

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TRANSFORMATÖR ÜRETİMİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA):
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİYLE ÇEVRESEL ETKİLERİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yağmur BİLGİN PİLCİOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Mühendisliği ve Yönetimi Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TRANSFORMATÖR ÜRETİMİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA):
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİYLE ÇEVRESEL ETKİLERİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yağmur BİLGİN PİLCİOĞLU
(501191761)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Mühendisliği ve Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Orhan İNCE

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) IN TRANSFORMER PRODUCTION:
EVALUATING ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM A SUSTAINABILITY
PERSPECTIVE**

M.Sc. THESIS

**Yağmur BİLGİN PİLCİOĞLU
(501191761)**

Department of Environmental Engineering

Environmental Sciences Engineering and Management Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Orhan İNCE

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191761 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yağmur BİLGİN PİLCİOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TRANSFORMATÖR ÜRETİMİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA): SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİYLE ÇEVRESEL ETKİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Orhan İNCE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Fatoş GERMİRLİ BABUNA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nilgün KIRAN CILIZ
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16 Mayıs 2025
Savunma Tarihi : 11 Haziran 2025





Annem, babam ve eşime,



ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması sürecinde bana rehberlik eden, mesleki birikimi, bilgi ve deneyimiyle yol gösteren, her koşulda beni motive eden değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Orhan İNCE'ye; tez jürimde yer alarak değerlendirmeleri ve yapıcı önerileriyle çalışmama değerli katkılarda bulunan Sayın Prof. Dr. Fatoş GERMİRLİ BABUNA'ya ve Sayın Prof. Dr. Nilgün KIRAN CİLİZ'a, bilgi ve deneyimleriyle çalışmama katkı sağlayan Sayın Orhan ATACAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu süreçte sabırları ve sevgileriyle her zaman yanımda olan, bana güç ve motivasyon kaynağı olan sevgili aileme ve eşime, çalışmama katkı sağlayan kıymetli meslektaşlarıma ve bu yolculuğumda bana eşlik eden tüm dostlarıma gönülden teşekkür ederim.

Bu çalışma; 46767 proje numarası ile İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri birimince desteklenmiştir.

Mayıs 2025

Yağmur BİLGİN PİLCİOĞLU
(Çevre Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Transformatör Üretimi ve Sektörel Arka Plan	5
2.2 Yaşam Döngü Değerlendirmesi (LCA) Kavramı.....	6
2.3 Transformatör Üretiminde Yapılmış LCA Çalışmaları.....	7
2.4 Yaşam Döngü Değerlendirmesi ve Sürdürülebilirlik Perspektifi.....	12
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	15
3.2 Yaşam Döngüsü Envanteri.....	15
3.2.1 Fonksiyonel birim.....	16
3.2.2 Sistem sınırları.....	16
3.2.3 Veri kaynakları ve toplanması.....	25
3.2.4 Tahsisat yöntemleri.....	27
3.2.5 Malzeme bileşimi.....	28
3.3 LCA Yaklaşımı ve Standartlar	31
3.4 Kullanılan Yaşam Döngü Değerlendirmesi Modelleme Aracı	32
3.5 Etki Değerlendirme Metodolojisi.....	34
3.5.1 EF 3.1 (çevresel ayak izi) yöntemi	34
3.5.2 ReCiPe 2016 yöntemi.....	36
3.5.3 ReCiPe 2016 ve EF 3.1 yöntemlerinin benzerlikleri ile ayırt edici özellikleri.....	38
3.6 Belirsizlik ve Hassasiyet Analizi.....	38
3.7 Veri Kalitesi Değerlendirmesi.....	39
3.7.1 Puanlama ve ağırlıklı endeks	40
3.7.2 Sonuçların sınıflandırılması.....	41
4. BULGULAR.....	43
4.1 Environmental Footprint 3.1 Çerçevesinde Sonuçların Analizi.....	43
4.2 ReCiPe 2016 Endpoint Çerçevesinde Sonuçların Analizi	46
4.3 Sıcak Nokta Analizi.....	48
4.4 Senaryo 1: Yenilenebilir Enerji Kullanımı.....	50
4.4.1 Senaryonun amacı ve kapsamı.....	50
4.4.2 Elektrik ikame mekanizması.....	50
4.5 Senaryo 2: Beşikten Kapıya Sistem Sınırlarının Değerlendirilmesi	52

5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR	57
5.1 Tartışma	57
5.2 Sonuçlar	63
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	71



KISALTMALAR

ABB	: Asea Brown Boveri (İsviçre-İsveç merkezli güç ve otomasyon teknolojileri şirketi)
ADP	: Abiyotik Kaynak Tükenme Potansiyeli
AWARE	: “Available Water Remaining” (bölgesel su kıtlığı göstergesi)
BM	: Birleşmiş Milletler
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CFC-11	: Trikloroflorometan (ozon referans gazı)
CH₄	: Metan
CO₂	: Karbondioksit
CTUe	: Comparative Toxic Unit, ekotoksosite
CTUh	: Comparative Toxic Unit, insan toksisitesi
ÇYS	: Çevre Yönetim Sistemi
DALY	: Disability Adjusted Life Year (sağlıklı yaşam yılı kaybı)
EF	: Environmental Footprint (Çevresel Ayak İzi)
GSMH	: Gayri Safi Milli Hasıla
GWP100	: Küresel Isınma Potansiyeli – 100 yıl
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	: International Organization for Standardization
JRC	: Joint Research Centre (European Commission)
kV	: Kilovolt
kVA	: Kilovolt-amper
LCA	: Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
LCI	: Life Cycle Inventory (Yaşam Döngüsü Envanteri)
LCIA	: Life Cycle Impact Assessment (Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi)
m²	: Metrekare
MJ	: Megajoule
MVA	: Megavolt-amper
N₂O	: Diazot Monoksit
NMVOC	: Metan Dışı Uçucu Organik Bileşikler

OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
PEF	: Product Environmental Footprint
PEFCR	: Product Environmental Footprint Category Rules
PM_{2.5}	: 2.5 µm'den küçük partikül madde
Sb	: Antimon (referans element)
SETAC	: Society of Environmental Toxicology and Chemistry
Sv	: Sievert (iyonlaştırıcı radyasyon birimi)
UN	: United Nations
UNEP	: United Nations Environment Programme
USEtox	: Uluslararası toksisite karakterizasyon modeli
WMO	: World Meteorological Organization
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : 2010–2025 Döneminde transformatörler üzerine yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi: güncel çalışmaların akademik özeti.	10
Çizelge 3.1 : Süreç kapsam matrisi.....	17
Çizelge 3.2 : A1 – hammadde üretimi aşaması (Girdi).	18
Çizelge 3.3 : A2 – hammadde taşımacılığı aşaması (Girdi).	19
Çizelge 3.4 : A3- üretim (fabrika-içi) aşaması (Girdi).	20
Çizelge 3.5 : A4 – ürün lojistiği aşaması (Girdi-Çıktı).	21
Çizelge 3.6 : B – kullanım aşaması (30 Yıl) (Girdi).....	21
Çizelge 3.7 : C – ömür sonu (Girdi-Çıktı).....	22
Çizelge 3.8 : Transformatör üretim sürecinde oluşan atıkların sınıflandırılması ve bertaraf yöntemleri.	23
Çizelge 3.9 : Hammadde girdilerinin ecoinvent süreçleri ile eşleştirilmesi (1 adet transformatör için).	30
Çizelge 3.10 : ReCiPe 2016 ve EF 3.1 yöntemlerinin karşılaştırılması.	38
Çizelge 3.11 : Çalışmanın veri kalitesi endeksi.....	40
Çizelge 3.12 : Veri kalitesi endeksi sonuçlarının sınıflandırılması.	41
Çizelge 4.1 : Yaşam döngüsü aşamalarına göre iklim değişikliği (Climate Change) etkisi sonuçları.	44
Çizelge 4.2 : Seçili çevresel etki kategorileri mevcut durum (şebeke elektriği) ve senaryo 1 (fotovoltaik elektrik) sonuçlarının karşılaştırılması (EF 3.1 karakterizasyon) ve değişim oranları.	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Transformatörün yaşam döngü aşamaları.	16
Şekil 3.2 : Yaşam döngü değerlendirme- sistem girdi ve çıktıları.....	25
Şekil 3.3 : Yaşam döngüsü metodolojisinin kapsamı.....	32
Şekil 4.1 : 1000 kVA yağlı tip transformatörün yaşam döngüsü boyunca etki değerlendirmesi.	45
Şekil 4.2 : ReCiPe 2016 etki değerlendirme sonuçları.	47
Şekil 4.3 : Senaryo 1 etki değerlendirme sonuçları.	51
Şekil 4.4 : Senaryo 2 etki değerlendirme sonuçları.	53



TRANSFORMATÖR ÜRETİMİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ (LCA): SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİYLE ÇEVRESEL ETKİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Transformatörler, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin kritik bileşenleri olup, üretimleri ve uzun süreli kullanımları boyunca önemli çevresel etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle, transformatörlerin çevresel performansının yaşam döngüsü boyunca kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, sürdürülebilir elektrik altyapısı planlaması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, transformatör üretim süreçlerinin sürdürülebilirlik perspektifiyle yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini kapsamlı ve nicel olarak değerlendirmektir. Bu amaçla, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yöntemi, Avrupa Birliği Çevresel Ayak İzi (EF) 3.1 ve ReCiPe 2016 etki değerlendirme metodolojileri kullanılarak uygulanmıştır. Fonksiyonel birim olarak, bir adet 1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörünün ham madde tedarikinden üretimine, yaklaşık 30 yıllık kullanım ömrü boyunca işletimine ve ömrü sonu bertarafına kadarki hizmeti tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, beşikten mezara yaklaşımı benimsenmiş ve sistem sınırları hammadde temini, üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarını kapsamaktadır. YDD modellemesi için gerekli birincil veriler transformatör üreticisinden sağlanmış; arka plan verileri Ecoinvent veri tabanından alınarak analizler SimaPro yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Değerlendirme sonuçları, incelenen tüm çevresel etki kategorilerinde en büyük payın transformatörün kullanım aşamasındaki enerji kayıplarından kaynaklandığını göstermiştir. Özellikle iklim değişikliği (karbon ayak izi) kategorisinde kullanım aşaması, üretim ve diğer yaşam döngüsü aşamalarına kıyasla baskın bulunmuştur. Nitekim, 30 yıllık yaşam döngüsü boyunca transformatörün yol açtığı yaklaşık 498 ton CO₂-eşdeğeri sera gazı emisyonunun %98'inin kullanım aşamasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Çalışmada, temel durum analizi sonrasında iki farklı senaryo değerlendirilmiştir. Senaryo 1, transformatörün 30 yıllık kullanım ömrü boyunca Türkiye'nin mevcut şebeke elektrik karışımı yerine %100 yenilenebilir (fotovoltaik) kaynaklardan elektrik kullanılması durumunu temsil etmektedir. Bu iyileştirme senaryosu, özellikle işletme aşamasından kaynaklanan emisyonları azaltma potansiyelini ortaya koymak amacıyla kurgulanmıştır. Senaryo 1'in sonuçlarına göre, işletme sırasında tamamen temiz elektrik kullanımı, transformatörün yaşam döngüsü boyunca neden olduğu sera gazı emisyonlarında yaklaşık %80–82 oranında bir azaltım sağlamaktadır. Senaryo 2 ise sistem sınırlarının değiştirilerek kullanım aşamasının kapsam dışı bırakıldığı bir durumu temsil etmektedir. Bu “beşikten kapıya” olarak adlandırılan senaryoda, transformatörün sadece üretim safhaları (hammadde çıkarımı ve işlenmesi, fabrika içi imalat ve montaj, ve ürünün fabrika çıkışına kadarki süreçler) değerlendirilmiştir. Kullanım aşaması hariç tutulduğunda, 1000 kVA'lık dağıtım transformatörünün

yaşam döngüsü sera gazı emisyonları ~10.000 kg (10 ton) CO₂-eşdeğeri mertebesine düşmektedir. Senaryo 2 analizi, transformatörün toplam çevresel etkilerinde kullanım aşamasının oynadığı baskın rolü izole ederek gözler önüne sermektedir. Bu senaryo aynı zamanda sonuçların, sistem sınırına son derece duyarlı olduğunu da vurgulamaktadır:

Elde edilen bulgular ışığında, transformatörlerin yaşam döngüsü çevresel etkilerinin azaltılması için birincil önceliğin enerji kullanım verimliliğinin artırılmasına ve temiz enerji kaynaklarının kullanımına verilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Sıcak nokta analizi açıkça göstermiştir ki transformatörde meydana gelen enerji kayıplarını azaltmaya yönelik iyileştirmeler karbon ayak izini azaltmada en etkili stratejidir. Yenilenebilir enerji senaryosunda elde edilen %81'lük emisyon azaltım potansiyeli, enerji kaynağının transformatör yaşam döngüsü karbon ayak izini düşürmedeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, çalışma Türkiye'de transformatör sektörü için ilk kapsamlı YDD uygulamasını sunmakta, literatüre orijinal veriler kazandırmakta ve endüstride temiz enerji kullanımı ve enerji verimliliği odaklı iyileştirme stratejileri için bilimsel bir temel teşkil etmektedir.

