_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*3.65

surdurulebilirlik_gelisimi =
0.167*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.167*(enerji_tuketimi_cevresel_

```

kazanci_veya_kaybi)+0.25*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.167*(su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_uretile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_miktari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_uretile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati))



EK 4: Alüminyum Ürün Grubuna Yönelik STELLA Programındaki Tüm Eşitlikler

EK 4.1: Alüminyum Ürün Grubuna Ait Senaryo 1a Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{hatali_parca_akisi} * \text{mevcut_geri_donusum_orani})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} > 4000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} * 23 \text{ ELSE } (-0.0024 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar} + 32.718) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktar}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayristirma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci} = 1 -$$

$$\frac{(((\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i * \text{birincil_üretimle_üret}ilmi s_malzemenin_satis_fiyat}i) - \text{topl}am_hurda_degeri + (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i * \text{birim_mal}iyet_degisim_firsati)) + (\text{geri_donustur}ilecek_atik_miktar}i * \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_mal}iyeti)}{((\text{hatali_parca_akisi} * \text{birincil_üretimle_üret}ilmi s_malzemenin_satis_fiyat}i) - (\text{hatali_parca_akisi} * \text{birim_hurda_degeri}) + (\text{hatali_parca_akisi} * \text{birim_mal}iyet_degisim_firsati))}$$

UNATTACHED:

$\text{mevcut_atik_miktar}i = 100$

$\text{ayr}istirma_orani = 0.9$

$\text{birim_enerji_tüketim_miktar}i = 46$

$\text{birim_gaz_salinim_miktar}i = 12$

$$\text{birim_hurda_degeri} = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i > 4000) \text{ THEN } 24.5 \text{ ELSE } ((0.001 * \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i) + 20.336)$$

$$\text{birim_mal}iyet_degisim_firsati = \text{birincil_üretimle_üret}ilmi s_malzemenin_satis_fiyat}i - \text{geri_donusturulmus_birim_malzeme_mal}iyeti$$

$\text{birim_su_tüketim_miktar}i = 0.5$

$$\text{birincil_üretim_ile_harcanan_enerji_miktar}i = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i * \text{birim_enerji_tüketim_miktar}i$$

$$\text{birincil_üretim_ile_harcanan_su_miktar}i = \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i * \text{birim_su_tüketim_miktar}i$$

$$\text{birincil_üretim_ile_salinan_gaz_miktar}i = \text{birim_gaz_salinim_miktar}i * \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i$$

$$\text{birincil_üretimle_üret}ilmi s_malzemenin_satis_fiyat}i = \text{IF} (\text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i > 4000) \text{ THEN } 50 \text{ ELSE } (-0.0026 * \text{geri_donusturulmeyen_atik_miktar}i + 60.904)$$

$\text{enerji_tüketim_miktar}i = \text{geri_donustur}ilecek_atik_miktar}i * 3.2$

$$\text{enerji_tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi} = \text{IF} (\text{hatali_parca_akisi} = 0) \text{ THEN } 0$$

ELSE 1-

$$((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktarı} + \text{enerji_tüketim_miktarı}) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birim_enerji_tüketim_miktarı}))$$

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatalı_parça_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

$$((\text{birincil_üretim_ile_salınan_gaz_miktarı} + \text{salınan_gaz_miktarı}) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birim_gaz_salınım_miktarı}))$$

geri_donusturulmeyen_atık_miktarı = hatalı_parça_akisi - geri_donusturulecek_atık_miktarı

geri_donusturulmuş_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturulecek_atık_miktarı=0) THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturulecek_atık_miktarı

salınan_gaz_miktarı = geri_donusturulecek_atık_miktarı*0.530

su__tüketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatalı_parça_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

$$((\text{birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktarı} + \text{su_tüketim_miktarı}) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birim_su_tüketim_miktarı}))$$

su_tüketim_miktarı = geri_donusturulecek_atık_miktarı*0.28

surdurulebilirlik_gelisimi =

$$0.0735 * (\text{gaz_salınımı_cevresel_kazancı_veya_kaybı}) + 0.1464 * (\text{enerji_tüketimi_cevresel_kazancı_veya_kaybı}) + 0.3368 * (\text{toplam_maliyet_ekonomik_kazancı_veya_kaybı}) + 0.400 * (\text{karlılık_ekonomik_kaybı_veya_kazancı}) + 0.0443 * (\text{su_tüketimi_cevresel_kazancı_veya_kaybı})$$

toplam_hurda_değeri = geri_donusturulmeyen_atık_miktarı*birim_hurda_değeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatalı_parça_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-(

$$((\text{birincil_üretimle_üretmiş_malzemenin_satis_fiyatı} * \text{geri_donusturulmeyen_atık_miktarı}) + (\text{harcama})) / (\text{hatalı_parça_akisi} * \text{birincil_üretimle_üretmiş_malzemenin_satis_fiyatı}))$$

EK 4.2: Alüminyum Ürün Grubuna Ait Senaryo 1b Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktari}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktari} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{hatali_parca_akisi} * \text{mevcut_geri_donusum_orani})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{IF}(\text{geri_donusturulecek_atik_miktari} > 4000) \text{ THEN } \text{geri_donusturulecek_atik_miktari} * 23 \text{ ELSE}$$

$$(-0.0024 * \text{geri_donusturulecek_atik_miktari} + 32.718) * \text{geri_donusturulecek_atik_miktari}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktari} * \text{ayrıştırma_orani}$$

UNATTACHED:

karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci = 1-
 (((geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-
 toplam_hurda_degeri+(geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_maliyet_degisim_firsati))+
 (geri_donusturulecek_atik_miktari*geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti)
)/((hatali_parca_akisi*birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati)-
 (hatali_parca_akisi*birim_hurda_degeri)+(hatali_parca_akisi*birim_maliyet_degisim_firsati)))

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayristirma_orani = 0.9

birim_enerji_tuketim_miktari = 46

birim_gaz_salinim_miktarii = 12

birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 24.5 ELSE
 ((0.001*geri_donusturulmeyen_atik_miktari) + 20.336)

birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati-
 geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti

birim_su_tuketim_miktari = 0.5

birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari =
 geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_enerji_tuketim_miktari

birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari =
 geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_su_tuketim_miktari

birincil_üretim_ile_salinan_gaz_miktari =
 birim_gaz_salinim_miktarii*geri_donusturulmeyen_atik_miktari

birincil_üretimle_üretilmis_malzemenin_satis_fiyati =
 IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktari>4000) THEN 50 ELSE (-
 0.0026*geri_donusturulmeyen_atik_miktari + 60.904)

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*3.2

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-geri_donusturulecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturulecek_atik_miktari=0) THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturulecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.530

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-

((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*birim_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_miktari = geri_donusturulecek_atik_miktari*0.28

surdurulebilirlik_gelisimi =

0.167*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.167*(enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(karlilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.167*(su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-(

((birincil_uretimle_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_miktari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_uretimle_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati))

EK 4.3: Alüminyum Ürün Grubuna Ait Senaryo 2 Eşitlikleri

$$\text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t) = \text{geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktar}(t - dt) + (\text{geri_donusturulecek_atik_miktar}) * dt$$

INIT geri_donusturulen_toplam_malzeme_miktari = 0

INFLOWS:

$$\text{geri_donusturulecek_atik_miktar} = \text{IF} (\text{mevcut_geri_donusum_orani} > 1) \text{ THEN } 1 * \text{hatali_parca_akisi} \text{ ELSE } (\text{IF}(\text{mevcut_geri_donusum_orani} < 0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{mevcut_geri_donusum_orani} * \text{hatali_parca_akisi})$$

$$\text{mevcut_geri_donusum_orani}(t) = \text{mevcut_geri_donusum_orani}(t - dt) + (\text{geri_donusum_orani_katkisi}) * dt$$

INIT mevcut_geri_donusum_orani = 0.30

INFLOWS:

$$\text{geri_donusum_orani_katkisi} = \text{IF}(\text{surdurulebilirlik_gelisimi} < 0) \text{ THEN } -1 \text{ ELSE } 0.04$$

$$\text{Toplam_maliyet}(t) = \text{Toplam_maliyet}(t - dt) + (\text{harcama}) * dt$$

INIT Toplam_maliyet = harcama

INFLOWS:

$$\text{harcama} = \text{cevre_basarisizlik_maliyeti} + \text{diger_uretim_giderleri} + \text{enerji_tuketim_gideri} + \text{su_tuketim_gideri}$$

UNATTACHED:

$$\text{hatali_parca_akisi} = \text{mevcut_atik_miktar} * \text{ayristirma_orani}$$

UNATTACHED:

$$\text{karilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci} = 1 -$$

$$\begin{aligned} & (((geri_donusturulmeyen_atik_miktar \cdot birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati) - \\ & toplam_hurda_degeri + (geri_donusturulmeyen_atik_miktar \cdot birim_maliyet_degisim_firsati) + (geri_donusturulecek_atik_miktar \cdot geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti) \\ &) / ((hatali_parca_akisi \cdot birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati) + (hatali_parca_akisi \cdot birim_maliyet_degisim_firsati) - birim_hurda_degeri \cdot hatali_parca_akisi)) \end{aligned}$$

UNATTACHED:

mevcut_atik_miktari = 100

ayrıştırma_orani = 0.9

birim_enerji_tuketim_miktari = 46

birim_gaz_salinim_miktari = 12

$$birim_hurda_degeri = IF (geri_donusturulmeyen_atik_miktar > 4000) THEN 24.5 ELSE ((0.001 \cdot geri_donusturulmeyen_atik_miktar) + 20.336)$$

$$birim_maliyet_degisim_firsati = birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati - geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti$$

birim_su_tuketim_miktari = 0.5

$$birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktar = geri_donusturulmeyen_atik_miktar \cdot birim_enerji_tuketim_miktar$$

$$birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktar = geri_donusturulmeyen_atik_miktar \cdot birim_su_tuketim_miktar$$

$$birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktar = birim_gaz_salinim_miktar \cdot geri_donusturulmeyen_atik_miktar$$

$$birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati = IF(geri_donusturulmeyen_atik_miktar > 4000) THEN 50 ELSE (-0.0026 \cdot geri_donusturulmeyen_atik_miktar + 60.904)$$

$$cevre_basarisizlik_maliyeti = IF(enerji_tuketim_miktar < 20) THEN 0 ELSE (0.1159 \cdot geri_donusturulecek_atik_miktar - 0.9374)$$

diger_uretim_giderleri = IF (geri_donusturlecek_atik_miktari>4000) THEN
11.15*geri_donusturlecek_atik_miktari

ELSE (-0.0007*geri_donusturlecek_atik_miktari +
14.125)*geri_donusturlecek_atik_miktari

enerji_tuketim_gideri = enerji_tuketim_miktari*1.89

enerji_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*3.2

enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_enerji_miktari+enerji_tuketim_miktari)/(hatali_parca_a
kisi*birim_enerji_tuketim_miktari))

gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_salinan_gaz_miktari+salinan_gaz_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_gaz_salinim_miktari))

geri_donusturulmeyen_atik_miktari = hatali_parca_akisi-
geri_donusturlecek_atik_miktari

geri_donusturulmus_birim_malzeme_maliyeti = IF(geri_donusturlecek_atik_miktari=0)
THEN 0 ELSE harcama/geri_donusturlecek_atik_miktari

salinan_gaz_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.530

su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi =

IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0 ELSE 1-
((birincil_uretim_ile_harcanan_su_miktari+su_tuketim_miktari)/(hatali_parca_akisi*bir
im_su_tuketim_miktari))

su_tuketim_gideri = su_tuketim_miktari*0.015

su_tuketim_miktari = geri_donusturlecek_atik_miktari*0.28

surdurulebilirlik_gelisimi =

0.167*(gaz_salinimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.167*(enerji_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi)+0.25*(karilik_ekonomik_kaybi_veya_kazanci)+0.167*(su_tuketimi_cevresel_kazanci_veya_kaybi)

toplam_hurda_degeri = geri_donusturulmeyen_atik_miktari*birim_hurda_degeri

toplam_maliyet_ekonomik_kazanci_veya_kaybi = IF(hatali_parca_akisi=0) THEN 0
ELSE 1-(

((birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati*geri_donusturulmeyen_atik_miktari)+(harcama))/(hatali_parca_akisi*birincil_uretim_ile_uretilmis_malzemenin_satis_fiyati))

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Damla Çevik Aka

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi/ İşletme Enstitüsü/ Üretim Yönetimi ve Pazarlama	2018
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Endüstri Mühendisliği Bölümü	2015
Lise	Sakarya Anadolu Lisesi	2010

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2016-2017	Alimex Alüminyum	Proje Mühendisi
2017-2019	Kırklareli Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2019-2020	Sakarya Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2020-Günümüz	Kırklareli Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

ESERLER

1. Taşkın, K., & Çevik, D. (2017). *Üç Boyutlu Yazıcıların Üretim Süreçlerine Etkileri*. 15. Uluslararası Türk Dünyası Sosyal Bilimler Kongresi, 15, 688–697, Komrat, Moldova.
2. Taşkın, K., & Çevik, D. (2018). *3 Boyutlu Yazıcıların Ürün Tasarımı Üzerine Etkisi*.
4. International Congress on Economics and Business "New Economic Trends and Business Opportunities", Budapeşte, Macaristan.
3. Çevik, D., & Taşkın, K. (2018). *3D Printer technology in product design processes*. MCBÜ Yayınları, 534 -541.

4. Yılmaz, R., Taşkın, K., Çevik, D. (2019). *Comparison of the effect of robot usage on the cycle time and production cost: A case study*. 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems, Sakarya, Turkey.
5. Çevik, D. (2019). *Çoğu zarar, azı karar! Tüketim karşıtı akımlar- gönüllü sade yaşam ve paylaşım ekonomisi*. Tüketicinin 1001 Hali, BETA, 179-196.
6. Çevik Aka, D. (2019). KOBİ'lerde Sanayi 4.0'ın uygulanabilirliği ve yönetici bakış açılarının değerlendirilmesi. *International Journal of Scientific Research*, 4(2), 277–291.
7. Çevik Aka, D. (2021). Fortune 500 Türkiye Raporunda açıklanan otomotiv firmalarının performans değerlendirilmesi. *İzmir İktisat Dergisi*, 36(4). 745-757.
8. Çevik Aka, D. (2021). Endüstriyel atık geri dönüşümünde etkili olan karar kriterlerinin bwm ile değerlendirilmesi: plastik, cam ve çelik endüstrisinde uygulama. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 390-398.
9. Çevik Aka, D., & Doğan, C. (2021). *Türk tüketicilerin Suriyeli esnaflardan ürün satın alma ve satın almama davranışlarındaki eğilim ve nedenleri*. 4. Uluslararası İzmir İktisat Kongresi, İzmir.
10. Çevik Aka, D. (2022). *Metaverse'ün işletmeler üzerindeki potansiyel etkisi*. INSAC Contemporary Trends in Humanities and Social Sciences, Duvar Kitabevi, 53-68.
11. Çevik Aka, D. (2022). *Sürdürülebilir tedarik zinciri ve uygulama alanları*. Sürdürülebilirlik Güncel Araştırmalar, Gazi Kitabevi, 193-218.