

**ESKİŞEHİR
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

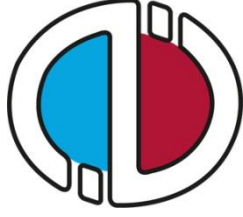
**Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**PVC PROFİL SİSTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ
ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ**

**Göker BİÇERGİL
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Burçin ATILGAN TÜRKMEN**

**BİLECİK, 2020
Ref. No.: 10321935**



**ESKİŞEHİR
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

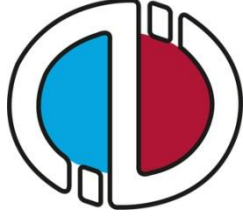
**Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**PVC PROFİL SİSTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ
ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ**

**Göker BİÇERGİL
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Burçin ATILGAN TÜRKMEN**

BİLECİK, 2020



**ESKİŞEHİR
ANADOLU UNIVERSITY**



**BİLECİK
SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Institute of Science
Department of Chemical Engineering**

**LIFE CYCLE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF
PVC PROFILES**

**Göker BİÇERGİL
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Asst. Prof. Burçin ATILGAN TÜRKMEN**

BİLECİK, 2020



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 30/12/2019 tarih ve ...76-02.... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16/01/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Çakar...Bırgı...'ın, "PVC Profil Sistemlerinin Yaşam Döngüsü Çevresel...Sürdürülebilirliği" başlıklı tez çalışmasıKimya....Mühendisliği.... Ana Bilim Dalında ...Yüksek Lisans... tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Burçin ATILGAN TÜRKMEN

ÜYE : Prof. Dr. Nezihe AYAS

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Halit Levent HOŞGÜN

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmamda benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danıőman hocam Dr. Öğr. Üyesi Burçin ATILGAN TÖRKMEN'e, tüm sorularımı içtenlikle yanıtlayan üretici firma yetkililerine ve her zaman yanımda olan aileme çok teőekkör ederim.

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmada kullanılmadığını beyan ederim.

..../..../2020

Göker BİÇERGİL

PVC PROFİL SİSTEMLERİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

ÖZET

İnsanların sağlıklı bir şekilde hayatlarını devam ettirebilmeleri için, ürün ve hizmetlerin gerçekleşmesi sürecinde doğal kaynaklar ve ekosistem üzerindeki etkileri en aza indirmek gerekmektedir. Hızla gelişmekte olan plastik sektörü sanayinin sürdürülebilirliğinin arttırılabilmesi için önemli bir etken durumundadır. PVC ilk keşfedilen ve günümüzde en yaygın kullanılan plastik türlerinden biridir. İnşaat, ulaşım, elektronik ve sağlık sektörü gibi birçok alanda kullanılmasına rağmen PVC malzemelerin çevresel etkileri günümüzde tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışmanın amacı PVC'den üretilen pencere profilinin yaşam döngüsü boyutunda çevresel sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesidir. Bu araştırmada çevresel etkilerin hesaplanması için 'Yaşam Döngüsü Analizi' metodu kullanılmıştır. Araştırmamız kapsamında yaşam döngüsü analizi ISO 14040 ve 14044 serisi standartlarına göre uygulanıp CCalC2 programı ile model oluşturulmuştur. PVC üretimi için belirlenen sistem sınırları; hammadde eldesi ve işlenmesi, hammadde nakliyesi ve üretim sürecidir. Çalışmanın fonksiyonel birimi 1 kg contalı PVC pencere profilidir. PVC üretim sistemi için analiz edilen çevresel etki kategorileri: asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, küresel ısınma potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyelidir. Hammadde ve enerji yoğun bir sistem olan PVC profil üretim süreci için iyileştirme modelleri oluşturulup plastik sektörünün çevresel sürdürülebilirliğinin arttırılması için PVC profil üreticilerine ve karar vericilere sonuç ve tavsiyeler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yaşam Döngüsü Analizi; Sürdürülebilirlik; Plastik; PVC; Çevresel Etki.

LIFE CYCLE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF PVC

PROFILES

ABSTRACT

In order to survive in a healthy way, it is necessary to minimize the effects on natural resources and ecosystem during the realization of products and services. The rapidly developing plastics industry is one of the important factors for increasing the sustainability of the industry. PVC is one of the first plastics discovered, and is also one of the most extensively used today. Although used in many areas such as construction, transportation, electronics and healthcare, the environmental effects of PVC materials are not fully known today. The aim of this study is to assess the environmental sustainability of the PVC window profile using Life Cycle Assessment methodology. In our study, Life Cycle Assessment has been carried out following ISO 14040 and 14044 standardization and CCalC2 program has been used for the modelling. System boundaries for PVC production have been accepted as raw material extraction and processing, raw material transportation and PVC profile production. Functional unit for this study has been selected 1 kg PVC window profile including gasket. The environmental impact categories which are acidification potential, eutrophication potential, global warming potential, human toxicity potential, ozone depletion potential, and photochemical ozone creation potential have been analysed for 1 kg PVC window profile. Some alternative improvement models have been created for the PVC profile production, which is a raw material and energy intensive system. Hereby, results and recommendations provided to PVC profile producers and decision makers to increase the sustainability of the plastics industry.

Keywords: Life Cycle Assessment; Sustainability; Plastic; PVC; Environmental Impact.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEŞEKKÜR	
BEYANNAME	
ÖZET	I
ABSTRACT	II
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VIII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	3
2.1. Plastik.....	3
2.1.1. Plastiğin tarihçesi.....	3
2.1.2. Plastiklerin sınıflandırılması.....	5
2.1.3. Küresel plastik sektörü.....	7
2.1.4. Türkiye plastik sektörü.....	8
2.2. Polivinilklorür (PVC).....	11
2.2.1. PVC üretim yöntemleri.....	12
2.2.2. Küresel PVC sektörü.....	14
2.2.3. Türkiye PVC sektörü.....	15
2.3. Yaşam Döngüsü Analizi.....	19
2.3.1. Yaşam Döngüsü Analizi tanımı.....	19
2.3.2. Yaşam Döngüsü Analizi metodolojisi.....	19
2.3.3. Yaşam Döngüsü Analizi'nin kullanım alanları.....	25
2.4. Literatür Taraması.....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Amaç ve Kapsam.....	30
3.2. Veri ve Kabuller.....	32
3.3. Etki Analizi.....	35
3.4. Sonuçların Yorumlanması.....	39
4. BULGULAR	40
4.1. PVC Üretiminin Çevresel Etkileri.....	40

4.1.1.Küresel ısınma potansiyeli (Karbon ayak izi)	40
4.1.2.Diğer çevresel etkiler.....	42
4.2.PVC Üretiminin Çevresel Etkilerinin Azaltılması	45
4.2.1.Geri dönüşümlü malzeme kullanılması	46
4.2.2.Enerji verimliliği uygulanması	47
4.2.3.Alternatif enerji kaynağı kullanılması	49
5. TARTIŞMA	51
6. SONUÇLAR	56
KAYNAKLAR.....	58
EKLER.....	62
ÖZ GEÇMİŞ.....

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1.	1950'den 2015'e kadar küresel plastik üretimi..... 7
Şekil 2.2.	Yıllara göre Türkiye'de plastik üretimi 8
Şekil 2.3.	Türkiye plastik ürün üretiminin sektörlere göre dağılımı..... 9
Şekil 2.4.	Türkiye plastik ihracatının yıllara göre değişimi..... 10
Şekil 2.5.	Türkiye plastik ithalatının yıllara göre değişimi..... 10
Şekil 2.6.	Türkiye plastik iç piyasasının yıllara göre değişimi. 11
Şekil 2.7.	Vinil klorür ve polivinil klorürün kimyasal yapısı. 11
Şekil 2.8.	Küresel PVC sektörü. 14
Şekil 2.9.	Türkiye PVC ithalatının yıllara göre değişimi..... 15
Şekil 2.10.	Türkiye PVC ihracatının yıllara göre değişimi..... 16
Şekil 2.11.	Türkiye PVC iç piyasasının sektörel dağılımı. 18
Şekil 2.12.	Yaşam döngüsü analizi modellemesi..... 19
Şekil 2.13.	Yaşam döngüsü analizi metodu ve uygulamaları 20
Şekil 2.14.	Genel birim prosesi 22
Şekil 3.1.	71 mm profilden üretilen bir pencere kesidi örneği..... 31
Şekil 3.2.	PVC profil için yaşam döngüsü basamakları..... 32
Şekil 4.1.	PVC profil üretiminin küresel ısınma potansiyeli. 41
Şekil 4.2.	PVC üretiminde kullanılan hammadde ve yardımcı malzemelerin küresel ısınma potansiyelindeki payları. 41
Şekil 4.3.	PVC üretim aşamalarının küresel ısınma potansiyelindeki payları. 42
Şekil 4.4.	PVC profil üretiminin asidifikasyon potansiyeli. 43
Şekil 4.5.	PVC profil üretiminin ötrofikasyon potansiyeli 43
Şekil 4.6.	PVC profil üretiminin ozon tabakası incelmesi potansiyeli. 44
Şekil 4.7.	PVC profil üretiminin fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli..... 44
Şekil 4.8.	PVC profil üretiminin insan toksisitesi potansiyeli. 45
Şekil 4.9.	Geri dönüşümün küresel ısınma potansiyeline etkisi. 46
Şekil 4.10.	Geri dönüşümün diğer çevresel etki kategorilerine etkisi. 47
Şekil 4.11.	Enerji verimliliği uygulanmasının küresel ısınma potansiyeline etkisi. 48
Şekil 4.12.	Enerji verimliliği uygulanmasının diğer çevresel etki kategorilerine etkisi. 48

- Şekil 4.13.** Alternatif enerji kaynağı kullanılmasının küresel ısınma potansiyeline etkisi.....49
- Şekil 4.14.** Alternatif enerji kaynağı kullanılmasının diğer çevresel etki kategorilerine etkisi.....50

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Plastiğin sınıflandırılması.	5
Çizelge 2.2. Türkiye'nin PVC ithal ettiği ülkeler	16
Çizelge 2.3. Türkiye'nin PVC ihrac ettiği ülkeler.	17
Çizelge 2.4. Türkiye PVC profil ithalat ve ihracat rakamları	18
Çizelge 2.5. Yaşam döngüsü analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorileri	24
Çizelge 3.1. PVC üretimine ait ulaşım verileri.	33
Çizelge 3.2. PVC üretimi için hammadde miktarları.....	34
Çizelge 3.3. PVC üretimine ait enerji verileri.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABS	: Akrilonitrilbütadienstiren
AP	: Asidifikasyon potansiyeli
CFC11	: Klorflorokarbon-11
DCB	: Dikloro benzen
EP	: Ötrofikasyon potansiyeli
EPD	: Çevresel Ürün Deklarasyonu
EPS	: Genleşmiş polistiren
GJ	: Gigajoule
GSMH	: Gayri safı millî hasıla
GWP	: Küresel ısınma potansiyeli
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
Http	: İnsan toksisitesi potansiyeli
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
MJ	: Megajoule
ODP	: Ozon tabakası tükenme potansiyeli
PC	: Polikarbonat
PET	: Polietilen tereftalat
PETE	: Polietilen tereftalat
POCP	: Fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PVC	: Polivinil klorür
SPI	: Plastik Endüstrisi Derneği
VCM	: Vinilklorür monomeri
VOC	: Uçucu organik bileşik
XPS	: Ekstrüde edilmiş polistiren
YDA	: Yaşam Döngüsü Analizi
YDE	: Yaşam Döngüsü Envanteri
YDEA	: Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

1. GİRİŞ

Çevresel sürdürülebilirlik, günümüzde insanlığın karşılaştığı en büyük sorunlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Nüfusun hızlı ve önlenemez yükselişi, kaynakları sınırlı olan gezegenimizdeki doğal kaynakların sürdürülebilirliği hakkında problemler yaratmaktadır. Günümüzde gezegenimiz üzerinde insan elinin ve kirliliğinin ulaşmadığı herhangi bir bölge neredeyse kalmamıştır. Bu sürecin temel etkenleri arasında nüfusun artması, hızlı kentleşme, 18. yüzyıl başlarında ortaya çıkan ve devam eden sanayileşme süreci ile tarımda modernleşme uygulamaları gösterilebilmektedir. Tüm bu faaliyetler dünyadaki su kaynaklarını, havayı ve toprağı kirletmeye devam etmektedir. Sonuç olarak ise, doğal kaynaklar kapasite üstü kullanılmakta ve gelecek nesillerin bu kaynakları kullanabilmesi kısıtlanmaktadır.

Toplumların çevresel bilincinin arttığı günümüzde bir ürünün, üretimin ya da hizmetin maliyet ve performans gibi değerlendirme kriterlerinin yanında artık doğal kaynak kullanımı ve küresel çevre sorunları gibi etkileri de karar verme süreçlerinde gittikçe daha sık göz önünde bulundurulanan faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Günümüzde neredeyse tüm insanların hemen hemen her alanda kullandığı bir malzeme haline alan plastikler sürdürülebilirlik çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Bunun en önemli sebebi ise sentetik plastiklerin biyolojik bozunmaya uğramadan doğada uzun yıllar kalabilmeleridir. Dünya üzerinde en çok kullanılan plastik türlerinden biri polivinil klorür (PVC) plastiklerdir. Kablo, kapı-pencere çerçevesi gibi malzemelerin üretiminde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. PVC kullanılarak üretilen pencerelerin kullanım kolaylığı, yüksek ısı yalıtım özelliği, vernikleme gibi bakım ihtiyaçlarının bulunmaması bu malzemedeki yapılan pencere profillerinin kullanım talebini yükselten en önemli sebeplerdendir. Öyleki, PVC pencere profilleri küresel boyutta toplam PVC kullanımının %9'unu oluşturmaktadır (European Commission, 2004).

Hammadde ve yakıt eldesi, nakliye ve dağıtım, üretim, bakım ve geri dönüşüm veya atık aşamalarındaki girdi ve çıktıların çevresel etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesi için kullanılan Yaşam Döngüsü Analizi çevresel etkilerin belirlenmesinde oldukça yaygın bir yöntemdir. Bu metot ülkemiz için ise oldukça yeni bir metottur.

Plastik sektörünün ülkemiz üretimindeki payı düşünüldüğünde bu sektörde kullanılabilir hammadde, üretim ve atık yönetimi alternatiflerinin doğal kaynaklar, insanlar ve ekosistem üzerine etkilerinin yaşam döngüsü boyutunda incelenmesi gelecekteki hammadde, teknoloji ve atık yönetim sistemi seçimi için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, plastik sektörünün sürdürülebilirliği alanında yapılacak araştırmalara ve pratik uygulamalara temel oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak plastik ve polivinil klorür plastiklerle ilgili literatür bilgisi verilmiş, Dünya ve ülkemiz üzerindeki üretim, tüketim ve geri dönüşüm bilgileri sunulmuştur. Daha sonra PVC ile ilgili olarak önceden yapılmış olan sürdürülebilirlik çalışmaları 'Literatür Taraması' başlığı altında incelenmiştir. Bir sonraki aşamada, çalışmada modellenen PVC profil üretim sistemi için iklim değişikliği, ozon tabakasındaki incelmeleri, ötrofikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar gibi çevresel etki kategorilerinde çevresel sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir. Bulunan sonuçlar akademik literatürdeki diğer çalışmalarla ve daha önce yayınlanmış olan EPD raporları ile karşılaştırılmıştır.

Daha sürdürülebilir bir üretim için, PVC malzeme kullanılarak üretilen profilin 'beşikten kapıya' tüm basamakları boyunca negatif çevresel etkinin oluşmasının ana kritik noktaları, yaşam döngüsü analizi sonucunda belirlenmiş olup belirlenen bu noktalardaki çevresel etkilerin azaltılması için iyileştirme modelleri oluşturulmuştur. Bu oluşturulan alternatif modellerde çevresel etkilerin hangi metotla nasıl azaltılabileceği grafiklerle açıklanarak çevresel ürün politikası karar vericilere ve PVC profil üreticilerine çevresel etkilerin düşürülmesi konusunda yardımcı olması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

2.1. Plastik

Plastik; karbonun hidrojen, oksijen, azot ve diğer elementler ile oluşturduğu monomer adı verilen, basit yapıdaki molekülü gruplardaki bağın koparılarak polimer olarak adlandırılan uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile oluşan malzemelere verilen isimdir. Plastik, günümüzde günlük hayatımızın hemen hemen birçok alanında kullanılan bir malzemedir. Düşük yoğunlukları, dayanıklılıkları, kolay üretilir ve işlenebilir olmaları, mükemmel bariyer özellikleri ve nispeten düşük maliyetli olmaları plastiklerin geniş bir alanda üretim ve paketleme uygulamaları için ideal malzemeler olmasını sağlamaktadır (Ryan, 2015; Andrady, 2003). Fakat tüm bu avantajlarının ve ideal kullanım alanlarının yanında bazı özelliklerine bağlı problemler oluşmaktadır. Bu problemlerden en önemlileri bu malzemelerin kötü ısıl dirençleri, yanabilir olmaları ve çok uzun süre doğada bozulmadan kalabilmeleridir.

2.1.1. Plastik'in tarihçesi

İnsanoğlunun polimer kullanımından faydalanmasının tarihi MÖ 1600 yılına kadar gitmektedir. MÖ 1600 yılına ait kaynaklara göre, bu tarihte Orta Amerikalılar doğal kauçuğu top gibi farklı eşyalara dönüştürmüşlerdir (Hosler vd., 1999).

Plastik üretiminde bazı dönüm noktaları bulunmaktadır. Örnek olarak; 1839'da Charles Goodyear vulkanize kauçuğu icat etmiştir ve bir eczacı olan Eduard Simon polistireni keşfetmiştir. 1860 yılında Aleksander Parkes tarafından nitro selüloz geliştirilmiştir. Takip eden yıllarda fenol- formaldehit bazlı polimerler, polivinil klorürler gibi sentetik ve doğal polimerin üretimi devam etmiştir. 20. yüzyılın ilk yarısında ise bakalit, polivinil klorür gibi en az 15 yeni polimer sınıfı sentezlenmiştir (Andrady ve Neal, 2009).

Plastik tarihinin kronolojik olarak daha detaylı bir sıralaması aşağıdaki gibi yapılabilmektedir (Andrady ve Neal, 2009; Gilbert, 2017);

1823- İskoçyalı bir kimyacı olan Charles Macintosh su geçirmez bir malzeme olan lastiği keşfetmiştir. Bulunan bu malzeme pamuğu nemden korumak için kullanılmıştır.

1845- Mucit Bewley, bitki gütta-perkadan doğal kauçuk üretmiştir. Bu tesis 19. yüzyıl boyunca, özellikle su altı telgraf kablolarının yalıtımı amacıyla düzenli olarak kullanılmıştır.

1862- İngiliz Alexander Parkes ilk insan yapımı plastik bileşiği tanıtmıştır. Buna parkesine adını vermiştir fakat yüksek üretim maliyetlerinden dolayı bu malzemenin kullanımını çok uzun ömürlü olmamıştır.

1869- Parkesinin başarısızlığı Daniel Spill'in selüloitin üretmesini sağlamıştır fakat Spill'in şirketi de birkaç yıl içerisinde iflas etmiştir.

1869- Amerikalı John W. Hyatt, 1872 yılında seri üretime giren, sert ve mukavemeti yüksek bir plastik türü olan selüloiti icat etmiştir.

1897- İki Alman araştırmacı bugün hala çoğunlukla plastik düğme imalatında kullanılmakta olan bir plastik türü olan galaliti geliştirmiştir.

1908- Jacques E. Brandenberger, DuPont'un 1927'de su geçirmez hale getirmesinden sonra çok başarılı hale gelen hafif, reaktif olmayan ve kullanımı kolay bir plastik bileşiği olan selofanı icat etmiştir. Bu malzeme türü bugün hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

1909- Amerikalı kimyager Leo H. Baekeland, bakalit adlı ilk tamamen sentetik plastik ürünü yaratmıştır. Mücevherlerden arabalara ve uçaklara kadar hemen hemen her alanda kullanılmıştır. Bakalit plastiklerinin orijinal parçaları günümüzde nadir ve değerli olarak kabul edilmektedir.

1920- Polivinil klorür (PVC) üretilmiştir.

1925- "Plastik" terimi ilk defa tanımlanmıştır.

1931- Güçlü ve şeffaf bir plastik türü pleksiglas icat edilmiştir ve ürün çok hızlı bir şekilde başarıya ulaşmıştır.

1938- Kimyager Roy Plunkett, günümüzde en çok mutfak eşyalarında kullanılan ve çok dayanıklı bir plastik olan teflonu keşfetmiştir.

1939- Naylon keşfedilmiştir.

1948- Akrilonitrilbütadienstiren (ABS) keşfedilmiştir. ABS günümüzde de borulardan araç parçalarına kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1953- Amerikalı kimyager Daniel Fox, çok dayanıklı ve neredeyse kurşun geçirmez olan yeni tip bir polikarbonat reçine termo lastiği icat etmiştir. Lexan olarak adlandırılan bu plastik bugün birçok akıllı telefon üreticisi tarafından kullanılmaktadır.

1954- Strafor kullanılmaya başlanmıştır.

1965- Kimyager Stephanie Kwolek, bugün kevlar adıyla bilinen hafif, son derece dirençli ve dayanıklı plastik bir bileşik geliştirmiştir. Bugün, bu plastik askeri ve asayiş alanında kurşun geçirmez koruyucu giysilerin içinde kullanılmaktadır.

1989- Patrick ve Sally Gruber tarafından mısır kullanılarak biyolojik olarak parçalanabilen polilaktik asit üretilmiştir.

2000’li yıllarda nanoteknoloji plastiklere uygulanmaya başlanmış ve uzay aracı tasarımları vb. alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Gelecek yıllarda ise plastiklerin 3D teknolojileri, esnek ekran tasarımları, yenilenebilir enerji gibi pek çok alanda kullanımını yaygınlaştırmak adına çalışmalar devam etmektedir.

2.1.2. Plastiklerin sınıflandırılması

Plastik Endüstrisi Derneği (SPI) 1988 yılında tüketicilerin ve geri dönüşümcülerin farklı termoplastik türlerini tanımlayabilmeleri için Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi bir sınıflandırma sistemi kurmuştur. Plastik sınıflandırılması için üreticiler, genellikle ürettikleri her plastik ürünün üzerine bir SPI kodu veya numarası tanımlarlar. Bu kılavuz, her kod numarasıyla ilişkili farklı plastik türlerinin temel bir taslağını sunar.

Çizelge 2.1. Plastik sınıflandırılması (Kılıç ve Yüce, 2014).

Numarası	Kısaltma	Polimer İsmi	Kullanımı
1	PET	Polietilen Tereftalat	Poliester fiberler, film, elyaf, köpük şişe, katı cisim
2	HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen	Taşınmaya elverişli kapların yapımı, çeşitli şişeler çantalar, oyun alan malzemeleri
3	PVC	Polivinil klorür	Çit ve parmaklık malzemeleri, pencere ve kapı profilleri yiyecek dışı şişeler
4	LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen	Sera örtüsü, film, ambalaj, elektrik sanayi
5	PP	Polipropilen	Plastik şişe, elektrik sanayi, mutfak eşyası
6	PS	Polistiren	Oyuncak, video kaset, tepsilere, yalıtım malzemeleri
7	Diğer	Akrilik, polikarbonat naylon dahil diğer plastikler	

Bu sınıflandırmaya göre 7 çeşit plastik sınıfı bulunmaktadır. Plastik sınıfları 1'den 7'ye kadar numaralandırılmıştır.

Polietilen tereftalat (PET): Bu plastik sınıfı 1 rakamı ile gösterilmektedir. PET mükemmel gerilme ve darbe dayanımı, kimyasal direnç, berraklık, işlem kabiliyeti ve makul ısı kararlılık gösteren yarı kristalimsi termoplastik polyesterdir. En çok kullanıldığı sektör tekstil sektörüdür. Bunun yanında video ve ses bantları, röntgen filmleri, gıda ambalajları ve özellikle alkolsüz içecek şişelerinin üretiminde bu malzemenin tüketimi oldukça yaygındır (Raheem ve Uyigue, 2010).

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE): Bu plastik sınıfı 2 rakamı ile belirtilir. Yüksek yoğunluklu polietilen ürünler çok güvenlidir ve herhangi bir kimyasalın yiyecek veya içeceklere geçmesini çok iyi önlemeleriyle bilinirler. HDPE ürünler genellikle geri dönüştürülebilir. Bu plastikten yapılan ürünler arasında süt kapları, şampuan ve saç kremi kapları, sabun şişeleri vb. gibi günlük hayatta çok fazla kullandığımız ambalajlar bulunur (Rubin, 1990).

Polivinil klorür (PVC): PVC daha önceki kronolojik sıralamada da belirtildiği üzere Dünya'da ilk kullanılan termoplastiklerden birisidir. Bu plastik sınıfı 3 rakamı ile ifade edilmektedir. PVC'nin monomeri vinil klorürdür. İçerisinde bulunan klor atomları malzemenin alev almasını engeller. Bu malzeme özellikle pencere-kapı kasa ve kanat profili imalatında ve alev almaz özelliği sayesinde kablo imalatında sıkça kullanılan bir malzemedir (Kılıç ve Yüce, 2014).

Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE): Bu plastik sınıfı 4 rakamı ile gösterilmektedir. Düşük yoğunluklu polietilen dayanıklı, esnek ve sağlıklı bir plastik olarak bilinmektedir. Bu yüzden sandviç torbaları ve market poşetleri gibi ürünlerde sıkça kullanılmaktadır (Rubin, 1990).

Polipropilen (PP): 5 rakamı ile ifade edilen polipropilen monomer polipropilenin polimer hale getirilmesiyle oluşan plastik türüdür. Çeşitli polipropilen formları farklı erime noktalarına ve sertliklerine sahiptir. Polipropilen araç kaplaması, akü kutuları, şişeler, tüpler ve torbalarda kullanılır (Rubin, 1990).

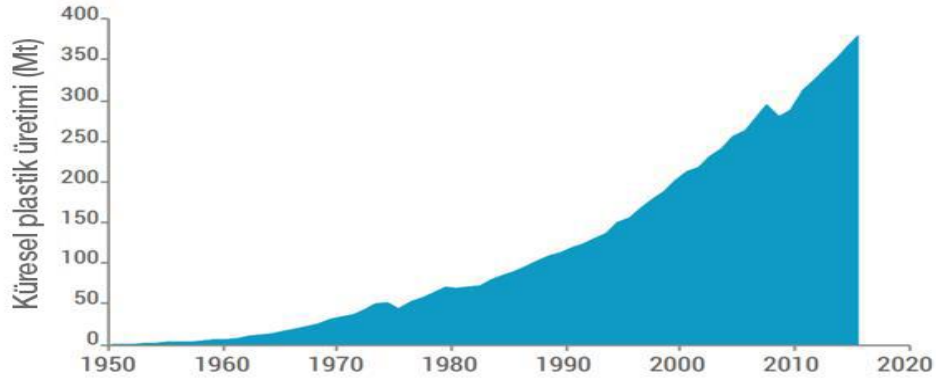
Polistiren (PS): Bu plastik grubu 6 rakamı ile ifade edilmektedir. Polistiren, tüketicilere çok yönlü bir kullanım alanı sunmaktadır. Sert bir plastik olarak, gıda ambalajı ve laboratuvar malzemeleri gibi ürünlerde kullanılır. Çeşitli renklendiriciler, katkı maddeleri veya diğer plastiklerle birleştirildiğinde, elektronik aletler, otomobil

parçaları, oyuncak, bahçe ekipmanları gibi çok yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Polistirenden ayrıca genişmiş polistiren (EPS) veya ekstrüde edilmiş polistiren (XPS) olarak adlandırılan, yalıtım için değerli olan bir köpük malzeme yapılıdır (Rubin, 1990).

Diğer Termoplastikler: 7 rakamı ile ifade edilen plastik grubu yukarıda açıklanan plastik sınıfları içinde tanımlanamayan çeşitli plastik türlerini belirtmek için kullanılır. Polikarbonat ve polilaktit bu kategoriye dahil edilmiştir. Bu plastik türlerinin geri dönüşümü zordur. Polikarbonat (PC) biberonlarda, kompakt disklerde ve tıbbi saklama kaplarında kullanılır (Rubin, 1990).

2.1.3.Küresel plastik sektörü

Dünya’da hızlı kentleşme, nüfus artışı, tüketim alışkanlıklarındaki değişimler, yaşam standartlarının yükselmesi ve tüketim ürünlerine olan talep artışı sonucunda plastik sanayi hızla gelişen bir sektör haline gelmiştir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi plastik üretimi, küresel boyutta yıllık ortalama 322 milyon ton üretim ile 1964 ve 2015 yılları arasında yirmi kat artmıştır. 2015 yılından 2035 yılına kadar bu üretimin iki katına çıkması ve 2050 yılına kadar neredeyse dört kat artması beklenmektedir (Barra ve Leonard, 2018).



Şekil 2.1. 1950'den 2015'e kadar küresel plastik üretimi (Morten W. Ryberg, 2018).

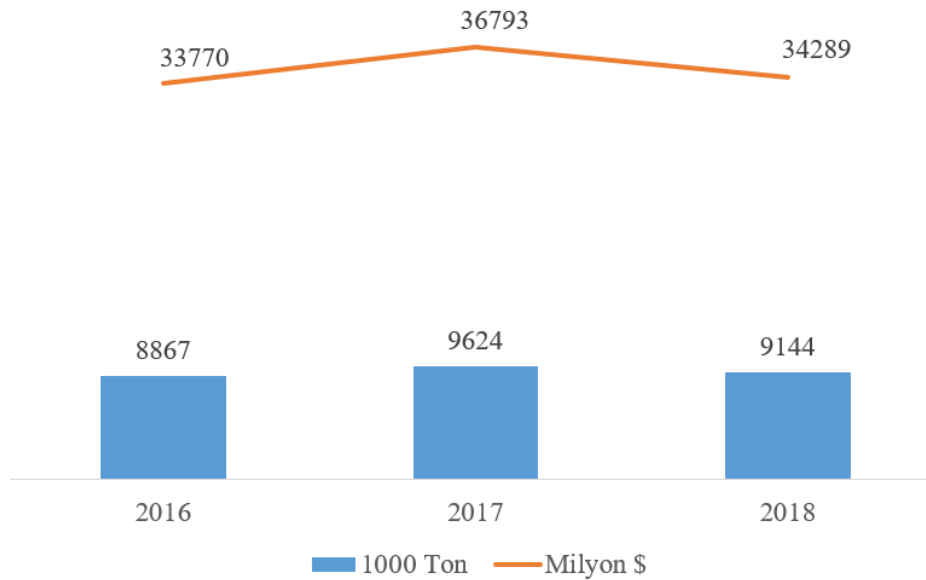
Küresel boyuttaki plastik tüketiminin en büyük kısmını %16 ile PP almaktadır. Onu ise %12 ile düşük yoğunluklu polietilen LDPE takip etmektedir. Üçüncü sırada %11'lik tüketim ihtiyacı ile PVC ve dördüncü sırada %10 ile HDPE takip etmektedir. Bu dört polimer çeşidi toplam olarak yaklaşık %49'luk bir oranla neredeyse küresel plastik ihtiyacının yarısını oluşturmaktadır (Europa, 2016).

Sektörel bazlı değerlendirmeler dikkate alındığında ise en fazla plastik tüketimi %30'luk pay ile ambalaj sektöründedir. Onu ikinci sırada %17'lik oranla yapı ve inşaat sektörü izlemektedir (Geyer, 2017).

2.1.4. Türkiye plastik sektörü

Plastik sektörü, Türkiye ekonomisinin en önemli bileşenlerinden birisidir. Günümüzde yaklaşık 10 milyon tona yaklaşan toplam üretimi, 35 milyar \$ civarındaki cirosu, 5 milyar \$ civarındaki ihracatı ve son 10 senede gayri safi millî hasıla (GSMH) büyümesini aşan yıllık büyüme ile plastik sektörünün ülke ekonomisine sağladığı katkı giderek artmaktadır. Sektör, ulaştığı üretim kapasitesiyle Avrupa'da ikinciliğe, dünyada ise altıncılığa yükselmiştir (PAGEV, 2019).

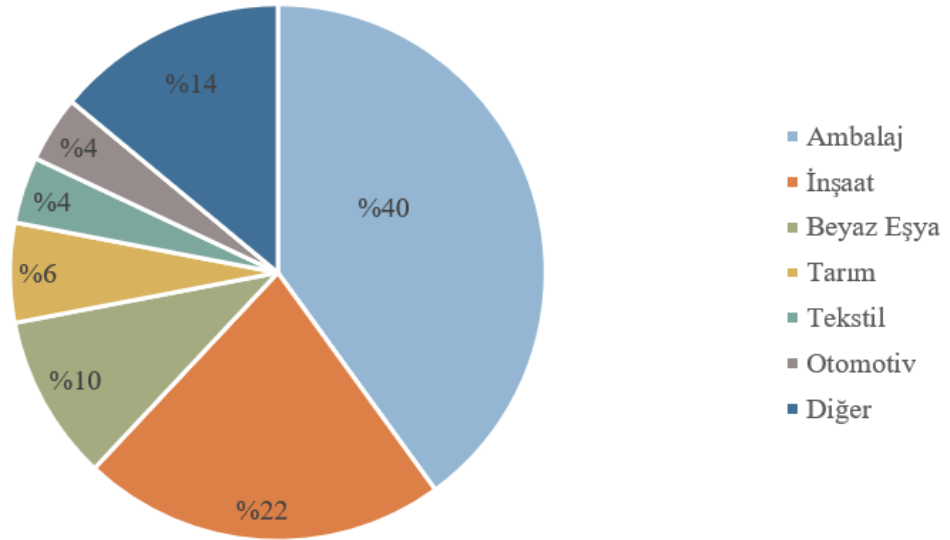
Şekil 2.2'de görüldüğü gibi Türkiye'de 2016 ile 2018 yılları arasında plastik ürün üretimi 8 milyon 867 bin tondan %3'lük bir artışla 9 milyon 144 bin tona yükselmiştir. 2019'un ilk 6 aylık plastik üretim rakamı 4 milyon 477 bin ton olarak gerçekleşmiştir. 2019 yıl sonuna gelindiğinde ise tahmini olarak 8 milyon 955 bin ton plastik üretilmesi öngörülmektedir (PAGEV, 2019).



Şekil 2.2. Yıllara göre Türkiye'de plastik üretimi (PAGEV, 2019).

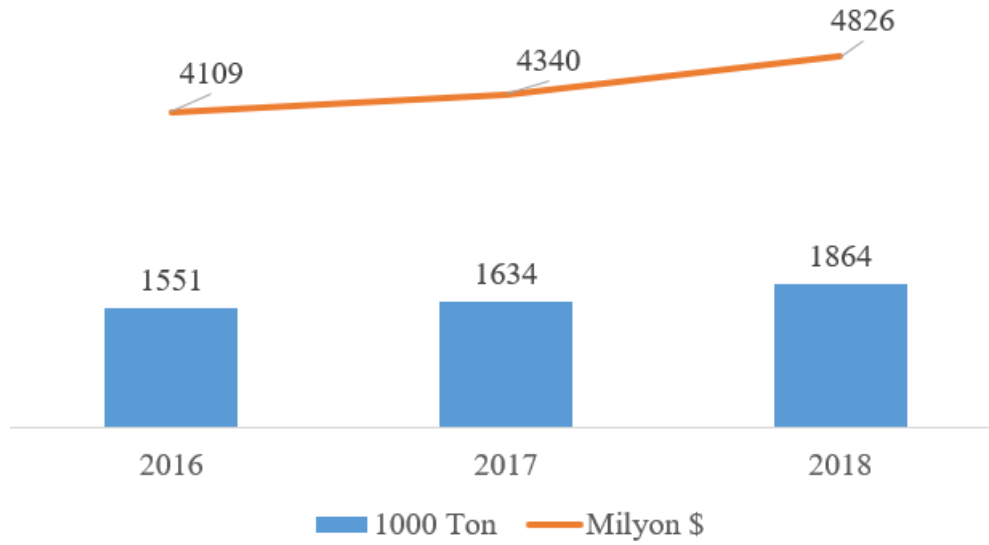
Şekil 2.3'de alt sektör bazında Türkiye plastik ürün üretiminin sektörel bazda dağılımı gösterilmiştir. Türkiye plastik ürün üretimindeki en büyük payı 2019 yılının ilk

altı aylık istatistiklerine göre ambalaj malzemeleri 1 milyon 791 bin ton olarak almaktadır. Onu ise 985 bin tonluk üretimle inşaat sektöründe kullanılan plastik malzemeler izlemektedir (PAGEV, 2019).



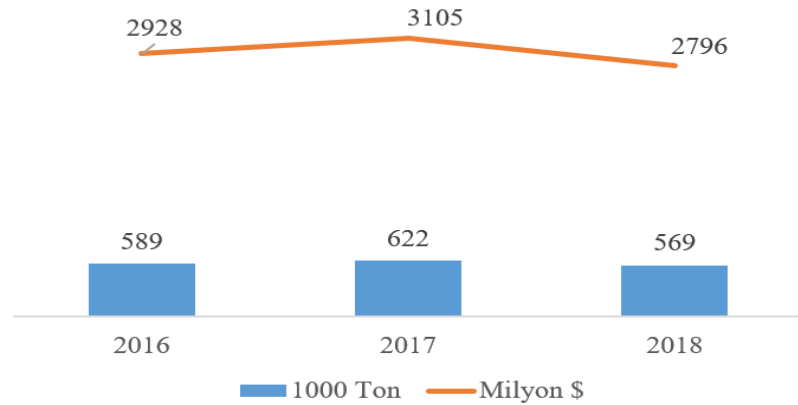
Şekil 2.3. Türkiye plastik ürün üretiminin sektörlere göre dağılımı. (PAGEV, 2019).

Şekil 2.4’de Türkiye plastik ihracatının yıllara göre değişimi gösterilmiştir. 2016 yılında Türkiye’den diğer ülkelere olan plastik ürün ihracatı 1 milyon 551 bin ton olarak gerçekleşirken bu rakam 2018 yılı sonunda 1 milyon 864 bin ton değerine yükselmiştir (PAGEV, 2019). Bu rakamlara bakılacak olduğunda Türkiye plastik ürün ihracatını miktar bakımından artırmaktadır. 2018 yılı, 2019 yılına ait tahmini rakamlarla karşılaştırıldığında miktar bazındaki artışa rağmen finansal anlamdaki düşüş görülmektedir. Bunun sebebi düşük fiyatlı plastik ihracatının 2019 yılında artış göstermesinden dolayıdır. Bu nedenle finansal olarak düşüş meydana gelmiştir.



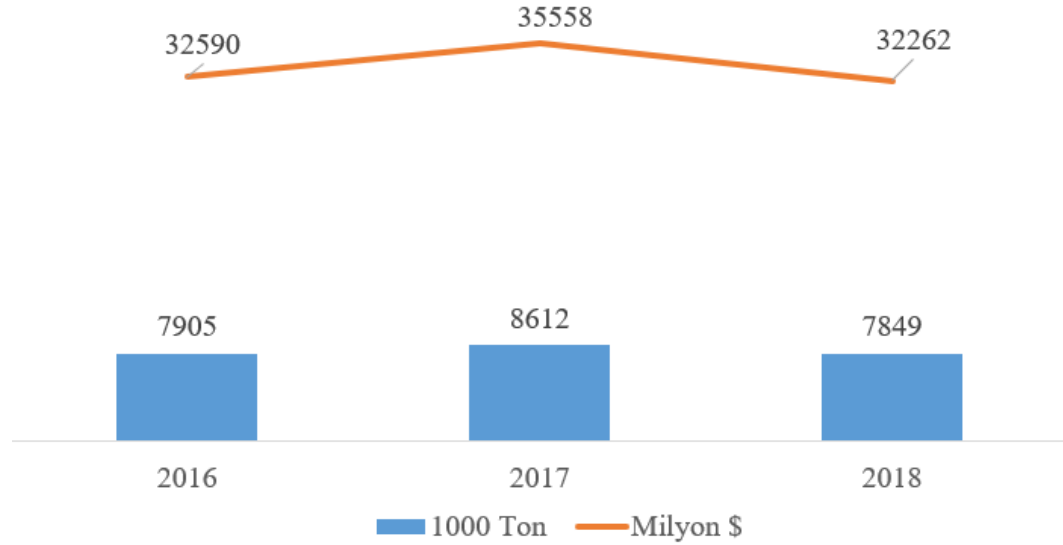
Şekil 2.4. Türkiye plastik ihracatının yıllara göre değişimi (PAGEV, 2019).

Şekil 2.5’de Türkiye plastik ithalatının yıllara göre değişimi gösterilmiştir. Türkiye’nin plastik ürün ithalatı 2016 yılında 589 bin ton, 2017 yılında 622 bin ton, 2018 yılında 569 bin ton olarak ölçülmüştür. Bu rakamın 2019 yılı sonunda 540 bin ton olarak gerçekleşmesi öngörülmektedir (PAGEV, 2019). Bu grafiğe göre 2017 yılından bu yana ülkemize gerçekleştirilen plastik ithalatında hem miktar hem de finansal anlamda bir azalma göze çarpmaktadır. Bunun nedeni olarak ise Şekil 2.6’da görüldüğü gibi iç pazardaki plastik tüketiminin azalması gösterilebilir.



Şekil 2.5. Türkiye plastik ithalatının yıllara göre değişimi (PAGEV, 2019).

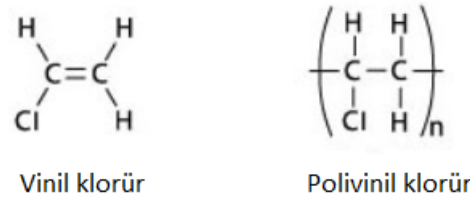
Şekil 2.6’da görüldüğü üzere Türkiye’deki iç pazardaki plastik tüketimi 2017 yılından bu yana düşüş eğilimi içerisinde. Türkiye iç pazarındaki plastik tüketimi 2016 yılında 7 milyon 905 bin ton olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılının ilk yarısında bu rakam 3 milyon 815 bin ton olmakla birlikte 2019 yıl sonu tahmininde 7 milyon 630 bin ton olarak gerçekleşmesi öngörülmektedir (PAGEV, 2019).



Şekil 2.6. Türkiye plastik iç piyasasının yıllara göre değişimi (PAGEV, 2019).

2.2. Polivinil klorür (PVC)

PVC kimya endüstrisinin önemli bir ürünüdür ve polipropilen ve polietilen ile birlikte en çok kullanılan olan plastiklerden biridir. Monomeri etilenden ve klordan elde edilen vinil klorürdür. Monomeri vinil klorür olan PVC'nin kimyasal yapısı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Vinil klorür ve polivinil klorürün kimyasal yapısı (Aydın, 2004).

2014 yılında küresel boyutta yaklaşık olarak 44 milyon ton PVC kullanılırken bu rakamın 2020 yılında 54 milyon tona yakın olacağı öngörülmektedir (Statista, 2015).

PVC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri ise aşağıdaki gibi belirtilebilir (Aydın, 2004):

- PVC amorf bir plastiktir.
- Beyaz ya da açık sarı renklidirler.
- Toz halinde kullanılırlar.
- PVC ortalama %57 oranında klor içerir.
- Asit ve bazlardan etkilenmezler.
- Benzin veya alkol PVC ile tepkimeye girip, PVC'yi herhangi bir fiziksel ve kimyasal değişime uğratmaz.
- PVC'nin kendi kendine alev almama özelliği mevcuttur.

PVC'nin rijit ve sert ya da esnek ve yumuşak olabilmesinden ötürü iki çeşit kullanım alanı mevcuttur. Rijit ve sert PVC genellikle pencere ve kapı profili imalatı, boru imalatı gibi alanlarda kullanılır. Hava şartlarına karşı dayanıklı olmaları, darbe dayanımlarının yüksek olması, kendi kendine alev almama özellikleri bu malzemenin belirtilen imalat sektörlerinde tercih edilmesinin en önemli sebeplerindedir. Yumuşak ve esnek PVC türleri ise daha çok kablo imalatı, oyuncak ve eldiven imalatı sektörlerinde kullanılmaktadır. PVC'nin hava şartlarına karşı dayanıklı olması, kolay işlenip şekil alabilmesi, ısıtıldıklarında metal olan yüzeylere yapışma özelliklerinin bulunması gibi özellikleri kablo üretim sanayinde kullanılmasının en önemli sebeplerindedir. Şu anda ülkemizde yapılan alçak gerilim kablolarının tamamına yakın kısmı PVC'den imal edilmektedir (Aydın, 2004; Wilkes vd., 2005).

Günümüzde tüm sanayilerde yaygın bir şekilde yer alan PVC ürünlerin kullanıldığı en önemli sektörler yapı ve inşaat sektörleridir. Toplam üretilen PVC malzemelerin yaklaşık %50'si bu iki sektörlerde kullanılmaktadır (European Commission, 2004).

2.2.1.PVC üretim yöntemleri

PVC tek bir vinil klorür monomerinin polimerize edilmesiyle elde edilmektedir. Normal şartlar altında renksiz bir gazdır fakat basınç altında sıvı olarak depolanmaktadır. Vinil klorürler kimyasal olarak $CH_2=CHCl$ olarak gösterilirler (Wilkes vd., 2005). PVC

hammadde üretiminde en çok kullanılan yöntem %80 ile süspansiyon polimerizasyonudur (ELCD, 2019). Diğer prosesler ise kütle (yığın) polimerizasyonu, mikrosüspansiyon polimerizasyonu, emülsiyon polimerizasyonu ve çözelti polimerizasyonudur.

Süspansiyon Polimerizasyonu: Bu yöntem PVC üretiminde en çok kullanılan yöntemdir ve PVC üretiminin %80'i bu yöntem ile gerçekleşmektedir. Bu proseste süspansiyon yapıcı katkıları ve karıştırma etkisiyle vinil klorür monomeri su içinde ince damlacıklar halinde dağıtılır. Organik fazda çözünen başlatıcılar yardımı ile reaksiyon başlatılır. Polimerizasyon %90 oranında dönüşene kadar devam eder ve reaksiyona girmemiş vinil klorür monomeri uzaklaştırılıp geri kazanılır. PVC tanecikleri sudan filtre yardımıyla ayrılır, daha sonra kurutulur ve toz haline gelince kullanıma hazır olurlar. (Aydın, 2004; Saeki ve Emura, 2002).

Kütle (Yığın) Polimerizasyonu: Bu yöntemde vinil klorür monomeri direk serbest bir radikal başlatıcı ile polimerleştirilir. Su ve çözücü kullanılmadığı için bu yöntem sayesinde üretilen polimerler diğer yöntemlere kıyasla daha temizdir. Bu proses, iki kademe gerçekleştirilir. Birinci aşamada tane büyüklüğü, ikinci aşamada molekül büyüklüğü geliştirilir (Aydın, 2004).

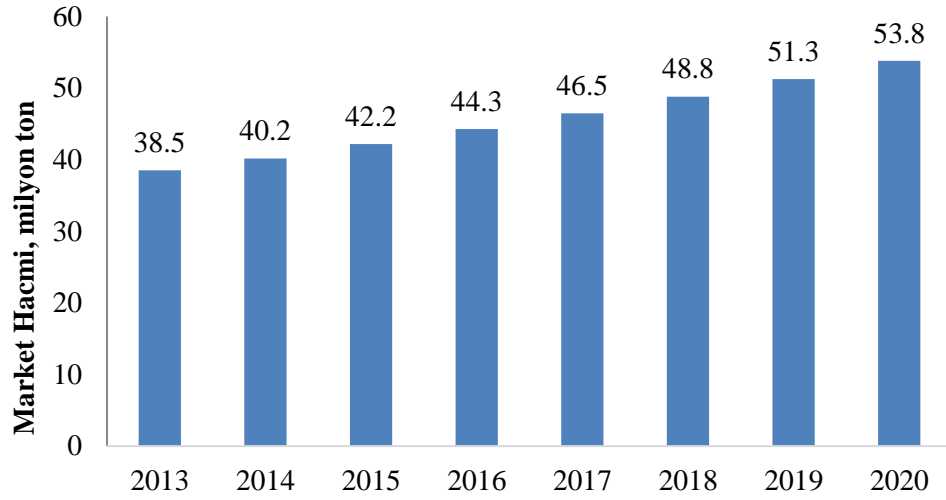
Mikrosüspansiyon Polimerizasyonu: Mikrosüspansiyon prosesi son yıllarda geliştirilmiş bir prosedir. "Seed" lateks kullanılarak veya "Seed" lateks kullanılmadan yapılmaktadır. Emülsiyon prosesinden ayrılan en önemli husus başlatıcının yağ fazında çözünmesidir. Mikrosüspansiyon prosesinde çift dağılımlı taneciklerin oluşturulması ve daha yüksek katı içeren lateks üretimi, emülsiyon prosesinden farklılığını teşkil eder (Aydın, 2004; Saeki ve Emura, 2002).

Emülsiyon Polimerizasyonu: Bu proseste suyun içerisine karıştırılarak katalizörler, vinil klorür monomerler (VCM) ve reaktifler ilave edilir. Katalitik tesiri sülfidler, sülfatlar, persülfatlar ve moleküller oksijen temin eder. Emülsiyon yapısı olarak genellikle stearik ve miristik asidin amonyum tuzları kullanılır. Lateksin %33'ü PVC, %67'si sudur. Emülsiyon halindeki PVC, pıhtılaşma özelliği nedeniyle atomizer tipi kurutucuda sıcak hava ile kurutulup siklona alınır, daha sonra elenir, ambalajlanır (Aydın, 2004; Saeki ve Emura, 2002).

Çözelti Polimerizasyonu: Bu yöntem monomerlerin çözücülerde eritilmesi ve polimerleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Erimeyen polimer katı bir tortu oluşturur ve oluşan bu tortu çözücünden ayrılır (Tolunay, 1994).

2.2.2.Küresel PVC sektörü

Dünya üzerindeki PVC'nin 2013 yılında 38,5 milyon ton olan pazar hacmi 2018 yılında 48,8 milyon ton olmuştur. PVC pazar hacminin 2020 yılında ise 53,8 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir (Statista Research Department, 2015). Şekil 2.8'de görüldüğü gibi küresel PVC pazarı her bir önceki yıla göre büyümektedir ve tahminlerde gelecekte bu büyümenin devam edeceği yönündedir.



Şekil 2.8. Küresel PVC sektörü (Statista Research Department, 2015).

PVC üretim kapasitesi istatistiklerine de bakıldığında benzer bir durumla karşılaşmaktadır. Dünya üzerindeki PVC üretim kapasitesi 2013 yılında 53 milyon ton iken 2016 yılında ise 61 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. PVC market hacmindeki artışa bağlı olarak ve geçmiş yıl verileri göz önüne alındığında PVC üretim kapasitenin de devam eden yıllarda büyüyeceği düşünülebilmektedir (Plastics Insight, 2019).

2016 yılında küresel boyutta 41,3 milyon ton PVC tüketilmiştir. Bunun %42'sine denk gelen en büyük kısmı PVC boru sektöründe gerçekleşmiştir. PVC boru üretimini PVC profil üretimi (%19), film ve kaplama sektörü (%17), kablo sektörü (%9) ve rüzgar türbini üretimi gibi diğer sektörler (%13) izlemektedir. Bu istatistiklere göre PVC boru ve PVC profil sektörleri için kullanılan PVC, küresel PVC tüketiminin %61'ini

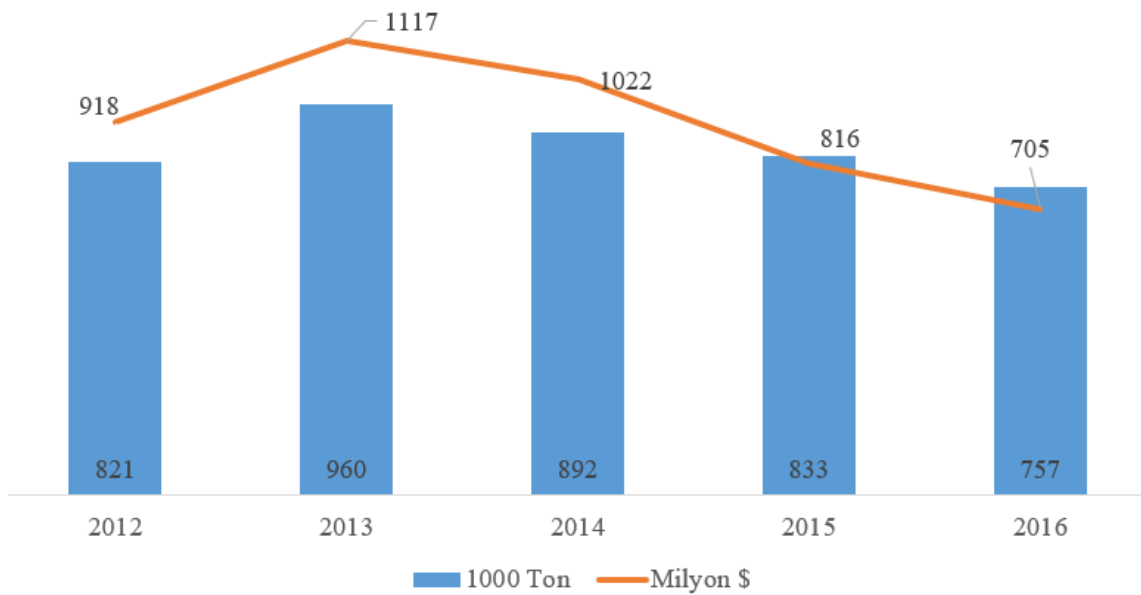
oluşturmaktadır. Bu istatistiklerden yola çıkarak en çok PVC kullanımının yapı imalat sektöründe olduğu görülmektedir (Plastics Insight, 2019).

2016 yılında en fazla PVC ihraç eden ülke 2,128 milyon \$'lık ihracatıyla Amerika Birleşik Devletleri (ABD) olmuştur. İthalat oranlarına baktığımızda ise ilk sırada 683,02 milyon \$ ile Çin gelmektedir. Çin'i ikinci sırada ise 618,83 milyon \$ ithalatla Türkiye izlemektedir. Türkiye bu verilere göre PVC konusunda dışa bağımlı bir grafik çizmektedir (Plastics Insight, 2019).

2.2.3. Türkiye PVC sektörü

Türkiye'de PVC üreten tek tesis PETKİM olup, mevcut üretim kapasitesi yılda 150 bin ton PVC üretebilecek seviyededir (PAGEV, 2017).

Türkiye'nin 2012-2016 döneminde yapmış olduğu toplam PVC ithalatı miktar bazında yılda ortalama %2 değer bazında da %6,4 azalmış ve söz konusu dönemde Şekil 2.9'da görüldüğü gibi 821 bin tondan 757 bin tona gerilemiştir (PAGEV, 2017).



Şekil 2.9. Türkiye PVC ithalatının yıllara göre değişimi (PAGEV, 2017).

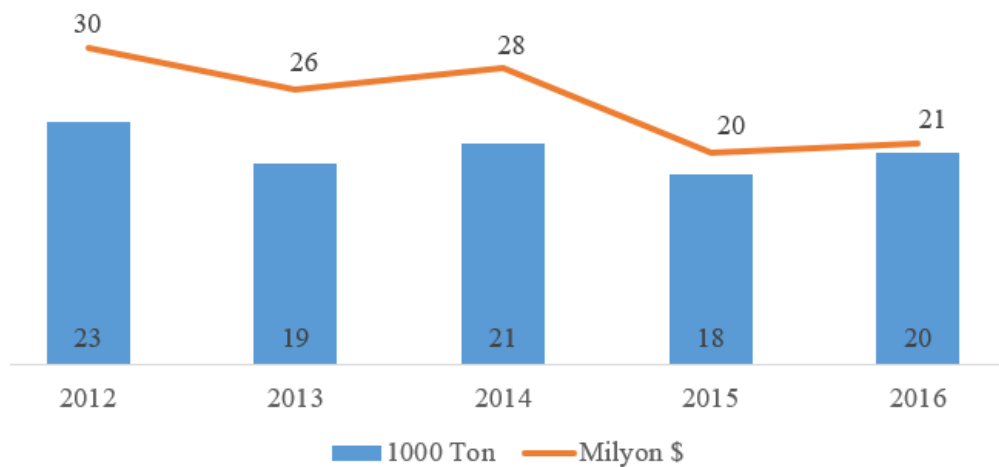
Türkiye'nin 2017 yılının ilk 9 ayında PVC ithalatı, Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi Fransa, ABD, Almanya, Meksika ve İspanya, İsveç, Güney Kore, Norveç, Mısır ve İtalya'dan ton ve dolar (\$) bazında %73'lük payla gerçekleşmiştir. Diğer ülkelerin PVC ithalatındaki payı ise 179 milyon \$ değerinde 168 bin tondur. Türkiye'nin bu dönemde

yaptığı toplam ithalat 481 milyon \$ değerinde 633 bin ton olarak tespit edilmiştir (PAGEV, 2017).

Çizelge 2.2. Türkiye'nin PVC ithal ettiği ülkeler (PAGEV, 2017).

Ülkeler	1000 Ton	Milyon \$	% ton	% \$
Fransa	106	108	17	16
ABD	83	82	13	12
Almanya	55	63	9	10
Meksika	57	56	9	8
İspanya	41	40	6	6
İsveç	35	36	5	5
Güney Kore	31	30	5	5
Norveç	23	24	4	4
Mısır	22	21	4	3
İtalya	11	21	2	3
10 Ülke Toplamı	464	481	73	73
Diğerleri	168	179	27	27
Toplam	633	660	100	100

Türkiye'nin 2012- 2016 döneminde yapmış olduğu toplam PVC ihracat verileri Şekil 2.10'da verilmiştir. PVC ihracatı miktar bazında yılda ortalama %3,7 değer bazında da %8 azalmış olup bu dönemde 23 bin tondan 20 bin ton değerine düşmüştür (PAGEV, 2017).



Şekil 2.10. Türkiye PVC ihracatının yıllara göre değişimi (PAGEV, 2017).

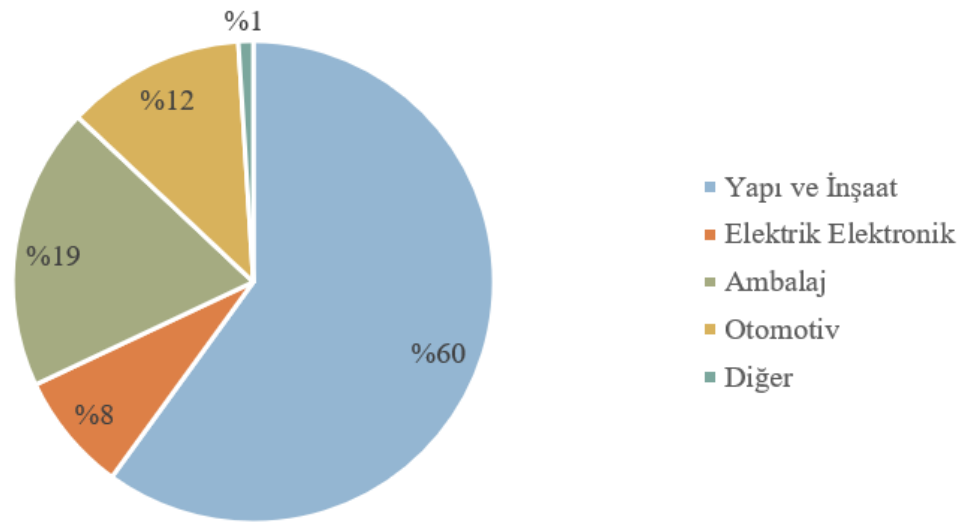
Türkiye 2017 yılının 9 ayında PVC ihracatının miktar bazında %72'sini değer bazında da %66'sını 10 ülkeden gerçekleştirmiştir. Çizelge 2.3'de gösterildiği gibi Bulgaristan, Azerbaycan, Gürcistan, Bursa Serbest Bölgesi ve KKTC, Türkiye'nin en çok PVC ihracatı yaptığı ülkeleri oluşturmuştur (PAGEV, 2017).

Çizelge 2.3. Türkiye'nin PVC ihrac ettiği ülkeler (PAGEV, 2017).

Ülkeler	1000 Ton	Milyon \$	% ton	% \$
Bulgaristan	3,2	3,3	23	21
Azerbaycan	1,6	1,4	11	9
Gürcistan	1,3	1	9	6
Bursa Serbest Bölgesi	0,8	0,9	5	6
KKTC	0,7	0,8	5	5
Cezayir	0,9	0,7	7	5
İsrail	0,5	0,7	4	5
Ukrayna	0,4	0,6	3	4
Kazakistan	0,5	0,5	3	3
Rusya Federasyonu	0,3	0,5	2	3
10 Ülke Toplamı	10,3	10,4	72	66
Diğerleri	3,9	5,3	28	34
Toplam	14,2	15,7	100	100

Türkiye'nin PVC tüketimi 2012- 2016 yıllarında miktar bazında yılda ortalama %2,1 değer bazında da %6,5 gerileyerek 2016 yılında 865 bin ton miktarına gerilemiştir (PÜKAD, 2016).

Türkiye'de PVC'nin kullanıldığı başlıca sektörler; yapı ve inşaat, ambalaj, elektrik ve otomotiv sektörleridir. Yapı ve inşaat sektörü Şekil 2.11'de belirtildiği gibi toplam PVC tüketiminin %60'ını kullanmaktadır (PÜKAD, 2016).



Şekil 2.11. Türkiye PVC iç piyasasının sektörel dağılımı (PÜKAD, 2016).

Çizelge 2.4’de görüldüğü üzere PVC pencere ve kapı profili bazında bakılacak olduğunda; 2016 yılında 432 bin ton PVC profil üretilmiş, bunun %67’lik kısmı iç piyasada pencere üretiminde kullanılmış, kalanı ise ihraç edilmiştir. İthal profiller iç pazarda yaklaşık %3’lük bir paya sahiptir (PÜKAD, 2016).

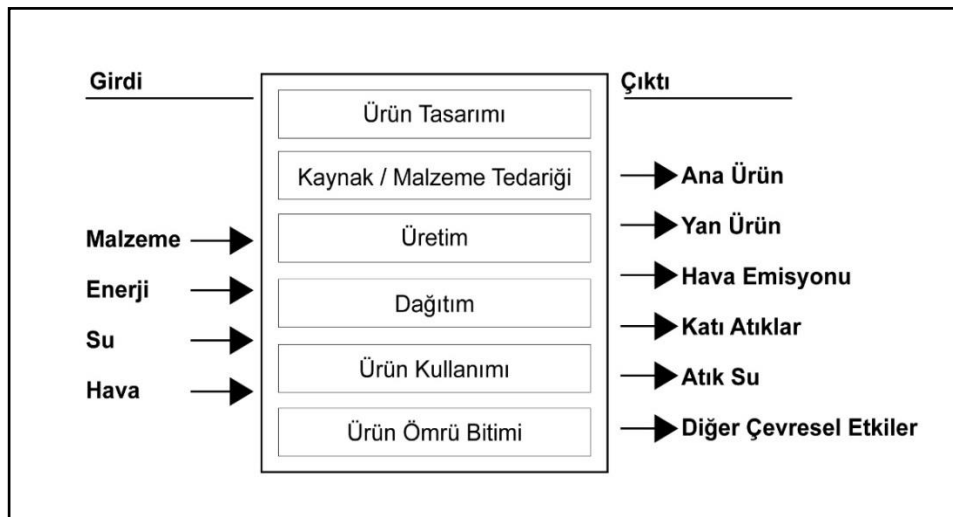
Çizelge 2.4. Türkiye PVC profil ithalat ve ihracat rakamları (PÜKAD, 2016)

İç Piyasaya Satılan PVC Pencereerde Profil Miktarı					İÇ PİYASAYA SATILAN PVC PENCERELEERDE PROFİL MİKTARI TON
YIL	ÜRETİLEN PENCERE PROFİLİ TON	İHRAÇ EDİLEN PVC PROFİL TON	İHRAÇ EDİLEN PENCERELEERDE PVC PROFİL TON	İTHAL EDİLEN PVC PROFİL TON	
2007	380.000	122.000	11.500	10.000	256.500
2008	420.000	122.000	14.500	10.000	293.500
2009	380.000	89.000	14.000	7.000	284.000
2010	450.000	118.000	18.000	10.000	324.000
2011	456.000	150.000	15.000	16.000	307.000
2012	468.000	160.000	14.000	17.000	311.000
2013	480.000	170.000	10.000	18.000	318.000
2014	480.000	186.000	10.000	15.000	299.000
2015	444.000	148.000	10.000	12.000	298.000
2016	432.000	140.000	10.000	8.000	290.000

2.3.Yaşam Döngüsü Analizi

2.3.1.Yaşam Döngüsü Analizi tanımı

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) son yıllarda giderek önem kazanmış ve günümüzde yürütülen sürdürülebilirlik analizi çalışmalarında kullanılan başlıca yöntemlerden biridir. Bu yöntem, ürün ve süreçlerin hammaddelerin elde edilmesi, imalatı, kullanımı, nihai bertaraf ve aradaki tüm sevkiyat aşamaları dahil, yaşam süreleri boyunca yol açtığı çevresel etkileri değerlendirme yöntemidir. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi her bir yaşam döngüsü basamağı için tüm enerji, su ve madde girdilerinin ve açığa çıkan atık ve emisyonların kapsamlı envanterleri derlenerek bir arada değerlendirilir ve ürünlerin potansiyel çevresel etkileri hesaplanır (SETAC, 1991; Azapagic, 2006).



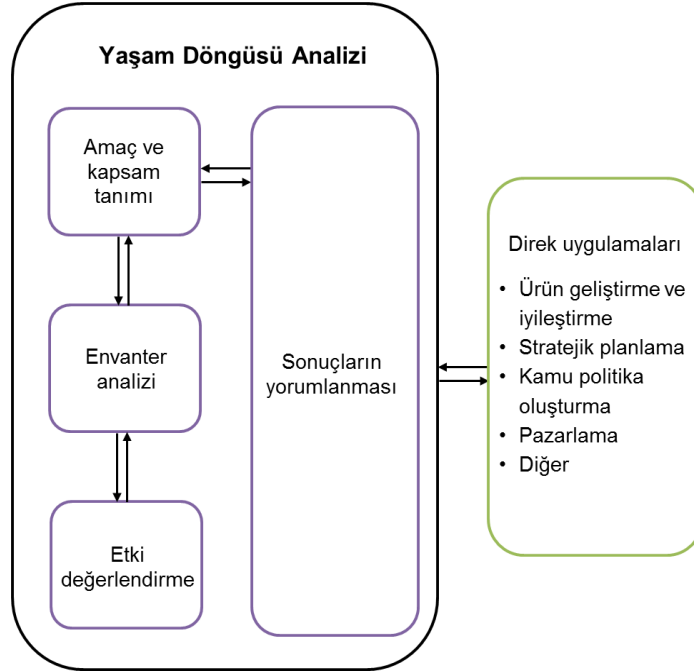
Şekil 2.12. Yaşam döngüsü analizi modellemesi (SETAC, 1991).

2.3.2.Yaşam Döngüsü Analizi metodolojisi

YDA yöntemi, Çevresel Toksikoloji ve Kimya Örgütü (SETAC) tarafından 1991 yılında tanımlanarak temel prensipleri ve çerçevesi ilk olarak belirlenmiştir (SETAC, 1991). Güncellemelerden sonra mevcut durumda uygulanmakta olan YDA metodolojisi, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından oluşturulan ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına (ISO, 2006b, 2006a) göre tanımlanmıştır.

Şekil 2.13’de belirtildiği gibi bu standart serilerine göre YDA değerlendirmeleri 4 adımdan oluşmaktadır. Bunlar; amaç ve kapsamın tanımlanması, envanter analizi, etki

değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanmasıdır (ISO, 2006b, 2006a). YDA metodolojisine ait basamaklar aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 2.13. Yaşam döngüsü analizi metodu ve uygulamaları (ISO, 2006b, 2006a).

Amaç ve Kapsamın Tanımlanması: ISO 14040'a göre bir YDA çalışmasının ilk aşaması amaç ve kapsamın tanımlanmasıdır. Bu aşamada amaç ve kapsam, amaçlanan uygulama ile net ve tutarlı bir şekilde tanımlanmalıdır. Amacın belirlenmesi aşaması, uygulanan YDA'nın nihai kullanılış amacı, YDA'nın amacı ve YDA çalışmasının hedef kitlesi gibi noktaların açıklanmasını gerektirmektedir. Kapsam tanımlanması sırasında ise incelenen ürün veya süreç sistemi karakterize edilir, tüm varsayımlar ayrıntılı bir şekilde ortaya koyulur ve ürün sistemini kurmak için kullanılan metodoloji tanımlanır. Ürünün fonksiyonu, fonksiyonel birim, sistemin açıklaması, sistem sınırları, etki kategorileri ve etki değerlendirme yöntemi, veri gereksinimleri, veri varsayımları, sınırlamalar, veri kalitesi gereksinimleri, sonuçların benzer çalışmalara göre değerlendirilmesi, raporlama tipi noktalarının kapsam tanımlanması aşamasında belirtilmesi gerekmektedir.

Sistemin İşlevi: Bir ürünü tanımlamak için ürünün işlevi tanımlanmalıdır. Bunun için de ürüne olan taleplerin tanımlanması gerekmektedir. Farklı ürünlerin karşılaştırılması durumunda, her bir ürünün farklı işlevleri tam olarak belgelenmelidir.

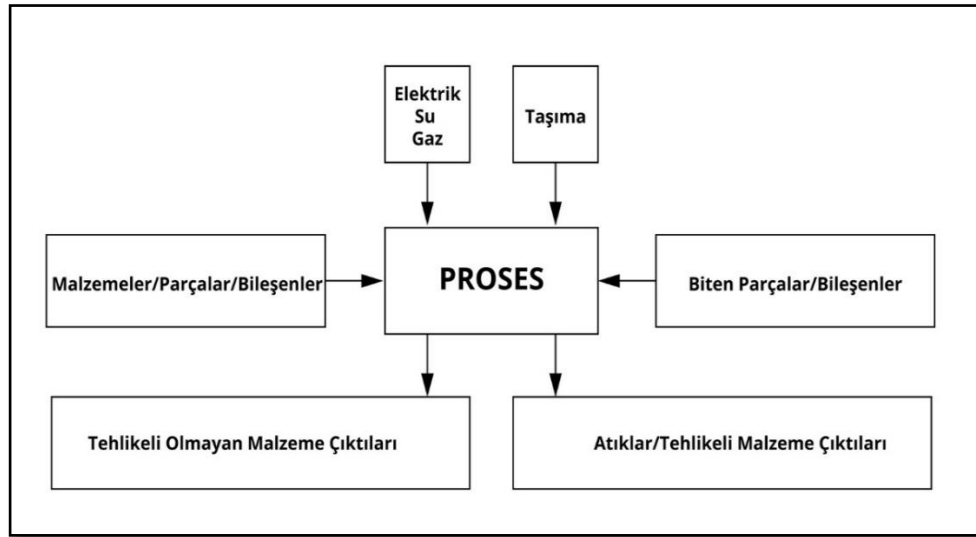
Fonksiyonel Birim: İşlevsel ya da diğer adıyla fonksiyonel birim, bir ürünün işlevinin nicelik olarak belirtilmiş tanımıdır. Fonksiyonel birim çalışmanın amacına göre seçilir ve her çalışma için farklıdır. İki ürünü karşılaştırmak için, fonksiyonel birimleri eşdeğer olmalıdır.

Paylaştırma ve Sistem Genişletme: Tahsis, bir işlemin girdi ve çıktılarının ilgili ürünlere ve yan ürünlere bölünmesi ve ilişkilendirilmesidir. Bu işlem kütleye göre paylaşırma vb. olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sistem Sınırları: Sistem sınırı, hangi işlemlerin sisteme dahil edileceğini veya dahil edilmeyeceğini tanımlar. Kullanılan sistem sınırlarını tanımlamak için dört ana seçenek bulunmaktadır;

- Beşikten mezara: Bir ürün ya da sürecin tüm yaşam döngülerini kapsayan analiz çalışmaları için kullanılmaktadır. Ham madde eldesinden (beşik) ortaya çıkan atıkların tasfiyesine (mezar) kadar geçilecek tüm süreçleri içine alır.
- Beşikten kapıya: bir ürün ya da süreci, ham madde eldesinden (beşik) itibaren kullanıma iletiildiği aşamaya (kapı) kadar olan süreçleri içerir yani yaşam döngüsünü kısmen kapsar.
- Beşikten beşiğe: Beşikten mezara yaklaşımının en son yaşam döngüsü olan atık tasfiyesi aşamasında atıkların geri kazanımı söz konusu ise bu yaklaşım olarak anılmaktadır.
- Kapıdan kapıya: Bir ürün ya da sürecin tek bir aşamasına ait yaşam döngüsünün ele alındığı bir yaklaşımdır.

Envanter Analizi: Bu aşama YDA analizindeki en hassas aşamadır. Envanter analizi, veri toplama ve Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) tablosundaki verilerin derlenmesini içerir. Sisteme ait modellemenin temeli olan proses akış diyagramları oluşturulur. Envanter analizi oluşturabilmek için mümkün olan en güvenilir kaynaktan verilerin toplanması gerekir. Veriler kullanılırken, veri kalitesi göstergelerine de dikkat edilmelidir (Rebitzer vd., 2004).



Şekil 2.14. Genel birim prosesi

Etki Değerlendirmesi: Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi olarak adlandırılan bu kısım yaşam döngüsü analizinin üçüncü aşamasını oluşturmaktadır. Yaşam döngüsü envanter değerlendirme sonucunda elde edilen enerji, su, hammadde kullanımı verilerinin potansiyel çevre etkilerinin değerlendirilir (Guinée vd., 2004). Etki değerlendirmesinin aşamaları her çalışma için farklılık göstermekte olup en kapsamlı şekilde aşağıdaki gibidir (Bruijn vd., 2002);

Etki kategorilerinin seçilmesi ve tanımlanması: Küresel ısınma, asidifikasyon, karasal zehirlilik gibi çalışma ile ilgili çevresel etki kategorilerinin seçilip tanımlanması ilk basamaktır.

Sınıflandırma: Bu aşamada, ayrı ayrı olan envanter öğeleri, ilgili çevresel etki kategorilerine göre atanır. Örneğin, SO₂ emisyonları asidifikasyon kategorisine eklenir.

Karakterizasyon: Karakterizasyon aşamasında, aynı çevresel soruna katkıda bulunan envanter öğeleri ilgili katsayılarla çarpılarak ortak birim üzerinden ifade edilir ve her çevresel etki kategorisi için kümelenmiş toplam etki hesaplanır. Örneğin, küresel ısınmaya yol açan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonlarının, ortak olarak CO₂ eşdeğeri üzerinden ifade edilerek küresel ısınma potansiyeli hesaplanır. Çizelge 2.5’de YDA çalışmalarında en sıklıkla kullanılan etki kategorilerine ait detaylı bilgi sunulmuştur.

Normalizasyon: Normalizasyon aşamasında, farklı çevresel etki potansiyelleri, kabul görmüş normalizasyon yöntemleri kullanılarak ortak referans sistemine göre birimsiz hale getirilerek birbiriyle kıyaslanır.

Gruplandırma: Göstergelerin sınıflandırılması ve sıralanması (örneğin, göstergelerin konuma göre yani yerel, bölgesel ve küresel bazda göstergelerin sınıflandırılması)

Ağırlıklandırma: Ağırlıklandırma aşamasında ise hangi çevresel etki potansiyelinin daha önemli olduğunu ortaya koymak için normalizasyon sonuçları yine kabul görmüş ve her çevresel etki kategorisi için azaltım hedeflerine dayanan ağırlıklandırma yöntemlerinden biri kullanılarak belirli katsayılarla çarpılır.

YDEA sonuçlarını değerlendirme ve raporlandırma: YDA çalışmalarında başlıca hesaplanan çevresel etki kategorileri Çizelge 2.5'te verilen asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma, fotokimyasal duman oluşumu, ozon tabakasının incelmeye, ekotoksisite, kanserojenik etki ve kaynak tüketimidir (Aydın Mammadov, 2017).

Sonuçların Yorumlanması: İlgili ISO standardına göre YDA sonuçları aşağıda özetlenen üç aşamada yorumlanır (Rebitzer vd., 2004):

Önemli Konu/Sonuçların Tanımlanması: Analizi yapılan her ürün, proses ve hizmet için gerçekleştirilen YDE ve YDEA çalışmalarına girdi sağlayan başlıca veri grupları ve bu verilerin elde edildiği YDA aşamaları, yorumlama aşamasındaki önemli noktalar ve konuların belirlenmesine yardımcı olur.

Veri Tutarlılığı ve Hassasiyetinin Değerlendirilmesi: YDA'nın yorumlama aşamasında kullanılan verilerin eksiksiz, tutarlı olduğu ve hassasiyet analizlerinin yapıldığı kontrol edilmelidir. Veri hassasiyetinin kontrolü yapılırken, sonuçları en fazla etkileyen veriler tespit edilmeli ve bu veri değerlerinde yapılacak değişikliğin sonuçları ne şekilde etkileyeceği araştırılmalıdır.

Sonuç ve Önerilerin Oluşturulması: Yorumlama aşamasının en kritik basamağıdır. Bu aşamada analiz yapılan ürün, işlem veya hizmetin alternatifleri arasından çevreye ve insan sağlığına en az yükü getiren ve en az olumsuz etkiye sahip olanı belirlenir. Hangi basamakta (hammadde temini, üretim, kullanım vb.) gerçekleştirilecek iyileştirmeler ile çevresel performansın arttırılabileceği bu aşamada tartışılır.

Çizelge 2.5. Yaşam döngüsü analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılan etki kategorileri

Etki Kategorisi	Ölçek	YDE Veri Örnekleri (sınıflandırma)	Karakterizasyon Faktörü	Karakterizasyon Faktörünün Açıklaması
Küresel Isınma	Küresel	Karbondioksit Nitrojendioksit Metan Kloroflorokarbonlar Hidrokloroflorokarbonlar Metilbromid	Küresel Isınma Potansiyeli	YDE verisini karbondioksit eşdeğerine dönüştürür.
Stratosferik Ozon Tüketimi	Küresel	Kloroflorokarbonlar Hidrokloroflorokarbonlar Halonlar Metilbromid	Ozon Tüketimi Potansiyeli	YDE verisini trikloroflorometana eşdeğerine dönüştürür.
Asidifikasyon	Bölgesel Yerel	Sülfüoksitler Nitrojen oksitler Hidroklorik asit Hidroflorik asit	Asidifikasyon Potansiyeli	YDE verisini hidrojen iyonu eşdeğerine dönüştürür.
Ötrifikasyon	Yerel	Fosfat Nitrojenoksit Nitrojendioksit Nitratlar	Ötrifikasyon Potansiyeli	YDE verisini fosfat eşdeğerine dönüştürür.
Fotokimyasal Sis	Yerel	Metan olmayan hidrokarbon	Fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyeli	YDE verisini metan eşdeğerine çevirir.
Karasal Zehirlilik	Yerel	Kemirgenlere olan öldürücü konsantrasyonu raporlanmış zehirli kimyasallar	LC50	LC50 verisini eşdeğerlere dönüştürür; açığa çıkarma ve multimedya modelleme kullanır.
Su Zehirliliği	Yerel	Balıklara olan öldürücü konsantrasyonu raporlanmış zehirli kimyasallar	LC50	LC50 verisini eşdeğerlere dönüştürür; açığa çıkarma ve multimedya modelleme kullanır.
İnsan Sağlığı	Küresel Bölgesel Yerel	Havaya, suya ve toprağa yapılan toplam salımlar	LC50	LC50 verisini eşdeğerlere dönüştürür; açığa çıkarma ve multimedya modelleme kullanır.
Kaynak Tüketimi	Küresel Bölgesel Yerel	Kullanılan mineral miktarı Kullanılan fosil yakıt miktarı	Kaynak tüketimi potansiyeli	YDE verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür.
Arazi Kullanımı	Küresel Bölgesel Yerel	Diğer arazi değişiklikleri veya düzenli bir depolama sahasının kullanılma miktarı	Arazi durumu	Tahmini bir özkütle kullanarak katı atığın kütleliğini hacme dönüştürür.
Su Kullanımı	Bölgesel Yerel	Su kullanımı veya tüketimi	Su kıtlığı potansiyeli	YDE verisini kullanılan kaynağın miktarına karşın rezervde kalan kaynağın miktarına dönüştürür.

2.3.3.Yaşam Döngüsü Analizi'nin kullanım alanları

Özellikle son yıllarda iklim değişikliğinden kaynaklanan endişelerin artması, daha sürdürülebilir ürün ve üretim süreçlerine olan ilgiden dolayı yaşam döngüsü analizi her geçen gün önem kazanmaktadır. YDA, bir çevresel etki değerlendirme yöntemi olarak çok çeşitli ürün, sistem ve servis için geniş uygulama alanına sahiptir. Bu analiz yöntemi stratejik planlama, kamu politikaları ve performans göstergeleri geliştirmek, üretimde öncelikli ürün ve süreçlerin belirlenmesi, iyileştirme olanaklarının ve alternatiflerin tespit edilmesi, ürün geliştirme veya yeniden tasarım ile stratejik karar verme aşamalarında kullanılmaktadır (Baumann ve Tillman, 2004; Azapagic, 2010).

2.4.Literatür Taraması

Yaşam döngüsü analizi çevresel sürdürülebilirliğin analiz edilmesinde kullanım oranı hızla artmakta olan bir yöntemdir. Hemen hemen her sektörle ilgili ürün veya üretim sistemlerinde bu yöntem kullanılarak çevresel etkiler belirlenmiş ve çevresel sürdürülebilirliğin iyileştirilmesi konusu tartışılmıştır. Yaşam döngüsü boyutunda çevresel etki değerlendirilmesi üretim sektörü için çok sık kullanılan bir tekniktir.

Literatür incelendiğinde PVC malzemenin çevresel etkilerinin değerlendirildiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda genel olarak PVC üretiminin sürdürülebilirliği incelenerek çevresel etkilerin azaltılması konusunda çalışılmıştır. PVC geri dönüşümünün çevresel sürdürülebilirliğe etkisini inceleyen çalışmalar da literatürde mevcuttur.

Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials, 2004 yılında Avrupa Birliği Komisyonu tarafından yayınlanmış olan kapsamlı bir rapordur. Çalışmanın genel amacı, ilgili uygulamalardaki PVC ve alternatif malzemeler hakkındaki mevcut yaşam döngüsü bilgilerinin bir derlemesini yapmak, bilgiyi değerlendirmek, boşlukları belirlemek ve komisyon içindeki karar vericilere destek için için bilgi hazırlamaktır. Çalışmada, PVC ve alternatif malzemeler hakkındaki yaşam döngüsü analizlerinin raporun yayınlanma tarihine kadar YDA değerlendirmesinden ve metodolojisinden uzak bir şekilde değerlendirildiğini bu nedenle de elde edilen verilerin derlenerek kapsamlı bir YDA sunmanın gerekliliği vurgulanmıştır. Konuyla ilgili olarak ilgili üreticilerle iletişim kurulmuş ve veri kaynağı olarak birincil üreticiler kullanılmıştır.

Rapor sonucunda PVC'nin üretimi ve kullanım alanları dahil olmak üzere çok yönlü bir PVC YDA analizi yapılmıştır.

Ye vd., (2017) çalışmalarında Çin'de üretilmekte olan PVC malzemenin yaşam döngüsü çevresel etkilerini ve bu malzemenin geri dönüştürülebilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada, fonksiyonel birim olarak bir ton birincil üretim ve geri dönüştürülmüş PVC plastik üretimi seçilmiştir. Bu araştırma iki senaryo üzerinden yürütülmüştür. Senaryo 1 geri dönüştürülmemiş PVC üretimini, Senaryo 2 ise geri dönüşümden üretilen PVC üretimini temsil etmektedir. Sonuçlar, en fazla çevresel etkinin her iki senaryo için de klor, karbon dioksit ve azot oksitlerden kaynaklandığını göstermiştir. İlk senaryodan elde edilen sonuçların tarımsal arazi işgali dışındaki çoğu kategoride oldukça büyük bir çevresel etkiye sahip olduğu kararla ulaşılmıştır. İklim değişikliği potansiyelinin, üretimde kullanılan kömüre bağlı enerjinin yerine hidroelektrik veya hibrit başka bir enerji kaynağı kullanılarak azaltılabileceği belirtilmiştir. PVC üretiminin çevresel sürdürülebilirliğinin artırılması için geri dönüştürülmüş PVC kullanımını teşvik edilmesi, metan dışı uçucu organik bileşikler (NMVOC) emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji oranını artırılması gerektiği bu araştırma sonucunda bulunmuştur.

Alvarenga vd., (2013) tarafından yapılan çalışmada PVC üretiminde kullanılmakta olan etilenin biyoetanol ile değiştirilmesi durumunda beşikten kapıya çevresel etkilerinin nasıl değişeceği YDA metodu kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada PVC üretimindeki en yoğun çevresel etkinin fosil kaynakların kullanımından geldiği vurgulanmıştır. Çalışmada biyoetanol bazlı PVC üretimi fosil bazlı PVC üretimi ile karşılaştırılmıştır. Biyoetanol kullanılarak üretilen PVC'nin fosil bazlı PVC'den genel olarak daha çevreci olduğu bulunmuştur. Biyoetanol bazlı PVC, fosil bazlı PVC'ye göre daha az çevresel etkiye neden olsa da bu tür PVC üretiminde biyolojik çeşitlilik ve ekotoksikite gibi çevresel etki kategorilerinde iyileştirme yapılması gerekmektedir.

Literatürde kapı ve pencere profilleri konusunda yapılan yaşam döngüsü değerlendirme çalışmaları genellikle profil malzemelerinin sürdürülebilirliğinin karşılaştırılması üzerine yoğunlaşmıştır.

Sinha ve Kutnar, (2012) çalışmalarında alüminyum, PVC ve ahşaptan üretilen benzer özelliklerdeki üç çerçeveyi termal performans ve sürdürülebilirlik açısından beşikten kapıya karşılaştırmışlardır. Çalışmada kullanılan fonksiyonel birim, U (Isıl geçirgenlik) değeri $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ olan bir pencere çerçevesinin 1 m^2 'si olarak belirlenmiştir.

Kütle cinsinden değerleri ise alüminyum için 50,7 kg, PVC için 94,5 kg, ahşap için ise 80,2 kg alınmıştır. Oluşturulan yaşam döngüsü analizi modelleri sonucunda elde edilen sonuçlar alüminyum çerçeve için iklim değişikliği potansiyeli 486 kg CO₂ eşdeğeri, PVC çerçeve için 258 kg CO₂ eşdeğeri ve ahşap çerçeve için 130 kg CO₂ eşdeğeri bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, alüminyum pencere çerçevesinin karbon ayak izinin ahşap pencere çerçevesinden neredeyse dört kat daha yüksek olduğu ayrıca PVC pencere çerçevesinin de ahşap pencere çerçevesinin iki katı olduğu gösterilmiştir.

Salazar ve Sowlati, (2008) Kuzey Amerika'da satılan alüminyum kaplı ahşap, PVC ve cam elyaf çerçeve ile üretilen pencerelerin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla YDA modelleri üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada fonksiyonel birim olarak; boyutu: 600x1200 mm olan, Kuzey Amerika standartlarında profil kullanılarak üretilen, kullanım ömrü 75 yıl olan, üzerinde tamir gerçekleştirilebilen (tamir koşulları contalı kısmın değişimi ve su geçirmezliğin yeniden sağlanması olacak şekilde) lowe kaplamalı çift camlı pencere olarak belirlenmiştir. Çalışma beşikten mezara olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada; çevresel sürdürülebilirlikte fosil enerji kaynaklarının kullanılmasının etkisinin büyük olduğu bulunmuştur. Ayrıca PVC yaşam döngüsü sürecinde pencerenin kısa servis ömrü nedeniyle en fazla çevresel hasara yol açtığı da belirtilmiştir. Ahşap pencereyi kaplamak için cam elyafı veya PVC kullanılmasının da ahşap profilli pencerenin çevresel etki performansı arttırdığı bulunmuştur. Analiz edilen üç pencere profilinin çevresel etkisinin azaltılması konusunda yapılacak en iyi iyileştirmenin üretim prosesine uygulanacak enerji verimliliğinin artırılması olduğu vurgulanmıştır.

Stachowiak-Wencek vd., (2013) çalışmalarında ahşap profilli pencere ile PVC profilli pencerenin yaşam döngüsü analizi boyutunda çevresel etki değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Her biri 1000x1000 mm boyutlarında olan 100 adet pencere üretimi, fonksiyonel birim olarak kabul edilmiştir. Model için gerekli olan veriler Polonya'da üretim yapan pencere profili üreticilerinden sağlanmıştır. Çalışmanın sonucuna göre PVC profilli pencerelerin çevresel etkilerinin ahşap pencereler için hesaplanan değerden daha daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Asif vd., (2002) çalışmalarında pencere çerçeveleri için kullanılan malzemelerin yaşam döngüsü değerlendirmesini ele almışlardır. Farklı malzemelerden elde edilen çerçeveleri üretim, enerji tüketimi ve çevresel etki sınıflandırmasında

değerlendirmişlerdir. Alüminyum, PVC, alüminyum-kaplı ahşap ve ahşaptan oluşan pencerelerin gömülü enerjisinin (bir ürünün bir biriminin üretilmesi için gerekli enerji) sırasıyla 6 GJ, 2980 MJ, 1460 MJ ve 995 MJ olduğu bulunmuştur. Araştırma, alüminyum ve PVC çerçevelerin büyük miktarda çevresel yük taşıdığını göstermektedir. Camların hava koşullarına karşı dayanıklılığını test etmek için hızlandırılmış yaşlanma testleri yapılmıştır. Bu testler alüminyum kaplı ahşap pencerelerin çevresel etkilerden nispeten en az etkilendiğini göstermektedir.

Asif vd., (2005) çalışmalarında alüminyum, alüminyum kaplı ahşap, PVC ve ahşap çerçevelerin sürdürülebilirlik araştırmasını yapmışlardır. Çalışmada, çerçevelerin üretim ve imhası sırasında ortaya çıkan çevresel atıklar, gömülü enerji, dayanıklılık ve servis ömrü, çerçevelerin bakım-onarımı değerlendirilmiştir. Ayrıca fiyat karşılaştırması ve pazar araştırması da tartışılmıştır. Ahşap ve alüminyum kaplı ahşap pencerelerin çevre dostu karakterleri, düşük gömülü enerjileri, daha iyi servis ömürleri sebebiyle daha sürdürülebilir olduğu, PVC ve alüminyum pencerelerin ise yüksek gömülü enerji değerlerine sahip oldukları ve bu nedenle çevresel etkilerinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Switala-Elmhurst ve Udo-Inyang, (2015) çalışmalarında tarihi ahşap pencere restorasyonunun PVC profilli ve alüminyum kaplamalı ahşap pencere değişimine karşı çevresel etkilerini değerlendirmek için bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapmışlardır. Yaşam döngüsü analizi için GaBi yazılımı kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Sonuçlar, YDA işlemlerinin çevresel sonuçlarını ölçülebilir çevresel etkilere dönüştüren TRACI 2.1 yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, ahşap pencere restorasyonunun PVC ve alüminyum kaplı ahşap restorasyon penceresine kıyasla daha az genel çevresel etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Duyarlılık analizi, pencere ömrü varsayımlarının sonuçları etkilediğini ortaya koymuştur.

Sadece PVC pencere profili üretimi bazında çevresel etkilerin yaşam döngüsü boyutunda incelendiği çalışmalara ise literatürde çok fazla rastlanmamıştır. Yapılan az sayıda çalışmada;

Stichnothe ve Azapagic, (2013) çalışmalarında daha önce kullanılmamış ham haldeki PVC granül, üretim sonrası firelerden oluşan PVC granül ve nihai müşterinin kullanımından sonra geri dönüştürülerek elde edilen PVC granül kullanılarak üretilen PVC profillerin yaşam döngüsü analizi boyutunda çevresel etkilerini incelemişlerdir.

Çalışmada fonksiyonel birim atık pencere çerçevelerinden geri dönüştürülmüş 1 ton PVC olarak tanımlanmaktadır. Sonuçlar, geri dönüşümlü atık çerçevelerden üretilmiş granüllerden üretilen PVC profilin ham granülden üretilen PVC profile göre çevresel sürdürülebilirliği önemli ölçüde arttırabileceğini göstermiştir. Yeni üretim PVC granülün hammadde olarak kullanımını, tüketici sonrası atıklardan geri dönüştürülen PVC granül hammaddesiyle değiştirmek, yaklaşık 2 ton CO₂ eşdeğeri/1 ton PVC tasarruf sağlarken, PVC sanayi sonrası fire atıklara kıyasla 1,8 ton CO₂ eşdeğeri tasarruf sağlamaktadır. Sonuçlar, ayrıca hammaddenin taşıma mesafesine karşı da oldukça hassas olduğunu belirtmektedir. Örneğin, PVC granülün taşıma mesafesi 100km'den 500 km'ye yükseldiğinde ve yük faktörü 0,7'den 0,2'ye düştüğünde küresel ısınma potansiyeli 1,7 kat artmaktadır.

Wang vd., (2014) çalışmalarında yaşam döngüsü analizi metodolojisi kullanarak, PVC pencere üretiminden kaynaklanan kaynak tüketimi, enerji tüketimi ve kirletici emisyonlarının nicel analizini ve değerlendirmesini yapmışlardır. Sonuç olarak, asidifikasyon potansiyeli, fotokimyasal oksidasyon potansiyeli ve küresel ısınma potansiyelinin pencere üretim sürecindeki toplam çevre yükünün ana katkıları olduğunu ve oranın neredeyse %97 olduğu bulunmuştur. Süreç olarak ise en fazla etkinin PVC pencere profili üretimi süreci ve cam üretimi sürecinden geldiği bulunmuştur. Konuyla ilgili iyileştirme çalışmalarının bu süreçler üzerinde yoğunlaştırılması gerektiği önerisinde bulunulmuştur.

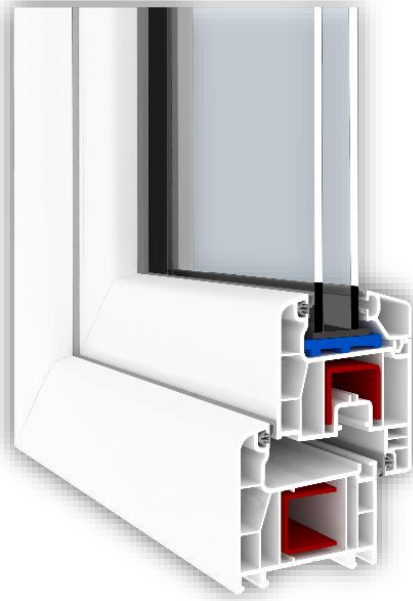
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada yaşam döngüsü analizi çalışması için “PVC pencere profili” ürünü seçilmiştir. Çevresel etki modeli için gerekli olan bütün veriler Eskişehir’de üretim yapmakta olan bir PVC firması tarafından 2017 ve 2018 yılları temel alınarak sağlanmıştır.

Yaşam döngüsü analizi uluslararası standartlar olan ISO 14040 ve ISO 14044 serisi standartlarına (ISO, 2006b, 2006a) göre birbiri ile ilişkili dört adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adım olarak çalışmasının amacı, kapsamı, üretim prosesinde sistem sınırları ve sistem için fonksiyonel birim tanımlanmıştır. Çalışmanın ikinci basamağında yaşam döngüsü envanter analizi için sisteme giren tüm hammadde ve enerji bileşenleri ile sistemden çıkan ürün ve diğer bileşenler fonksiyonel birim ile ilişkilendirilerek hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ile PVC profil üretim sürecinin tüm bileşenleri için çevresel etki kategorileri (asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, küresel ısınma potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli) Manchester Üniversitesi tarafından geliştirilen CCalC2 (CCalC, 2016) yaşam döngüsü programı ile bu program ile sağlanan veritabanı kullanılarak tespit edilmiştir. Son aşamada bu sonuçlar yorumlanıp en fazla etkinin geldiği basamaklar belirlenmiştir. Oluşturulan alternatif modeller ile yaşam döngüsü çevresel etkilerde iyileştirme sağlanmıştır.

3.1.Amaç ve Kapsam

Çalışmanın amacı kapı ve pencere üretiminde kullanılan PVC profillerinin çevresel sürdürülebilirliğinin yaşam döngüsü boyutunda incelenmesidir. Belirlenen ürünün üretim sürecinin çevresel etkileri YDA yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın fonksiyonel birimi “1 kg contalı 71 mm kalınlığında beyaz kaplamasız PVC profil” üretimidir. Belirlenen bu fonksiyonel birim tezin bundan sonraki kısımlarında daha kolay olması amacıyla “1 kg PVC profil” olarak kullanılacaktır. Profile eklenen destek sacı ile camın yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkisi kapsam dışında bırakılmıştır. Seçilen ürüne ait detaylar Şekil 3.1’de verilmiştir.

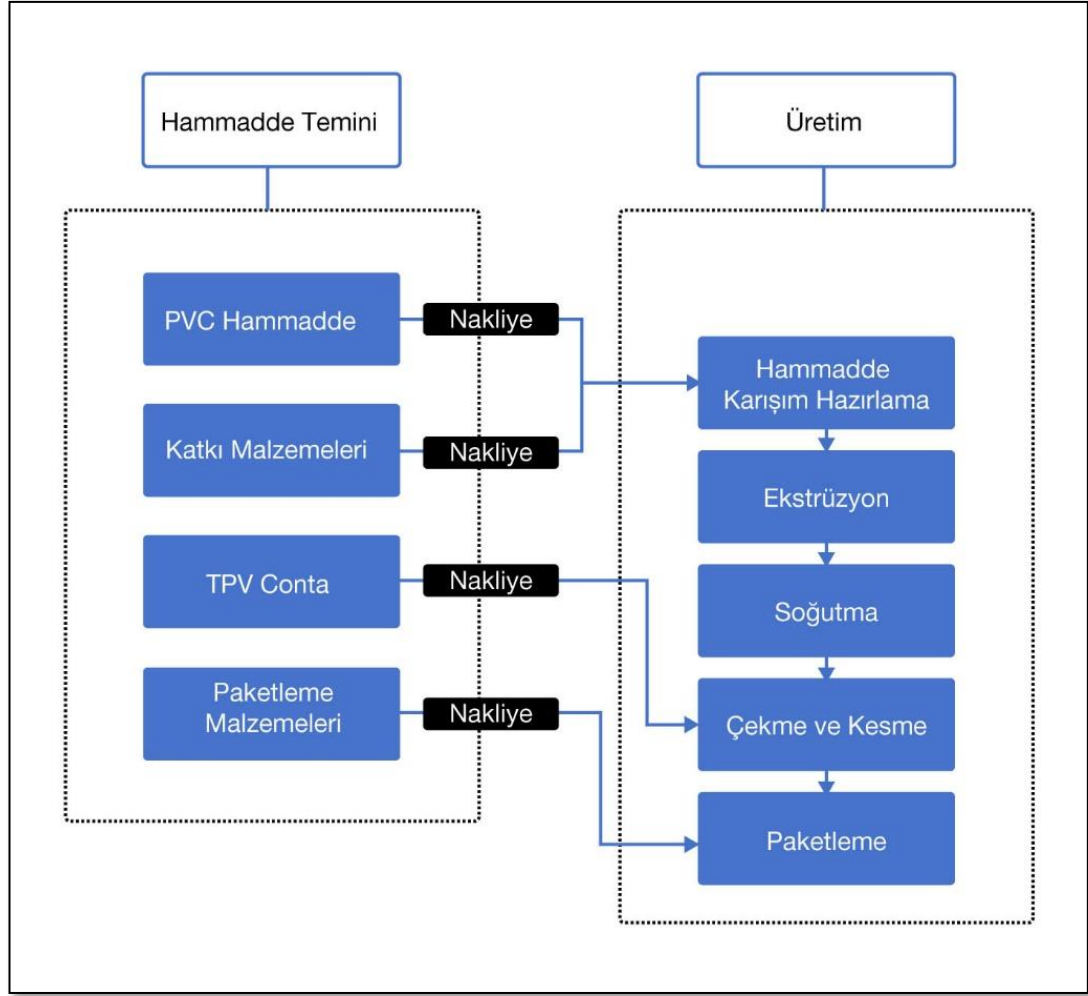


Şekil 3.1. 71 mm profilden üretilen bir pencere kesidi örneği.

Sistem sınırları beşikten kapiya kabul edilerek hammadde eldesi ve işlenmesi, hammadde nakliyesi, hammadde hazırlama, ekstrüzyon, soğutma, çekme ve kesme ile paketleme basamaklarından oluşmaktadır. Üretim tesisinin inşaatı, kullanım sonrası yıkımı, üretilen ürünün dağıtımı, kullanımı ve kullanım sonrası bertaraf basamakları veri yetersizliğinden dolayı sistem sınırlarına alınamamıştır. PVC profil üretiminin yaşam döngüsü basamakları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Oluşturulan yaşam döngüsü modelinde PVC profil için belirlenen yaşam döngüsü basamakları temel olarak 3 basamakta toplanmıştır ve bu basamaklar:

- *Hammadde Eldesi Aşaması:* Hammaddelerin elde edilmesi ve hammaddelere uygulanan ön işlem süreçlerini içerir.
- *Hammadde Nakliyesi Aşaması:* Hammaddelerin tesise karayolu ve deniz yolu ile nakliyesi sürecini kapsar.
- *Üretim Aşaması:* Üretim tesisinde gerçekleşmekte olan hammadde karışım hazırlama, ekstrüzyon, soğutma, çekme ve kesme ile paketleme basamaklarından oluşmaktadır.



Şekil 3.2. PVC profil için yaşam döngüsü basamakları.

3.2. Veri ve Kabuller

Çalışmada envanter analizi veri toplama, varsayımlar ve hesaplama işlemlerinden oluşmaktadır. Yaşam döngüsü analizi çalışması için kapı ve pencere üretiminde kullanılan “PVC profil” ürünü seçilmiştir. PVC profil yaşam döngüsü modellemesi için hammadde temin, nakliyesi ve kullanımı, enerji tüketimi, su kullanımı, ambalaj temini ve kullanımı ile ilgili tüm veriler Eskişehir’de üretim yapmakta olan bir PVC fabrikası tarafından 2017 ve 2018 yılları için sağlanan üretim verileridir. PVC profil üretiminde yan ürün oluşmamaktadır.

PVC profil üretiminde kullanılan hammaddeler üretim tesisine deniz ya da kara yoluyla taşınmaktadır. Ülkemizde üretilen PVC hammadde miktarı, Türkiye’de kullanılan PVC hammadde miktarını karşılayamamaktadır. Bu nedenle PVC hammadde deniz (konteynır) ve karayolu taşımacılığı ile yurtdışından üretim yapılan tesise

ulaşmaktadır. Metil metakrilat ve titanyumdioksit için de benzer durumlar söz konusudur. Bu ürünler de yurtdışından ithal edilmekte ve hem karayolu hem de denizyolu taşımacılığı kullanılmaktadır. Kalsit, termoplastik vulkanizat (TPV) conta ve çinko stearat ise yurtiçindeki tedarikçilerden 22 tonluk karayolu tır taşımacılığıyla tedarik edilmektedir. PVC profil üretiminde kullanılmakta olan hammaddelere ait üretim tesisine ulaştırma ile ilgili detaylı veriler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. PVC üretimine ait ulaşım verileri.

Ürün	Nakliye Tipi	Mesafe (km)
PVC Hammadde	Karayolu	400
	Denizyolu	10,000
Kalsit	Karayolu	620
Metil Metakrilat	Denizyolu	17,200
	Karayolu	400
TPV Conta	Karayolu	400
Titanyumdioksit	Karayolu	450
	Denizyolu	7,500
Çinko Stearat	Karayolu	500

Tesise getirilen PVC üretiminde kullanılmakta olan hammaddeler ve katkı malzemeleri belirlenen oranda elevatör yardımıyla PVC silosuna taşınır. PVC hammaddesi PVC silosuna yukarıdan boşaltılır. Yardımcı malzemeler de aynı elevatör yöntemi yardımıyla kendi ürün türüne ait silolara boşaltılır. Ürün miktarları otomatik ölçümle tartılarak karışım mikserinde PVC profil hammadde karışımı hazırlanır. Çizelge 3.2’de PVC üretimi için gerekli olan hammaddeler ve miktarları hakkında bilgiler sunulmuştur.

Çizelge 3.2. PVC üretimi için hammadde miktarları.

Ürün İsmi	Miktar (kg/1 kg PVC Profil)	Oran (%)
PVC Hammadde	0,700	70
Kalsit	0,141	14
Metil Metakrilat	0,050	5
TPV Conta	0,051	5
Titanyumdioksit	0,030	3
Çinko Stearat	0,026	3
TOPLAM	1 kg	100

PVC pencere profilinin tercih edilmesini sağlayan özellikleri sağlam ve hafif olması, alev almaya karşı dirençli olması, yalıtım özellerinin iyi olması ve uzun ömürlü olmasıdır. Tüm bu özellikleri sağlamak ve iyileştirmek adına PVC pencere profili üretilirken PVC hammaddenin yanında, bazı katkı malzemeleri de kullanılmaktadır. PVC pencere profil üretimi için kullanılan ürünlerden PVC hammadde ana bileşen konumundadır. Kalsit ürüne darbe mukavemeti kazandırmak için eklenmektedir. Metil metakrilat polimerizasyona yardımcı olması amacıyla eklenmektedir. Titanyum dioksitin kullanım amacı iyi bir örtücü olması ve renk solması direncini artırmasıdır. Çinko stearat ise yardımcı stabilizatördür. TPV conta, pencere kasa ve kanadının birbirine tam olarak oturmasına yardımcı olup aynı zamanda hava ve su sızdırmazlığını sağlamaktadır.

Karışım ön ısıtma işlemi olarak 120 °C'ye çıkarılır daha sonra ise 45 °C'ye kadar soğutulur. Bu hazırlanan karışım daha sonra hammadde karışım silolarına gönderilir. Sensörler yardımıyla ekstrüder hazneleri bu silodan beslenir. Hammadde karışım silolarından ekstrüder haznelerine gelen karışım hammadde profil çekme işleminden önce 125-140 °C'de ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Ön ısıtma işleminden kalıba geçiş, hızı dakikada 11,5 devir olarak spiraller yardımıyla gerçekleştirilir. Geçiş işlemi sağlayan silindir sıcaklığı ise 180 °C'dir. Nihai kalıp sıcaklığı 195 °C'dir. Ürünler kalıpta PVC kasa-kanat profil şeklini alırlar ve buradan soğuk kalıplara gönderilirler. Burada 15 °C'deki su yardımıyla soğutma işlemi yapılmaktadır. Tesiste sadece elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Çizelge 3.3'de enerji kullanımına ait bilgiler verilmiştir. Türkiye için

oluşturulmuş bir yaşam döngüsü analizi veri tabanı bulunmamaktadır. Türkiye elektrik üretimine ait yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkiler için Atilgan ve Azapagic, (2016a) çalışması temel alınarak 2017 yılı Türkiye elektrik üretim istatistikleri (TEIAS, 2018) ile modeller oluşturulup bu çalışmada kullanılmıştır. İyileştirme modeli olarak oluşturulan rüzgar enerjisinin kullanıldığı model için Atilgan ve Azapagic, (2016b) çalışmasında Türkiye'deki rüzgar türbinleri için oluşturulan modelin sonuçları kullanılmıştır.

Soğuyan profile conta takma işlemi bir sonraki adımdır. Contası da takılan profil müşteri taleplerine göre (çoğunlukla 6 metre olacak şekilde) kesilir ve naylon poşetler yardımıyla paketlenerek nihai müşteriye sevkedilmek üzere depoya gönderilir.

Çizelge 3.3. PVC üretimine ait enerji verileri.

Üretim Basamağı	Enerji Tüketimi (MJ/1 kg PVC profil)
Hammadde Hazırlama	0,31
Ekstrüder	1,90
Soğutma	0,75
Çekme ve Kesme	0,34
Paketleme	0,10
TOPLAM	3,40

3.3.Etki Analizi

PVC profil yaşam döngüsü modellemesi, Eskişehir'de üretim yapmakta olan bir PVC fabrikasının 2017-2018 üretim verileri esas alınarak CCaLC2 (CCaLC, 2016) yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. CCaLC2 Manchester Üniversitesi tarafından, tüm tedarik zincirleri boyunca farklı sanayi sektörlerinin karbon ayak izlerini hesaplamak ve azaltmak için bir yaşam döngüsü metodolojisi ve karar destek araçları geliştirmek üzere geliştirilmiş bir programdır. Bu yaşam döngüsü analizi yazılımı ile çevreyle ilgili politika belirleyicilerin yanı sıra sanayi tarafından da kullanılmak üzere genel bir YDA veritabanı ve modelleme çerçevesi geliştirilmiştir. CCaLC2 yazılımı ile birlikte yalnızca karbon ayak izi metodolojisinin kullanıldığı iklim değişikliği potansiyeli değil, asidifikasyon potansiyeli, ozon tabakası incelmesi potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli de sistemsel ürün ve

hizmetler için hesaplanabilmektedir. Çevresel sürdürülebilirliğin yanında ekonomik sürdürülebilirliğin analiz edilmesine de olanak sağlamaktadır (CCaLC, 2016).

Çalışmada hesaplanan çevresel etki kategorileri yaşam döngüsü analizi sonuçlarının daha kolay anlaşılabilmesi için hammadde temini, hammadde nakliyesi ve PVC profil üretim basamakları için toplam çevresel etkiler sunulmuştur.

PVC üretim sistem için analiz edilen çevresel etki kategorileri: asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, küresel ısınma potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyelidir. Bu çevresel etki kategorileri ve her birine ait hesaplanma yöntemi aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır ve örnek hesaplama Ek-1’de gösterilmiştir:

Küresel Isınma Potansiyeli: Küresel ısınma potansiyeli, farklı sera gazlarının iklim değişikliğine neden olma potansiyelini ifade edilmektedir. İklim değişikliği sonucu kutuplarda erime, toprakta nem kaybı, uzun mevsimler, orman kaybı ve rüzgar- okyanus hareketlerinde değişimler oluşabilmektedir. Temel olarak küresel ısınmaya karbondioksit (CO₂) neden olmaktadır. Ardından metan (CH₄), su buharı, azot oksit (N₂O), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve kükürt heksaflorür (SF₆) gelmektedir(Baumann ve Tillman, 2004). Bu etki kategorisi için referans sera gazı CO₂'dir.

Küresel ısınma potansiyeli Denklem 3.1’deki formül ile hesaplanabilmektedir (Azapagic, 2010):

$$GWP = \sum_j^J GWP_j \times B_j \quad (3.1)$$

GWP- küresel ısınma potansiyeli (kg CO₂-eşd.)

GWP_j- gazın emisyon faktörü (kg CO₂-eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam sera gazı sayısı

Asidifikasyon Potansiyeli (AP): Asidifikasyon potansiyeli, kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x), hidrojen klorür (HCl) ve amonyak (NH₃) gibi kirleticilerin H⁺ iyonları şeklinde potansiyel asit biriktirmesini ifade eder. Asidifikasyon, asitleştirici maddelerin toprak, yeraltı suyu, yüzey suyu, organizmalar, ekosistemler ve malzemeler

üzerinde yarattığı toksik etkiyi ifade eden etki kategorisidir. Asidik gazların atmosferdeki su ile reaksiyona girmeleri sonucunda ‘asit yağmuru’ denilen olay gerçekleşmektedir. Asit yağmurlarının oluşumu da ekosistem içerisindeki çeşitliliğin azalmasına sebep olmaktadır (Baumann ve Tillman, 2004). Bu çevresel etkinin birimi kg SO₂-eşdeğeri (eşd.)’dir ve Denklem 3.2’deki formül ile hesaplanır (Azapagic, 2010):

$$AP = \sum_j AP_j \times B_j \quad (3.2)$$

AP- asidifikasyon potansiyeli (kg SO₂-eşd.)

AP_j- gazın emisyon faktörü (kg SO₂-eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam gaz sayısı

Ötrofikasyon Potansiyeli (EP): Ötrofikasyon, havaya, suya ve toprağa besi maddelerinin aşırı salınımı nedeniyle oluşan makro besi maddelerinin artışının sebep olduğu etkileri ifade eden etki kategorisidir. Azot (N) ve fosfor (P) gibi besin maddelerinin biyokütleyi (genel olarak algleri) arttırma potansiyeli olarak tanımlanmaktadır. Bu etki PO₄⁻³e göre ifade edilir ve Denklem 3.3’deki şekilde hesaplanır (Azapagic, 2010):

$$EP = \sum_j EP_j \times B_j \quad (3.3)$$

EP- ötrofikasyon potansiyeli (kg PO₄⁻³-eşd.)

EP_j- gazın emisyon faktörü (kg PO₄⁻³-eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam gaz sayısı

İnsan Toksisitesi Potansiyeli (HTP): İnsan toksisitesi potansiyeli, parçacıklar ve ağır metaller gibi insan sağlığını olumsuz etkileyen toksik kirleticilerin havaya, suya ve toprağa etkisinin ölçüsünü temsil eder. İnsan toksisitesi, insanların sağlığını etkileyebilecek kanserojen ve kanserojen olmayan bileşenlerin ağırlıklı bir değerlendirilmesi olarak hesaplanmaktadır. DCB’ye göre ifade edilir. Denklem 3.4’deki şekilde hesaplanır (Azapagic, 2010):

$$HTP = \sum_j^J HTP_j \times B_j \quad (3.4)$$

HTP- insan toksisitesi potansiyeli (kg DCB-eşd.)

HTP_j- gazın emisyon faktörü (kg DCB-eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam madde sayısı

Ozon Tabakası Tükenme Potansiyeli (ODP): ODP, stratosferik ozon tabakasını incelmeye neden olan kloroflorokarbonlar (CFC'ler), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler) ve halojenlerin potansiyelini ifade eder. Ozon tabakasının incelmeye, insan ve hayvan sağlığı, ekosistemler, biyokimyasal çevrimler ve materyaller üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Ozon tabakasının incelmeye, Dünya yüzeyine ulaşan radyasyon miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu etki, R11 cinsinden ifade edilip Denklem 3.5'deki gibi hesaplanmaktadır (Azapagic, 2010):

$$ODP = \sum_j^J ODP_j \times B_j \quad (3.5)$$

ODP- ozon tükenme potansiyeli (kg R11-eşd.)

ODP_j- gazın emisyon faktörü (kg R11-eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam ozon tüketen gaz sayısı

Fotokimyasal Duman Oluşturma Potansiyeli (POCP): Bu etki, NO_x, uçucu organik bileşikler (VOC'ler), CH₄ ve CO gibi reaktif kimyasal bileşiklerin güneş ışığının etkisiyle reaksiyona girmesi nedeniyle (Azapagic, 2010), aynı zamanda yaz dumanı olarak da bilinen fotokimyasal duman oluşum potansiyelini ölçmektedir (Guinée vd., 2001). Denklem 3.6'daki gibi hesaplanmaktadır (Azapagic, 2010):

$$POCP = \sum_j^J POCP_j \times B_j \quad (3.6)$$

POCP- fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli (kg C₂H₄ eşd.)

POCP_j- gazın emisyon faktörü (kg C₂H₄ eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam madde sayısı

3.4. Sonuçların Yorumlanması

Etki analizi sonucunda elde edilen sonuçlar bu basamakta değerlendirilmiş olup etkilerin en fazla geldiği kaynaklar bulunmuştur. Çalışmamıza ait bulgular Bۆlüm 4’de sunulmuştur.

4.BULGULAR

PVC profil yaşam döngüsü modellemesi, Eskişehir’de üretim yapmakta olan bir PVC fabrikasının 2017-2018 yılı üretim verileri esas alınarak Ek-2’de gösterilen CCaLC2 (CCaLC, 2016) yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. PVC profil üretimi için oluşturulan çevresel etki analizi modelinin yaşam döngüsü basamakları verilerin alındığı fabrikanın contalı 71 mm kalınlığında beyaz kaplamasız PVC profil ürününe ait üretim hattı akış şeması dikkate alınarak hazırlanmıştır.

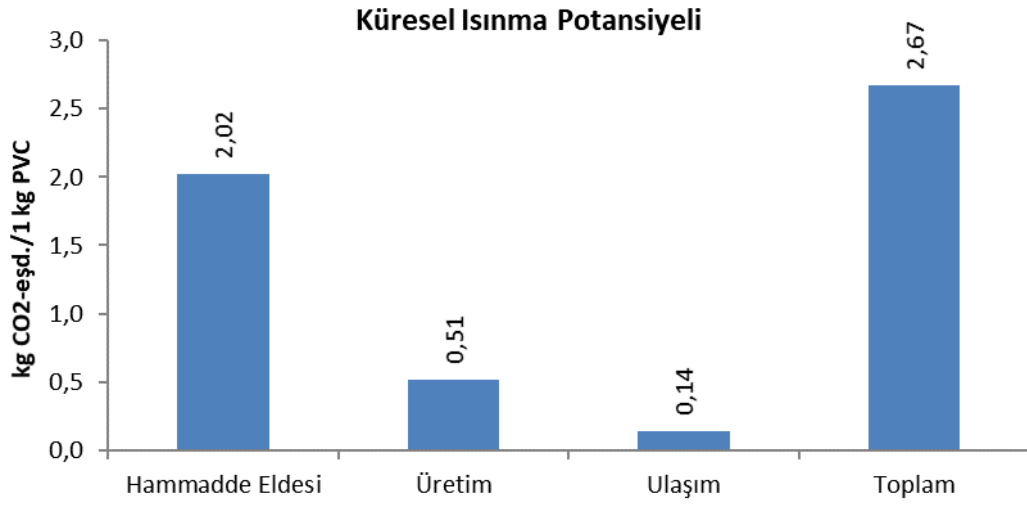
4.1.PVC Üretiminin Çevresel Etkileri

PVC üretim sistemi için analiz edilen çevresel etki kategorileri: küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyelidir. Bu çevresel etkiler yaşam döngüsü analizi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Etki analizi ile elde edilen çevresel etki sonuçlarının detaylı olarak her bir yaşam döngüsü basamağı ve her bir üretim basamağı için değerlendirilmesi aşağıdaki kısımlarda fonksiyonel birime bağlı olarak verilmiştir.

4.1.1.Küresel ısınma potansiyeli (Karbon ayak izi)

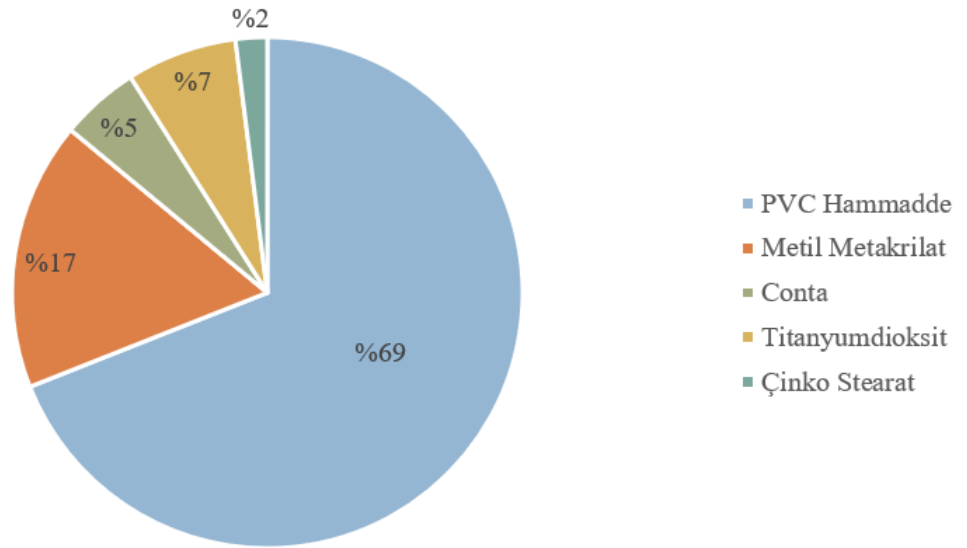
Fonksiyonel birimimiz olan 1 kg PVC profil için yaşam döngüsü basamakları olarak belirlenen hammaddelerin elde edilmesi ve işlenmesi, hammaddelerin nakliyesi ve PVC profil üretimi aşamalarında açığa çıkan karbon ayak izi sonuçları Şekil 4.1 ‘de gösterilmiştir.

1 kg contalı PVC profil üretimi için küresel ısınma potansiyeli toplam 2,67 kg CO₂ eşdeğeri olarak bulunmuştur. Karbon ayak izi oluşumuna en fazla neden olan yaşam döngüsü basamağı hammadde eldesi basamağı olup 2,02 CO₂ kg eşd./1 kg PVC profil karbon ayak izine sahiptir. En az sera gazı salınımı ise nakliye (%5) aşamasından kaynaklanmaktadır. Üretim aşamasının küresel ısınma potansiyeli ise 0,51 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profil şeklindedir.



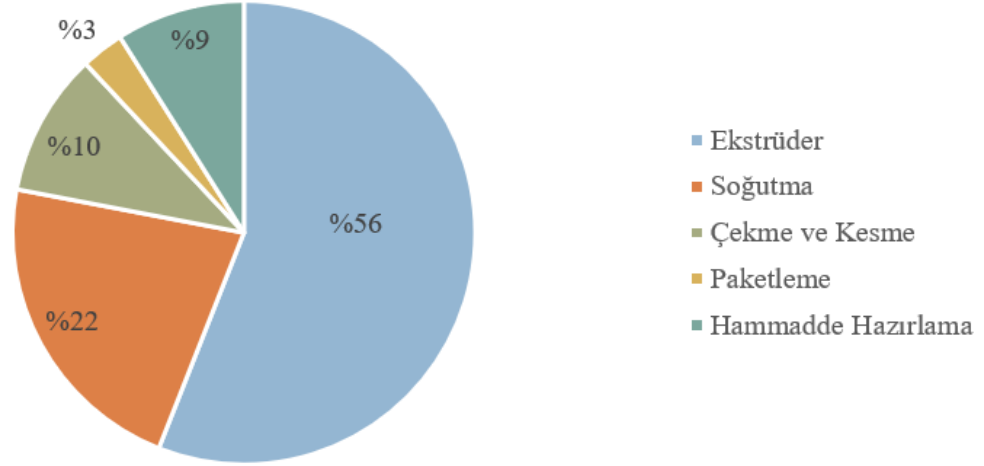
Şekil 4.1. PVC profil üretiminin küresel ısınma potansiyeli.

PVC'nin yaşam döngüsü çevresel etkilerinde hammadde eldesi en fazla etkinin geldiği basamağı oluşturmaktadır. PVC üretiminde kullanılan hammaddelerden gelen çevresel etkiler incelendiğinde Şekil 4.2'de gösterildiği gibi %69'luk pay ile en fazla etkinin geldiği hammaddenin PVC hammadde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2. PVC üretiminde kullanılan hammadde ve yardımcı malzemelerin küresel ısınma potansiyelindeki payları.

Şekil 4.3’de PVC üretim sürecinden gelen çevresel etkinin üretim basamaklarına göre dağılımı gösterilmiştir. Üretim aşamasındaki en fazla karbon ayak izi ekstrüzyon (%56) aşamasından kaynaklanmaktadır.



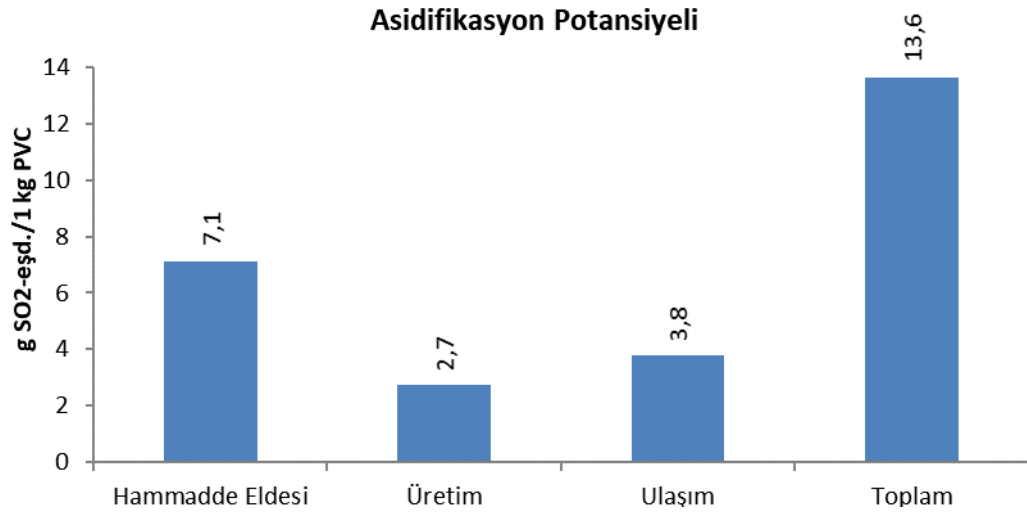
Şekil 4.3. PVC üretim aşamalarının küresel ısınma potansiyelindeki payları.

4.1.2. Diğer çevresel etkiler

PVC profil üretimi için yaşam döngüsü boyutunda hesaplanan diğer çevresel etkiler yani asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli CCalC2 programı yardımıyla hesaplanmış olup aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

Asidifikasyon Potansiyeli

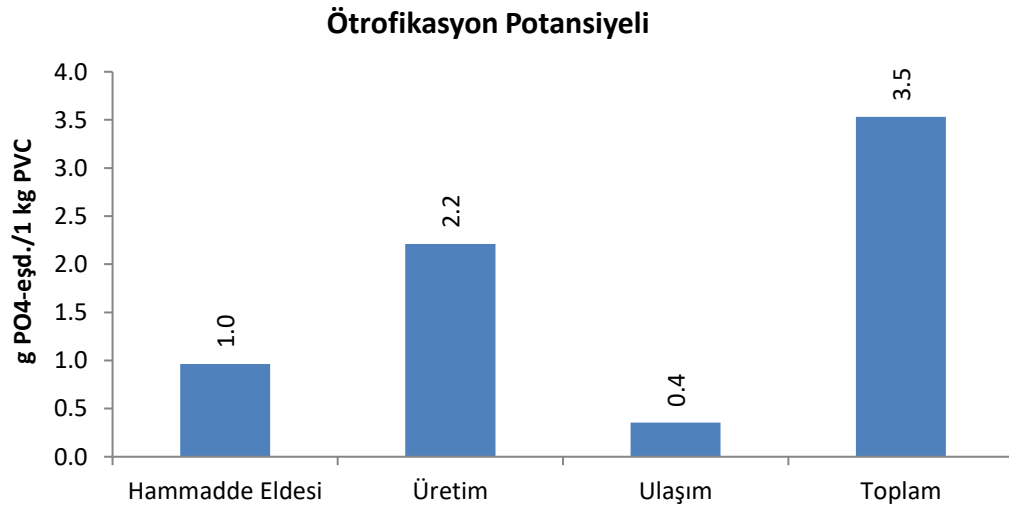
Yapılan çalışmanın sonucunda 1 kg PVC profil üretiminin asidifikasyon potansiyeli toplam 13,6 g SO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4’de gösterildiği gibi bu etkiye en fazla sebep olan yaşam döngüsü basamağı hammadde eldesi (%52) basamağıdır.



Şekil 4.4. PVC profil üretiminin asidifikasyon potansiyeli.

Ötrofikasyon Potansiyeli

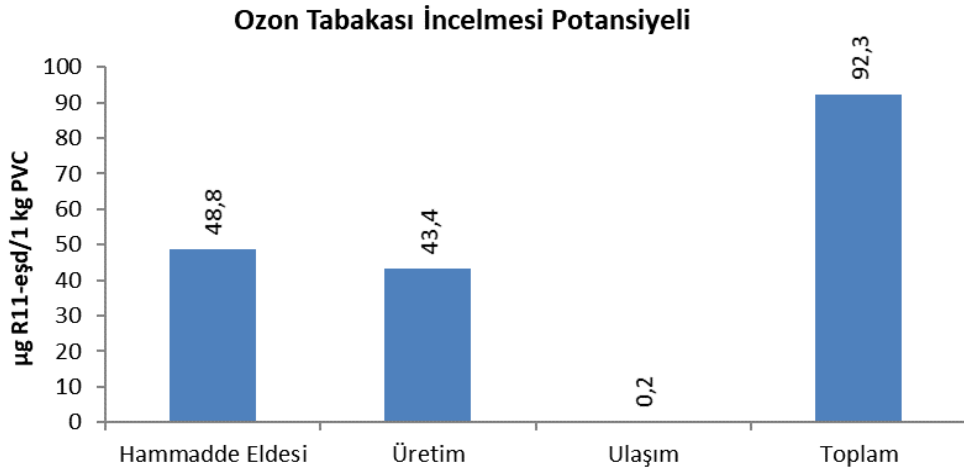
Yapılan çalışmanın sonucunda ötrofikasyon potansiyeli Şekil 4.5’de görüldüğü gibi toplam 3,5 g PO₄⁻³ eşd./1 kg PVC profil olarak bulunmuştur. Ötrofikasyon potansiyelinin oluşmasını en fazla etkileyen yaşam döngüsü basamağı PVC profil üretim (%63) aşamasıdır.



Şekil 4.5. PVC profil üretiminin ötrofikasyon potansiyeli

Ozon Tabakası İncelme Potansiyeli

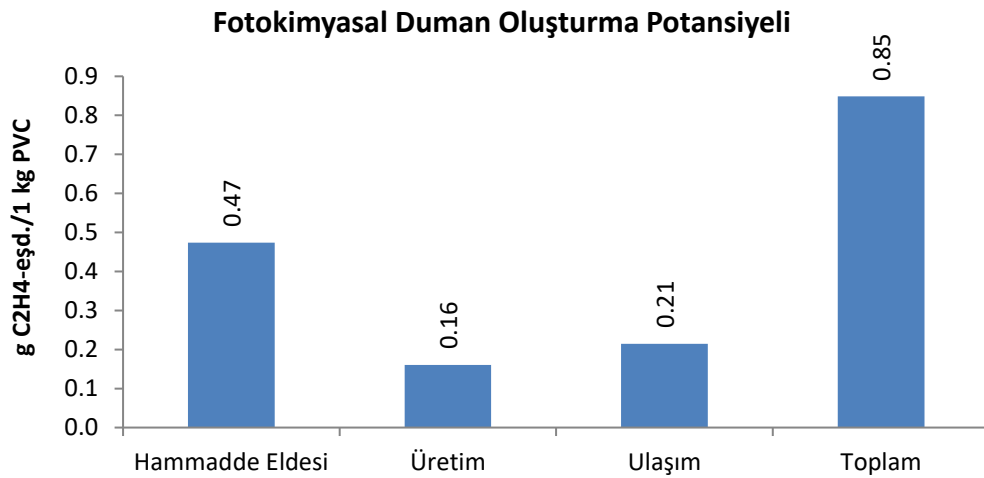
Çalışmamızda toplam ozon tabakası incelme potansiyeli toplam 92,3 μg R11 eşd./1 kg PVC profil olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6'dan görüleceği gibi bu çevresel etkinin geldiği basamaklar hammadde eldesi (%53) ve üretim (%47) basamaklarıdır.



Şekil 4.6. PVC profil üretiminin ozon tabakası incelmesi potansiyeli.

Fotokimyasal Duman Oluşturma Potansiyeli

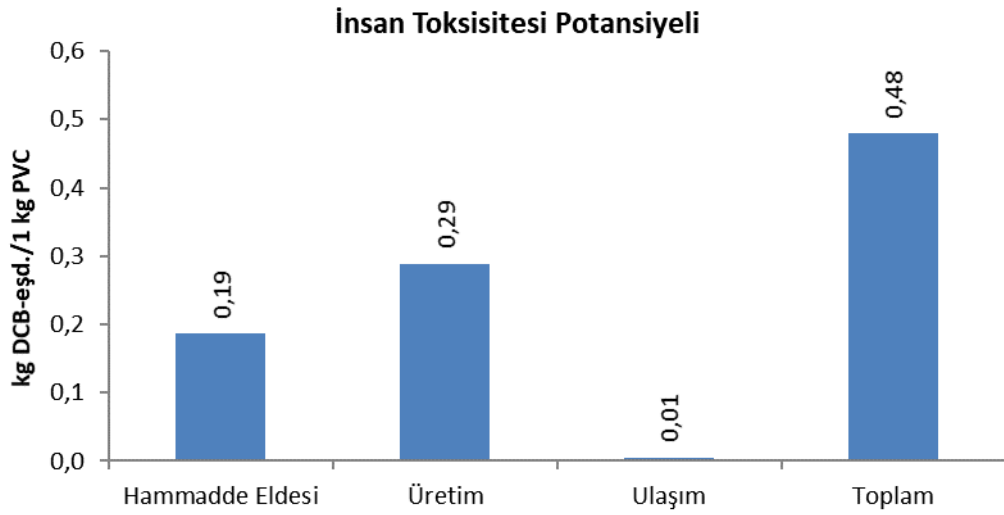
Şekil 4.7'de belirtildiği gibi oluşturulan yaşam döngüsü modeli ile elde ettiğimiz fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli toplam 0,85 g C_2H_4 eşd./1 kg PVC profil olarak hesaplanmıştır. Fotokimyasal duman oluşumuna en büyük etken ise hammadde eldesi (%55) aşamasıdır.



Şekil 4.7. PVC profil üretiminin fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli.

İnsan Toksikitesi Potansiyeli

Yapılan çalışma sonunda insan toksisitesi potansiyeli toplam 0,48 kg DCB-eşd./1 kg PVC profil olarak bulunmuştur. Bu etkiye ait yaşam döngüsü basamaklarının etkileri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu etki en fazla üretim (%60) basamağından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.8. PVC profil üretiminin insan toksisitesi potansiyeli.

4.2.PVC Üretiminin Çevresel Etkilerinin Azaltılması

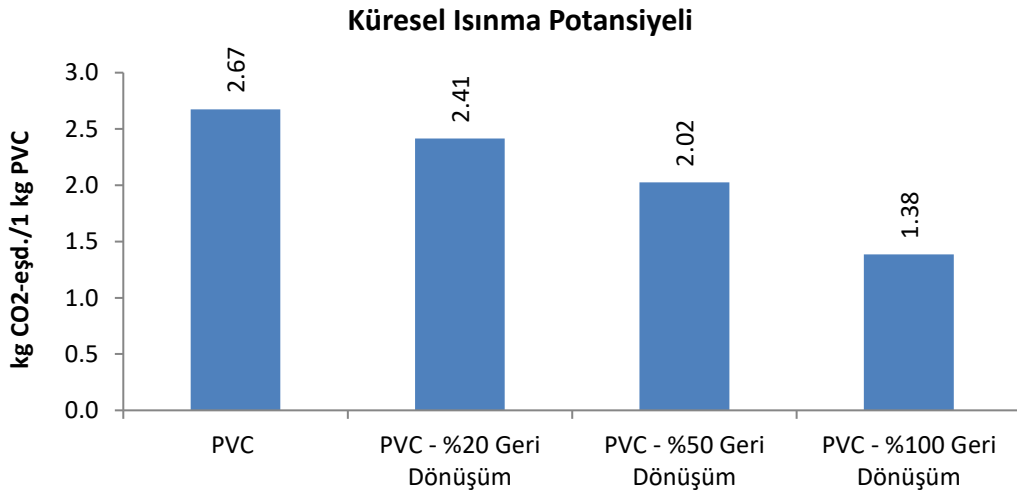
PVC üretiminden kaynaklanan çevresel etkiler yaşam döngüsü analizi yöntemi kullanılarak PVC üretimdeki beşikten kapıya bütün basamaklar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar bu üretim sürecinden kaynaklanan yaşam döngüsü boyutundaki çevresel etkilerin en fazla geldiği basamakları göstermiştir. Bu sonuçlara dayanarak hammadde ve üretim basamakları için alternatif iyileştirme modelleri oluşturulmuş ve bu iyileştirmelerin gerçekleşmesi durumunda 1 kg contalı PVC üretiminden kaynaklanan çevresel etkilerinin nasıl düşürülebileceği analiz edilmiştir.

Oluşturulan modellerde PVC hammadde geri dönüşüm oranını artırma, enerji miktarını belirli bir oranda azaltma ve enerji türlerinde yenilebilir enerji kaynağının kullanıldığı durumlar alternatif olarak değerlendirilmiştir. PVC üretiminin çevresel etkilerinin azaltılması amacıyla oluşturulan iyileştirme modellerine ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.2.1. Geri dönüşümlü malzeme kullanılması

Çalışmamızda çevresel etkilerin büyük oranda hammadde eldesi basamağından kaynaklandığı sonucu elde edilmiştir. Hammaddelerden kaynaklanan çevresel etkilerin azaltılması amacıyla geri dönüşümlü PVC kullanılması alternatifi üzerine iyileştirme çalışması yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

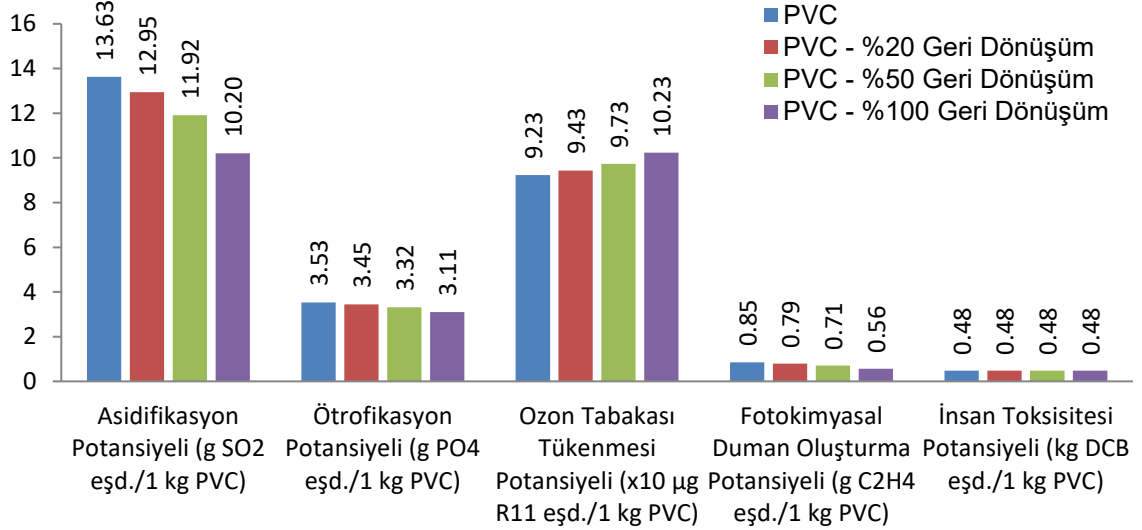
Geri dönüşüm oranının %20, %50 ve %100 olduğu durumlar üzerine çalışılmıştır. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi ürün üretiminde kullanılan PVC hammaddenin %20'sinin geri dönüştürülmüş ürünlerden elde edilen PVC hammaddesi ile değiştirilmesi toplam küresel ısınma potansiyelini %10 azaltarak 2,67 CO₂ kg eşd./1 kg PVC profilden 2,41 CO₂ kg eşd./1 kg PVC profile düşürmüştür. %50'sinin geri dönüştürülmüş PVC kullanılarak üretilmesi, toplam küresel ısınma potansiyelini %25 azaltarak 2,02 CO₂ kg eşd./1 kg PVC profile, %100 geri dönüştürülmüş PVC hammadde kullanılması ise küresel ısınma potansiyelini %48 azaltarak 1,38 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profile düşürmüştür.



Şekil 4.9. Geri dönüşümün küresel ısınma potansiyeline etkisi.

Hammadde eldesi basamağındaki PVC hammaddenin belirtilen oranlarda geri dönüştürülmüş PVC ile değiştirilmesi küresel ısınma potansiyelinin yanı sıra asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli çevresel etkilerinde Şekil 4.10'da gösterildiği gibi azalmaya neden olmuştur. Geri dönüşümlü PVC hammadde kullanımı insan toksisitesi potansiyeli etkisinde

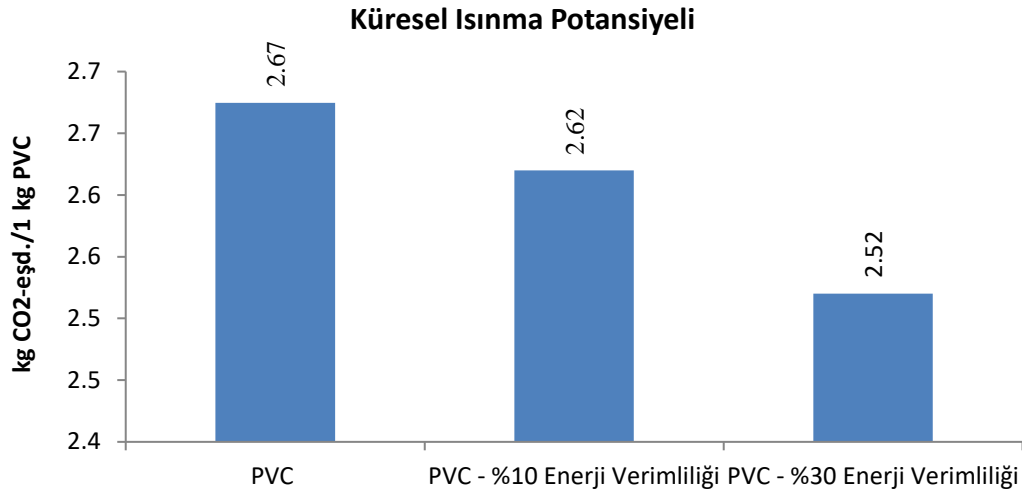
herhangi bir değişikliğe neden olmazken, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ise geri dönüşüm işlemi nedeniyle artış göstermiştir.



Şekil 4.10. Geri dönüşümün diğer çevresel etki kategorilerine etkisi

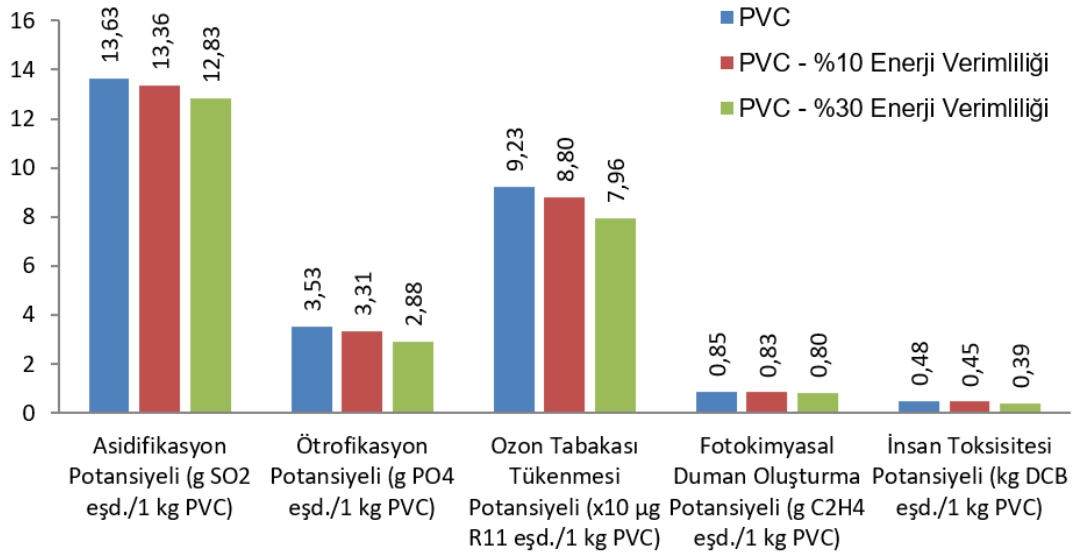
4.2.2. Enerji verimliliği uygulanması

Alınacak tedbirler doğrultusunda enerji verimliliğinin %10 ve %30 artırılması durumunda küresel ısınma potansiyeli etkisinde Şekil 4.11’de görüldüğü gibi azalma görülmüştür. Enerji verimliliğinin artırılması direk üretim süreçleri ile bağlantılı olduğundan karşılaşılan çevresel etki azalması karşımıza üretim basamağında ortaya çıkmaktadır. Enerji verimliliğinin %10 artırılması küresel ısınma potansiyelinin %2 azalarak 2,62 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profile düşmesine neden olacaktır. Enerji verimliliğinin %30 artırılması ise küresel ısınma potansiyelinin %6 azalarak 2,52 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profile düşmesine neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Enerji verimliliği uygulanmasının küresel ısınma potansiyeline etkisi.

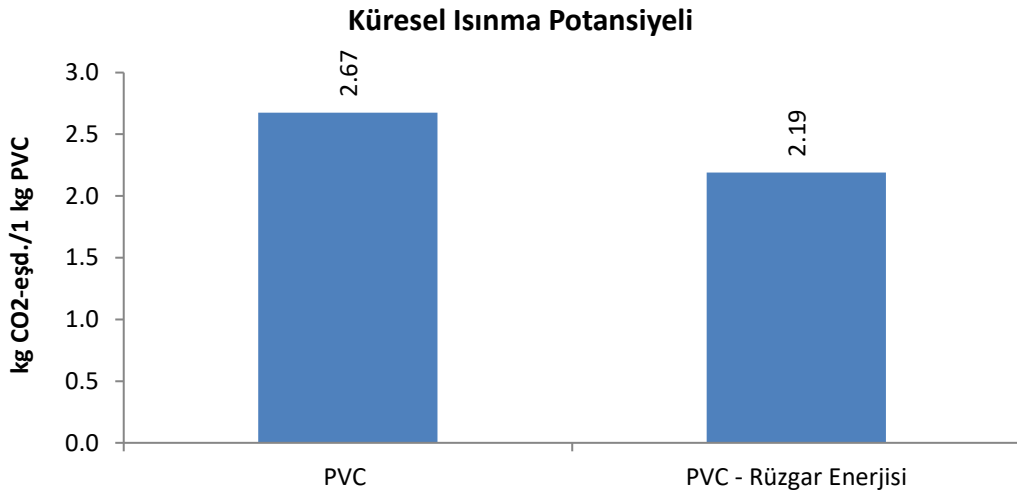
Üretim basamağında enerji verimliliğinin %10 veya %30 oranlarında artırılması küresel ısınma potansiyeli etkisindeki benzer şekilde Şekil 4.12’de gösterildiği gibi diğer tüm çevresel etkilerde de azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.12. Enerji verimliliği uygulanmasının diğer çevresel etki kategorilerine etkisi.

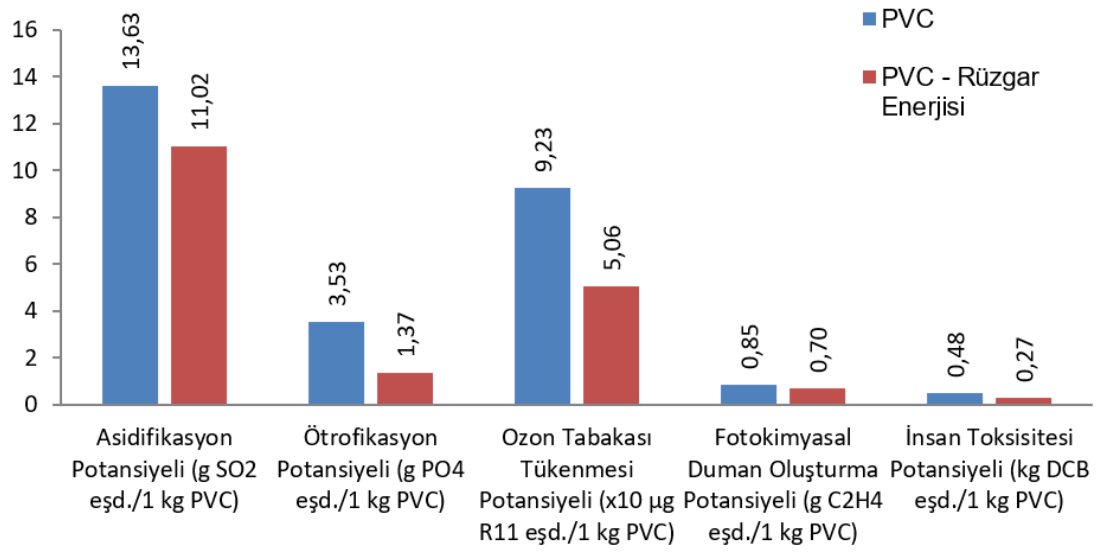
4.2.3. Alternatif enerji kaynağı kullanılması

Bir diğer alternatif senaryoda ise üretimde kullanılan enerjinin yenilenebilir bir enerji türü olan rüzgar enerjisinin kullanıldığı varsayılmıştır. Türkiye’de kullanılan enerjinin %68 gibi yüksek bir kısmı fosil yakıt kaynaklıdır ve bu da ürünlerin çevresel etkilerinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Kullanılan enerji kaynağının %100 yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisiyle değiştirilmesi küresel ısınma potansiyelinin %18 azalarak 2,67 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profilden 2,19 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profile düşmesine neden olacaktır. Bu durumda üretim aşamasından gelen küresel ısınma potansiyeli etkisi 0,03 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profil olmaktadır.



Şekil 4.13. Alternatif enerji kaynağı kullanılmasının küresel ısınma potansiyeline etkisi.

Üretim basamağında yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin kullanımı, küresel ısınma potansiyeli etkisindeki benzer şekilde Şekil 4.14’de görüldüğü üzere diğer çevresel etkilerde de azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.14. Alternatif enerji kaynağı kullanılmasının diğer çevresel etki kategorilerine etkisi.

5. TARTIŞMA

Özellikle son yıllarda iklim değişikliğinden kaynaklanan endişelerden dolayı daha sürdürülebilir ürün ve üretim süreçlerine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Mevcut seviyelerde, plastik yaşam döngüsünden kaynaklanan sera gazı emisyonları, küresel topluluğun küresel sıcaklığı 1,5 °C derecenin altında tutmasını engellemektedir. Plastik üretim ve kullanım şu anda planlandığı gibi büyürse, 2030 yılına kadar bu emisyonların yılda 1,34 gigatona ulaşabileceği öngörülmektedir. 2050 yılına gelindiğinde, plastikten kaynaklanan sera gazı emisyonlarının 56 gigatona ulaşabileceği düşünülmektedir. Bu rakam ise kalan tüm karbon bütçesinin %10-13'üne tekabül etmektedir (Lisa Anne Hamilton, 2019). Bu da plastik sektörünün sürdürülebilirlik açısından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu yüzden en az hammadde, doğal kaynak ve enerji kullanımı ile sürdürülebilir plastik üretimi sağlamak önemli bir noktadır.

Bu konuyla ilgili olarak sonuçlarımız, yaptığımız çalışmayla fonksiyonel birimlerinin aynı olması ve sistem sınırlarının neredeyse aynı olmasından dolayı ülkemizde faaliyet göstermekte olan farklı firmaların ürünleri için oluşturdukları Çevresel Ürün Beyanı (EPD) belgelerindeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır (EPD, 2016; Metsims, 2015; IBU, 2015a, 2015b). Bu karşılaştırma sonucunda bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçların EPD belgelerinde belirtilen sonuçlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Örnek olarak 1 kg PVC üretimi için küresel ısınma potansiyeli için bu belgelerdeki sonuçların en düşük 2,70 kg CO₂ eşd. (IBU, 2015a) ve en yüksek 5,43 kg CO₂ eşd. (EPD, 2016) olduğu görülmüştür. Bizim bu çevresel etki kategorisi için bulduğumuz sonuç 2,67 kg CO₂ eşd./1 kg PVC profildir. Diğer çevresel etkiler için de benzer durum söz konusudur. EPD belgelerindeki çevresel etkilere ait sonuçlardan daha küçük sonuçlar bulmamızın sebebi olarak veri alınan firmanın ürünlerinin çoğunlukla gelişmiş ülkelere satılması ve kullanılan hammaddelerin çevresel uygunluklarının bu ülkelerin standartlarına göre denetlenmesi olarak gösterilebilmektedir. Bunun yanı sıra bu raporlarda da çalışmamızdaki sonuçlara benzer şekilde çevresel etkilerin büyük bir kısmı hammadde temini aşamasından gelmektedir. Yayınlanan raporların iki tanesinden farklı olarak çalışmamızda bertaraf aşaması veri eksikliğinden dolayı sistem sınırları içerisine alınamamıştır. Yayınlanan raporlarda 1 kg PVC profil üretimi için bu yaşam döngüsü basamağından gelen çevresel etki 0,406 kg CO₂ (Metsims, 2015) ve 0,439 kg CO₂ (EPD, 2016) eşd.'dir. Bu basamaktan gelen çevresel etkilerin küçük olmasından dolayı veri

eksikliğinden dolayı bu basamağı sistem sınırlarına ekleyemememiz sonuçlarımızı değiştirmemektedir.

EPD belgelerinde, yaşam döngüsü çevresel etki kategorileri için sonuç sunarken ürün veya süreç için çevresel sürdürülebilirliğin artırılması konusunda bir iyileştirme çalışması veya önerisinde bulunulmadığı için karşılaştırmalar sadece bulunan çevresel etki değerleri üzerinden yapılabilmektedir. Bizim araştırmamızın EPD raporlarından farkı ise küresel boyuttaki ve ülkemizdeki sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmeye yardımcı olmak ve PVC profil üreticilerine daha sürdürülebilir bir süreç işletmeleri konusunda yardımcı olunması amacıyla yola çıkılarak hazırlanan bir çalışma olmasıdır. Üreticiden alınan direkt ve doğrulanabilir veriler kullanılarak küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli hesaplanmış, en fazla etkinin geldiği basamaklar ve süreçler tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre;

Küresel ısınma potansiyeli için en yüksek etki %76 ile hammadde eldesi basamağından gelmektedir. Bu nedenle PVC üretiminde kullanılan hammaddelerden gelen çevresel etkiler incelendiğinde, Bkz.Şekil 4.2’de gösterildiği gibi %69’luk pay ile en fazla etkinin geldiği hammaddenin PVC hammadde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi profil üretiminde PVC’nin miktar olarak fazla kullanılması ve PVC üretim sürecidir. Genel olarak PVC fosil kaynaklı petrol ile tuz kullanılarak süspansiyon yöntemiyle üretilmektedir ve üretim süreci enerji yoğun bir süreçtir. Sistemimizde kullanılan Türkiye’de üretilen elektriğin %68’i fosil yakıt kullanan santraller (TEIAS, 2018) ile üretilmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı yoğun çevresel etkiye neden olmaktadır. Bkz. Şekil 4.3’de gösterildiği üzere üretim aşamasındaki en fazla karbon ayak izi ise %56 ile ekstrüzyon aşamasından kaynaklanmaktadır. Ekstrüzyon aşamasının karbon salınımındaki en büyük etkiye sahip olmasının sebebi ise bu basamakta ısıtma işleminden kaynaklı kullanılan enerji miktarının fazla olmasıdır (Bkz. Çizelge 3.3).

Asidifikasyon potansiyeli için Bkz. Şekil 4.4’de gösterildiği gibi bu etkiye en fazla sebep olan yaşam döngüsü basamağı hammadde eldesi (%52) basamağıdır. Hammadde eldesindeki yüksek oranın sebebi fosil kaynaklı petrol ile tuz kullanılarak süspansiyon yöntemiyle üretilen PVC hammaddedir.

Ötrotifikasyon potansiyeli oluşmasını en fazla etkileyen yaşam döngüsü basamağı PVC üretim (%63) aşamasıdır. Üretim aşamasındaki fazla etkinin sebebi ise yüksek enerji kullanımı nedeniyle ekstrüder aşamasıdır (Bkz. Çizelge 3.3).

Ozon tabakası incelme potansiyeli için Bkz. Şekil 4.6'dan görüleceği gibi bu çevresel etkinin geldiği basamaklar hammadde eldesi (%53) ve üretim (%47) basamaklarıdır. Hammadde eldesindeki yüksek etkinin sebebi havada ozon tabakası incelmesine neden olacak tepkimeleri hızlandırması nedeniyle titanyum dioksittir. Üretim aşamasındaki fazla etkinin sebebi ise yüksek enerji kullanımı nedeniyle ekstrüder aşamasıdır (Bkz. Çizelge 3.3).

Fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli için Bkz. Şekil 4.7'de belirtildiği gibi, oluşturulan yaşam döngüsü modeli ile elde ettiğimiz fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli toplam 0,85 g C₂H₄ eşd./1 kg PVC profil olarak hesaplanmıştır. Fotokimyasal duman oluşumuna en büyük etken ise hammadde eldesi (%55) aşamasıdır. Hammadde eldesinden gelen yüksek etkinin sebebi süspansiyon yöntemiyle üretilmiş olan PVC hammaddedir.

İnsan toksisitesi potansiyeline ait yaşam döngüsü basamaklarının etkileri Bkz. Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu etki en fazla üretim (%60) basamağından kaynaklanmaktadır. Bu çevresel etkinin üretim basamağında yüksek olmasının sebebi enerji tüketimi yüksek ekstrüder aşamasıdır (Bkz. Çizelge 3.3).

Bulunan sonuçlara göre oluşan çevresel etkilerin büyük bir kısmında etken olarak fosil kaynaklı süspansiyon PVC Hammadde karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun iyileştirilmesi adına bizim çalışmamızda geri dönüşüm oranının %20, %50 ve %100 olduğu durumlar üzerine çalışılmıştır.

Stichnothe ve Azapagic, (2013) in PVC geri dönüşüm ile ilgili yaptıkları çalışmaya göre yeni üretim PVC granülün hammadde olarak kullanımını, tüketici sonrası atıklardan geri dönüştürülen PVC granül hammaddesiyle değiştirmek, yaklaşık 2 ton CO₂ eşd./1 ton PVC tasarruf sağlarken, PVC sanayi sonrası fire atıklara kıyasla 1,8 ton CO₂ eşd. tasarruf sağladığı sonucunu elde etmişlerdir. (Ye vd., 2017)'e göre Senaryo 1 geri dönüştürülmemiş PVC üretimini, Senaryo 2 ise geri dönüşümden üretilen PVC üretimini temsil etmektedir. İlk senaryodan elde edilen sonuçların tarımsal arazi işgali dışındaki çoğu kategoride oldukça büyük bir çevresel etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bizim çalışmamızda PVC hammaddenin %20'sinin geri dönüştürülmüş ürünlerden elde

edilen PVC hammaddesi ile değiştirilmesi toplam küresel ısınma potansiyelini %10, %50'sinin geri dönüştürülmüş PVC kullanılarak üretilmesi toplam küresel ısınma potansiyelini %25, %100 geri dönüştürülmüş PVC hammadde kullanılması ise küresel ısınma potansiyelini %48 azaltmıştır (Bkz. Şekil 4.9.). Bu sonuca göre hammadde karışımındaki geri dönüşümlü PVC hammadde kullanımı arttıkça küresel ısınma potansiyeli etkisi azaltmaktadır. Hammadde eldesi basamağındaki PVC hammaddenin belirtilen oranlarda geri dönüştürülmüş PVC ile değiştirilmesi küresel ısınma potansiyelinin yanı sıra asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli çevresel etkilerinde de azalmaya neden olmuştur (Bkz. Şekil 4.10.). Sonuçlarımız, Stichnothe ve Azapagic, (2013) ve Ye vd., (2017) çalışmalarındaki çevresel etkileri azaltmak için geri dönüşümlü ürün kullanımı önerilerini destekler niteliktedir.

Çevresel etkilerin yoğun olarak kaynaklandığı bir diğer aşama ise yüksek oranda enerji tüketimi nedeniyle ekstrüzyon aşamasıdır (Bkz. Çizelge 3.3). Fakat çalışmamızda elde edilen sonuçlara göre üretim aşamasının toplam küresel ısınma potansiyeline etkisi %19 olarak bulunmuş olup Wang vd., (2014) çalışmasında bahsedildiği %97 gibi büyük bir oranla karşılaşılmamıştır. Bunun sebebi olarak ise Wang vd., (2014) çalışmasında pencere üretiminin konu alınması ve pencere üretiminde çerçeve bileşenlerinin üretiminin yanı sıra çok yüksek miktarda enerji harcanan cam üretimi ve cam-çerçeve montajı aşamasının da bulunmasıdır. Özet bir tabirle çalışmamız ve söz konusu çalışmanın fonksiyonel birimleri farklılık göstermektedir.

Üretim sürecinden gelen çevresel etkilerin iyileştirilmesi adına çalışmamızda enerji verimliliğinin %10 ve %30 artırılması durumunda küresel ısınma potansiyeli ve diğer çevresel etkilerin nasıl değiştiğini görebilmek için iki alternatif senaryo oluşturulmuştur.

Asif vd., (2005) çalışmalarında PVC ve alüminyum kaplı pencerelerin ise yüksek gömülü enerji değerlerine sahip oldukları ve bu nedenle çevresel etkilerinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Asif vd., (2002) çalışmalarında yine PVC profil üretiminin yüksek gömülü enerjiye sahip olduğunu, bu nedenle de küresel ısınma potansiyeli ve diğer çevresel etkilerin yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Salazar ve Sowlati, (2008) çalışmalarında fosil kaynaklı enerji kaynaklarının kullanımının çevresel etkileri artırdığını belirtmişler ve enerji verimliliğinin artırılmasının çevresel etkileri azaltacağını

belirtmişlerdir. Bizim sonuçlarımıza göre enerji verimliliğinin %10 artırılması küresel ısınma potansiyelini %2, %30 artırılması ise %6 azaltmıştır (Bkz. Şekil 4.11.) Enerji verimliliğinin artırılması küresel ısınma potansiyelinin yanı sıra diğer çevresel etkilerin de azalmasına neden olmuştur (Bkz Şekil 4.12.). Elde edilen sonuçlar üretim proseslerinde enerji verimliliğinin artırılmasının da çevresel etkileri azaltmak adına alternatif bir metot olabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar Asif vd., (2005) ve Asif vd., (2002) çalışmalarındaki önerileri destekler niteliktedir.

Üretim basamağından gelen enerji kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması adına oluşturulan bir diğer alternatif senaryo ise üretimde %68 fosil kaynaklı enerji kullanımı yerine %100 rüzgar enerjisi kullanımınıdır. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisinin çalışmamızda tercih edilme sebebi ise Türkiye’de rüzgar enerjisi kullanımının gittikçe daha yaygın kullanım alanı bulmasından kaynaklıdır.

Salazar ve Sowlati, (2008) çalışmalarında fosil kaynaklı enerji kaynaklarının kullanımının çevresel etkileri artırdığını belirtmişlerdir. Ye vd., (2017) isimli çalışmada da yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının çevresel etkileri azaltacağı önerisinde bulunulmuştur. Çalışmamızda PVC pencere profili üretiminde yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin kaynak olarak kullanımına dair alternatif senaryo oluşturulmuştur. Üretim aşamasında %100 rüzgar enerjisi kullanımı küresel ısınma potansiyeli etkisini %18 oranında azaltmıştır (Bkz. Şekil 4.13). Küresel ısınma potansiyeli etkisinin yanı sıra bu senaryoda da diğer çevresel etkilerde küresel ısınma potansiyeli gibi azalmalar söz konusu olmuştur (Bkz. Şekil 4.14.) Sonuçlarımız Salazar ve Sowlati, (2008) ve Ye vd., (2017) çalışmalarındaki önerileri destekler niteliktedir.

6.SONUÇLAR

Yapılan çalışmada plastik sektörünün küresel boyutta ve ülkemizdeki durumunu gösteren istatistiksel veriler paylaşılmıştır. İstatistikler göz önüne alındığında plastik sektörünün ne denli büyük bir sektör olduğu yani plastiklerin gündelik hayatımızın vazgeçilmezi olduğu açıkça görülmektedir. Hayatımızda bu denli yer kaplayan plastiklerin biyolojik bozunmaya uğramadan doğada uzun yıllar kalabilmelerinden dolayı çevreye zarar verdiği, bu nedenle de bu ürünlere ait çevresel ürün değerlendirmelerin belirlenmesinin de ne kadar önemli olduğu vurgulanmıştır.

Plastiklerin en çok kullanılan türlerinden birinin de PVC plastikler olduğu açıkça görülmektedir. Kablo sanayinden kapı pencere profil üretimine kadar çok yaygın bir kullanım alanı bulan PVC plastikler, aynı zamanda ülkemiz için önemli bir ihraç kalemini de oluşturmaktadır.

Çalışmamızın ana konusu olan PVC pencere profilleri, küresel boyutta ve ülkemizde tüketilen toplam PVC miktarında önemli bir yer almaktadır. Aynı zamanda PVC profiller de ülkemiz için önemli bir ihraç kalemini de oluşturmaktadır. Plastiğin çevresel etkisi konusunda bilincin hızla artmasıyla hem gelecek nesiller için daha yaşanılabilir bir Dünya bırakmak, hem de ekonomik anlamda ülkemizin kalkınması için PVC malzemeye ait çevresel ürün değerlendirmeleri büyük önem arz etmektedir.

Çalışmamızda 1 kg PVC profil üretiminin başta küresel ısınma potansiyeli olmak üzere, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, insan toksisitesi potansiyeli, ozon tabakası tükenmesi potansiyeli ve fotokimyasal duman oluşturma potansiyeli çevresel etkileri incelenmiştir. Bulunan sonuçlar daha önce ülkemizde faaliyet gösteren PVC profil üreticileri için hazırlanan EPD raporları ve literatürde daha önce yayınlanmış olan çalışmalarla karşılaştırılıp, konu üzerindeki değerlendirmeler yapılmış ve çevresel etkilerin azaltılması konusunda iyileştirme önerilerinde bulunulmuştur.

Yapılan iyileştirme önerilerinin doğrultusunda, PVC profillerin kullanım sonrası geri dönüştürülmesinin çevresel etkilerin azaltılması konusunda en önemli etken olduğu bulunmuştur. Bunun sebebinin ise PVC hammadde üretim sürecinin çevresel etkisinin çok yüksek olması olarak belirtilmiştir. Daha sürdürülebilir bir PVC pencere profili üretimi için ülkemizde ve Dünya’da konuyla ilgili yürütülen faaliyetlerin geri dönüşüm noktasında yoğunlaşması gerektiği görülmektedir. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji

tüketiminin teşvik edilmesi ve kullanılan enerjinin de verimli kullanılması gerektiği, sürdürülebilir PVC pencere profili üretimi açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Alvarenga, R. A., J. Dewulf, S. De Meester, A. Wathélet, J. Villers, R. Thommeret ve Z. Hruska. (2013). Life cycle assessment of bioethanol based PVC: Part 1: Attributional approach, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7: 386-95.
- Andrady, A. L. (2003). *Plastics and the Environment* John Wiley & Sons, New Jersey.
- Andrady, A. L., ve M. A. Neal. (2009). Applications and societal benefits of plastics, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364: 1977-84.
- Asif, M., A. Davidson ve T. Muneer. (2002). Life cycle of window materials-A comparative assessment, *Millenium Fellow School of Engineering*, Napier University, Edinburgh.
- Asif, M., T. Muneer ve J. Kubie. (2005). Sustainability analysis of window frames, *Building Services Engineering Research and Technology*, 26: 71-87.
- Atilgan, B., ve A. Azapagic. (2016a). Assessing the Environmental Sustainability of Electricity Generation in Turkey on a Life Cycle Basis, *Energies*, 9: 31.
- Atilgan, B., ve A. Azapagic. (2016b). Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts, *Renewable Energy*, 89: 649-57.
- Aydın, H. (2004). PVC üretimi ve katkı maddeleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Aydın Mammadov, N. C. (2017). Yaşam Döngüsü Analizi: Tanımı, Amacı, Sürdürülebilirlik Kavramlarıyla İlişkisi ve Sanayideki Yeri, *Anahtar*, 29: 4-10.
- Azapagic, A. (2006). Life cycle assessment as an environmental sustainability tool, Renewables-Based Technology: *Sustainability Assessment*: 87-110.
- Azapagic, A. (2010a). Assessing environmental sustainability: Life cycle thinking and life cycle assessment, *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*: 56-80.
- Azapagic, A. (2010b). Life cycle assessment as a tool for sustainable management of ecosystem services, in, Ecosystem Services *The Royal Society of Chemistry*.
- Barra, R., ve S. Leonard. (2018). Plastics and the circular economy, In *54th Global Environment Facility Council Meeting*.
- Baumann, Henrikke, ve Anne-Marie Tillman. 2004b. *The Hitch Hiker's Guide to LCA - An orientation in life cycle assessment methodology and application* (Studentlitteratur AB).
- Bruijn, H., R. Duin ve M. A. Huijbregts. (2002). *Handbook Life Cycle Assessment*.
- CCaLC. (2016). CCaLC2 for Windows Manual, Manchester University.

- Consulting, M. S. (2015). Environmental Product Declaration, Fırat Plastik Kauçuk Sanayi ve Ticaret A.Ş, Metsims Sustainability Consulting.
- ELCD. (2019). European Platform on Life Cycle Assessment, https://ec.europa.eu/knowledge4policy/dataset/jrc-eplca-129b8f8d-7667-41bc-91f4-421bfcdcf8c3_en., (15.10.2019).
- EPD. (2016). Çevresel Ürün Beyanı, PVC Profil, SARAY Döküm ve Madeni Aksam San.Turizm A.Ş, IEPD TURKEY, İstanbul-Türkiye.
- Europa, P. (2016). Plastics – the Facts 2016, An analysis of European plastics production, demand and waste data, Plastics Europa.
- European Commission. (2004). Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials, In, edited by PE Europe GMBH, Institutet for Produktudvikling (IPU), DTU, RANDA GROUP 325.
- Geyer, R. J., Jenna R; Law, Kara Lavender. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science advances*, 3: e1700782.
- Gilbert, M. (2017). Chapter 1- Plastics Materials: Introduction and Historical Development.' in M. Gilbert (ed.), *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)*. Butterworth-Heinemann.
- Guinée, J. B., M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. De Koning, L. Van Oers, A. W. Sleswijk, S. Suh ve H. U. de Haes. (2001). 'Handbook on life cycle assessment', Operational guide to the ISO standards, 1.
- Guinée, J. B., M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. d. Koning, L. v. Oers, A. W. Sleswijk, S. Suh, H. A. U. d. Haes, H. d. Bruijn, R. v. Duin, M. A. J. Huijbregts, E. Lindeijer, A. A. H. Roorda, B. L. v. d. Ven ve B. P. Weidema. (2004). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards* Kluwer Academic Publishers.
- Hosler, D., S. L. Burkett ve M. J. Tarkanian. (1999). Prehistoric polymers: rubber processing in ancient Mesoamerica, *Science*, 284: 1988-91.
- IBU. (2015a). Environmental Product Declaration, Ege Profil Tic. ve San. A.Ş. IBU-Institut Bauen und Umwelt e.V.
- IBU. (2015b). Environmental Product Declaration, Ege Profil Tic. ve San. A.Ş., WİNSA IBU- Institut Bauen und Umwelt e.V.
- ISO. (2006a). Life Cycle Assessment- Principles and Framework. In. Geneva, Switzerland: International Standard Organization.
- ISO. (2006b). Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland: International Standard Organization.

- Kılıç, M., ve E. Yüce. (2014). PVC ve PET atıkların seçimli flotasyonu Bölüm 1: Plastikler; çevresel etkileri, geri dönüşümü, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29: 79-93.
- Lisa Anne Hamilton, S. F. (2019). Plastic & Climate The Hidden Costs of a Plastic Planet. In, edited by C. M. Amanda Kistler. CIEL.
- Morten W. Ryberg, A. L., Michael Hauschild. (2018). Mapping of global plastics value chain and plastics losses to the environment, Edited by A. L. Morten W. Ryberg, Michael Hauschild 99. United Nations Environment Programme.
- PAGEV. (2017). Türkiye PVC Sektör İzleme Raporu, 2017/9. Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı.
- PAGEV (2019,6). Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı. (2019). Türkiye Plastik Sektörü İzleme Raporu 2017/6., 32.
- Plastics Insight. Polyvinyl Chloride (PVC) Properties, Production, Price, Market, and Uses, <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/pvc/>,(15.10.2019).
- PÜKAD. (2016). 2016 yılı Türkiye Cam ve Pencere Sektörü İzleme Raporu., 12. Pencere ve Kapı Sektörü Derneği.
- Raheem, A., ve L. Uyigue. (2010). The conversion of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) into a thermosetting polyester resin, *Archives of Applied Science Research*, 2: 240-54.
- Rebitzer, G., T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W. P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema ve D. W. Pennington. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, *Environment International*, 30: 701-20.
- Rubin, I. I. (1990). *Handbook of Plastic Materials and Technology* Wiley New York.
- Ryan, G. P. (2015). A Brief History of Marine Litter Research, in M. Bergmann, L. Gutow and M. Klages (eds.), *Marine Anthropogenic Litter* Springer International Publishing, Cham.
- Saeki, Y., ve T. Emura. (2002). Technical progresses for PVC production, *Progress in polymer science*, 27: 2055-131.
- Salazar, J., ve T. Sowlati. (2008). Life cycle assessment of windows for the North American residential market: case study, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23: 121-32.
- SETAC. (1991). *A Technical Framework for Life-cycle Assessment: Workshop Report: August 18-23, 1990, Smugglers Notch*, Vermont Society of Environmental Toxicology and Chemistry.

- Sinha, A., ve A. Kutnar. (2012). Carbon footprint versus performance of aluminum, plastic, and wood window frames from cradle to gate, *Buildings*, 2: 542-53.
- Stachowiak-Wencek, A., W. Pradzynski ve T. Deska. (2013). Environmental impact analysis of windows made from wood and PVC using LCA, *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*, 84.
- Statista. (2015a). Polyvinyl chloride (PVC) market size worldwide from 2013 to 2020, <https://www.statista.com/statistics/720296/global-polyvinyl-chloride-market-size-in-tons/> (10.10.2019).
- Statista. (2015b). Polyvinyl chloride (PVC) market size worldwide from 2013 to 2020, <https://www.statista.com/statistics/720296/global-polyvinyl-chloride-market-size-in-tons/> (04.05.2019).
- Stichnothe, H., ve A. Azapagic. (2013). Life cycle assessment of recycling PVC window frames, *Resources, Conservation and Recycling*, 71: 40-47.
- Switala-Elmhurst, K., ve P. Udo-Inyang. (2015). Save the windows: A residential case study using life cycle assessment, *International Journal of the Constructed Environment*, 6.
- TEIAS. (2018). Elektrik üretim ve iletim istatistikleri, <http://www.teias.gov.tr/TurkiyeElektrikIstatistikleri.aspx>, (02.06.2019).
- Tolunay, Ö. (1994). Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu. DPT. Yayınları, Ankara.
- Wang, S. P., W. J. Chen, Z. H. Wang, X. Z. Gong, C. Z. Zhao ve L. P. Ma. (2014). Life cycle assessment of PVC-U plastic window production. *In Key Engineering Materials*, 319-23. Trans Tech Publ.
- Wilkes, C. E., J. W. Summers, C. A. Daniels, ve M. T. Berard. (2005). *PVC Handbook* Hanser Munich.
- Ye, L., C. Qi, J. Hong, ve X. Ma. (2017). Life cycle assessment of polyvinyl chloride production and its recyclability in China, *Journal of cleaner production*, 142: 2965-72.

EKLER

Ek-1 Örnek Çevresel Etki Hesaplaması

Küresel Isınma Potansiyeli

$$GWP = \sum_j^J GWP_j \times B_j$$

GWP- küresel ısınma potansiyeli (kg CO₂-eşd.)

GWP_j- gazın emisyon faktörü (kg CO₂-eşd./kg)

B_j- gaz emisyonu, j (kg)

J- toplam sera gazı sayısı

Ek 1(a): Küresel ısınma potansiyeli için bazı gazların emisyon faktörleri

Sembol	İsim	CO ₂ eşdeğeri
CO ₂	Karbondioksit	1
CH ₄	Metan	25
N ₂ O	Nitroksit	298
HFCler	Hidroflorokarbonlar	140~11.700
PFCler	Perflorokarbonlar	6.500~9.200
SF ₆	Sülfürheksaflorit	23.900

B_{CO₂} = 1,22 kg/birim,

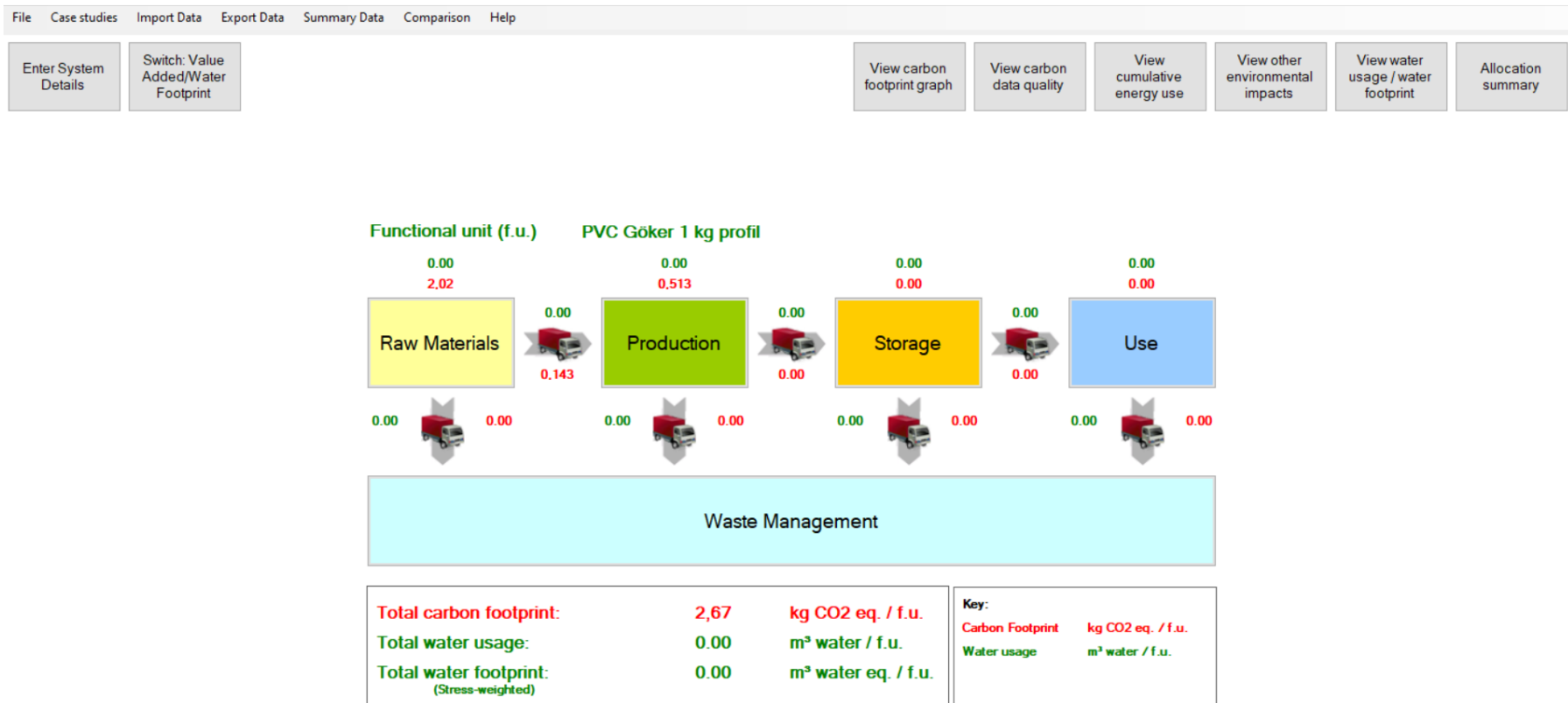
B_{CH₄} = 0.015 kg/birim,

B_{N₂O} = 0,00005 kg/birim

GWP = (1,22x1) + (0,015x25) + (0,00005x298) = 1,6099 kg CO₂ eşd./birim

Ek-2 CCalC2 Yazılımı ile Oluşturulan Yaşam Döngüsü Modeli

Ek-2(a): CCalC2 yazılımı ile oluşturulan model



Ek-2(b): CCalC2 yazılımı ile oluşturulan modele ait örnek veri girdisi

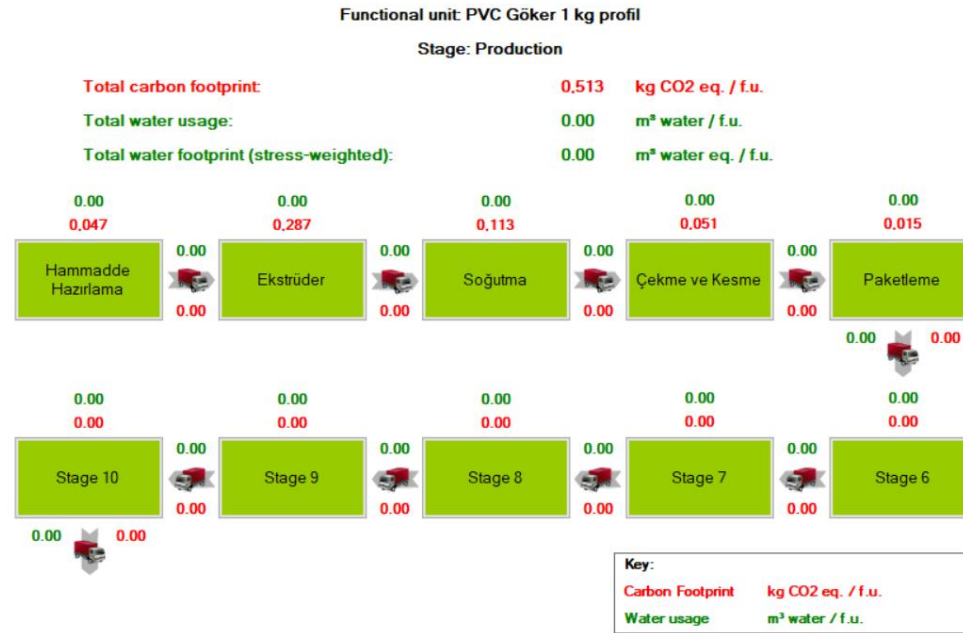
File	Case studies	Import Data	Export Data	Summary Data	Comparison	Help		
Back to top level	Define materials	Define energy	Define packaging	Define waste	Define land use change	View carbon footprint graph		
Functional unit: PVC Göker 1 kg profil								
Stage: Raw Materials								
Total carbon footprint for stage:		2.02	kg CO2 eq. / f.u.					
Total water usage for stage:		0.00	m³ water / f.u.					
Total water footprint (stress-weighted) for stage:		0.00	m³ water eq. / f.u.					
Raw material	Amount (kg/f.u.)	CO2 eq. (kg/kg raw material)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (m³/kg raw material)	Water usage (m³/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (m³ eq./f.u.)	Database section	Production stage
limestone, milled, packed, at ...	0.141	0.019	2,72E-3	0.00	0.00	0.00	Ecoinvent/Ma...	Hammadde H...
methyl methacrylate, at plant	0.050	6.70	0.335	0.00	0.00	0.00	Ecoinvent/Ma...	Hammadde H...
natural rubber based sealing, ...	0.051	1.95	0.100	0.00	0.00	0.00	Ecoinvent/Ma...	Çekme ve Ke...
Polyvinylchloride, suspension ...	0.700	1.90	1.33	0.00	0.00	0.00	CCaLC/Materi...	Hammadde H...
titanium dioxide, production m...	0.030	4.57	0.137	0.00	0.00	0.00	Ecoinvent/Ma...	Hammadde H...
Zinc stearate	0.026	1.65	0.043	0.00	0.00	0.00	CCaLC/Materi...	Hammadde H...
Total:	0.998	Total:	1.95	Total:	0.00	0.00		
Energy	Amount (MJ/f.u.)	CO2 eq. (kg/MJ energy)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (m³/MJ energy)	Water usage (m³/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (m³ eq./f.u.)	Database section	
Total:	0.00	Total:	0.00	Total:	0.00	0.00		
Packaging	Amount (kg/f.u.)	CO2 eq. (kg/kg packaging)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (m³/kg packaging)	Water usage (m³/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (m³ eq./f.u.)	Database section	Production stage
Polythene bags	0.050	1.39	0.069	0.00	0.00	0.00	CCaLC/Pack...	Paketleme
Total:	0.050	Total:	0.069	Total:	0.00	0.00		
Waste	Amount (kg/f.u.)	CO2 eq. (kg/kg waste)	CO2 eq. (kg/f.u.)	Water usage (m³/kg waste)	Water usage (m³/f.u.)	Water footprint (stress-weighted) (m³ eq./f.u.)	Database section	
Total:	0.00	Total:	0.00	Total:	0.00	0.00		

Ek-2(c): CCalC2 yazılımı ile oluşturulan modele ait örnek proses

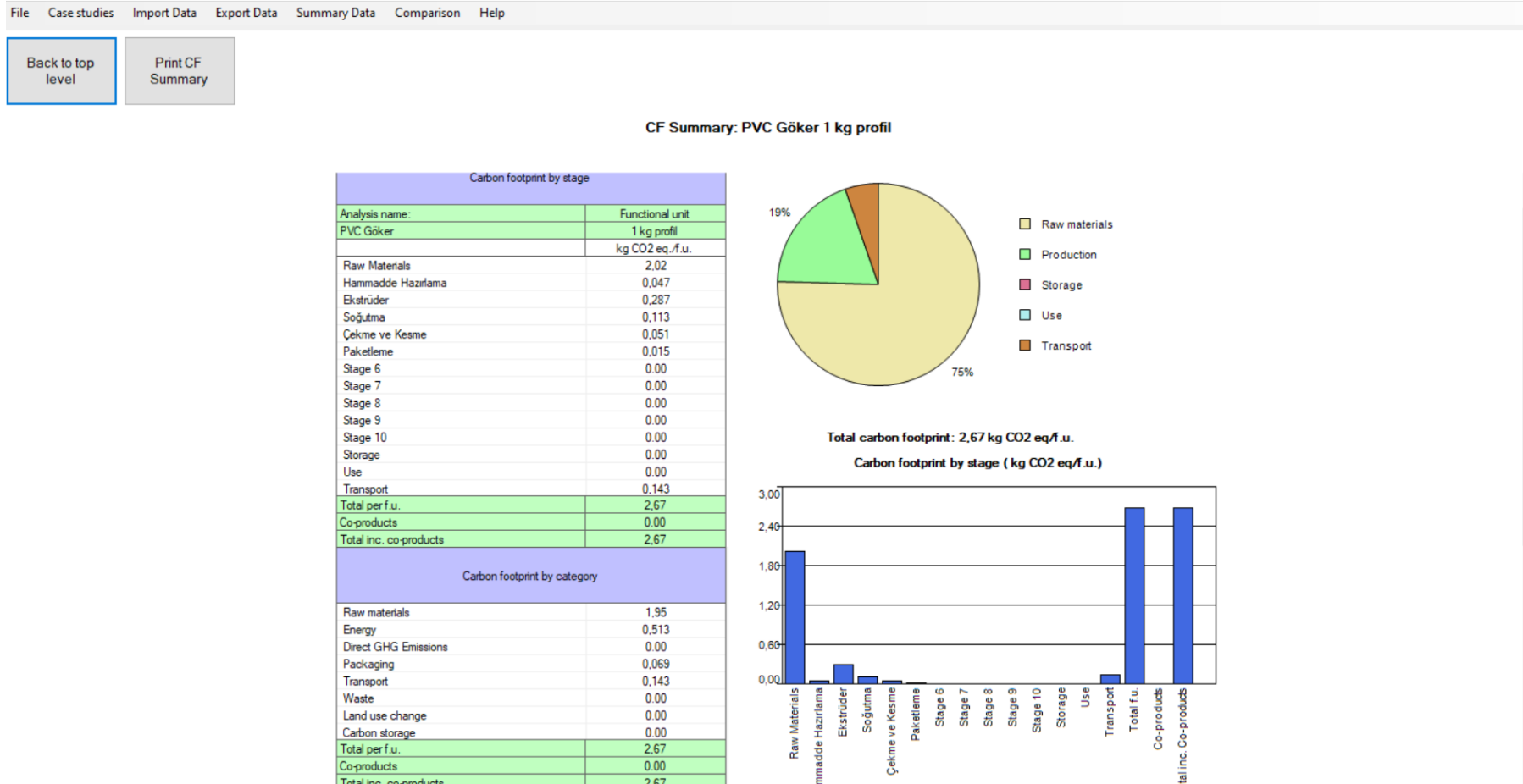
File Case studies Import Data Export Data Summary Data Comparison Help

Back to top level

View carbon footprint graph



Ek-2(d): CCalC2 yazılımı ile oluşturulan modele ait örnek sonuçlar



ÖZ GEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Goker Biçergil
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir/1992

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Ondokuz Mayıs Üniversitesi – Makine Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce, İtalyanca, Almanca

İş Deneyimi

Stajlar : Eti Şirketler Grubu – Eti Makine San. ve Tic. A.Ş. (2012)
Ford Otomotiv A.Ş. (2013)
Fachhochschule Düsseldorf (2014-2015)
Projeler : Güneş Bacası Prototipi İmalatı
Çalıştığı Kurumlar : HATİPOĞLU PLASTİK A.Ş (2018-...)
Özgen Yapı Denetim Tic. Ltd. Şti. (2016-2017)

İletişim

Adres : Odunpazarı / Eskişehir
E-Posta Adresi : gokerbicergil@gmail.com

Tarih: 27/01/2020