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) IN TRANSFORMER PRODUCTION: EVALUATING ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM A SUSTAINABILITY PERSPECTIVE

SUMMARY

Transformers are critical components of electrical transmission and distribution networks, and their production and prolonged use can result in significant environmental impacts over their lifespan. In the pursuit of sustainable power infrastructure, it is essential to thoroughly evaluate the life-cycle environmental performance of transformers. This MSc thesis addresses that need by conducting a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) of transformer production and use from a sustainability perspective. The main objective is to quantify the environmental impacts associated with a distribution transformer throughout its entire life cycle and to identify opportunities for impact reduction. By focusing on a real-world transformer product, this study aims to provide scientific insights that can guide sustainability improvements in the power sector. Importantly, it represents a pioneering effort as the first extensive LCA conducted for the transformer industry in Turkey, thereby filling a gap in the literature with region-specific data and analysis. The study is motivated by global and national calls for reducing the carbon footprint of energy systems and provides a foundation for developing strategies to make electricity distribution more sustainable.

The assessment follows the standard LCA framework in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 guidelines, ensuring a systematic and internationally accepted approach. For impact assessment, two complementary methods were employed: the Environmental Footprint (EF) 3.1 method and the ReCiPe 2016 method. The functional unit of the study is defined as the full life-cycle service of a single 1000 kVA oil-immersed distribution transformer, encompassing all stages from raw material extraction and manufacturing, through approximately 30 years of use (operation) in the field, to end-of-life disposal or recycling. Accordingly, a cradle-to-grave system boundary was adopted: the LCA covers raw material acquisition, component manufacturing and assembly, transportation, operational use of the transformer over its lifespan, and end-of-life treatment. To ensure high data quality, primary inventory data were collected directly from a transformer manufacturing facility (for processes such as core fabrication, coil winding, assembly, etc.), reflecting actual industrial practices in Turkey. Meanwhile, secondary (background) data for upstream processes (e.g., production of steel, copper, oil, and electricity generation) were obtained from the Ecoinvent database (a well-established LCI database). The LCA model was built, and calculations were carried out using SimaPro software, which facilitated the integration of various datasets and the implementation of the chosen impact assessment methods. All analysis steps were carried out in line with ISO standards: first defining the goal and scope, then compiling the life-cycle inventory, performing impact assessment with EF 3.1 and ReCiPe 2016 characterization factors, and finally interpreting the results.

The LCA results demonstrate that the use phase dominates the environmental impacts of the distribution transformer across virtually all assessed categories. In particular, the climate change impact (global warming potential, GWP) is overwhelmingly driven by the transformer's operational phase. Over a 30-year lifetime, the transformer is responsible for an estimated total of ~498 metric tons of CO₂-equivalent greenhouse gas emissions. Remarkably, about 97–98% of this life-cycle GHG footprint is attributable to the electricity losses during the use phase, i.e., the energy dissipated as heat through no-load and load losses while the transformer is in service. By contrast, the production-related stages (including raw material extraction, manufacturing, and transport to the use site) collectively contribute only about 2–3% of the total GHG emissions. This stark contrast clearly identifies the operational energy loss as the “hotspot” of the life cycle, overshadowing all other phases in terms of impact. The dominance of the use phase is explained by the continuous energy consumption of the transformer over decades, coupled with the carbon-intensive nature of electricity generation in the grid mix. In effect, the emissions from fuel combustion for electricity generation (indirectly, to cover transformer losses) vastly exceed the one-time emissions from manufacturing the equipment.

Other environmental impact categories show a similar pattern of results. The manufacturing stage shows relatively small contributions in most categories. It was observed, however, that certain materials and processes in production have notable impacts in specific categories. The findings clearly indicate that the operational phase of the transformer's life cycle is by far the most critical in determining its environmental footprint, particularly in a country where the grid electricity mix is carbon-intensive. The disproportionate influence of the use phase underscores that improving in-service energy efficiency can yield the greatest environmental benefits.

To explore strategies for mitigating the identified impacts, two scenario analyses were conducted. In Scenario 1, the study examines the effect of powering the transformer entirely with 100% renewable electricity during its use phase, rather than the current Turkish grid mix (which includes a significant share of fossil fuels). This scenario simulates an ideal case where all electricity losses during the 30-year operation are compensated by clean energy sources (modeled here using photovoltaic solar energy from the Ecoinvent database).

The fossil resource depletion indicator likewise improved substantially (around 70% less fossil fuel use), which is expected given the replacement of coal/gas power with renewables. These improvements directly result from avoiding the emissions that would have been produced by fossil-based power plants in the baseline scenario. However, the renewable electricity scenario also revealed some trade-offs. These counterintuitive results are attributed to the “hidden” environmental burdens of renewable infrastructure. Manufacturing and deploying solar panels and associated equipment entail upstream impacts: mining and processing of metals (like silicon, silver, etc.), industrial processes for panel production, and so on. When the LCA model accounts for these upstream processes, the renewable scenario carries a higher load in mineral extraction and certain emissions (e.g., substances that deplete the ozone layer or contribute to toxicity) relative to the baseline. Despite these increases, it is important to note that the magnitudes of impacts like mineral depletion are relatively small in absolute terms compared to the enormous benefits gained in climate change and air pollution categories under Scenario 1. In summary, Scenario 1 underscores the decisive influence of electricity source on the transformer's life-cycle impacts: transitioning to a fully renewable power supply for transformer operation can

dramatically cut its carbon footprint and acidification impact, among others, reinforcing the push for cleaner grids.

In Scenario 2, the study investigates a different perspective by altering the system boundary to cradle-to-gate, meaning the use phase of the transformer is excluded from the analysis. This scenario effectively isolates the impacts from materials extraction and production processes up until the point the finished transformer leaves the factory (“gate”), with no impacts from operation or end-of-life considered. The purpose of Scenario 2 is to gauge the environmental profile of the transformer if one only considers its production footprint and to highlight how much the use phase drives the impacts by comparing against the full cradle-to-grave results. Under this cradle-to-gate scenario, the total GHG emissions associated with producing the 1000 kVA transformer are on the order of 9,073 kg CO₂-eq, which is only about 2% of the full cradle-to-grave emissions. In other words, 98% of the life-cycle carbon footprint is due to the use phase, consistent with the earlier finding. This scenario confirms that when operational impacts are omitted, the raw material production stage becomes the dominant contributor to most impact categories. Scenario 2 thus starkly illustrates the outsized role of the operational phase by showing that a transformer appears relatively benign if only cradle-to-gate impacts are considered, but the inclusion of the use phase changes the picture dramatically. This underscores a critical point: partial life-cycle assessments (ending at the factory gate) can severely underestimate the true environmental impact of products that consume energy during use. Therefore, a full cradle-to-grave perspective is essential for technologies like transformers to avoid misleading conclusions about where improvements are most needed.

The overarching conclusion is that for distribution transformers, especially in contexts with carbon-intensive electricity, improving operational energy efficiency and clean energy integration are the most impactful strategies for environmental improvement. The hotspot analysis pinpointed the transformer’s electrical losses as the chief contributor to emissions, which means that design and engineering measures to reduce losses are critical. Enhancing the energy efficiency of transformers can be achieved by using higher-grade core materials with lower hysteresis losses, optimizing the core and coil design to reduce load losses, and ensuring rigorous quality control in manufacturing to minimize performance deviations. Such measures would directly cut down the lifetime emissions. In parallel, increasing the share of renewable energy used during the transformer’s operation (and in the electricity grid at large) has been shown to massively reduce impacts in categories like climate change and acidification. Therefore, energy policy and utility practices that deliver cleaner electricity will significantly improve the life-cycle sustainability of not only transformers but electrical equipment in general. Concretely, the study suggests focusing on energy efficiency improvements in transformer design, such as reducing core losses (which could be incentivized through efficiency standards or labeling), and promoting the use of renewable power during the use phase, possibly via on-site solar generation for substations or through grid decarbonization policies. Additionally, the scenario results imply that a holistic view is needed when adopting new technologies: policymakers should support balanced strategies that not only curb operational emissions but also manage upstream impacts (e.g., recycling programs for renewable energy infrastructure to address mineral resource use).

In conclusion, by evaluating the environmental impacts of a 1000 kVA distribution transformer from cradle to grave, this research provides actionable knowledge to reduce the carbon footprint and other environmental burdens of electrical distribution

equipment. The outcomes serve as a guide for the transformer sector in Turkey—and by extension similar developing energy markets—to move towards more sustainable practices, ensuring that as the electrical grid expands and modernizes, it does so with minimal environmental impact. The recommendations put forth can help inform sustainable transformer manufacturing and usage policies, aligning the power distribution industry with broader climate and sustainability goals.



1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği bugün dünya ekonomisinin ve politikasının en temel sorunlarından bir tanesi olarak görünmektedir. Bilim insanlarının hemen hemen hepsi iklim değişikliği sorununun uzun zamandan bu yana var olduğu ve sanayi devrimi sonrasında atmosfere, suya ve toprağa zararlı maddelerin büyük miktarda emisyonuna yol açmasına paralel olarak sorunun daha da kötüleştiği konusunda fikir birliği içindedir (Yakovlev ve Belyaev, 2023: 1).

Enerji sistemlerinin çevresel sürdürülebilirliği, son yıllarda küresel politika gündeminin ön sıralarına yerleşmiş olup; bu durum, ulusal mevzuatlarda yapılan düzenlemelerle birlikte, enerji sektöründeki tüm paydaşlar üzerinde kapsamlı raporlama ve azaltım yükümlülükleri doğurmuştur. Özellikle enerji üretimi, iletimi ve dağıtım sırasında ortaya çıkan çevresel etkilerin Paris Anlaşması (UNFCCC, 2015) ve Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı (EC, 2019) gibi üst düzey stratejik metinlerle ilişkilendirilmesi, enerji şirketleri için zorunlu karbon ayak izi hesaplamalarını ve buna bağlı performans ölçütlerini kaçınılmaz hâle getirmiştir. Bu çerçevede, enerji dağıtım şebekesinin kritik bileşenleri arasında yer alan transformatörlerin, yaşam döngüsü boyunca (ham madde temini, üretim, işletme, bakım ve bertaraf dâhil) ortaya koyduğu çevresel etkilerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir.

Transformatörler hizmet ömürleri boyunca elektrik dağıtımında verimlilik ve güvenilirlik sağlarken, üretim süreçlerinden kullanım ve bertaraf aşamalarına dek belirli çevresel etkilere neden olmaktadır. Dağıtım transformatörlerinin imalatı büyük miktarda silikonlu sac çelik, bakır iletken ve mineral yağ gibi malzemeler gerektirir; bu malzemelerin çıkarılması ve işlenmesi süreçlerinde enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları da dâhil olmak üzere önemli çevresel yükler oluşabilir. Son yıllarda iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları çerçevesinde, elektrik ekipmanlarının yaşam döngüsü bazında çevresel performansının anlaşılması ve iyileştirilmesi giderek önem kazanmıştır.

ISO 14040/44 standartlarında çerçevesi çizilen YDD yöntemi; hammadde temini, enerji tüketimi, emisyonlar ve atık oluşumu gibi verileri derleyerek “beşikten mezara”

veya tanımlanan sınırlar dâhilinde “beşikten kapıya” kadar çevresel yükleri nicel olarak ortaya koyar. Böylece, karmaşık üretim süreçlerinin ve tedarik zincirinin çevresel ayak izi şeffaf biçimde görülebilir hale gelmektedir. Dağıtım transformatörleri özelinde yaşam döngüsü perspektifiyle yapılacak bir değerlendirme, bu ürünlerin üretiminden kaynaklanan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları başta olmak üzere çeşitli etki kategorilerindeki yüklerini nicelleştirmeye imkân tanıyacaktır. Bu aynı zamanda transformatör üreticilerinin ve enerji sektörü paydaşlarının, çevresel iyileştirme alanlarını belirlemesine yardımcı olacak bilimsel bir temel sunacaktır.

Küresel ölçekte sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve iklim politikaları, enerji altyapısı ekipmanlarının çevresel performansına ilişkin kapsamlı çalışmalar yapılmasını teşvik etmektedir. Avrupa Birliği’nin Yeşil Mutabakat programı, 2050 yılına kadar karbon-nötr bir ekonomi olma hedefini merkezine almıştır (European Commission, 2025). Bu hedef doğrultusunda enerji yoğun sektörlerin ve elektrik ekipmanlarının yaşam döngüsü emisyonlarını azaltması beklenmektedir. Benzer şekilde, Türkiye de Ekim 2021’de Paris Anlaşması’nı onaylayarak 2053 yılına kadar net sıfır emisyona ulaşma taahhüdünde bulunmuştur (World Bank, 2025). Bu politik hedefler, dağıtım transformatörü gibi elektrik şebekesi bileşenlerinin üretim süreçlerinde düşük karbonlu ve çevre dostu yaklaşımların benimsenmesini gerektirmektedir. Bu tez çalışması, dağıtım transformatörü üretimine odaklanarak yukarıda anılan politika ve hedeflerle uyumlu bir şekilde, sanayide çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına yönelik bilimsel veriler sunmayı amaçlamaktadır.

Dünya genelinde artan iklim değişikliği tehdidi ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, enerji ekipmanlarının yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de bir fabrikada üretilen 1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörünün "beşikten mezara" yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile çevresel etkilerini ortaya koymaktır. Özellikle iklim değişikliği kategorisindeki etkilere odaklanılarak, söz konusu transformatörün yaşam döngüsü boyunca neden olduğu sera gazı emisyonlarının küresel ısınmaya katkısı değerlendirilmektedir. İklim değişikliği etki kategorisine vurgu yapılmasının nedeni, sera gazı emisyonlarının yol açtığı küresel ısınmanın günümüzde en kritik çevresel sorunlardan biri olması ve endüstriyel ürünlerin karbon ayak izini azaltma gerekliliğinin aciliyet kazanmasıdır (IPCC, 2021). Bu bağlamda, transformatörün iklim değişikliği potansiyelini nicel olarak belirlemek, iklim kriziyle

mücadeleye yönelik sürdürülebilirlik girişimleri açısından önemli bir motivasyon oluşturmaktadır.

Çalışmanın kapsamı, transformatörün hammadde temininden üretimine, kullanım ömrü süresince işletilmesinden ömrü sonundaki bertaraf ve geri dönüşümüne kadar tüm aşamaları içerecek şekilde tanımlanmıştır. Fonksiyonel birim olarak, bir adet 1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörünün hizmet ömrü boyunca (30 yıl) elektrik dağıtım şebekesindeki görevini yerine getirmesi esas alınmıştır. Değerlendirme, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup (ISO, 2006a; ISO, 2006b), çevresel etkiler iklim değişikliği başta olmak üzere çeşitli etki kategorileri altında incelenmiştir. Böylece, transformatörün toplam çevresel performansı sürdürülebilirlik perspektifinden bütüncül olarak ele alınmakta ve özellikle iklim değişikliği göstergesine ilişkin sonuçlar vurgulanmaktadır. Bu YDD çalışması, elde edilen bulgularla dağıtım transformatörlerinin üretim ve kullanım süreçlerinde çevresel iyileştirmeler yapılmasına bilimsel altyapı sağlayacaktır.

Literatürde dağıtım transformatörlerinin yaşam döngüsü performansı ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıda olup, Türkiye bağlamında hemen hemen hiçbir kapsamlı araştırma bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu tez, hem yerel veri ve koşullara dayalı olarak özgün bir vaka analizi ortaya koymakta, hem de küresel literatüre Türkiye’den bir katkı sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında değerlendirilen transformatör, özellikle Türkiye şartlarında ele alındığından, literatürde yaygın olarak bulunmayan bir konuyu aydınlatmaktadır. Böylelikle çalışma sonuçlarının, uluslararası alanda hem akademik literatüre katkı yapabilecek hem de uygulamada enerji sektöründe politika yapıcılara ve sanayi kuruluşlarına yol gösterici olabilecek özgünlükte olduğu düşünülmektedir. Bu tez çalışmasının özgün katkısı, Türkiye’de hemen hemen ilk defa bir dağıtım transformatörünün üretim sürecine dair çevresel etkilerin bilimsel yöntemlerle ortaya konulmasıdır. Doğrudan saha verilerine dayalı bu kapsamlı analiz sayesinde, transformatör imalatının çevresel “ayak izi” tüm boyutlarıyla hesaplanacak; sonuçlar %95 güven aralığı ile istatistiksel olarak sunulacak ve bulguların güvenilirliği ortaya konacaktır. Elde edilen veriler, ilgili sektörde üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik somut öneriler geliştirilmesi ve ileriye dönük olarak dağıtım şebekesi ekipmanlarının AB Yeşil Mutabakatı ve Türkiye’nin iklim stratejisi hedeflerine uyumunun sağlanması için kritik bir temel oluşturacaktır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Transformatör Üretimi ve Sektörel Arka Plan

Transformatörler, enerji iletim ve dağıtım altyapısının kritik bileşenleridir ve hem üretimleri sırasında hem de uzun hizmet ömürleri boyunca çeşitli çevresel etkilere neden olurlar. Özellikle dağıtım transformatörleri, elektrik şebekelerinde 30 yılı aşkın süre kesintisiz çalışarak hizmet verirken, bu süre zarfında çekirdek manyetik kayıpları ve iletken direnç kayıpları nedeniyle sürekli enerji tüketimi ve dolaylı sera gazı emisyonları yaratmaktadır. Aynı zamanda transformatörlerin imalat süreçleri de önemli miktarda hammadde kullanımını gerektirmektedir. Tipik bir dağıtım transformatörü, yüksek oranda silisli sac çelik (manyetik çekirdek için) ve bakır veya alüminyum iletken (sargılar için) ile mineral yağ ve diğer yardımcı bileşenlerden oluşur. Bu malzemelerin madenciliği ve rafine edilmesi süreçlerinde ciddi enerji tüketimleri gerçekleşmekte ve sonuç olarak önemli çevresel yükler ortaya çıkabilmektedir (ör. cevher çıkarımı ve metal üretimi kaynaklı sera gazı emisyonları). Dolayısıyla, transformatör sektöründe hammaddeden ürünün kullanım ömrü sonuna dek oluşan çevresel etkilerin bilinmesi, sürdürülebilir üretim ve kullanım stratejileri geliştirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Transformatör üretim sektörü, küresel ölçekte artan elektrik talebini ve şebeke genişlemesini karşılamak üzere sürekli büyümektedir. Dünya genelinde milyonlarca transformatör şebekelerde halihazırda çalışmakta olup, her yıl çok sayıda yeni transformatör üretilmektedir. Bu ölçek, transformatörlerin çevresel ayak izinin küçümsenmeyecek boyutta olduğunu göstermektedir. Nitekim yapılan bazı çalışmalarda, dağıtım transformatörünün yaşam döngüsü boyunca yol açtığı toplam sera gazı emisyonunun yüzlerce ton CO₂ eşdeğeri seviyesinde olduğu raporlanmıştır (Liu vd., 2024). Üretim aşaması, toplam etki içinde küçük bir paya sahip olsa da (ör. %2–10 aralığında), transformatörlerin kullanım sırasındaki elektrik kayıpları nedeniyle oluşan emisyonlar birikimli olarak çok daha yüksek bir etkiye ulaşabilmektedir (Carlen vd., 2011). Bu durumda, enerji verimliliği ve malzeme verimliliği gibi kavramlar transformatör sektöründe çevresel iyileştirme açısından ön plana çıkmaktadır. Örneğin, transformatörlerde yüksek verimli manyetik

çekirdek malzemelerinin kullanımı, uzun vadede önemli enerji tasarrufları ve emisyon azaltımları sağlamaktadır. Nitekim amorf metal çekirdek teknolojisinin, geleneksel silisli çelik çekirdeklere kıyasla transformatörlerin toplam çevresel etkisini yaklaşık %60 oranında azaltabildiği gösterilmiştir (Carlen vd., 2011). Benzer şekilde, bakır yerine daha hafif ve düşük maliyetli alüminyum sargı kullanımı da üretim aşamasında bazı avantajlar sunsa da, her iki iletken tipinin çevresel etkileri detaylı olarak değerlendirilmelidir (Mansilha vd., 2019). Özetle, transformatör üretiminde kullanılan malzemelerin türü ve cihazın işletme esnasındaki verimlilik özellikleri, yaşam döngüsü performansını belirleyen temel faktörlerdir. Bu sektörel arka plan göz önünde bulundurulduğunda, transformatörlerin çevresel performansını tüm yaşam döngüsü aşamalarını kapsayacak şekilde analiz etmek, sürdürülebilir elektrik altyapısı hedefleri bakımından kritik bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) Kavramı

Çevresel etkileri bütüncül biçimde ele alan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemi, hammaddelerin elde edilmesinden başlayarak ürünün üretimi, kullanımı ve nihai bertarafına (veya geri dönüşümüne) kadar olan tüm süreçler boyunca ortaya çıkan potansiyel çevresel etkileri nicel olarak değerlendirmeye yarayan uluslararası kabul görmüş bir yaklaşımdır. ISO 14040 (2006) standardına göre Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), bir ürün ya da sürecin “beşikten mezara” tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin derlenmesi ve değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir tekniktir. Başka bir deyişle, YDD yaklaşımı ürün sisteminin karmaşık tedarik zinciri ve kullanım sürecini bir bütün olarak ele alarak, farklı aşamalardaki enerji ve kaynak tüketimleri ile emisyon ve atık oluşumlarını entegre şekilde analiz eder. Bu özelliği ile YDD, yalnızca tekil bir üretim sürecinin değil, o sürecin öncesindeki hammadde çıkarma ve sonrasındaki atık yönetimi aşamalarının da çevresel ayak izini ortaya koymayı mümkün kılar. YDD metodolojisi, temel olarak ISO 14040 ve ISO 14044 standartları çerçevesinde tanımlanmıştır (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Bu standartlara göre bir YDD çalışması dört ana adımdan oluşur: Amaç ve kapsam tanımı, Yaşam döngüsü envanteri (LCI), Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) ve Yorumlama. İlk adımda değerlendirmenin sınırları, fonksiyonel birimi ve incelenecek etki kategorileri tanımlanır. Ardından envanter analizinde, sistemin tüm girdileri (ör. enerji, ham maddeler) ve çıktıları (ör. emisyonlar, atıklar) nicel olarak toplanır. Etki

değerlendirmesi adımı bu envanter verileri, çeşitli çevresel etki kategorilerine (iklim değişikliği, asidifikasyon, ozon tabakası incelmeleri, ekotoksikite vb.) dönüştürülerek sonuçlar hesaplanır. Son olarak yorumlama adımı, elde edilen sonuçlar bütüncül bir bakışla değerlendirilir, belirsizlik analizleri yapılır ve iyileştirme önerileri geliştirilir. YDD'nin beşikten mezara yaklaşımı, ürünün tüm yaşam döngüsünü (ham maddeden atığa kadar) kapsarken; bazı durumlarda çalışma amacına bağlı olarak beşikten kapıya (ham maddeden üretim tesisinden çıkışa kadar) gibi sınırlı bir kapsam da tanımlanabilir. Her iki durumda da YDD, karmaşık süreçlerin ve tedarik zincirlerinin çevresel etkilerini sayısal verilerle şeffaf hale getirir. Bu kavramsal çerçevede, yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi farklı sektörlerde çevresel performansın izlenmesi ve iyileştirilmesi için güçlü bir araç sunar. Transformatör gibi uzun ömürlü ve malzeme-yoğun bir ürüne YDD uygulandığında, hammadde tedariklerinden imalat proseslerine, kullanım sırasındaki enerji tüketiminden ömür sonu atık yönetimine kadar her adımın çevresel yükü ortaya konabilir. Böylece hangi aşamaların “sıcak nokta” (en yüksek etkiye sahip) olduğu belirlenerek, çevresel iyileştirme çalışmalarının hangi noktalara odaklanması gerektiği bilimsel bir temel ile desteklenir. Kısacası, YDD kavramı transformatör sektörü de dahil olmak üzere sürdürülebilirlik hedefi olan tüm alanlarda, karar vericilere bütüncül ve nicel çevresel değerlendirme olanağı sağlayan vazgeçilmez bir metod haline gelmiştir.

2.3 Transformatör Üretiminde Yapılmış YDD Çalışmaları

Transformatörler üzerine gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirme çalışmaları literatürde görece sınırlı sayıda olmakla birlikte, 2010'lu yıllardan itibaren artan bir ilgiyle çeşitli odak noktalarında araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda çoğunlukla dağıtım transformatörleri ele alınmış ve transformatörün belirli tasarım özelliklerinin veya yaşam döngüsü aşamalarının çevresel etkileri analiz edilmiştir.

Çizelge 2.1'de 2010–2025 döneminde yayımlanmış başlıca transformatör YDD çalışmalarının kapsamı, yöntem tercihleri ve öne çıkan bulguları özetlenmiştir. Bu kapsayıcı bakış, dağınık haldeki literatür verilerini bir araya getirerek transformatör üretimi alanında bugüne kadar hangi noktaların incelendiğini ve ne gibi sonuçlar elde edildiğini görünür kılmaktadır. Aşağıda, literatürde öne çıkan bu çalışmaların bulguları kısaca değerlendirilmiştir.

Carlen ve diğ. (2011) Avrupa şebekesindeki 1000 kVA dağıtım transformatörleri için İsviçre-Merkezli ABB (Asea Brown Boveri)'nin (İsviçre merkezli güç ve otomasyon teknolojileri şirketi) Almanya ve Polonya fabrikalarından alınan özgül tasarım verileriyle, amorf metal çekirdekli kuru tip ve yağlı tip transformatörlerin yaşam döngüsü çevresel etkilerini ISO 14040/44'e uygun olarak değerlendirmiştir. GaBi v4.3 ve Ecoinvent v2.0 veritabanlarıyla yürütülen analizde iki yük senaryosu (%20 ortalama, %50 pik) modellenmiş; sonuçlar amorf tasarımların standart RGO-çekirdekli eşdeğerlerine kıyasla tipik Avrupa yükünde toplam çevresel etkiyi yaklaşık %60, yüksek yükte %40-50 azaltarak daha sürdürülebilir bir seçenek sunduğunu göstermiştir. İmalat fazının payı %2-10 arasında kalırken, metal geri dönüşümü negatif etki yaratarak bu fazın bir bölümünü dengelemiştir.

Mansilha ve diğ. (2019) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, 75 kVA'lık dağıtım transformatörlerinde alüminyum ve bakır iletkenli sargı tasarımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma, transformatörün üretim aşamasında bakır ve alüminyum sargı malzemelerinin çevresel etkilerini kıyaslayarak malzeme seçiminin toplam etki kategorileri üzerindeki rolünü ortaya koymuştur. Sonuçlar, transformatör üretiminde kullanılan malzemenin türünün belirli etki kategorilerinde önemli farklar yarattığını göstermiş; bakır sargılı tasarımın küresel ısınma potansiyeli ve enerji tüketimi gibi göstergelerde alüminyum sargılı tasarıma göre farklı bir profile sahip olduğu belirlenmiştir.

Daha yakın tarihli çalışmalar, transformatörlerin kullanım aşamasındaki etkilerinin baskınlığını vurgulayan sonuçlar ortaya koymuştur. **Bas Andreu, 2023** gerçekleştirdiği yüksek lisans çalışması kapsamında 1980, 2022 ve 2050 yıllarına ait orta gerilim (630 kVA) transformatör modelleri için SimaPro yazılımını kullanılarak ham maddeden bertarafa (beşikten mezara) Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) gerçekleştirilmiştir. YDD sonuçları, çevresel tekil skorun ortalama olarak % 86,46'sının işletme safhasından, % 13,4'ünün ise üretim safhasından kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Literatürde transformatör sektörüne ilişkin bir diğer çalışma alanı, ürün bazlı YDD yerine kurumsal karbon ayak izi değerlendirmesidir. **Güldürek ve Esenboğa (2024)**, Türkiye'de yağlı ve kuru tip (25 – 2500 kVA) transformatör üreten bir işletmenin 2023 yılı kurumsal karbon ayak izini bütünsel bir “ham madde-kullanım-bertaraf” sınırıyla incelemiştir. ISO 14064-1 ve GHG Protocol esaslarına dayanan envanter sonucunda,

konum-bazlı toplam emisyon 1 799 483 t CO₂-eşd. olarak hesaplanmış; bu değer satılan 6044 ürün için yaklaşık 298 t CO₂-eşd./transformatör düzeyine karşılık gelmiştir. Emisyonların %94'ü transformatörlerin 30 yıllık işletme aşamasındaki yük ve boşta kayıplardan kaynaklanırken, ham madde ve üretim adımlarının payı <%5'de kalmıştır.

Son dönemde transformatörlerin yaşam döngüsü karbon emisyonlarına ilişkin küresel ölçekte kapsamlı analizler de yapılmaktadır. **Liu ve diğ. (2024)**, Çin'de on farklı güç-gerilim seviyesine sahip dağıtım transformatörünü “beşikten kapıya” yaklaşımıyla değerlendirerek fonksiyonel birim seçiminin sonuçlar üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymuştur. Çalışmada ortalama 223,5 t CO₂-e eşdeğerinde iklim değişikliği etkisi rapor edilmiş; bunun yaklaşık %74'ü çelik ve bakır imalatından kaynaklanmıştır. Elektrik şebekesinin dekarbonizasyonunu içeren senaryolar, üretim evresi emisyonlarını %9-11 düzeyinde azaltırken, mutlak kazanımın büyük MVA birimlerde daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Piotrowski ve Markowska (2025) tarafından gerçekleştirilen yakın tarihli bir çalışmada 31.5 MVA ve 25 MVA kapasiteli iki adet yağlı tip güç transformatörünün karbon ayak izi değerlendirilmiştir. Söz konusu çalışmada, transformatörlerin tam yaşam döngüsü boyunca (hammadde çıkarımından kullanım ve geri dönüşüme kadar) sera gazı emisyonları ve enerji tüketimi hesaplanmıştır. Bu değerlendirme, büyük güç transformatörlerinin kullanım aşamasındaki enerji kayıplarının toplam sera gazı emisyonlarının çok büyük bir kısmını oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Wang ve diğ. (2025) tarafından 200 kVA'lık bir dağıtım transformatörü için yapılan kapsamlı bir YDD çalışmasında, toplam yaşam döngüsü karbon emisyonunun %99'undan fazlasının kullanım (işletme) aşamasından kaynaklandığı gösterilmiştir. Wang ve arkadaşlarının Çin'de gerçekleştirdiği bu çalışma kapsamında, üretim, taşıma, kurulum, 40 yıllık kullanım ve atık geri kazanım dahil olmak üzere tüm aşamalar değerlendirilmiştir. 200 kVA'lık transformatörün işletme aşamasındaki emisyonlarının yaklaşık 11.08 ton CO₂-eşdeğeri olduğu rapor edilmiştir. Bu sonuç, transformatörlerin enerji verimliliğinin ve işletme kayıplarının azaltılmasının iklim değişikliği açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, söz konusu çalışmada üretim aşamasının göreceli payı düşük görünmekle beraber, üretimde kullanılan malzeme ve süreçlerin optimizasyonu ile bu emisyonların daha da azaltılabileceği belirtilmiştir.

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere; 2010–2025 döneminde yayımlanmış başlıca transformatör Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmalarının kapsamı, yöntemsel tercihleri ve öne çıkan bulguları bütüncül bir bakış açısıyla özetlenmiştir. Böylelikle, literatürde dağınık hâlde bulunan ampirik veriler tek bir referans matrisi altında toplanarak görünür kılınmıştır.

Çizelge 2.1 : 2010–2025 Döneminde transformatörler üzerine yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi: güncel çalışmaların akademik özeti.

Çalışma Açıklaması	Ürün Kapsamı	YDD Kapsamı	Veri Kaynakları	Yöntem	Temel Bulgular
Carlen M. et al. (2011) “Amorf Metal Çekirdekli Kuru Tip ve Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi”	1000 kVA yağlı tip ve kuru tip dağıtım transformatörleri	Beşikten mezara: hammadde, üretim, 30 yıllık işletme, nakliye, ömür sonu Farklı yük senaryoları	GaBi v4.3, EcoInvent; ABB Almanya & Polonya fabrika verileri; Avrupa Birliği şebeke karışımı	ISO 14040/44 YDD; GWP ana gösterge + 5 ek kategori;	Amorf Metal çekirdek kullanımı toplam çevresel etkiyi %60 azaltır; imalat payı %2-10; geri dönüşüm negatif katkı sağlar. Alüminyum sargı % ≈ 38 daha yüksek GWP’ye (≈ 1226 kg) yol açar; bakır sargı ≈ 889 kg CO ₂ . Transformatör üretiminde bakır sargı kullanımı, tüm etki değerlendirme yöntemleri açısından alüminyuma kıyasla ortalama %42,20 oranında daha yüksek çevresel etki sergilemiştir.
Mansilha vd., 2019 Elektrik Dağıtım Trafolarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi: Alüminyum ve Bakır Bobinler Arasındaki Karşılaştırmalı Çalışma	75 kVA dağıtım trafosu bakır ve alüminyum sargı	Beşikten-kapıya; tüm hammadde kullanımları, enerji tüketimleri, taşıma süreçleri, emisyonlar, deşarjlar ve atık bertarafı	SimaPro + EcoInvent Birincil Fabrika Verileri - Brezilya	Eco-indicator 99 CML 2 ReCiPe	İşletme aşaması tekil ağırlıklı skorda %81 (%40 yük) – %91 (%70 yük) payla en baskın aşamadır; İmalat ortalama %13,4 payla ikinci önemli aşama; dağıtım ve ömür-sonu etkileri <%1’dir. Teknolojik gelişim (2050 senaryosu) iklim değişikliği, asitleşme ve fosil tüketimi etkilerini düşürür, ancak mineral & metal kaynak kullanımı artış eğilimi gösterir.
Bas Andreu, 2023 Dağıtım Şebekesi İçin Orta Gerilimli Bir Transformatörün Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Aracının Geliştirilmesi	630 kVA Transformatör 1980, 2022, 2050 tasarımlarını karşılaştırması	Beşikten-mezara; 35 yıl kullanım ömrü	SimaPro Yazılımı EcoInvent Veri tabanı Birincil: 2021 trafosu üretici verisi, İspanya Elektrik Şebeke Karışımı	EN 50693 etki kategorileri; Environmental Footprint 3.0 etki değerlendirme yöntemi	İşletme aşaması tekil ağırlıklı skorda %81 (%40 yük) – %91 (%70 yük) payla en baskın aşamadır; İmalat ortalama %13,4 payla ikinci önemli aşama; dağıtım ve ömür-sonu etkileri <%1’dir. Teknolojik gelişim (2050 senaryosu) iklim değişikliği, asitleşme ve fosil tüketimi etkilerini düşürür, ancak mineral & metal kaynak kullanımı artış eğilimi gösterir.
Güldürek & Esenboğa, 2024 Kurumsal Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi ve Transformatör Endüstrisinin Enerji Analizi	Türkiye’de bir trafo üreticisinin kurumsal karbon ayak izi (2023) + İşletme Senaryosu Analizi	ISO 14064; Kapsam 1-2-3) Fabrika Sınırları	Birincil: Yakıt, elektrik, trafo üretim verileri İkincil: Malzeme & şebeke emisyon faktörleri	Kurumsal Karbon ayak izi sıcak-nokta analizi	2023 toplam 1,799 milyon t CO ₂ -e ürün başına 297,72 ton CO ₂ -eq / transformatör Sıcak noktalar: üretimde elektrik kullanımı ve çelik/bakır üretimi.

Çizelge 2.1 (devam) : 2010–2025 Döneminde transformatörler üzerine yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi: güncel çalışmaların akademik özeti.

Çalışma Açıklaması	Ürün Kapsamı	YDD Kapsamı	Veri Kaynakları	Yöntem	Temel Bulgular
Liu vd., 2024 Çoklu Fonksiyonel Ünitelere Sahip Farklı Senaryolar Altında Çeşitli Transformatörlerin Yaşam Döngüsü CO2 Emisyonlarının Değerlendirilmesi	Çin’ de 10 farklı (1 MVA, 1 kWh, 1 MVA·kV ve 1 MWh·kV) güç-gerilim düzeyinde transformatör	Beşikten-kapıya YDD; 30 yıllık işletme senaryosu	GaBi Yazılımı Ecoinvent Veritabanı Avrupa (7), Brezilya (2) ve Çin (1) Çevresel Ürün Beyanları, Literatür Taraması,	CML2001-Ağustos 2016	Ortalama tam yaşam döngüsü emisyonu 223,5 t CO ₂ eş/trafo Fonksiyonel birime bağlı emisyonlar: 6 955 kg CO ₂ eq/MVA; 9,83 kg CO ₂ eq/(MVA·kV); 81,08 kg CO ₂ eq/kWh; 1,36 × 10 ⁻⁴ kg CO ₂ eq/(MWh·kV) – fonksiyonel birim seçimi çıktıları dramatik biçimde değiştiriyor
Wang vd., 2025 Dağıtım Ağı Transformatörlerinin Karbon Ayak İzini Yaşam Döngüsü Temelli Bir Değerlendirme	200 kVA yağlı tip dağıtım trafosu (Çin)	Beşikten mezara (hammadde üretim, taşıma, montaj, 40 yıl işletme, geri-dönüşüm)	Sima Pro Yazılımı Birincil: Üretici verisi (malzemeler, prosesler) Ecoinvent Veri Tabanı	GWP (IPCC faktörleri) & Kümülatif Enerji Talebi	Yaşam döngüsü toplamı ≈ 112 t CO ₂ eq ve 798 GJ. Emisyonların ≈ %99’u işletme kayıplarından kaynaklanıyor. Yaşam sonu geri dönüşüm – 0,088 t CO ₂ kredi sağlıyor.
Piotrowski & Markowska, 2025 Yaşam Döngüsü Analizi ile Güç Transformatörlerinin Karbon Ayak İzini Değerlendirilmesi	25 MVA ve 31,5 MVA güç trafoları (Polonya)	Beşikten-kullanıma YDD (40 yıl, bertaraf hariç);	SimaPro Birincil imalat verisi EcoInvent	GWP; karbon ayak izi (t CO ₂ -eq)	İşletme safhası baskın: toplam emisyonların %94–99’u; üretim fazının 2–3 yıl içinde geride bırakılıyor %50 yükte toplam CF: TRF-1 → 346,8 t & 226,0 t CO ₂ -eq/MVA (senaryo 1 vs 2); TRF-2 → 387,6 t & 253,0 t CO ₂ -eq/MVA Üretim emisyonlarının %85’i metallerle ait: elektrik çeliği (~ %31), konstrüksiyon çeliği (~ %26), bakır (~ %24); mineral yağ ≈ %11

Genel olarak bakıldığında, transformatör üretimine odaklanan YDD literatürü sınırlı olsa da mevcut çalışmalar bazı ortak noktaları ortaya çıkarmaktadır. Birincisi, işletme (kullanım) aşaması özellikle dağıtım transformatörleri için çoğu senaryoda en baskın çevresel etki kaynağıdır; cihazın ömrü boyunca maruz kaldığı elektrik kayıpları, toplam karbon ayak izinin büyük kısmını oluşturur (Carlen vd., 2011; Bas ve Andreu, 2023). İkincisi, cihaz tasarımında malzeme seçimi ve enerji verimliliği kritik rol oynamakta; çekirdek ve sargı malzemelerindeki iyileştirmeler veya yüksek verimli tasarımlar, yaşam döngüsü etkilerini ciddi oranda azaltabilmektedir (Mansilha vd., 2019; Carlen vd., 2011). Üçüncüsü, ömrü sonu senaryoları (örn. malzeme geri kazanımı) transformatör özelinde toplam etkiyi bir miktar azaltıcı etki sunsa da (Carlen

vd., 2011), bu katkı diğer aşamalara kıyasla nispeten küçüktür. Son olarak, bölgesel ve operasyonel farklılıklar nedeniyle transformatör YDD sonuçları değişebilir; örneğin kullanılan elektrik şebekesinin emisyon faktörü veya hammadde tedarikinin kaynağı, çıktıları önemli ölçüde etkiler. Nitekim Avrupa karışımıyla hesaplanan emisyonlar ile Çin gibi karbon yoğun elektrik karışımıyla hesaplananlar farklılık gösterecektir (Liu vd., 2024).

Literatür çalışmalarının taraması ortaya koymaktadır ki, Türkiye özelinde transformatör üretimi ya da elektrik ekipmanları imalatına odaklanan yaşam döngüsü çalışmaları oldukça sınırlıdır. Literatürdeki ve uygulamadaki bu boşluk göz önüne alındığında, dağıtım transformatörünün üretim kaynaklı çevresel etkilerine dair bu tez çalışmasının bulguları, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde özgün bir bilgi ihtiyacını karşılayacaktır. Ayrıca çalışma, gelecekte Türkiye’de benzer altyapı ekipmanlarının yaşam döngüsü değerlendirmelerine yönelik araştırmalara bir temel oluşturacak ve yöntemsel açıdan referans teşkil edecektir.

2.4 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Sürdürülebilirlik Perspektifi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, sürdürülebilirlik bilimlerinin çevresel boyutunu nicel olarak ele alan temel araçlardan biri haline gelmiştir. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve iklim değişikliği ile mücadele politikaları, ürün ve süreçlerin tüm yaşam döngülerini kapsayan çevresel analizler yapılmasını ve bu sayede bütüncül iyileştirme stratejileri geliştirilmesini teşvik etmektedir. Özellikle son yıllarda küresel ölçekte devreye alınan politikalar, YDD yaklaşımının önemini daha da artırmıştır. Avrupa Birliği’nin Yeşil Mutabakat programı, 2050 yılına kadar Avrupa’da net karbon-nötr ekonomi hedefini ortaya koymakta ve bu kapsamda tüm endüstriyel ürünlerin yaşam döngüsü emisyonlarını azaltmaya yönelik önlemler öngörmektedir (European Commission, 2025). Benzer şekilde Türkiye de Ekim 2021’de Paris Anlaşması’nı onaylayarak 2053’e kadar net sıfır sera gazı emisyonu hedefi benimsemiştir (World Bank, 2025). Bu yüksek düzeydeki politik hedefler, elektrik altyapısının önemli bir unsuru olan transformatörlerin de daha çevre dostu üretim teknolojilerine ve kullanım uygulamalarına yönelmesini zorunlu kılmaktadır. Örneğin AB’nin Ecodesign yönetmelikleri kapsamında dağıtım transformatörlerinin verimlilik standartları yükseltilmiş, manyetik çekirdek ve sargı kayıplarını azaltıcı gereksinimler getirilmiştir.

YDD'nin sürdürülebilirlik perspektifindeki bir diğer kritik rolü, iyileştirme alanlarının belirlenmesi ve karar alma süreçlerinin bilgilendirilmesidir. Bir ürün veya süreç için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi, o sistemin çevresel “sıcak noktalarını” ortaya koyarak hangi aşamalarda veya bileşenlerde iyileştirme yapmanın en etkili olacağını gösterir. Bu sayede sınırlı kaynakların en verimli şekilde kullanılmasına yardımcı olur.

Sonuç olarak, yaşam döngüsü değerlendirmesi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda hem mikro düzeyde (ürün/şirket bazında) hem de makro düzeyde (sektörel/ulusal bazda) rehberlik eden vazgeçilmez bir araçtır. Transformatör üretim sektöründe YDD yaklaşımının benimsenmesi, üreticilerin ve enerji sektörü paydaşlarının çevresel performansı takip edebilmesini, iyileştirme alanlarını tespit edebilmesini ve gelecekte daha düşük karbon ayak izine sahip teknolojilere geçiş yapabilmesini sağlar. Bu aynı zamanda ulusal ve uluslararası iklim hedeflerine ulaşılmasına katkı sunacaktır. Sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, yaşam döngüsü boyunca elde edilen veriler ışığında yapılacak her iyileştirme toplam etkileri azaltacak ve gelecek nesiller için daha çevreci bir sanayi profili oluşturacaktır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, 1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörünün yaşam döngüsü boyunca (beşikten mezara) ortaya çıkan çevresel etkilerin nasıl nicelendirildiği ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Yöntem, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarındaki dört temel adıma (amaç-kapsam, envanter, etki değerlendirmesi, yorumlama) sadık kalınarak kurgulanmıştır (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

3.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaklaşımıyla 1000 kVA gücünde yağlı tip bir dağıtım transformatörünün ham madde temininden üretimine, 30 yıllık kullanım ömrü ve nihai bertarafına kadar olan tüm süreçler boyunca çevresel etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Böyle kapsamlı bir “beşikten mezara” analiz ile transformatörün yaşam döngüsündeki her adımın çevresel yükü ortaya konacak ve böylece çevresel iyileştirme çalışmalarının hangi noktalara odaklanması gerektiği bilimsel bir temel ile desteklenecektir. İnceleme kapsamında ele alınan çevresel etki kategorileri, Avrupa Birliği’nin önerdiği Çevresel Ayak İzi (EF) 3.1 metodolojisi ile ReCiPe 2016 metodolojisinin tanımladığı tüm önemli çevresel göstergeleri içermektedir (iklim değişikliği, asidifikasyon, kaynak kullanımı vb.). Çalışmanın temel hedefi, transformatör üretimi ve kullanım sürecinde oluşan karbon ayak izi başta olmak üzere çeşitli çevresel etki kategorilerindeki “sıcak noktaları” belirleyerek, bu etkileri azaltmaya yönelik iyileştirme önerileri geliştirmektir.

3.2 Yaşam Döngüsü Envanteri

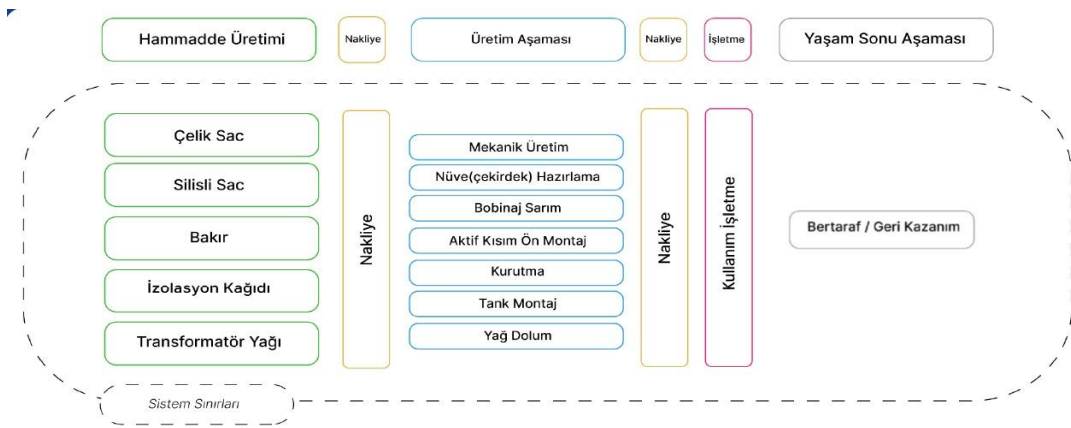
Bu bölümde, fonksiyonel birim ve sistem sınırları kapsamında derlenen yaşam döngüsü envanteri (YDE) sunulmaktadır. Envanter analizinde, transformatörün tüm yaşam döngüsü aşamalarındaki girdi ve çıktı akışları verilmiştir.

3.2.1 Fonksiyonel birim

YDD çalışmasında fonksiyonel birim, değerlendirme kapsamının nicel temelini oluşturur. Bu çalışmada fonksiyonel birim, elektrik dağıtım şebekesinde otuz yıl boyunca hizmet veren bir adet 1000 kVA yağlı tip transformatör olarak tanımlanmıştır. Böylece tüm girdiler, çıktılar ve bunlara bağlı çevresel etkiler, belirtilen kullanım süresinde transformatörün sağladığı işlev üzerinden hesaplanmıştır. Bu sayede, çeşitli malzeme tüketimleri, enerji harcamaları ve emisyonlar bir transformatör başına hesaplanarak ortak bir referansa indirgenmiştir. Fonksiyonel birimi 1 adet transformatör olarak belirlemek, sonuçların anlaşılır ve pratik olmasını sağlamaktadır. Literatürde de transformatör üretiminin YDD değerlendirmelerinde genellikle bir adet cihaz üretimi fonksiyonel birim olarak alınmaktadır.

3.2.2 Sistem sınırları

Sistem sınırları, YDD' nin dahil ettiği süreçleri ve yaşam döngüsü aşamalarını belirler. Bu çalışma için sistem sınırları beşikten mezara (cradle-to-grave) olarak çizilmiştir; yani hammaddenin doğal kaynaktan çıkarılmasından transformatörün ömrü sonunda bertarafına veya geri kazanımına kadar olan tüm süreçler dâhil edilmiştir. Şekil 3.2' de transformatörünün “beşikten mezara” yaşam döngüsü akış şeması bütüncül olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : Transformatörün yaşam döngüsü aşamaları.

Şekilde görüldüğü üzere, transformatörün yaşam döngüsü ham madde üretimiyle başlamakta ve ürünün kullanım ömrü bitimine kadar uzanmaktadır. Değerlendirmeye alınan başlıca aşamalar; hammadde çıkarımı ve işlenmesi, hammaddelerin fabrikaya taşınması, fabrika ölçeğinde transformatörün imalat süreçleri (çekirdek saclarının imalatı, bakır sargıların hazırlanması, çekirdek ve sargıların montajı, transformatörün

yağ ile doldurulması, üretim sırasında yapılan testler vb.), ürünün müşteri sahasına nakliyesi, transformatörün işletme (kullanım) aşaması ve ömür sonu işlemleri olarak tanımlanabilir. Kullanım aşamasında transformatörün yaklaşık 30 yıllık hizmet ömrü süresince sebep olduğu enerji kayıpları (yüksek verimle çalışsa dahi çekirdek ve sargı kayıpları) modele dahil edilmiştir. Ömür sonu aşamasında ise transformatörün geri dönüşüm potansiyeli olan malzemelerin (örneğin bakır, çelik gibi metallerin) geri kazanılması süreçleri değerlendirilmiştir.

Hammaddelerin çıkarılmasıyla ilgili veriler “A1” koduyla, nakliye ile ilgili veriler “A2” koduyla, fabrika içi enerji tüketimleri “A3”, kullanım kaynaklı elektrik kayıpları “B6” (operasyonel enerji kullanımı), bakım faaliyetleri “B2”, hurda geri dönüşüm akışları “C3/C4” vb. kodlarla tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan süreçler, standart EN 15804 modül tanımları referans alınarak Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi kapsamına dahil edilip edilmediği Çizelge 3.1 ile gösterilmiştir:

Çizelge 3.1 : Süreç kapsam matrisi.

Yaşam Döngüsü Modülü	Tanım	Kapsam Açıklaması
A1	Hammadde temini ve ön işleme (beşikten fabrikaya)	(dahil)
A2	Hammadde ve bileşenlerin tesise nakli	(dahil)
A3	Üretim ve montaj (fabrika içi)	(dahil)
A4	Ürünün şantiye/ müşteriye nakli	(dahil)
A5	Kurulum ve şantiye işlemleri (ambalaj atığı, vb.)	(hariç)
B1	Kullanım (ürünün işlevini yerine getirmesi, doğrudan emisyonlar)	(hariç)
B2	Bakım (rutin bakım, malzeme veya enerji kullanımı)	(dahil, yağ tamamlama)
B3	Onarım (büyük parça değişimi, arıza tamiri)	(hariç)
B4	Parça yenileme (ömrü dolan parça değişimi)	(hariç)
B5	Yenileştirme (refurbishment, ömrü uzatma için)	(hariç)
B6	Operasyonel enerji kullanımı (kayıplar, ısıtma vb.)	(dahil, yük/boş kayıplar)
B7	Operasyonel su kullanımı	(hariç)
C1	Söküm / yıkım (demontaj)	(hariç)
C2	Atık nakliyesi (sökülen malzemenin bertarafa taşınması)	(hariç)
C3	Atık işleme (geri dönüşüm veya atık ayırma işlemleri)	(dahil)
C4	Nihai bertaraf (düzenli depolama, yakma kalıntıları)	(dahil)
D	Sistem dışı faydalar/krediler (örn. geri dönüşen malzeme)	Hariç (cut-off uygulanmıştır)

Her bir aşama için kapsamlı envanter tablosu hazırlanmıştır. Çizelge 3.2 fonksiyonel birim başına (1 adet transformatör / 30 yıl kullanım) değerleri vermektedir. Söz konusu veriler, üretici firmadan sağlanan birincil malzeme tüketim miktarlarının, Ecoinvent gibi güvenilir bir yaşam döngüsü envanteri veri tabanından alınan ham madde üretimi süreç verileriyle birleştirilmesi yoluyla elde edilmiştir. Metodolojik olarak, bu aşamanın analize dahil edilmesi, beşikten mezara YDD yaklaşımının başlangıç noktasını oluşturur; böylece hammaddelerin çıkarımı ve işlenmesi sırasında gerçekleşen enerji kullanımı ve emisyonlar yaşam döngüsü envanterine dahil edilerek çevresel etki hesaplamalarına tam ve tutarlı bir şekilde yansıtılmaktadır.

Çizelge 3.2 : A1 – hammadde üretimi aşaması (Girdi).

Aşama	Girdiler	Kaynak
A1- Hammadde Üretimi	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer production Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Aluminium alloy, AlMg3 {RER} aluminium alloy production, AlMg3 Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Brass {RoW} market for brass Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Cable, unspecified {GLO} market for cable, unspecified Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Cellulose fibre {RoW} market for cellulose fibre Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Chromium {RER} chromium production Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Coating powder {RER} market for coating powder Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Copper {RER} copper production, primary Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Epoxy resin {RER} epoxy resin production Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Glass tube, borosilicate {GLO} market for glass tube, borosilicate Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Kraft paper {RER} market for kraft paper Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Paper, melamine impregnated {RER} market for paper, melamine impregnated Cut-off, S	Ecoinvent

Çizelge 3.2 (devam) : A1 – hammadde üretimi aşaması (Girdi).

Aşama	Girdiler	Kaynak
A1- Hammadde Üretimi	Paraffin {RER} paraffin production Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER} polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Polyvinylchloride, bulk polymerised {RER} polyvinylchloride production, bulk polymerisation Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Sanitary ceramics {RoW} sanitary ceramics production Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} steel production, chromium steel 18/8, hot rolled Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} steel production, low-alloyed, hot rolled Cut-off, S	Ecoinvent
A1- Hammadde Üretimi	Synthetic rubber {RER} synthetic rubber production Cut-off, S	Ecoinvent

A2 aşamasında(Çizelge 3.3), hammaddelerin ve bileşenlerin üretim tesisine taşınması sürecinden kaynaklanan lojistik yükler değerlendirilmektedir. Bu tablodaki girdi akışları, taşıma modu (karayolu kamyon taşımacılığı) için hesaplanan yakıt tüketimi ve emisyonları içermektedir. İlgili mesafe ve taşıma verileri üretici firma tarafından birincil veri olarak sağlanmış olup, bunlara ait çevresel yükler Ecoinvent gibi ikincil veri kaynaklarındaki nakliye süreçleri kullanılarak modellenmiştir.

Çizelge 3.3 : A2 – hammadde taşımacılığı aşaması (Girdi).

Aşama	Girdiler	Kaynak
A2- Hammadde Taşımacılığı	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RoW} market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 Cut-off, S	Ecoinvent

A3 aşaması Çizelge 3.4’ te detaylandırılmış olup, transformatörün fabrika içi imalat ve montaj süreçlerinden kaynaklanan çevresel girdileri kapsamaktadır. Bu tabloda, üretim tesisinde tüketilen elektrik ve yakıt gibi enerji girdileri ile imalat sırasında oluşan atık akışları sunularak transformatörün üretim safhasının envanteri verilmiştir. Söz konusu veriler büyük ölçüde üretici firmanın fabrika kayıtlarından elde edilen birincil verilere dayanmaktadır; transformatörün imalatı boyunca kullanılan toplam elektrik enerjisi, doğalgaz miktarı ve oluşan atık miktarları doğrudan ölçülmüştür. Bu

birincil veriler, elektrik üretimi ve yakıt tedariki gibi arka plan süreçlerin çevresel etkilerini temsilen Ecoinvent veri tabanından alınan ikincil verilerle desteklenerek YDD modeline entegre edilmiştir.

Çizelge 3.4 : A3- üretim (fabrika-içi) aşaması (Girdi).

Aşama	Girdiler	Çıktı	Kaynak
A3- Üretim (Fabrika-içi) Aşaması	Electricity, medium voltage {TR} market for electricity, medium voltage Cut-off, S	-	Ecoinvent
A3- Üretim (Fabrika-içi) Aşaması	Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, S	-	Ecoinvent
A3- Üretim Atıkları	-	Diğer hidrolik yağlar	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Kağıt ve karton ambalaj	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Plastik ambalaj	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Ahşap ambalaj	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ya da tehlikeli maddelerle kontamine olmuş ambalajlar	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Enfeksiyonu önlemek amacı ile toplanmaları ve bertarafı özel işleme tabi olan atıklar	Fabrika Verisi-Atık Beyanı
A3- Üretim Atıkları	-	Metaller	Fabrika Verisi-Atık Beyanı

A4 aşamasında, tamamlanmış transformatörün müşteriye (kurulum sahasına) ulaştırılması için gerçekleştirilen lojistik faaliyetlerin çevresel etkileri değerlendirilmektedir. Çizelge 3.5’ te, ürün taşımacılığı sürecine ait girdiler (karayolu ve denizyolu nakliye süreçlerine dair yakıt tüketimi ve mesafe verileri) sunulmuştur. Transformatörün sevkiyat mesafesi ve taşıma moduna ilişkin bilgiler üretici tarafından birincil veri olarak sağlanmış; bu taşıma süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar ise Ecoinvent gibi ikincil veri setlerindeki uygun nakliye süreçleri kullanılarak modellenmiştir. Bununla birlikte, transformatörün nakliyesi sırasında kullanılan

ambalaj malzemelerinin çevresel yükü ihmal edilebilir düzeyde görüldüğünden, bu girdiler sistem sınırı dışında bırakılmıştır.

Çizelge 3.5 : A4 – ürün lojistiği aşaması (Girdi-Çıktı).

Aşama	Girdiler	Kaynak
A4- Ürün Taşımacılığı	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RoW} market for transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 Cut-off, S	Ecoinvent
A4- Ürün Taşımacılığı	Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship Cut-off, S	Ecoinvent

Kullanım aşaması (B), transformatörün yaklaşık 30 yıllık işletme ömrü boyunca gerçekleşen enerji tüketimi ve bakım faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel etkileri kapsamaktadır. Çizelge 3.6’ da, transformatörün şebekeden çektiği elektrik enerjisi (yük ve boшта çalışma kayıpları nedeniyle tüketilen elektrik) temel girdi olarak sunulmuş olup, uzun vadeli kullanım süresince gerekebilecek bakım girdileri de (periyodik olarak yalıtım yağının kısmi yenilenmesi) değerlendirmeye dahil edilmiştir. Transformatörün yük kayıpları ve bakım ihtiyacı gibi birincil veriler, üretici teknik dokümanlarından elde edilmiş; bu süreçlerin çevresel etkileri, ülke elektrik şebekesinin ortalama üretim karışımına ait emisyon faktörleri ve bakım malzemelerinin üretim verileri gibi ikincil veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.6 : B – kullanım aşaması (30 Yıl) (Girdi).

Aşama	Girdiler	Kaynak
B - Kullanım Aşaması (30 Yıl)	Electricity, high voltage {TR} electricity, high voltage, production mix Cut-off, S	Ecoinvent

Ömür sonu aşaması (C), transformatörün hizmet ömrünü tamamladıktan sonra devre dışı bırakılmasıyla başlayan malzeme geri kazanım/bertaraf süreçlerini kapsamaktadır. Bu aşamada transformatörün materyal geri kazanım potansiyeli modellenmiş olup söküm operasyonları ile sökümünden kaynaklanan lojistik faaliyetleri sisteme dahil edilmemiştir. Söz konusu süreçlere ilişkin birincil veri bulunmaması ve literatürde benzer güç aralığındaki transformatörler için yapılan duyarlılık analizlerinde, söküm ve nakliye adımlarının toplam yaşam döngüsü çevresel etkilerine katkısının genellikle %1’in altında kaldığının gösterilmesinden dolayı ihmal edilebilir olarak görülmüştür. Çizelge 3.7’ de, transformatörün içindeki değerli malzemelerin geri kazanımı ve atık

niteliğindeki bileşenlerin bertarafına ilişkin girdi/çıkış akışları sunulmaktadır. Malzemelerin yeniden işlenmesi (hurda metalin ergitilerek yeni hammaddeye dönüştürülmesi vb.) için gereken enerji tüketimi ve emisyonlar Ecoinvent veri tabanından alınan geri dönüşüm süreç verileriyle modellenmiştir. Benzer şekilde, kullanım ömrü sonunda atık hale gelen transformatör yağı gibi tehlikeli maddelerin geri kazanım işlemleri de ilgili süreçlerin ikincil verileri kullanılarak YDD envanterine dahil edilmiştir. Metodolojik olarak bu aşamada cut-off (kesme) yaklaşımı benimsenmiş; geri dönüştürülebilir malzemeler sisteme bir çıktı olarak verilmiş ve bunların sonraki kullanımından doğacak potansiyel çevresel yük veya krediler incelenen sisteme atfedilmemiştir. Dolayısıyla, ömür sonu işlemlerinin kendi enerji kullanımı ve emisyonları sisteme dahil edilerek ürünün beşikten mezara çevresel profili tamamlanmakta, ancak geri kazanılan malzemelerin ileride sağlayacağı faydalar sistem sınırları haricinde tutulmaktadır.

Çizelge 3.7 : C – ömür sonu (Girdi-Çıktı).

Aşama	Girdiler	Çıktılar	Kaynak
C – Ömür Sonu	-	Geri dönüştürülen metal hurda	FabrikaVerisi
C – Ömür Sonu	-	Geri kazanılan yağ	FabrikaVerisi

Aşağıda, değerlendirmeye alınan yaşam döngüsü aşamaları özetlenmiştir:

Hammadde çıkarma ve üretim: Transformatörün bileşenlerini oluşturan temel malzemelerin doğal kaynaklardan elde edilmesiyle başlayan evredir. Demir cevherinin madenden çıkarılması ve çelik sac haline getirilmesi, bakır cevherinin çıkarılıp elektrolitik olarak arıtılması, mineral yağın rafine edilmesi bu aşamada yer alır. Bu süreçlerde kullanılan enerji ve salınan emisyonlar da sisteme dahildir. Kısaca, transformatör malzemelerinin “beşiği” olan maden ocağından başlayarak fabrika girişine kadarki serüveni bu aşamada modellenmiştir.

İmalat (üretim) aşaması: Transformatörün ilgili üretim tesisinde bir araya getirilip tamamlanmasını kapsar. Bu aşamada metal saclarının kesilmesi ve istiflenmesi, bakır sargıların sarılması, aktif parçaların montajı, kurutma fırını işlemleri ve tankın yağ ile doldurulması gibi üretim adımları yer almaktadır. Fabrika içinde tüketilen elektrik ve ısıtma amaçlı yakıtlar envantere eklenmiştir. Ayrıca 1000 kVA yağlı tip bir dağıtım transformatörünün imalat sürecinde çeşitli atıklar oluşmaktadır. Bu atıklar, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) açısından üretim sisteminin çıktıları olup, tanımlanan

sistem sınırları içinde ele alınmıştır. Transformatör imalatında oluşan başlıca atık türleri, sınıflandırmaları, geri kazanım/bertaraf yöntemleri ve yıllık atık miktarları Çizelge 3.8’ de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Transformatör üretim sürecinde oluşan atıkların sınıflandırılması ve bertaraf yöntemleri.

Atık Kodu	Atık Tanımı	Atık Türü	Atık Miktarı Kg/yıl	Bertaraf Yöntemi
13 01 13	Diğer hidrolik yağlar	Tehlikeli	658	R9
15 01 01	Kağıt ve karton ambalaj	Tehlikesiz	26745	R12
15 01 02	Plastik ambalaj	Tehlikesiz	7871	R12
15 01 03	Ahşap ambalaj	Tehlikesiz	90187	R12
15 01 10	Tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ya da tehlikeli maddelerle kontamine olmuş ambalajlar	Tehlikeli	33	R12
15 02 02	Tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler	Tehlikeli	33	R12
20 01 40	Metaller	Tehlikesiz	432031	R4

Üretim sürecinde tüketilen elektrik, doğalgaz ve diğer yardımcı malzemeler girdi; ortaya çıkan hurda metal, atıklar ve emisyonlar çıktı olarak tanımlanmıştır. İmalat aşamasında sadece transformatörün üretimine odaklanılmış olup, fabrikanın genel altyapısı (bina inşaatı vb.) tek bir ürün bazında bu etkiler ihmal edilebilir düzeyde olması sebebiyle sistem sınırı dışında bırakılmıştır.

Lojistik ve nakliye: Hammaddelerin tedarikçilerden üretim tesisine taşınması ve transformatörün üretim sonrası kullanım yerine ulaştırılması bu kısımda değerlendirilir. Tüm hammaddelerin yurtiçinde veya yurtdışında üretilip fabrikaya taşınması, tamamlanmış transformatörün müşteri sahasına taşınması için gereken nakliye süreçleri (karayolu taşımacılığı, gemiyle uluslararası nakliye vb.) sisteme dahildir. Her bir nakliye süreci için mesafeler ve taşıma modlarına göre yakıt tüketimi ve emisyonlar Ecoinvent verileriyle modellenmiştir. Taşıma modu (karayolu, denizyolu vb.), mesafe ve taşıma yük faktörleri dikkate alınmıştır. Nakliye sırasında

ortaya çıkabilecek paketleme malzemeleri veya taşıma kayıpları ihmal edilebilecek düzeyde olarak belirlenmiş ve kapsama dahil edilmemiştir.

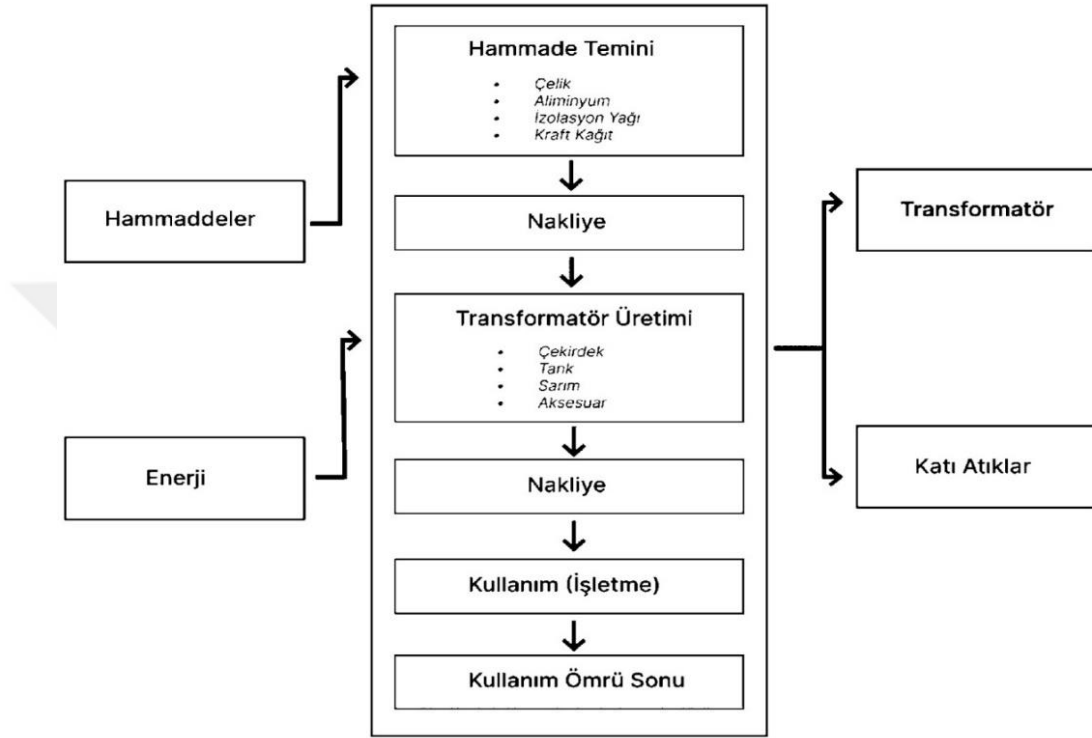
Kullanım (işletme) aşaması: Transformatörün şebekede devrede olduğu yaklaşık 30 yıllık hizmet süresini kapsar. Bir dağıtım transformatörü, işletme ömrü boyunca sürekli olarak yük altında çalışırken belirli oranlarda enerji kayıpları oluşturur. Bu çalışmada, transformatörün tipik yük profili ve kayıp gücü değerleri üretici teknik verilerinden alınmış, transformatörün 30 yıllık işletme ömrü boyunca kayıplarını karşılamak amacıyla çekeceği toplam elektrik enerjisi niceliksel olarak hesaplanmıştır. Kayıplar nedeniyle şebekeden çekilen ekstra elektrik enerjisinin üretilmesi için elektrik santrallerinde oluşan dolaylı emisyonlar (sera gazları ve diğer kirleticiler) kullanım aşamasının çevresel etkilerini oluşturur. Bu nedenle, transformatörün kullanım aşamasındaki etkileri değerlendirmek için, ülke elektrik şebekesinin ortalama elektrik üretim karışımı ve bu karışıma ait çevresel emisyon faktörleri esas alınmıştır.

Bakım onarım: Transformatörün işletme ömrü boyunca meydana gelebilecek arıza veya bakım durumları bu aşamada ele alınmaktadır. Tipik olarak dağıtım transformatörleri için planlı bir bakım sık değildir; ancak beklenmedik arızalarda sargı onarımı, contaların değiştirilmesi veya yağ sızıntısı varsa yağın ikmali gibi işlemler gerekebilir. Bu çalışmada, 30 yıllık süreçte yılda bir kez transformatör yağının kısmi yenilenmesi gerekebileceği varsayılmış ve buna ilişkin yeni yağ üretimi etkileri sisteme dahil edilmiştir. Bakım ve onarım aşamasına dair belirsizlikler bulunmakla birlikte, sonuçlar üzerindeki etkisinin ikincil düzeyde olduğu düşünülmektedir.

Bertaraf ve geri dönüşüm: Transformatörün ekonomik ömrünü tamamlaması sonrasında devre dışı alınmasıyla başlayan, söküm ve atık işleme süreçlerini kapsar. Transformatör söküldükten sonra bünyesindeki değerli malzemelerin önemli bir kısmı geri dönüştürülebilir. Bu çalışmada, ömür sonu aşamasında transformatörün içindeki bakır iletkenlerin ve çelik parçaların tamamının geri kazanım için ayrıldığı varsayılmıştır. Geri dönüşüm süreçleri için ilgili enerji tüketimleri ve emisyonlar (hurda bakırın eritilerek yeniden hammaddeye kazandırılması, çelik hurdasının elektrik ark ocaklarında çeliğe dönüştürülmesi) Ecoinvent verileriyle modellenmiştir. Transformatör yağı ise tehlikeli atık olarak lisanslı tesislerde toplanarak bertaraf edilmektedir; bu kapsamda atık yağın yakılarak enerji geri kazanımı yapıldığı ve kalan atıkların uygun şekilde depolandığı varsayılmıştır.

Geri dönüşüm sonucu elde edilen malzemelerin ileride kullanılacak ikinci hayat ürünlere katkısı, bu çalışmanın sistem sınırları dışında tutulmuştur.

Şekil 3.2’ de bu çalışmada yürütülen yaşam döngüsü değerlendirmesinin (YDD) girdi–çıkıtlı envanter tablosu ile bire bir eşleştirilecek şekilde sistem sınırları şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.2 : Yaşam döngüsü değerlendirmesi- sistem girdi ve çıktıları.

Çalışmada, sistem sınırları dışında bırakılan herhangi bir önemli süreç olmadığı varsayılmıştır; tüm temel malzeme ve enerji akışları envantere dahil edilmiştir. ISO 14044 standardı uyarınca, toplam çevresel etkilerin %1'inden fazlasını oluşturabilecek herhangi bir akışın ihmal edilmediğine dikkat edilmiştir (ISO, 2006b). Dolayısıyla, sonuçların transformatörün gerçek yaşam döngüsü etkilerini temsil etme kabiliyeti yüksektir.

3.2.3 Veri kaynakları ve toplanması

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi modellemesinde kullanılan veriler, birincil (özgün) ve ikincil (veritabanı) kaynaklardan derlenmiştir. Birincil veriler, çalışmada incelenen transformatörü üreten firmanın 2024 yılı üretim kayıtlarından doğrudan toplanmıştır. Transformatörün detaylı malzeme dökümü, üretim süreçlerindeki enerji tüketimleri ve proses çıktı verileri fabrikadan elde edilmiştir. Özellikle transformatörde kullanılan

başlıca malzemelerin miktarları (çelik, bakır iletkenler, yağ vb.), imalat adımlarında tüketilen elektrik ve yakıt miktarları, üretim sırasında oluşan atık tipleri ve miktarları fabrika kayıtlarından sağlanmıştır. Ayrıca lojistik verilere de fabrika kayıtlarından erişilmiştir. Hammaddelerin tedarikçilerden fabrikaya taşınırken kat ettiği mesafeler ve taşıma modları (karayolu, denizyolu gibi) ile üretilen transformatörün müşteriye sevk edilmesi sırasında kat edeceği mesafe bilgileri firma tarafından sunulmuştur.

Bununla birlikte, her bir süreç için detaylı verinin mevcut olmadığı durumlarda ikincil veri kaynaklarına başvurulmuştur. Bu çalışmada arka plan süreçleri için Ecoinvent veritabanından yararlanılmıştır. Ecoinvent'in güncel sürümlerinden 3.10 versiyonu seçilerek, transformatör üretim zincirindeki ilgili süreçler modele entegre edilmiştir. Transformatörde kullanılan çelik sacın üretimi, bakırın rafinasyonu, mineral izolasyon yağının imalatı, şebeke elektriğinin üretimi, nakliye süreçlerinin emisyonları ve atık işlemleri (geri dönüşüm ve depolama) süreçlerinin çevresel envanter verileri Ecoinvent üzerinden temin edilmiştir. Ecoinvent'in kesme (cut-off) modeline dayalı Allocation, cut-off by classification sistem modeli kullanılmış; böylece transformatörün tedarik zincirindeki tüm arka plan süreçleri (ham maddelerin üretimi, enerji üretimi, atık arıtma vs.) ortalama endüstriyel koşulları temsil eden envanter verileriyle modele entegre edilmiştir. Birincil verilerle doğrudan ölçülmesi mümkün olmayan bu süreçler için Ecoinvent verileri, ortalama endüstriyel koşulları temsil eden envanter bilgilerini sağlamıştır. İkincil veriler kullanılırken, Türkiye'ye özgü durumları yansıtmaya dikkat edilmiştir.

Ömrü sonu aşamasında ise yukarıda belirtildiği gibi cut-off yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşım uyarınca, transformatörün kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan geri dönüştürülebilir malzemeler sisteme bir çıktı olarak verilir; bunların sonraki kullanımlarından doğan çevresel yük veya krediler incelenen sisteme atfedilmez. Elde edilen sonuçlarda transformatör ömrü sonunda geri kazanılan malzemeler için herhangi bir pozitif çevresel etki (kredi) tanınmamıştır.

Toplanan birincil ve ikincil veriler birleştirilerek, transformatörün tedarik zincirinden kullanım ömrü sonuna dek uzanan kapsamlı bir yaşam döngüsü envanteri oluşturulmuştur.

3.2.4 Tahsisat yöntemleri

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde tahsisat, bir prosesin birden fazla ürün veya fonksiyonu olduğunda, bu prosesin girdi ve çıktılarının ilgili ürünlere paylaştırılması işlemidir. Bu çalışmada değerlendirilen transformatör üretimi, temelde tek bir ana ürün (transformatörün kendisi) üzerine odaklanmıştır; dolayısıyla üretim süreçlerinde birden fazla ortak ürün bulunmadığı için fabrika içi proseslerde tahsisat gereksinimi minimum düzeydedir. ISO 14044'e göre, eğer tahsis kaçınılmazsa öncelikle fiziksel ilişkiler temelinde (örn., kütle veya enerji içerikleri oranında) veya ekonomik değer temelinde dağıtım yapılması önerilir; ancak bu çalışmada üretim aşamasında anlamlı bir çoklu çıktı durumu olmadığı için bu tip bir tahsis yapılmasına gerek kalmamıştır (ISO, 2006b).

Geri dönüşüm ve ömür sonu tahsisi konusunda ise cut-off (kesme) yaklaşımı benimsenmiştir. Ecoinvent veritabanının sağladığı cut-off sistem modeline uygun olarak, transformatörün ömrü bittiğinde elde edilen geri kazanılabilir malzemeler sistem dışına bir çıkış olarak verilir ve bunların sonraki kullanımlarından doğan çevresel yarar veya yükler inceleme kapsamına dahil edilmez (Moreno Ruiz vd., 2020). Basitçe ifade etmek gerekirse, bu yaklaşım üretici sorumluluğu ilkesine dayalıdır: ürüne giren geri dönüştürülmüş içerikler varsa, bu içeriklerin üretim yükü önceki sisteme aittir ve yeni ürüne düşük çevresel yük ile girer; benzer şekilde ürünün sonunda çıkan hurda malzemeler ise incelenen sisteme yük getirmeden sistemden çıkar, bunların geri dönüştürülerek hammadde olması bir sonraki ürünün çevresel kazancıdır. Sonuçlar sunulurken, transformatörün ömrü sonunda geri kazanılan malzemeler için herhangi bir çevresel kredi verilmediği not edilmiştir; bu, sonuçların ihtiyatlı (konservatif) tarafta kalmasını sağlar, çünkü geri dönüşüm faydaları hesaba katılmamıştır. ISO 14044 standardı, tahsis konusunda yapılan tercihlerin çalışmanın sonuçlarını etkileyebileceğini ve bu tercihlerin açıkça beyan edilmesi gerektiğini vurgular (ISO, 2006b).

İncelenen üretim hattı 2024 yılında 5254 adet yağlı tip dağıtım transformatörü ve 12 adet güç transformatörü üretmiştir; dolayısıyla aynı hat üzerinde iki farklı ürün grubu yer almaktadır.

Yıllık toplam elektrik tüketiminin $\approx \%15$ 'i idari binalara, $\approx \%85$ 'i üretim faaliyetlerine aittir. Üretime ilişkin $\%85$ 'lik kısım, hat üzerinde üretilen toplam 5266 adet ürüne bölünerek birim başına özgül tüketim (kWh/ürün) hesaplanmıştır.

YDD'nın referans ürünü olan 1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörü, üretimin $\%99,8$ 'ini oluşturan ana ürün grubunun parçası olduğu için, elektrik tüketimi doğrudan bu birime tahsis edilmiştir; güç transformatörleri sayıca az olduğundan ayırıcı bir alt-proses tahsisi gerekmemiştir.

Tesis bünyesindeki fırınlar ve boyahane kurutma hatlarında kullanılan toplam doğalgaz (Sm^3) aynı yöntemle 5266 ürüne oranlanmış, birim ürüne düşen tüketim elde edilmiştir.

3.2.5 Malzeme bileşimi

Transformatörün hammadde reçetesinde yer alan tüm girdiler, benzer özelliklere sahip olanlar altında toplanarak malzeme cinsi temelinde kategorilere ayrılmıştır. Bu gruplandırma, SimaPro yazılımına veri girerken her bir malzeme türü için uygun Ecoinvent sürecinin seçilmesini kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Benzer üretim süreçlerine ve kimyasal bileşime sahip girdiler aynı kategoride gruplandırılmıştır. Manyetik çekirdek sacları ile yapısal çelik gövde parçaları birlikte çelik malzeme grubunu oluşturur; zira her ikisi de demir esaslı alaşımlar olup benzer mekanik dayanım ve üretim tekniklerine sahiptir. Aynı şekilde iletken sargılar için kullanılan alüminyum teller ayrı bir gruba alınmıştır, çünkü transformatörün elektriksel iletim işlevini yerine getiren bu malzemenin teknik özellikleri ve üretim süreci (yüksek enerji gerektiren elektroliz) çelikten tamamen farklıdır. İzolasyon amaçlı kullanılan mineral yağ ise sıvı formda, petrokimyasal kökenli özel bir malzeme olduğundan ayrı bir kategori ("Lubricating Oil") olarak tanımlanmıştır. Bu yağın transformatörde elektriksel izolasyon ve soğutma işlevi vardır ve üretim kaynağı ham petrol olup çevresel profili metallerden farklıdır.

Transformatör bileşenlerinin $\%95$ 'lik büyük kısmını üç ana malzeme oluşturmaktadır: çelik, alüminyum ve mineral yağ. Bu üçü, kütlece en baskın girdiler oldukları ve toplam kütlenin neredeyse tamamını temsil ettikleri için ayrı kategorilerde değerlendirilmiştir. Kalan $\%4-5$ 'lik kısmı oluşturan yardımcı malzemeler (ör. porselen, kraft kâğıt, PVC/PET plastikler, kauçuk contalar, epoksi reçine, küçük metal bağlantı elemanları vb.) ise her ne kadar kütlece düşük paya sahip olsa da atık yönetimi

ve toksisite gibi etki kategorilerinde oransal olarak önemli etkilere yol açabildiği için göz ardı edilmemiştir.

Ecoinvent süreçleri, versiyon 3.10 (Allocation cut-off by classification) veritabanından seçilmiştir. Her bir süreç, ilgili malzemenin ortalama koşullardaki üretimini temsil etmektedir. Transformatör üreticisinin coğrafi tedarik ağları heterojen olduğu için konum bazlı tekil süreçler yerine global (GLO) ya da Avrupa (RER/EU27) kapsama sahip market for veri setleri seçilmiştir. Bu yaklaşım, “Allocation, cut-off by classification” sistem modelindeki varsayım (geri dönüştürülmüş içeriğe indirim, ömür-sonu kredilerinin sonraki sisteme aktarılması) ile uyumludur. Ecoinvent’te doğrudan karşılığı bulunmayan girdiler için fonksiyonel ve kimyasal benzer süreçler kullanılmıştır. Çelik, alüminyum ve yağ gibi enerji-yoğun malzemeler ayrı kategoride tutulmuş; bu malzemeler ömür boyunca çevresel “sıcak nokta” olduğundan kendi özgün süreçleri ile modellenmiştir. <0,1 kg girdiler toplu “yardımcı malzemeler” kategorisi içinde konservatif tek bir polimer süreciyle temsil edilmiştir. Bu akışların toplam iklim değişikliği etkisine katkısı <0,05 % olduğundan sonuç tutarsızlığı yaratmamaktadır.

Ham maddelerin gruplandırılması, her bir malzeme grubunun farklı çevresel etki kategorilerine katkısını ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Böylece, etki değerlendirme metodolojisi çerçevesinde hangi malzeme türünün hangi etki kategorilerinde öne çıktığı belirlenerek yaşam döngüsü “sıcak noktaları” tespit edilebilmektedir.

Transformatörün birim ürün (1 adet, 1000 kVA yağlı tip) için toplam kütlesi 2660 kg’dır. Kütlenin %55,6’sı çelik gövde (1479,526 kg), %19,6’sı alüminyum sargılar (521,803 kg) ve %19,6’sı yalıtım yağı (520,372 kg) olmak üzere ilk üç malzeme toplam kütlenin ~%95’ini oluşturmaktadır. Kalan %4,4’lük bölümde porselen izolatörler, kraft kâğıt, PVC, PET ve diğer yardımcı elemanlar yer almaktadır.

Çizelge 3.8’de sunulan değerler, incelenen 1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörünün fabrika içi üretimi sırasında sisteme giren malzeme ve enerji akışları ile çıkan ürün ve atık akışlarını göstermektedir. Veriler, üretici firmanın veri sistemine kayıtlı parça listesi (Bill of Materials) çıktılarından alınmıştır.

Çizelge 3.9 : Hammadde girdilerinin ecoinvent süreçleri ile eşleştirilmesi (1 adet transformatör için).

Girdi Akışı	Miktar (kg)	SimaPro Süreç Kodu
Çelik sac malzemesi	1479,53 kg	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} steel production, low-alloyed, hot rolled Cut-off, S
Alüminyum iletken tel	521,80 kg	Aluminium alloy, AlMg3 {RER} aluminium alloy production, AlMg3 Cut-off, S
Mineral izolasyon yağı	520,37 kg	Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, S
Kraft Kağıt	56,92	Kraft paper {RER} market for kraft paper Cut-off, S
PVC	8,15	Polyvinylchloride, bulk polymerised {RER} polyvinylchloride production, bulk polymerisation Cut-off, S
PET film	5,85	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER} polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous Cut-off, S
Seramik/Porselen İzolatör	41,13	Sanitary ceramics {RoW} sanitary ceramics production Cut-off, S
Krom Malzeme	7,38	Chromium {RER} chromium production Cut-off, S
Selüloz Malzeme	2,40	Cellulose fibre {RoW} market for cellulose fibre Cut-off, S
Toz boya	5,20	Coating powder {RER} market for coating powder Cut-off, S
Paslanmaz Çelik	6,34	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} steel production, chromium steel 18/8, hot rolled Cut-off, S
Selüloz bazlı izolasyon malzemeleri	1,32	Paper, melamine impregnated {RER} market for paper, melamine impregnated Cut-off, S
Nitril Kauçuk	1,20	Synthetic rubber {RER} synthetic rubber production Cut-off, S
Bakır Tel	0,70	Copper {RER} copper production, primary Cut-off, S
Epoksi Reçine	0,63	Epoxy resin {RER} epoxy resin production Cut-off, S
Borosilikat cam	0,25	Glass tube, borosilicate {GLO} market for glass tube, borosilicate Cut-off, S
ABS Küçük parçalar, Plastik Tıpa vb.	0,40	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {RER} acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer production Cut-off, S
Kablo	0,20	Cable, unspecified {GLO} market for cable, unspecified Cut-off, S
Mühür	0,10	Paraffin {RER} paraffin production Cut-off, S
Pirinç Tıpa	0,10	Brass {RoW} market for brass Cut-off, S

Aktif kısım (manyetik çekirdek + sargılar): