



Alınış tarihi (Received): 14.05.2025

Kabul tarihi (Accepted): 14.04.2026

## Tek Kullanımlık PET ve EPS Bardakların Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Karşılaştırılması: Bir Örnek Olay İncelemesi

Serkan BEYCUR<sup>1,\*</sup> Yusuf ER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yeşilyurt Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Malatya

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Elazığ

\*Sorumlu yazar: srkn2344@gmail.com

**ÖZET:** Covid-19 salgınından sonra, tek kullanımlık malzemelerin kullanımı dünya genelinde artmıştır. Tek kullanımlık mutfak gereçlerinde kullanılan materyallerin her geçen gün kullanımı artmakta ve çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu çalışmada, tek kullanımlık Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (EPS) ve Polietilen Tereftalat (PET) malzemelerinden imal edilen bardakların yaşam döngüsü değerlendirilmesi yapılarak, çevreye ve insan sağlığına zararı en az olan ürünün belirlenmesi amaçlanmıştır. Fonksiyonel birim olarak 175 ml kapasiteli 1 adet tek kullanımlık PET (1,7 g) ve 1 adet tek kullanımlık EPS (1,5 g) bardak seçilmiştir. Ham madde temini, ham madde nakliyesi ve üretim aşamalarını kapsayan beşikten-kapıya sistem sınırlarında yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD) yapılmıştır. Bu çalışma, karşılaştırmalı bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi niteliğindedir. Her iki ürün senaryosu için de paketleme süreçleri ve malzemeleri özdeş olduğundan; bu aşama, ürünlerin göreceli çevresel performans farklarını etkilemeyecektir. Bu nedenle paketleme aşaması, analizi sadeleştirmek amacıyla sistem sınırları dışında tutulmuştur. Modelleme openLCA 2.0 yazılımında gerçek fabrika verileri ve Türkiye elektrik karması kullanılarak ISO 14040/14044 çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. ELCD 3.2. veri tabanı kullanılmıştır. CML tabanlı etki değerlendirmesinde küresel ısınma potansiyeli EPS için  $4,86 \times 10^{-3}$  kg CO<sub>2</sub>-eş, PET için  $5,31 \times 10^{-3}$  kg CO<sub>2</sub>-eş bulunmuş; PET bardağın bu kategoride yaklaşık %9,2 daha yüksek etki ürettiği hesaplanmıştır. Asidifikasyon potansiyelinde EPS bardağın etkisi PET bardağa göre %6,4 daha yüksek çıkarken, ötrofikasyon ve ekotoksikite kategorilerinin çoğunda EPS bardak daha yüksek değerler vermiştir. Sonuçlar, özellikle elektrik tüketimi (kömür ağırlıklı üretim) ve ham madde/nakliye süreçlerinin etkilerin ana belirleyicileri olduğunu göstermektedir. Üretim aşamasından kaynaklanan emisyonların azaltılması için ham madde ve enerji girdileriyle ilgili iyileştirme çalışmalarının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler** – EPS bardak, PET bardak, Tek kullanımlık, Yaşam döngüsü değerlendirilmesi, openLCA

## Comparison of Environmental Impacts of Disposable Pet and Eps Cups with Life Cycle Assessment: A Case Study

**ABSTRACT:** Since the Covid-19 pandemic, the use of disposable materials has increased worldwide. The use of disposable kitchenware materials is increasing day by day, causing environmental problems. This study aims to determine the product with the least harm to the environment and human health by conducting a life cycle evaluation of disposable cups made from Expanded Polystyrene Foam (EPS) and Polyethylene Terephthalate (PET) materials. One disposable PET (1.7 g) and one disposable EPS (1.5 g) cup with a capacity of 175 ml were selected as functional units. A life cycle assessment (LCA) was conducted within the cradle-to-door system boundaries, covering raw material procurement, raw material transportation, and production stages. This study is a comparative life cycle evaluation. Since the packaging processes and materials are identical for both product scenarios, this stage will not affect the relative environmental performance differences of the products. Therefore, the packaging stage was kept outside the system boundaries to simplify the analysis. Modeling was performed in openLCA 2.0 software using real factory data and the Turkish electricity mix, within the framework of ISO 14040/14044. The ELCD 3.2 database was used. In the CML-based impact assessment, the global warming potential was found to be  $4.86 \times 10^{-3}$  kg CO<sub>2</sub>-eq for EPS and  $5.31 \times 10^{-3}$  kg

CO<sub>2</sub>-eq for PET; it was calculated that the PET cup produced approximately 9.2% higher impact in this category. While the impact of the EPS cup in acidification potential was 6.4% higher than that of the PET cup the EPS cup yielded higher values in most of the eutrophication and ecotoxicity categories. The results show that electricity consumption (coal-based production) and raw material/transportation processes are the main determinants of the impacts. The necessity of improvement studies related to raw material and energy inputs to reduce emissions originating from the production stage has emerged.

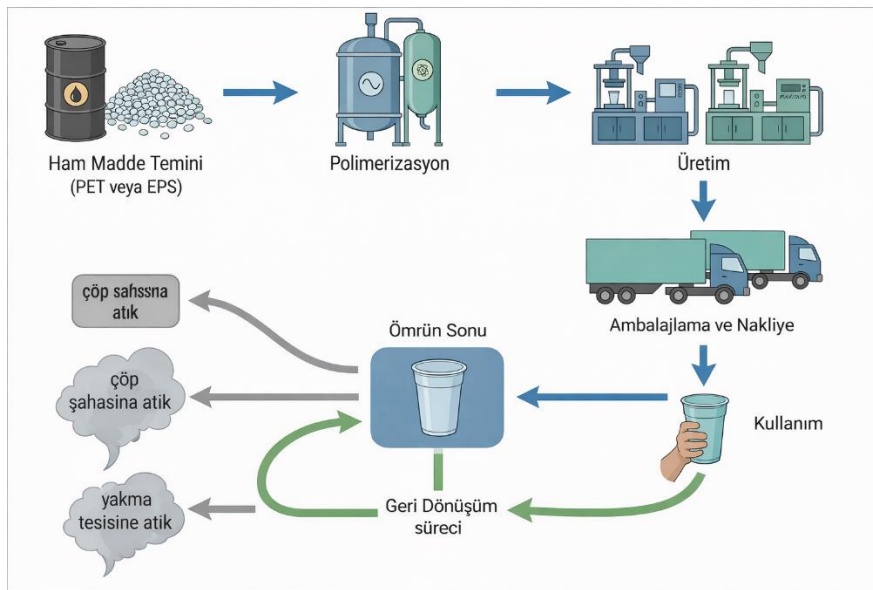
**Keywords – EPS cup, PET cup, Disposable, Life cycle assessment, openLCA**

## 1. Giriş

Hijyen gereksinimleri ve değişen tüketim alışkanlıkları nedeniyle kontrolsüzce artan tek kullanımlık plastik kullanımı, atık yönetimi krizleri ve yüksek karbon emisyonlarıyla karakterize edilen küresel bir çevre sorunu haline gelmiştir. 2021 yılı itibarıyla küresel plastik üretiminin %44'ünü oluşturan ambalaj sektörü, bu sorunun merkezindeki tek kullanımlık plastiklerin (SUP) birincil kaynağıdır [1]. Özellikle COVID-19 pandemisi sonrası tüketim alışkanlıklarının değişmesiyle, hijyen kaygıları doğrultusunda bu ürünlerin kullanımında %25-30 oranında bir artış yaşandığı raporlanmıştır [2].

Bu artışa paralel olarak birçok ülke tarafından pipet, çatal-bıçak, plastik poşet ve birçok tek kullanımlık ürünün kullanımına yasaklar getirilmiştir. Ancak bu yasalara rağmen plastik kirliliği, hala özellikle düşük gelirli devletler için çok büyük etkileri olan bir sorun olmaya devam etmektedir [3]. Denizlere her yıl karışan büyük miktardaki tek kullanımlık atıklar ekosistemi tehdit etmektedir. Plastiğin yaşam döngüsü hesaplandığında, 2050 yılına kadar olan plastik üretiminin, dünyadaki toplam karbon bütçesinin %12'sini bulabileceği tahmin edilmektedir. Bu oran, yaklaşık 615 kömürlü termik santralin emisyonuna eşittir [4].

Bu çevresel etkilerin azaltılması, sürdürülebilir karar verilmesi, kaynak kullanımının optimizasyonu ve çevresel etkinin ölçülüp karşılaştırılması amacıyla Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemi stratejik bir önem kazanmıştır. YDD, bir ürünün hammadde eldesinden bertarafına kadar olan tüm süreçlerini kapsar. Bu kapsamı gösteren genel akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Bir ürünün ham madde eldesinden bertarafına kadar olan yaşam döngüsü aşamalarının genel akış şeması (ISO 14040 standardından uyarlanmıştır [5]).

Figure 1. General flow diagram of life cycle stages from raw material acquisition to disposal (adapted from ISO 14040 [5]).

Literatürdeki güncel çalışmalar, üretim aşamasının önemini vurgulamaktadır. Jung ve ark. (2025) tarafından yapılan analizde, Güney Kore’de "iş olağan" senaryosu için baz alınan tek kullanımlık PET bardakların, fonksiyonel birim başına yarattığı 8,12 kg CO<sub>2</sub>-eş küresel ısınma potansiyelinin %51,2’sinin doğrudan saf PET üretiminden kaynaklandığı saptanmıştır [6]. Bu veriler, plastiklerin çevresel yüklerinin azaltılmasında sadece atık aşamasının değil, üretim aşamalarının da kritik rolünü doğrulamaktadır. Bununla birlikte, çevresel etkilerin sadece karbon ayak izi ile sınırlı kalmayıp 14 farklı kategoride ölçülmesi, Hedgehog (2024) çalışmasında belirtildiği üzere "çevresel takasların" anlaşılması adına hayati önem taşımaktadır [7].

Plastiklerin alternatif malzemelerle değiştirilmesi ise her zaman beklenen çevresel faydayı sağlamayabilir. ACS Publications (2024), incelenen 16 uygulamanın 15’inde plastik ürünlerin alternatiflerine (cam, kâğıt vb.) kıyasla yaşam döngüsü boyunca %10 ila %90 oranında daha az emisyon ürettiğini saptamıştır [8]. Benzer şekilde, EUMEPS (2024) raporu, EPS (köpük) kutuların, kâğıt bazlı alternatiflerine göre bazı kategorilerde çok daha düşük çevresel ayak izine sahip olduğunu kanıtlamıştır [9]. Ayrıca NAPCOR (2023) raporu, PET malzemelerin cam şişelere göre üretim ve nakliye aşamalarında yaklaşık 2 ila 3 kat daha fazla enerji verimliliği sağladığını doğrulamaktadır [1].

Malzeme seçiminin yanı sıra "başabaş noktası" analizi de kritiktir. WJARR (2025) çalışması, yeniden kullanılabilir cam bardakların avantajlı hale gelmesi için en az 5 kullanım döngüsünü tamamlaması gerektiğini belirtirken [10]; Verive (2024), yeniden kullanılabilir plastik bardakların tek kullanımlık seçenekleri yakalaması için en az 4 ila 10 kez kullanılması gerektiğini, ancak %30'luk bir kayıp oranında bu noktaya asla ulaşamadığını vurgulamıştır [11].

Yapılan literatür taraması, tek kullanımlık PET ve EPS bardakların karşılaştırıldığı çalışmaların çoğunlukla ikincil veri tabanlarına dayandığını göstermektedir. Özellikle Türkiye ölçeğinde, yerel elektrik karmasını ve gerçek üretim teknolojilerini yansıtan, birincil (primary) fabrika verilerine dayalı karşılaştırmalı YDD çalışmalarının eksikliği önemli bir araştırma boşluğu olarak tespit edilmiştir [12].

Bu çalışma, Elazığ’daki Dağyüce Plastik fabrikasından elde edilen 2023 yılına ait gerçek operasyonel verileri kullanarak bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın literatüre özgün katkısı; teorik modellemeler yerine sahadan toplanan doğrulanmış verilerle "beşikten kapıya" (cradle-to-gate) analizini gerçekleştirmesi ve böylece hem ulusal literatürdeki veri açığını kapatması hem de sektördeki karar vericilere Türkiye koşullarına özgü, bilimsel ve nicel bir kıyaslama sunmasıdır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Fabrikanın genel bilgileri ve üretim süreçleri

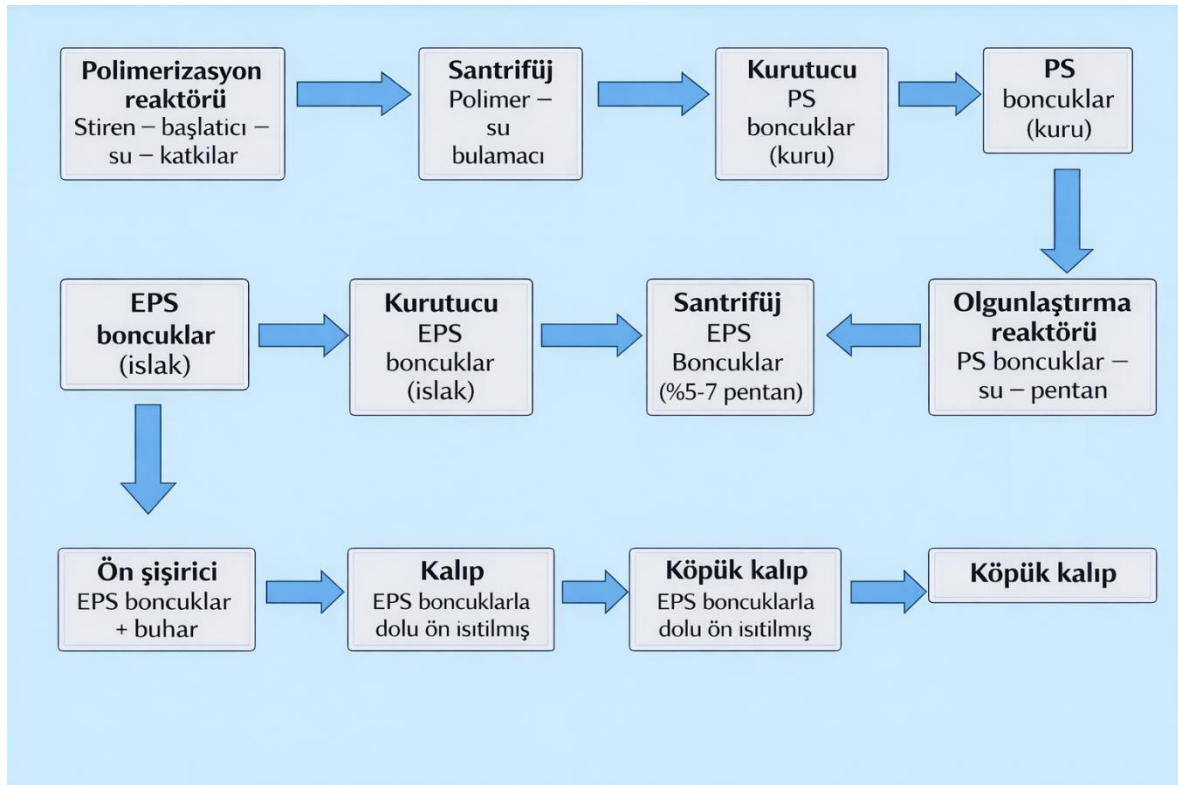
Bu çalışmada, Türkiye’deki tek kullanımlık mutfak gereçlerinin üretim sektöründeki karar vericilere kılavuz olması amacıyla, Elazığ’da belirlenen fabrikada üretilen tek kullanımlık bardakların YDD ile çevresel etkileri tespit edilmiştir. Veriler, Elazığ’da faaliyet gösteren Dağyüce Plastik fabrikasından, 2023 yılı faaliyet dönemini (Ocak-Aralık) kapsayacak şekilde, yerinde inceleme ve fatura/sayaç okumaları yoluyla toplanmıştır.

Çalışma, verilerin tek bir tesisten elde edilmesi ve yerel üretim koşullarını yansıtması nedeniyle veri kalitesi açısından bir "örnek olay incelemesi" (case study) niteliği taşımaktadır. Bu çalışma, spesifik bir üretim tesisinin birincil verilerine dayandığından sektörel bir ortalamayı değil, yerel ve teknolojiye özgü (site-specific) bir senaryoyu yansıtmaktadır. Bu durum veri kalitesini artırırken, sonuçların farklı teknolojiler kullanan fabrikalara genellenebilirliğini sınırlamaktadır. İncelenen tesis, üretim teknolojisi ve kapasitesi bakımından Türkiye'deki orta ölçekli plastik üretim tesislerini temsil eden tipik bir örnektir. Üretim süreçleri kapalı alanda ve standart otomasyon sistemleriyle gerçekleştirildiğinden, mevsimsel sıcaklık değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir ve üretim yıl boyunca standart bir akış izlemektedir.

YDD hesaplamalarında 1 adet tek kullanımlık EPS bardak seçilmiştir. Dağyüce Plastik fabrikasında, 1 adet EPS bardak beş aşamada üretilmektedir. Bu aşamalar:

1. Ön genişletme: 80-100 °C sıcaklıktaki buhar ve pentan gazı kullanılarak, EPS tanecikleri serbest bir şekilde şişirilmektedir.
2. Şartlandırma: Şişirilmiş tanecikler içinde az miktarda bulunan pentan gazının yerine, soğurken oluşan hava dolmaktadır.
3. Kalıplama: Kalıp kullanılarak EPS'ye şekil verilmektedir. Bu aşamada yeniden buhar kullanılmaktadır. Aynı zamanda buharla EPS tanecikleri birbirine kaynaştırılmaktadır.
4. Şekillendirme: Soğutulduktan sonra kalıptan çıkartılan EPS, kızgın tel yöntemi kullanılarak kesilip, şekil verilmektedir.
5. Üretim sonrası aşama: Bu aşamada, EPS'nin folyolanması işlemleriyle, kullanım yerine uygun hale getirilmektedir.

EPS bardak üretim prosesinin şematik gösterimi Şekil 2'de gösterilmektedir.

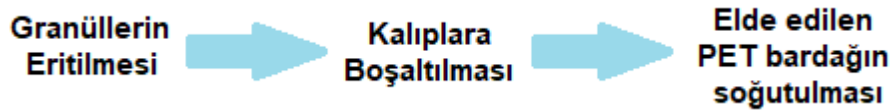


Şekil 2. EPS bardak üretim prosesinin şematik gösterimi  
Figure 2. Schematic representation of EPS cup production process

YDD hesaplamalarında 1 adet EPS bardakla karşılaştırılmak üzere 1 adet tek kullanımlık PET bardak seçilmiştir. Tek kullanımlık PET bardağın üretimi kısaca üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. Reçine granül ve tozları eritmek için ısıtılmaktadır.
2. Eritilmiş malzeme bardak kalıplarına dökülmektedir.
3. Oluşan bardak soğutularak şekillenmiş PET bardak elde edilmektedir.

PET bardak üretim prosesinin şematik gösterimi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. PET bardak üretim prosesinin şematik gösterimi  
Figure 3. Schematic representation of PET cup production process

## 2.2. Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları

Yapılan çalışmada, openLCA yazılımı tercih edilmiştir. OpenLCA, ücretsiz olması, geniş veri tabanı olması ve açık kaynak koda sahip olmasından dolayı, dünyada en fazla tercih edilen yazılımdır.

Bu çalışmada YDD dört aşamada gerçekleştirilmiştir. YDD'nin ilk aşaması amaç ve kapsamdır. Bu aşamada çalışmanın hedefi, kapsamı, sınırları ve ayrıntıları belirtilir. YDD gerçekleştirilirken, çevresel etkilerin belirlenmesi ve karşılaştırılması için sistemin veya ürünün fonksiyonel birimi seçilmelidir. Amaç ve kapsam aşamasında fonksiyonel birim belirlenir ve ölçülebilirdir. Farklı ürünleri karşılaştıran fonksiyonel birim, bir ölçektir. Envanter analizi, YDD'nin ikinci aşamasıdır. Bu adımda veriler toplanıp, sistem sınırları belirlenir. Envanter analizi, sistemle alakalı verileri bulundurup, hesaplamalar yapar. Envanter analizinde yaşam döngüsünün tamamındaki ham madde tüketimi, atıklar ve emisyonlar gibi veriler toplanmaktadır. Bu adımda çalışmada harcanacak ham madde, enerji, su ve bu girdilerden dolayı ortaya çıkan çevresel emisyonlar belirlenir. Bundan sonraki aşamada yaşam döngüsü etki analizidir. Etki analizi, YDD'nin üçüncü aşamasıdır. Bu aşamada envanter analizi aşamasında toplanan veriler kullanılarak, çevresel etkilerinin analizi, yani karakterizasyonu yapılır. Dördüncü aşama olan son aşamada ise ortaya çıkan bu sonuçlar yorumlanmıştır.

### 2.2.1. Amaç ve kapsam

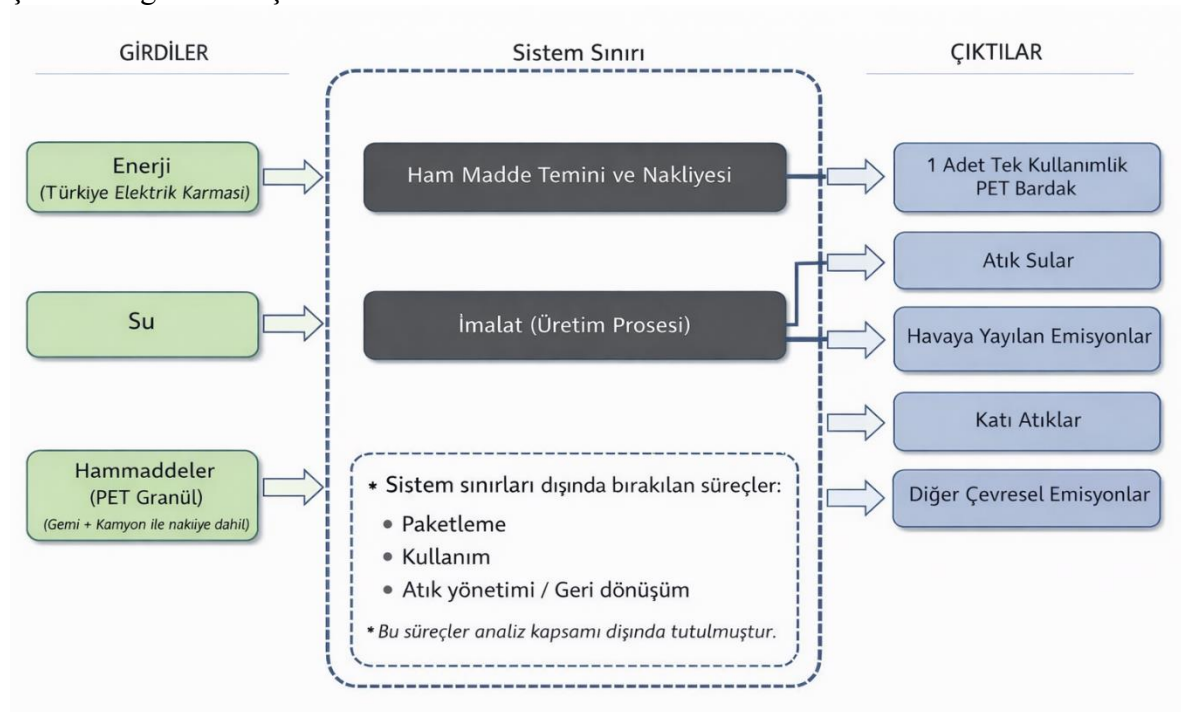
Çalışmanın amacı 2020 yılında başlayan Covid-19 virüs salgınıyla, Dünya'da ve Türkiye'de kullanımı artan tek kullanımlık PET ve EPS bardakların YDD'yi kullanarak, etkilerini kıyaslamaktır. Bu çalışmada tek kullanımlık PET ve EPS bardakların çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sistem sınırları 'beşikten-kapıya' (cradle-to-gate) olarak belirlenmiştir. Ürünlerin kullanım sonrasındaki atık yönetimi, geri dönüşüm oranları ve doğada çözünme süreleri gibi 'ömür sonu' (End-of-Life - EoL) senaryoları, belirsizliklerin yüksek olması ve tesis özelindeki üretim verisi kalitesini doğrudan yansıtmaması nedeniyle analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Ayrıca bu çalışma, karşılaştırmalı bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Comparative LCA) niteliğindedir. Her iki ürün senaryosu için de paketleme süreçleri ve malzemeleri özdeş (identical) olduğundan; bu aşama, ürünlerin göreceli çevresel performans farklarını etkilemeyecektir. YDD çalışması ISO 14040 ve 14044 standartları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ISO 14044 ise, YDD'nin amaç ve kapsam kısmının hazırlanması ve derlenmesi ile YDD'nin hesaplanması,

yorumlanması ve rapor edilmesi için gerekli adımları ve kuralları kapsar. Fonksiyonel birim olarak 1 adet tek kullanımlık PET bardak ve 1 adet tek kullanımlık EPS bardak seçilmiştir. Seçilen her iki bardağında aldıkları sıvı miktarları 175 cc.'dir. Seçilen PET bardak 1,7 gr., EPS bardak ise 1,5 gr. ağırlığındadır [3]. Çevresel etkilerin hesaplanmasında ve karakterizasyonunda ise CML 2001 (Baseline ve Non-Baseline) etki değerlendirme metodu tercih edilmiştir.

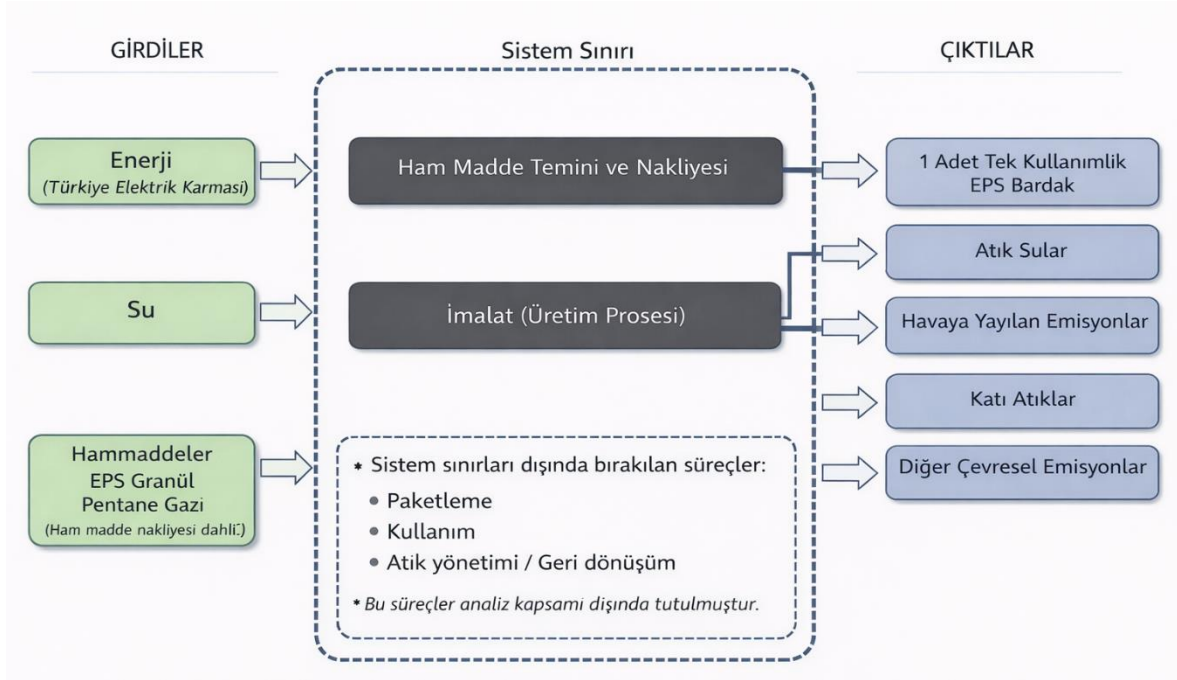
### 2.3. Envanter analizi

YDD gerçekleştirmek için amaç ve kapsam aşamasından sonra envanter analizinin yapılmaktadır. Fonksiyonel birim bazında girdilerin tümü hesaplanmıştır. ELCD 3.2. veri tabanı kullanılmıştır.

Bu çalışmada beşikten kapıya yaklaşımı kullanılmıştır. Tek kullanımlık PET bardak için sistem sınırları Şekil 4'te gösterilmiştir. Tek kullanımlık EPS bardak için sistem sınırları Şekil 5'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Tek kullanımlık PET bardağın sistem sınırları, girdi ve çıktı akışları  
**Figure 4.** System boundaries, input and output flows of a single-use PET cup



**Şekil 5.** Tek kullanımlık EPS bardağın sistem sınırları, girdi ve çıktı akışlar  
**Figure 5.** System boundaries, input and output flows of a single-use EPS cup

Tablo 1’de, tek kullanımlık PET bardak için girdiler gösterilmektedir. Granül ham madde olarak polietilen tereftalat (PET), Suudi Arabistan ülkesinde üretilmiş, gemi nakliyesi ile Mersin iline taşınmaktadır. Mersin ilinden de Elazığ’daki üretim tesisine transfer edilmektedir. Tek kullanımlık PET bardak üretim hattındaki 1 saat boyunca toplam elektrik sarfiyatı 40 kwh’dır. 1 Saatte toplam 6000 adet tek kullanımlık PET bardak üretilmektedir. 1 adet tek kullanımlık PET bardak üretiminde kullanılan toplam elektrik tüketimi sarfiyatı 0.0066 kwh’dır.

Üretim sürecinde oluşan fire ve üretim atıkları fabrika içerisinde öğütülerek sisteme geri kazandırıldığından, net bir katı atık çıkışı olmamıştır. Üretim bandından doğrudan havaya veya suya salınan spesifik emisyonlara ilişkin sahada ölçüm verisi bulunmadığından, bu çevresel çıktılar yazılımda ELCD 3.2 veri tabanının sağladığı arka plan (background) üretim süreçleri üzerinden modellenmiş ve sisteme dahil edilmiştir.

**Tablo 1.** PET bardak üretimindeki girdiler [3].

**Table 1.** Inputs in PET cup production.

GİRDİLER	MİKTAR	BİRİM
Su	0,02	kg
Elektrik	0,0066	kwh
PET granül	1,7	gr
PET Ham madde kamyon nakliyesi (Mersin-Elazığ)	9,69	kg*km
PET Ham madde gemi nakliyesi (Suudi Arabistan-Mersin)	32,725	kg*km

Tablo 2’de, tek kullanımlık EPS bardak için girdiler gösterilmektedir. Granül ham madde olarak EPS, Suudi Arabistan ülkesinde üretilmiş, gemi nakliyesi ile Mersin iline taşınmaktadır. Mersin ilinden de Elazığ’daki üretim tesisine transfer edilmektedir. Tek kullanımlık EPS bardak üretim hattındaki 1 saat boyunca toplam elektrik sarfiyatı 30,6 kwh’dır. 1 Saatte toplam 5000 adet tek kullanımlık EPS bardak üretilmektedir. 1 adet tek

kullanımlık EPS bardak üretiminde kullanılan toplam elektrik tüketimi sarfiyatı 0.00612 kwh'dir.

**Tablo 2.** EPS bardak üretimindeki girdiler [3].  
**Table 2.** Inputs in EPS cup production.

GİRDİLER	MİKTAR	BİRİM
Su	0,03	kg
Elektrik	0,00612	kwh
EPS	1,5	gr
Pentan gazı	50	mg
EPS Ham madde kamyon nakliyesi (Mersin-Elazığ)	22,1	kg*km
Ham madde gemi ile nakliyesi (Suudi Arabistan-Mersin)	32,725	kg*km
Pentan gazı tanker transferi (İskenderun-Elazığ)	0,0242	kg*km

Türkiye için elektrik veri tabanı, openLCA yazılımında bulunmadığından, yazılıma bu girdiler eklenirken, Türkiye Elektrik İletim A.Ş.'nin rapor verileri kullanılarak, hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 3'te gösterilen, Türkiye'deki elektrik üretiminde kullanılan enerji türlerinin yüzdesel olarak oranına göre elektrik tüketimi hesaplamaları yapılmıştır.

**Tablo 3.** Türkiye'deki elektrik üretiminde kullanılan enerji türlerinin oranı [3].  
**Table 3.** Proportion of fuels used in electricity generation in Turkey [3].

ENERJİ TÜRÜ	% (2022 yılı)
Kömür	34,6
Fuel-oil	0,1
Doğalgaz	22,9
Yenilenebilir+atık	2,9
Atık ısı	0,4
Hidrolik	20,3
Jeotermal	3,4
Rüzgar	10,6
Güneş	5,1

### 3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışmada openLCA 2.0 yazılımı ve ELCD 3.2. veri tabanı kullanılarak tek kullanımlık EPS ve PET bardak yaşam döngüsü modellenmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Etki analizi

Etki analizi basamağında tek kullanımlık PET bardak ve EPS bardak üretimindeki, YDD çevresel etkileri CML 2001 metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, çevresel etkilerin değerlendirilmesi amacıyla CML-IA (Institute of Environmental Sciences, Leiden University) yöntemi kullanılmıştır. Değerlendirme kapsamı geniş tutularak, CML-IA Baseline (Temel) yöntemindeki standart kategorilere ek olarak; koku oluşumu, arazi kullanımı ve çökelti ekotoksitesi gibi kategoriler de dahil edilmiş ve toplam 14 etki kategorisi analiz edilmiştir. Kullanılan kategorilerin detaylı sınıflandırması Tablo 4'te sunulmuştur.



**Tablo 4.** Çalışmada Kullanılan CML 2001 Etki Değerlendirme Yöntemi ve Seçili Kategoriler  
**Table 4.** The CML 2001 Impact Assessment Method and Selected Categories Used in the Study

<b>Etki Kategorisi</b>	<b>Birim</b>	<b>Yöntem Alt Kümesi</b>
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP 100a)	kg CO <sub>2</sub> -Eş	CML-IA Baseline
Asidifikasyon Potansiyeli	kg SO <sub>2</sub> -Eş	CML-IA Baseline
Ötrofikasyon Potansiyeli	kg NO <sub>x</sub> -Eş	CML-IA Baseline
Ozon Tabakası İncelmesi (ODP)	kg CFC-11-Eş	CML-IA Baseline
İnsan Toksikitesi (HTP)	kg 1,4-DCB-Eş	CML-IA Baseline
Tatlı Su Sucul Ekotoksitesitesi (FAETP)	kg 1,4-DCB-Eş	CML-IA Baseline
Deniz Sucul Ekotoksitesitesi (MAETP)	kg 1,4-DCB-Eş	CML-IA Baseline
Karasal Ekotoksitesite (TETP)	kg 1,4-DCB-Eş	CML-IA Baseline
Fotokimyasal Oksidasyon	kg Etilen-Eş	CML-IA Baseline
Abiyotik Kaynakların Tükenmesi	kg Sb-Eş	CML-IA Baseline
Koku Oluşumu Potansiyeli (Malodours Air)	m <sup>3</sup> hava	CML-IA Non-Baseline
Arazi Kullanımı (Land Use)	m <sup>2</sup> a	CML-IA Non-Baseline
İyonlaştırıcı Radyasyon	DALYs	CML-IA Non-Baseline
Tatlı Su Çökelti Ekotoksitesitesi	kg 1,4-DCB-Eş	CML-IA Non-Baseline

Tek kullanımlık PET ve EPS bardak için, ham maddelerin elde edilmesi, ham madde nakliyesi ve bardakların üretimi sürecindeki açığa çıkan çevresel etkiler Tablo 5'te gösterilmektedir.

**Tablo 5.** Tek kullanımlık PET bardak ve EPS bardak etki kategorileri değerleri.

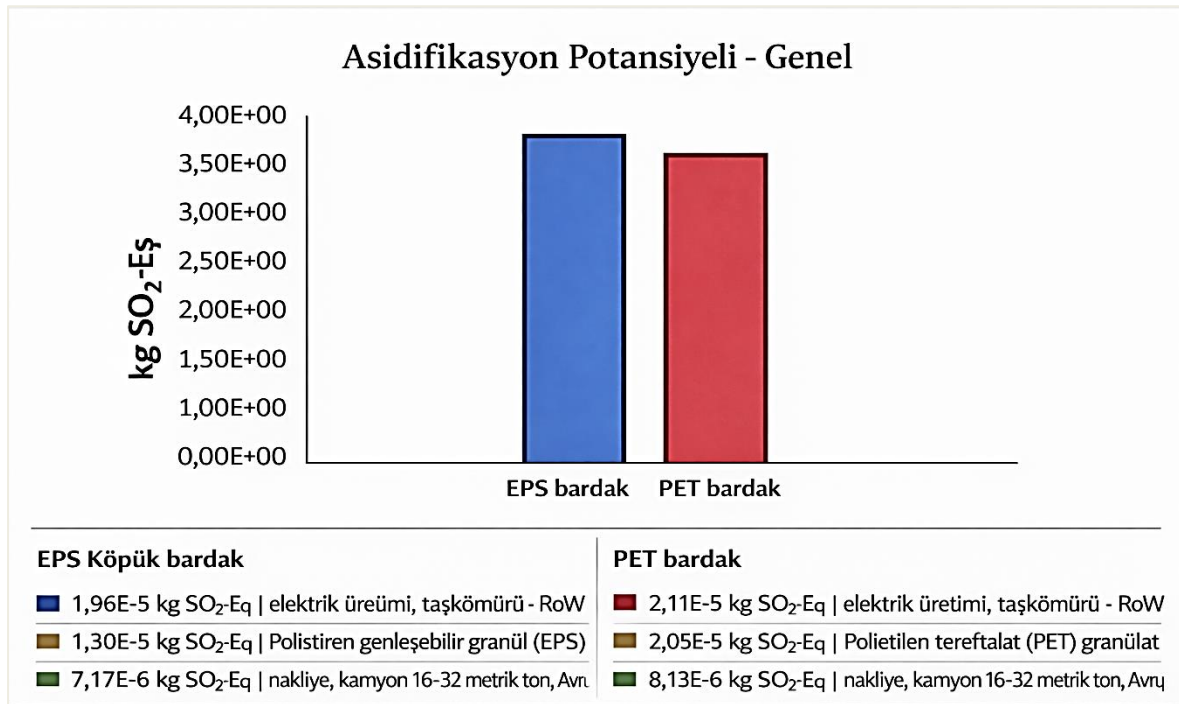
**Table 5.** Single-use PET cup and EPS cup impact categories values.

<b>Etki Kategorileri</b>	<b>EPS Bardak</b>	<b>PET Bardak</b>	<b>Fark</b>	<b>Birim</b>
Asidifikasyon Potansiyeli- Avrupa Ort.	3,53774e-5	3,31245e-5	%-6,37	kg SO <sub>2</sub> -Eş
Küresel Isınma Potansiyeli -100a	4,85788e-3	5,30529e-3	%9,21	kg CO <sub>2</sub> -Eş
Ötrofikasyon Potansiyeli- Avrupa Ort	2,86540e-5	3,22956e-5	%12,71	kg NO <sub>x</sub> -Eş
Tatlı su zehirliliği -100a	7,71147e-4	8,33227e-4	%8,05	kg 1,4-DCB-Eş
Tatlı su çökelti zehirliliği -100a	1,09156e-3	1,18032e-3	%8,13	kg 1,4-DCB-Eş
İnsan Toksikitesi Potansiyeli	5,73213e-3	6,93194e-3	%20,93	kg 1,4-DCB-Eş
İyonize Radyasyon	3,20567e-12	3,66223e-12	%14,24	DALYs
Arazi kullanımı- Arazi rekabeti	1,43491e-4	1,59668e-4	%11,27	m <sup>2</sup> a
Koku	6,79960e+1	7,58193e+1	%11,51	m <sup>3</sup> hava
Deniz zehirliliği -100a	3,38619e-3	3,72215e-3	%9,92	kg 1,4-DCB-Eş
Deniz çökelti zehirliliği -100a	2,63950e-3	2,94022e-3	%11,39	kg 1,4-DCB-Eş
Fotokimyasal oksidasyon -MOIR (yüksek)	4,47085e-7	4,72092e-7	%5,59	kg ozon oluşumu
Kaynaklar, abiyotik kaynakların yok olması	3,94651e-5	4,14174e-5	%4,95	kg antimoni-Eş
Stratosferik Ozon tabakası incilmesi-10a	3,64537e-10	4,12378e-10	%13,12	kg CFC-11-Eş
Karasal zehirlilik -100a	-1,04759e-6	-3,14972e-6	%200,66	kg 1,4-DCB-Eş

Çalışma kapsamında tek kullanımlık PET ve EPS bardak için hesaplanan YDD çevresel etki kategorileri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

### 3.1.1. Asidifikasyon potansiyeli

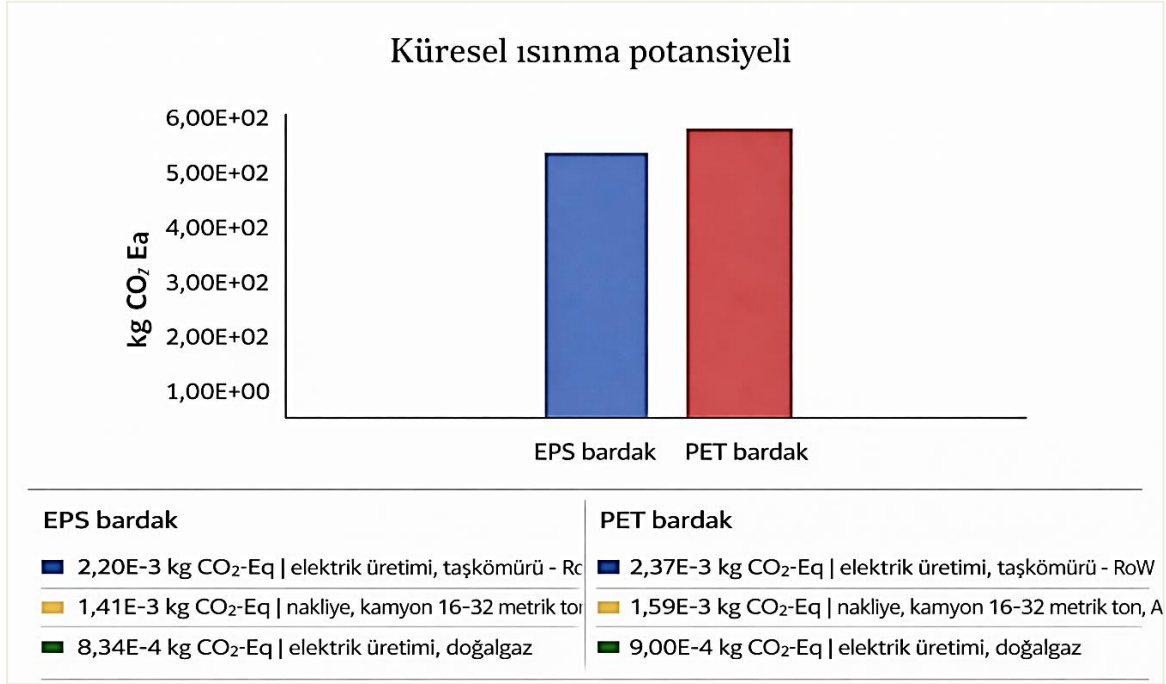
Asidifikasyon potansiyeli azot oksitler ( $\text{NO}_x$ ), amonyak ( $\text{NH}_3$ ), kükürt dioksit ( $\text{SO}_2$ ) gibi gazların atmosferdeki su ile reaksiyona girmesiyle asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Asitli bileşenlerin, toprak, yer altı suyu, ekosistem, organizma, yüzey suyuna ve binalara olan zararlarını gösterir. Şekil 6'da görüleceği üzere, üretimlerdeki asidifikasyon potansiyeli, %6,37 farkla tek kullanımlık EPS bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de asidifikasyon potansiyeline en fazla etki eden etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen ise PET ve EPS ham maddelerinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



Şekil 6. Asidifikasyon potansiyeli.  
Figure 6. Acidification potential.

### 3.1.2. Küresel ısınma potansiyeli

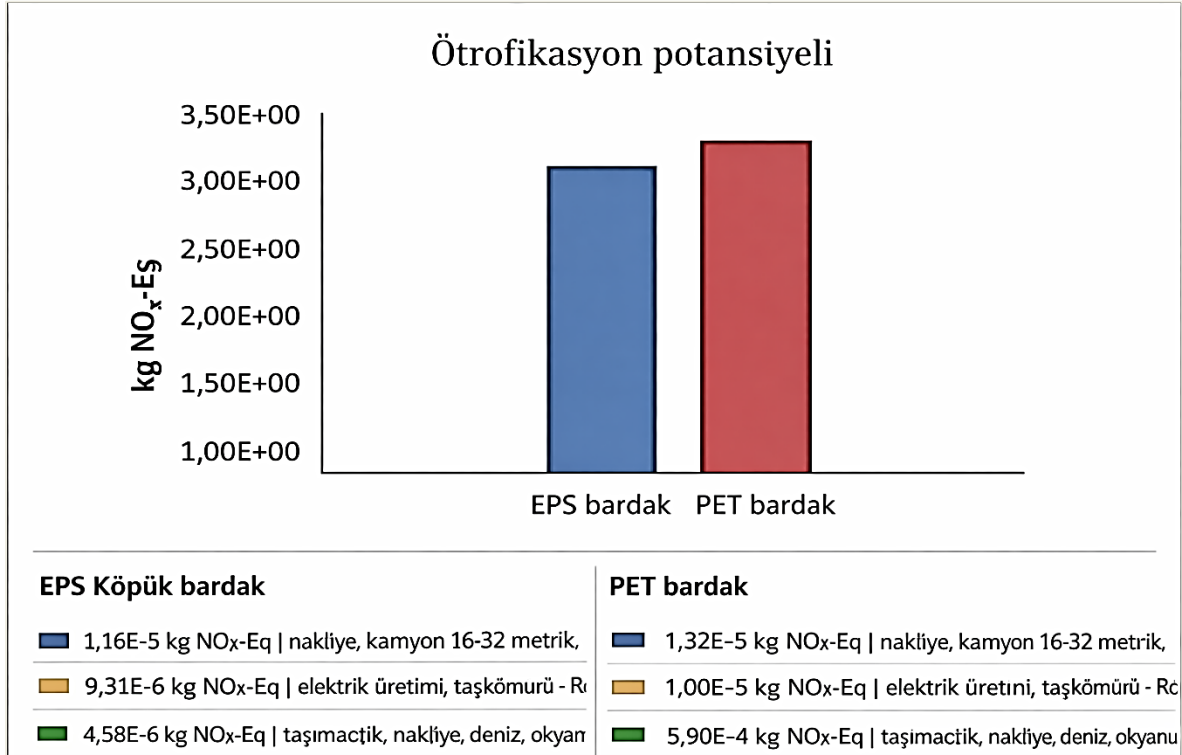
Sera gazlarından kaynaklanan, sıcaklıktaki değişimdir. Şekil 7'de görüleceği üzere, üretimlerdeki küresel ısınma potansiyeli, %9,21 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de  $\text{CO}_2$  salınımı artışlarındaki en büyük etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen ise kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



**Şekil 7.** Küresel ısınma potansiyeli  
**Figure 7.** Global warming potential

### 3.1.3. Ötrofikasyon potansiyeli

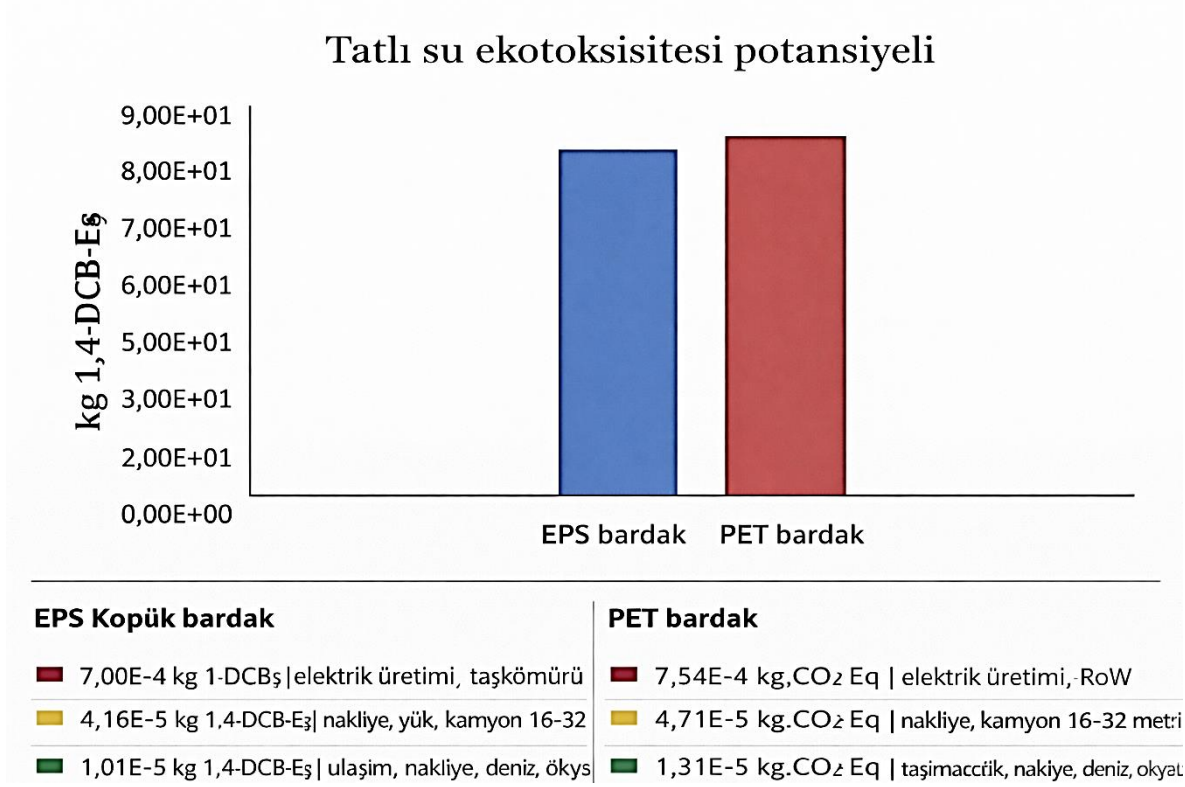
Su ekosisteminde çok fazla besin maddesinin (fosfor ve azot gibi) birikmesinden dolayı, suyun biyolojik üretkenliğini artırır. Tatlı sularda oksijenin oranının azalmasına, alg oranının artışına ve balıkların ölümüne sebep olmaktadır. Şekil 8’de görüleceği üzere, üretimlerdeki ötrofikasyon değeri, %12,71 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de ötrofikasyon potansiyeli artışlarına en büyük etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen ise, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



**Şekil 8.** Ötrofikasyon potansiyeli.  
**Figure 8.** Eutrophication potential.

### 3.1.4. Tatlı su ekotoksitesi potansiyeli

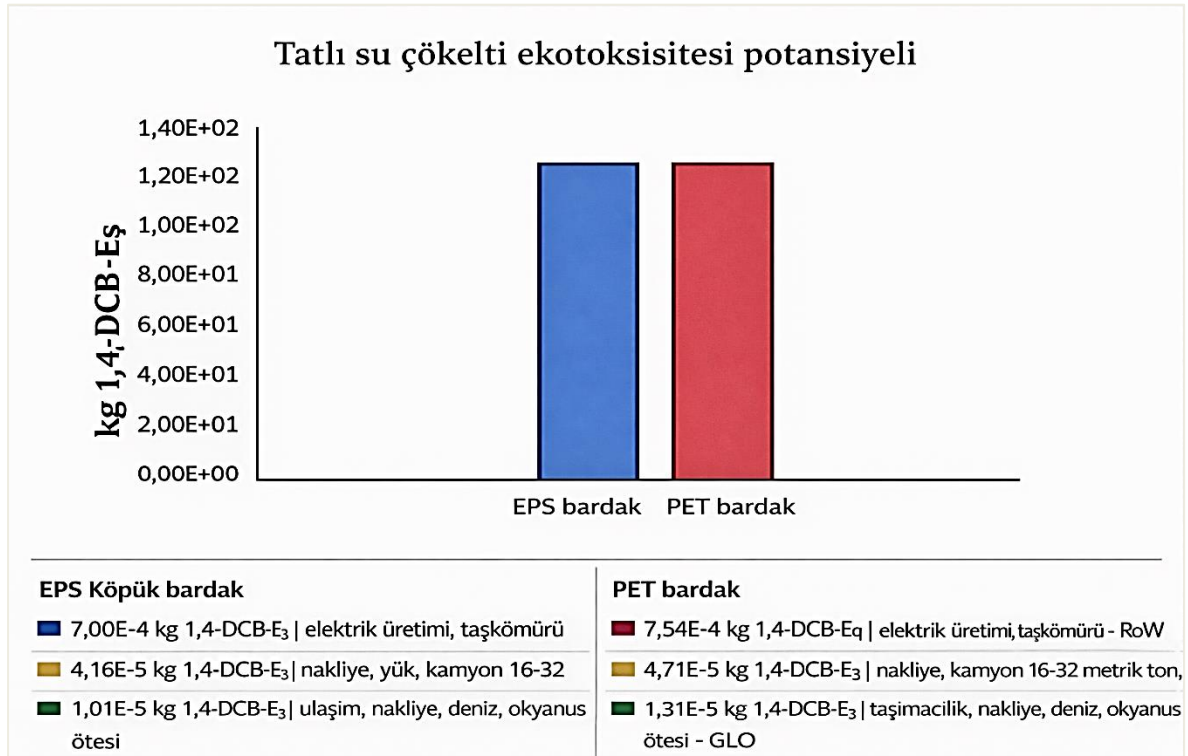
Nehirler, göller gibi tatlı su kaynaklarındaki çevresel etkileri değerlendirmektedir. Şekil 9’da görüleceği üzere, üretimlerdeki tatlı su zehirliliği, %8,05 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de tatlı su zehirliliği en fazla etki eden etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



**Şekil 9.** Tatlı su zehirliliği potansiyeli.  
**Figure 9.** Freshwater ecotoxicity potential.

### 3.1.5 Tatlı su çökeltisi ekotoksitesitesi potansiyeli

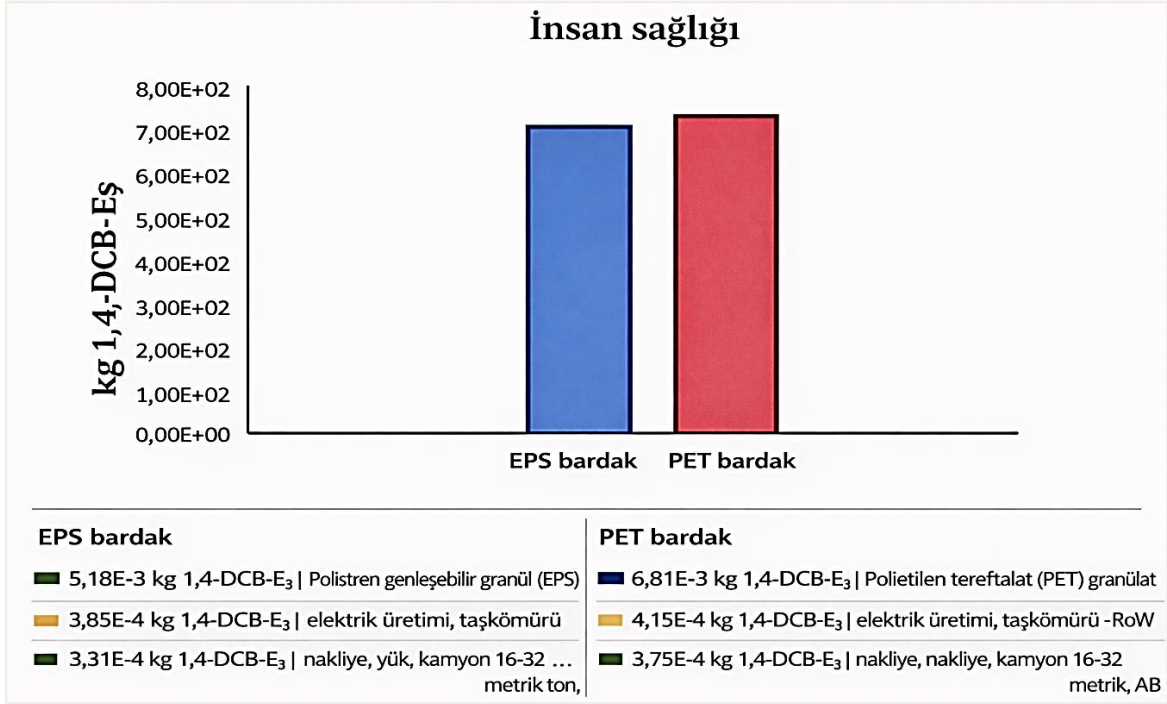
Şekil 10'da görüleceği üzere, üretimlerdeki tatlı su çökelti ekotoksitesitesi, %8.13 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de tatlı su çökelti ekotoksitesitesi potansiyeline en fazla etki eden etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



**Şekil 10.** Tatlı su çökeltisi ekotoksitesitesi potansiyeli.  
**Figure 10.** Freshwater sediment ecotoxicity potential.

### 3.1.6. İnsan toksisitesi potansiyeli

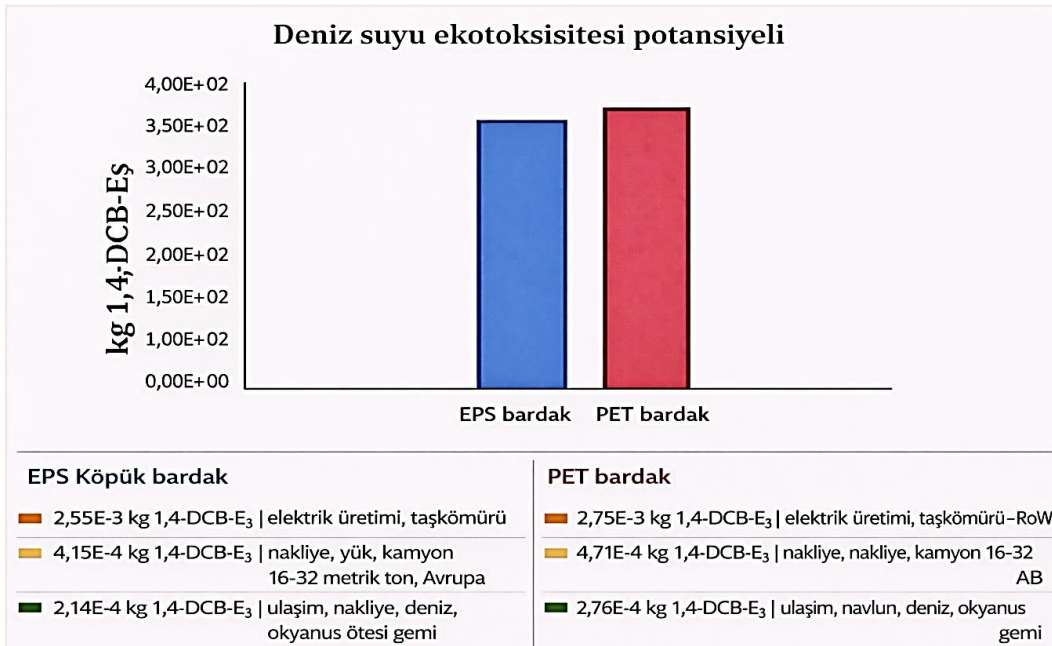
Şekil 11’de görüleceği üzere, üretimlerdeki insan sağlığına etkisi, %20,93 farkla tek kullanımlık PET bardakta daha yüksek çıkmıştır. İnsan toksisitesi potansiyeline en fazla etki eden etmen; tek kullanımlık EPS bardak üretim sürecinde EPS granül ham maddesinden, tek kullanımlık PET bardak üretim sürecinde ise PET granül ham maddesi kullanımından kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



Şekil 11. İnsan toksisitesi potansiyeli.  
Figure 11. Human toxicity potential.

### 3.1.7. Deniz suyu ekotoksitesisi potansiyeli

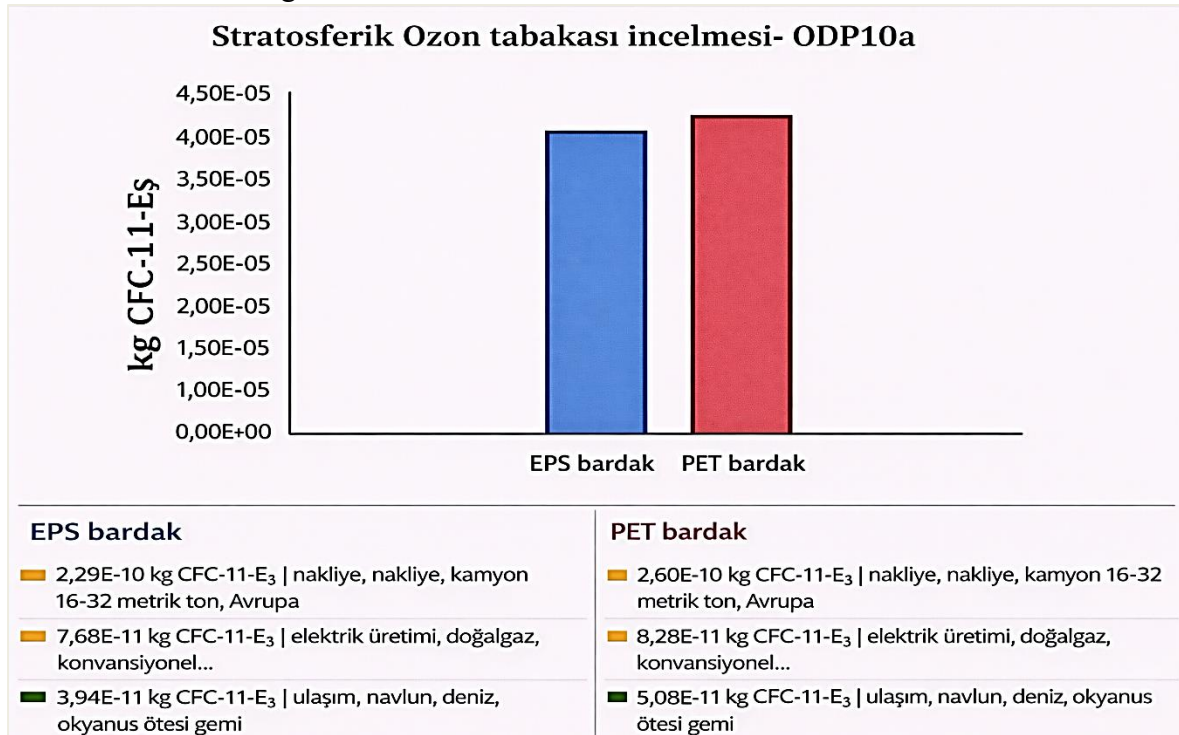
En fazla berilyum (Be) salınımından kaynaklanmaktadır. Şekil 12’de görüleceği üzere, üretimlerdeki deniz ekotoksitesisi, %9,92 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de deniz ekotoksitesisi potansiyeline en fazla etki eden etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



Şekil 12. Deniz suyu ekotoksitesisi potansiyeli  
Figure 12. Marine aquatic ecotoxicity potential.

### 3.1.8. Ozon tabakasının tükenmesi potansiyeli

Bu etkinin nedeni havaya verilen başta CFC olmak üzere halojenli bileşiklerdir. Ayrıca güneşten gelen UV-B dalgaları da ozon tabakasının incelmeye sebep olmaktadır. Bitkilerin gelişiminde sorunlara ve insanlarda cilt kanserlerine neden olmaktadır. Biyokimyasal döngüleri, hayvan sağlığını, karasal ve sucul ekosistemleri de etkilemektedir. Şekil 13'te görüleceği üzere, üretimlerdeki stratosferik ozon tüketimi, %13,12 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de ozon tabakasının tükenmesi potansiyeli artışlarına en büyük etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, elektrik (doğalgazlı elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.

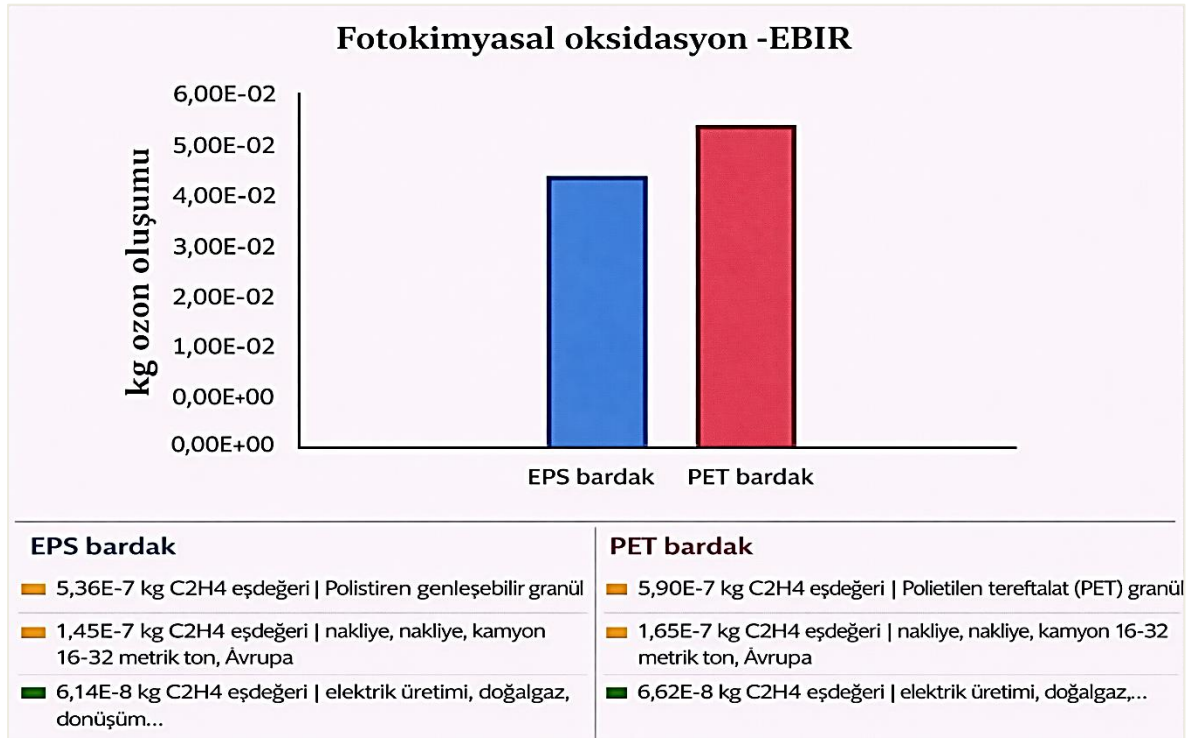


Şekil 13. Ozon tabakasının tükenmesi potansiyeli.  
Figure 13. Ozone depletion potential.

### 3.1.9. Fotokimyasal oksidasyon potansiyeli

Bu potansiyel, ekosisteme ve insan sağlığına zarar veren reaktif maddelerin oluşumuna sebep olmaktadır. Şekil 14'te görüleceği üzere, üretimlerdeki Fotokimyasal oksidasyonu, %11,65 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Fotokimyasal oksidasyon oluşumundaki artışlara en büyük etmen, tek kullanımlık EPS bardak üretim sürecinde EPS granül ham maddesinden, tek kullanımlık PET bardak üretim sürecinde ise PET granül ham maddesi kullanımından kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.

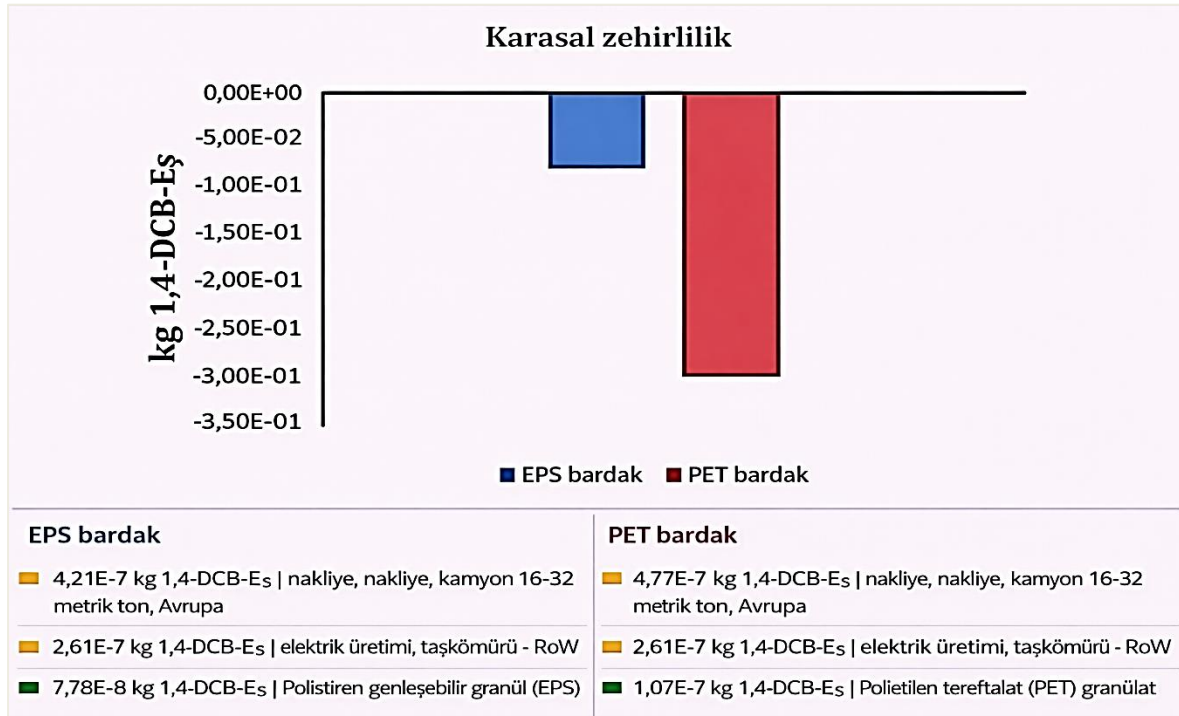




**Şekil 14.** Fotokimyasal oksidasyon potansiyeli.  
**Figure 14.** Photochemical oxidation potential.

### 3.1.10. Kara ekotoksitesi potansiyeli

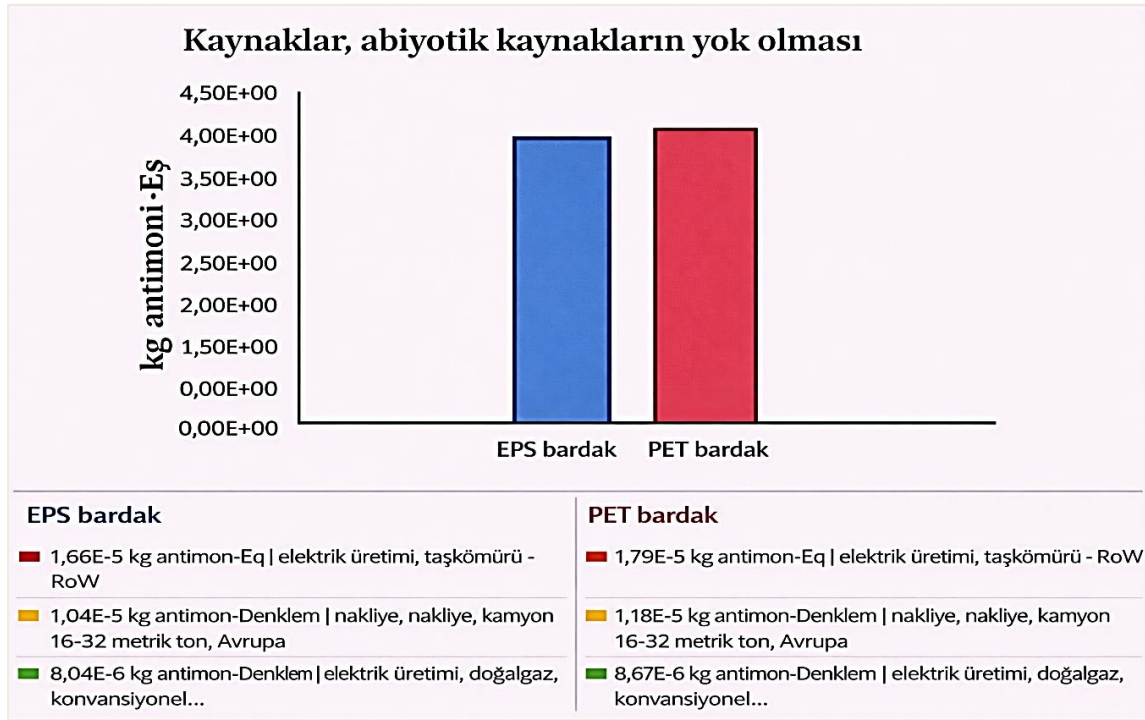
Karasal organizmalar ve kara ekosistemleri üzerindeki toksik etkidir. Şekil 10'da görüleceği üzere, üretim süreçlerinin karasal ekotoksisiteyi azaltıcı (negatif yöndeki etkisinin, %200,66 farkla tek kullanımlık PET bardakta daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de Kara ekotoksitesi potansiyeli artışlarına en büyük etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. Şekil 15'teki grafiğin altında yer alan negatif değerler, zararlı etkileri önlediğini göstermekte, negatif değerler olumlu olarak değerlendirilir. Negatif değerlerin çıkması, karasal ekotoksite potansiyelini azaltma yönünde etki ortaya çıkardığını göstermektedir. Karasal ekotoksite azaltan en önemli işlem, geri dönüşüm işlemidir. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



**Şekil 15.** Kara ekotoksitesi potansiyeli.  
**Figure 15.** Terrestrial ecotoxicity potential.

### 3.1.11. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli

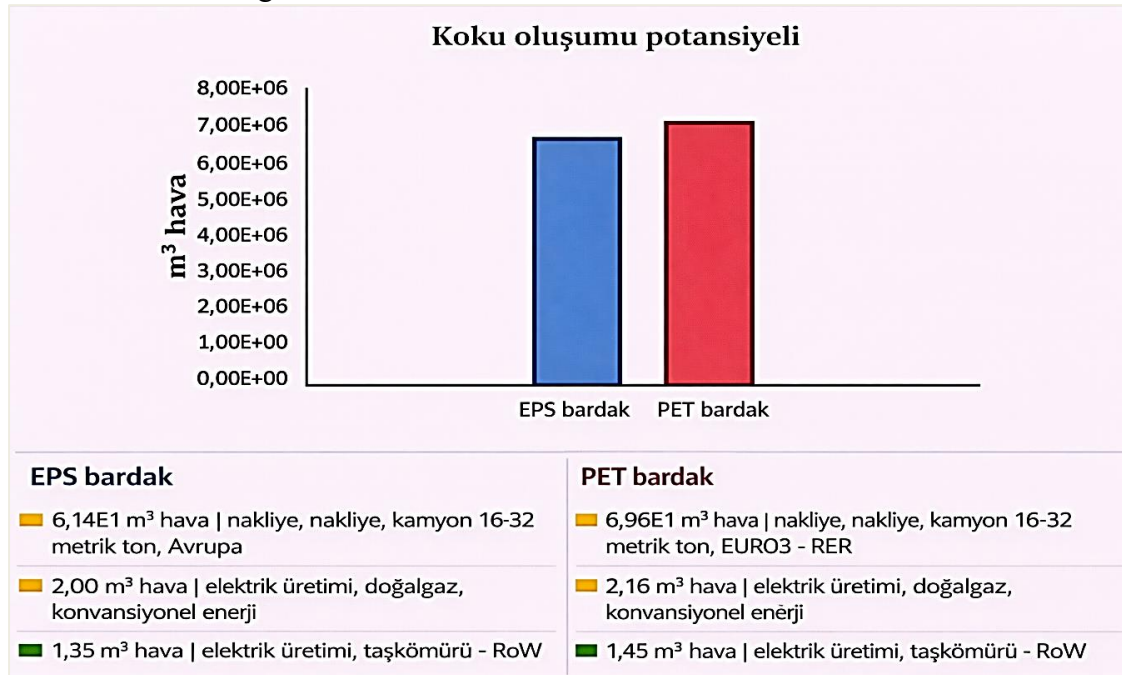
Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli, YDD basamakları tarafından kullanılan fosil yakıtların etkisidir. Şekil 16'de görüleceği üzere, üretimlerdeki kaynaklar kullanımı, %4,95 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeline en fazla etki eden etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



Şekil 16. Abiyotik kaynakların tükenmesi potansiyeli.  
Figure 16. Potential for depletion of abiotic resources.

### 3.1.12. Koku oluşumu potansiyeli

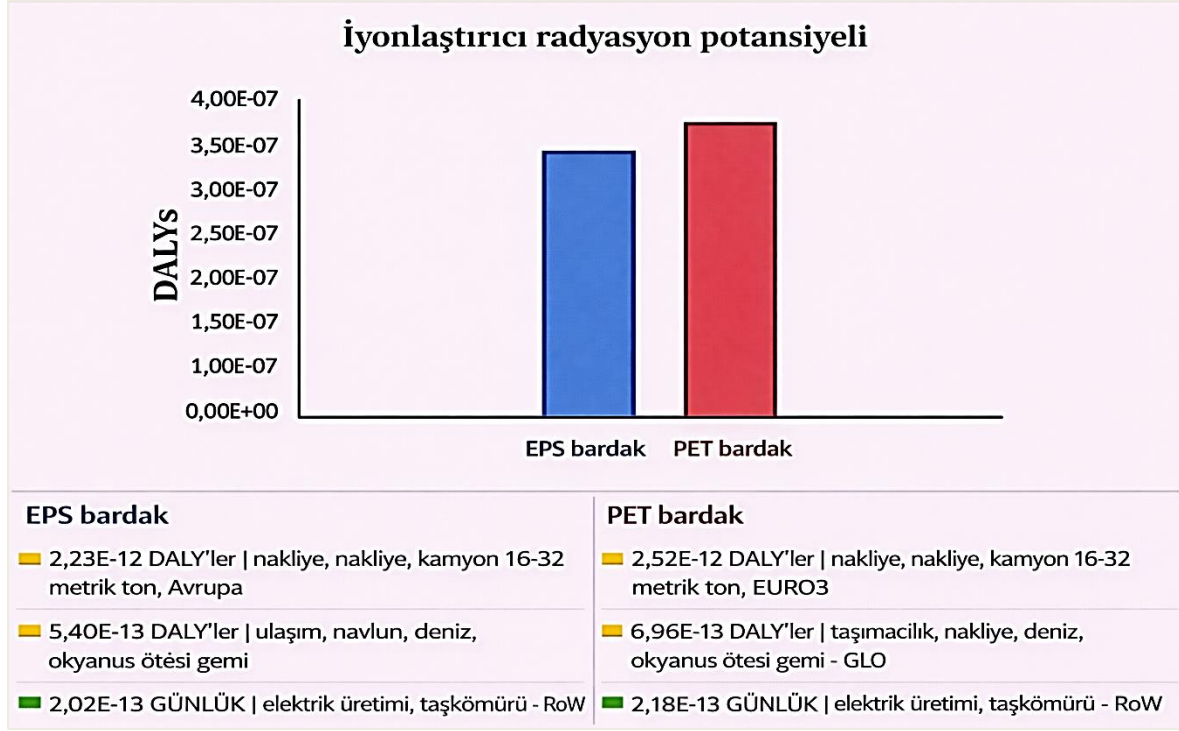
Şekil 17’de görüleceği üzere, üretimlerdeki kötü koku oluşumu, %11,51 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de koku oluşumu potansiyeli artışlarına en büyük etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, elektrik (doğalgazlı elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



Şekil 17. Koku oluşumu potansiyeli.  
Figure 17. Malodours air potential.

### 3.1.13. İyonlaştırıcı radyasyon potansiyeli

Şekil 18’de görüleceği üzere, üretimlerdeki iyonlaştırıcı radyasyon değeri, %14,24 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de iyonlaştırıcı radyasyon potansiyeli artışlarına en büyük etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, ham maddenin gemi ile nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.

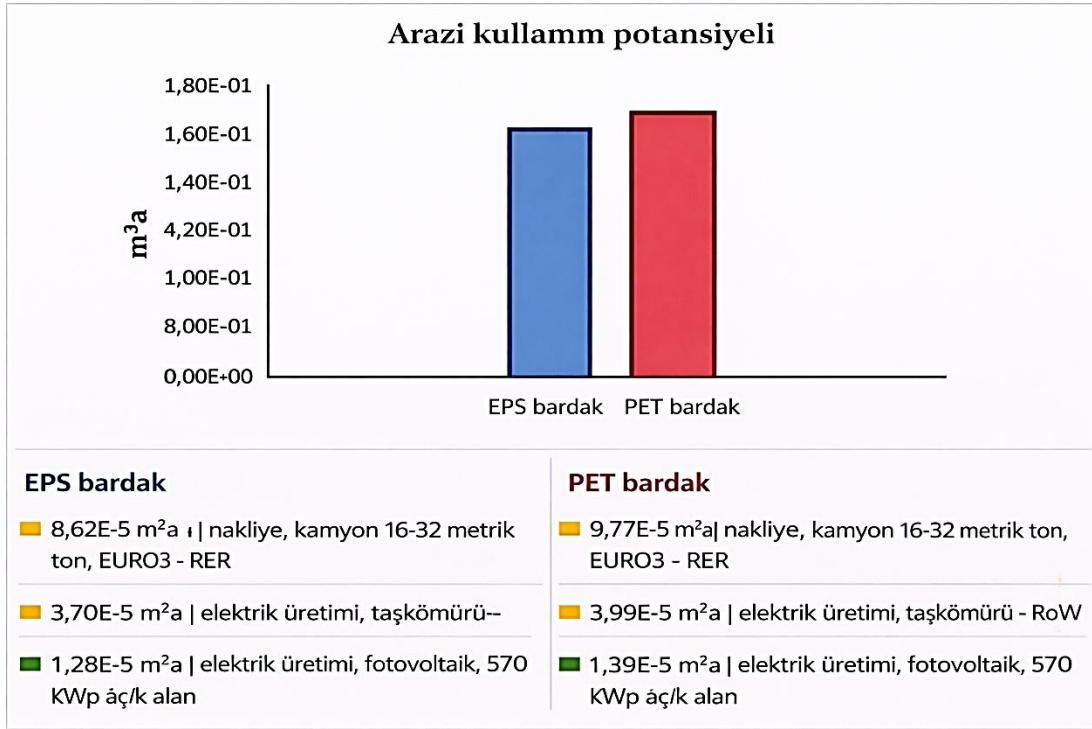


Şekil 18. İyonlaştırıcı radyasyon potansiyeli.

Figure 18. Ionizing radiation potential.

### 3.1.14. Arazi kullanım oranları

Şekil 19’da görüleceği üzere, üretimlerdeki arazi kullanım oranları, %11,27 farkla tek kullanımlık PET bardakta yüksek tespit edilmiştir. Her iki üretim sürecinde de Arazi kullanım oranlarındaki artışlara en büyük etmen, kamyon ile ham madde nakliyesinden kaynaklanmaktadır. Her iki üretim sürecinde de en büyük ikinci etmen, elektrik (kömürlü elektrik üretimi) tüketiminden kaynaklanmaktadır. Grafiğin alt kısmında, en yüksek çıkan etmenlerden 3 etmen gösterilmektedir.



Şekil 19. Arazi kullanım potansiyeli.

Figure 19. Land use potential.

### 3.2. Tartışma: Bulguların Literatür ile Karşılaştırılması ve Yorumlanması

Bu çalışmada elde edilen bulgular, tek kullanımlık PET ve EPS bardakların çevresel etkilerinin etki kategorilerine göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Küresel ısınma potansiyeli başta olmak üzere birçok etki kategorisinde PET bardakların daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, PET üretim süreçlerinin enerji yoğun yapısı ile açıklanabilir ve literatürde yer alan çalışmalarla uyumludur.

Buna karşılık, bazı etki kategorilerinde EPS bardakların daha yüksek değerler göstermesi, çevresel performansın tek bir gösterge ile değerlendirilemeyeceğini ortaya koymaktadır. Bu durum literatürde “çevresel takaslar (trade-offs)” olarak ifade edilmekte ve farklı etki kategorilerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Çalışmada dikkat çeken en önemli bulgulardan biri, elektrik tüketiminin çevresel etkiler üzerindeki baskın rolüdür. Türkiye elektrik üretim karomasında kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yüksek paya sahip olması, üretim süreçlerinden kaynaklanan çevresel etkilerin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, aynı üretim süreçlerinin farklı ülkelerde farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, yalnızca malzeme seçiminin değil, aynı zamanda üretim süreçleri ve enerji kaynaklarının da çevresel performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çevresel etkilerin azaltılması için üretim süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürde tek kullanımlık PET ve EPS ürünlerin çevresel etkilerini inceleyen benzer yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) çalışmalarıyla kıyaslanmıştır. Küresel ısınma potansiyeli ve asidifikasyon gibi temel etki kategorilerinde, üretim aşamasının çevresel yükler üzerindeki baskın rolü bu çalışmada da açık biçimde

ortaya konmuştur. Bu bulgu, Jung ve ark. (2025) tarafından raporlanan ve tek kullanımlık PET bardaklarda toplam sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünün ham madde üretimi ve enerji tüketiminden kaynaklandığını gösteren sonuçlarla uyumludur. Benzer şekilde, NAPCOR (2023) ve ACS Publications (2024) çalışmalarında vurgulanan, plastik ürünlerin çevresel performansının büyük ölçüde enerji karması ve hammadde yoğunluğuna bağlı olduğu yönündeki bulgular, bu çalışmanın sonuçlarıyla örtüşmektedir. Bununla birlikte, etki kategorileri arasındaki görece farkların büyüklüğü, kullanılan veri setleri, sistem sınırları ve coğrafi koşullardaki farklılıklara bağlı olarak literatürde bildirilen değerlerle kısmen farklılık gösterebilmektedir. Özellikle literatürde sıklıkla karşılaşılan ve genellikle yenilenebilir enerji payının daha yüksek olduğu Avrupa veya Kuzey Amerika merkezli YDD çalışmalarından farklı olarak, sunduğumuz bu analizde PET ve EPS bardaklar arasındaki çevresel etki makasının bazı kategorilerde görece daha dar çıktığı görülmüştür. Bu durumun temel nedeni, Türkiye ulusal elektrik karmasında yer alan yüksek fosil yakıt oranının (özellikle %34,6 kömür ve %22,9 doğalgaz), plastiğin türünden (PET veya EPS) kaynaklanan yapısal ve ham madde bazlı çevresel farkları gölgede bırakarak üretim aşamasını domine etmesidir.

### 3.3. Kapsam, Veri Kalitesi, Sınırlılıklar ve Alternatif Senaryoların Değerlendirilmesi

Bu araştırma, "beşikten kapıya" (cradle-to-gate) sınırları içerisinde ve spesifik bir üretim tesisinden (Dağyüce Plastik, Elazığ) elde edilen birincil (primary) operasyonel verilerle gerçekleştirilmiştir. Bu durum, çalışmanın yerel üretim dinamiklerini yüksek doğrulukla yansıtan güçlü bir "örnek olay incelemesi" (case study) olmasını sağlamıştır. Analiz edilen veriler, ikincil veri tabanlarındaki varsayımlar yerine gerçek fabrika operasyonlarına dayandığından, sonuçların güvenilirliği yüksektir. Ancak bu durum aynı zamanda sonuçların farklı üretim teknolojileri kullanan fabrikalara genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Ayrıca ömür sonu (End-of-Life) senaryolarının analiz kapsamı dışında bırakılması, ürünlerin toplam çevresel performanslarına dair kesin yargılara varılmasını engellemektedir. Örneğin, PET'in geri dönüşüm altyapısına sahip olması veya EPS'nin doğada parçalanma ve hacimsel kaplama sorunları, "beşikten mezara" (cradle-to-grave) yapılacak bir analizde mevcut etki sıralamasını değiştirebilecek kritik faktörlerdir.

Hakem ve literatür değerlendirmeleri ışığında, incelenen plastik bardakların ahşap, metal veya cam gibi çok kullanımlık alternatif malzemelerle değiştirilmesi fikri, "başabaş noktası" (break-even point) analizleriyle birlikte ele alınmalıdır. Çok kullanımlık alternatiflerin hammadde ve üretim aşamasındaki çevresel ayak izleri, tek kullanımlık plastiklere göre başlangıçta çok daha yüksektir. Alternatif ürünlerin çevresel bir kazanç sağlayabilmesi için yüksek bir kullanım döngüsüne ulaşması ve yıkama/sterilizasyon süreçlerinin düşük emisyonlu yöntemlerle yapılması gerekmektedir [10, 11]. Dolayısıyla, mevcut "beşikten kapıya" verileri üzerinden farklı materyallere kesin ve normatif bir geçiş önerisinde bulunmak yerine; üretim tesislerinde yenilenebilir enerji entegrasyonu, ambalaj azaltımı (dematerialization) ve enerji verimliliği gibi adımlara odaklanmak, mevcut kısıtlar dahilinde daha gerçekçi bir çevresel strateji sunmaktadır.

## 4. Sonuç

Çalışmanın Kapsamı ve Yöntem Bu çalışmada, 1 adet tek kullanımlık EPS bardak ile 1 adet tek kullanımlık PET bardağın çevresel etkileri, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Analiz, ISO 14040/14044 standartlarına uygun olarak ve OpenLCA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sistem sınırları, "beşikten kapıya" (cradle-to-gate) yaklaşımıyla belirlenmiş olup; hammadde temini, üretim süreci ve

fabrika çıkışına kadar olan nakliye aşamalarını kapsamaktadır. Bu süreçlere ait girdi ve çıktı verileri değerlendirilerek 14 farklı çevresel etki kategorisinde analizler yapılmıştır.

Bulgular ve Karşılaştırma Elde edilen analiz sonuçlarına göre, her iki bardak türü için de "koku oluşumu potansiyeli" en yüksek etki kategorisi olarak tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla; deniz çökelti zehirliliği, insan sağlığı, iklim değişimi ve tatlı su zehirliliği takip etmektedir [3].

İki ürün kıyaslandığında, çevresel etki puanları arasındaki farkların kategori bazında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. En belirgin fark, %200,66 oranla "Karasal zehirlilik" kategorisinde PET bardağın aleyhine tespit edilmiştir. İki ürün arasındaki makasın en daraldığı kategori ise %4,95 fark oranıyla "Abiyotik kaynakların tükenmesi" olmuştur.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, belirlenen 'beşikten kapıya' sistem sınırları ve Elazığ'daki spesifik üretim tesisi verileri ışığında; tek kullanımlık PET bardağın üretim aşamasından kaynaklı çevresel yükünün, EPS bardağa kıyasla incelenen 14 kategorinin çoğunluğunda (özellikle karasal ekotoksiste ve küresel ısınma potansiyelinde) daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu farkın temel nedenleri incelendiğinde; hammadde yoğunluğu, üretimde tüketilen elektriğin kömür ağırlıklı olması ve nakliye süreçlerinin belirleyici etmenler olduğu görülmüştür. Ancak, bu sonuçlar yalnızca hammadde eldesi ve üretim aşamalarını kapsamakta olup, ürünlerin kullanım ömrü sonu (atık yönetimi, okyanus kirliliği, mikroplastik oluşumu ve geri dönüşüm verimliliği) senaryolarını içermemektedir. Bu nedenle, 'PET bardak çevresel açıdan EPS'den her koşulda daha zararlıdır' şeklinde kesin bir yargıya varmak mevcut metodolojik kısıtlar dahilinde uygun değildir.

### Öneriler:

Bu çalışmanın sonuçları, ele alınan fabrikanın üretim verileri ve "beşikten kapıya" sınırları ile kısıtlıdır. Ürünün kullanım ömrü sonu (atık yönetimi, geri dönüşüm veya doğada bozunma) senaryoları dahil edilmediğinden, "PET bardak her koşulda daha zararlıdır" genellemesini yapmak için "beşikten mezara" (cradle-to-grave) analizlere ihtiyaç vardır. Üretim aşamasındaki çevresel etkilerin azaltılması adına; fabrikanın enerji ihtiyacını yenilenebilir kaynaklardan sağlaması ve hammadde tedarikinde daha düşük emisyonlu lojistik yöntemleri (demiryolu vb.) tercih etmesi sürdürülebilirlik açısından önemli iyileştirme fırsatları sunmaktadır.

Literatürde tek kullanımlık ürünlere alternatif olarak sunulan cam, porselen veya metal gibi çok kullanımlık bardakların çevresel avantajları ise kullanım sayısına (break-even point) bağlıdır. İlgili literatür çalışmaları, çok kullanımlık ürünlerin üretim aşamasındaki çevresel yüklerinin (özellikle enerji ve hammadde yoğunluğu nedeniyle) tek kullanımlıklara göre başlangıçta çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Örneğin, Hocking (1994) tarafından yapılan öncü çalışmada, seramik bir bardağın enerji verimliliği açısından tek kullanımlık köpük (EPS) bardağı yakalaması için en az 39 ila 100 kez; kağıt bardağı yakalaması için ise çok daha fazla kullanılması gerektiği belirtilmiştir [18]. Benzer şekilde Woods ve Bakshi (2014), tekrar kullanılabilir bardakların çevresel avantajının, kullanım sayısına ve yıkama yönteminin verimliliğine (su sıcaklığı, deterjan kullanımı) doğrudan bağlı olduğunu vurgulamıştır [19]. Dolayısıyla alternatif ürünlere geçiş, ancak uzun ömürlü kullanım ve verimli yıkama döngüleri sağlandığında çevresel bir kazanç oluşturmaktadır. Bu nedenle, tüketicilerin alternatif ürünlere yönelmesi önerilirken, bu ürünlerin uzun ömürlü kullanımının önemi de vurgulanmalıdır. Gelecek çalışmalarda, farklı atık senaryolarının ve

yaşam döngüsü maliyet analizlerinin de sürece dahil edilmesi, literatürdeki bu boşluğun doldurulmasına katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma, belirli bir coğrafi bölgedeki (Elazığ, Türkiye) ve belirli bir teknolojik altyapıya sahip tek bir üretim tesisinin birincil verilerine dayanmaktadır. Analizde kullanılan elektrik tüketim verileri ve makine verimlilikleri, söz konusu fabrikanın 2023 yılına ait spesifik koşullarını yansıtmaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar; farklı üretim teknolojileri kullanan, farklı iklim bölgelerinde yer alan veya farklı enerji verimliliği politikaları izleyen diğer tesisler için birebir geçerli olmayabilir. Çalışma, sektörel bir ortalamayı (sectoral average) değil, spesifik bir üretim senaryosunu (site-specific scenario) temsil etmektedir. Gelecek çalışmalarda, veri kalitesini artırmak ve daha genelleyici sonuçlara ulaşmak adına, farklı bölgelerdeki birden fazla tesisten veri toplanarak sektörel ortalamaların oluşturulması önerilmektedir.

## 5. Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin temini sürecinde sağlanan katkılarından dolayı Dağyüce Plastik firmasına teşekkür edilmektedir.

## 6. Kaynaklar

- [1] NAPCOR (2023). PET Life Cycle Assessment Report: Comparison of PET, Glass, and Aluminum. *National Association for PET Container Resources*.
- [2] Pagev, <https://pagev.Org/Covid-19-Un-Plastik-Sektorune-Etkisi-Yuzde-3-5-Daralma-Olacak> (Erişim Tarihi: 20.12.2023).
- [3] Beycur, S. 2024. PET ve EPS bardakların yaşam döngüsü değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekobilişim Anabilim Dalı, Elazığ.
- [4] Greenpeace (2022). Sağlık Uzmanları Yanıtlıyor: Tek Kullanımlık Plastikler Bizi Virüsten Korur mu? (Erişim Tarihi: 30.03.2022).
- [5] ISO 14040:2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization, Geneva.
- [6] Jung, S., et al. (2025). Comparative life cycle GHG emissions of single-use plastic cups and reusable cups for beverages. *Environmental Engineering Research*, 30(2), 240-255.
- [7] Hedgehog Company (2024). Example results of an LCA: PVC vs. PET *Environmental Impact Categories Analysis*. LCA Knowledge Base.
- [8] Baek, J., et al. (2024). Replacing Plastics with Alternatives Is Worse for Greenhouse Gas Emissions in Most Cases. *Environmental Science & Technology*, 58(8), 3646-3656.
- [9] EUMEPS (2024). LCA Study Highlights Environmental Benefits of EPS Cooler Boxes vs Cardboard Alternatives. European Manufacturers of Expanded Polystyrene Report.
- [10] WJARR (2025). Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use disposable and reusable cups: Environmental and economic break-even analysis. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 102-115.
- [11] Verive (2024). Is a reusable cup more sustainable than a disposable one? Life Cycle Assessment Insights Report.
- [12] Üstün Odabaşı, S., Büyükgüngör, H. (2022). Plastik manşonun yaşam döngüsü değerlendirme analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 434-443.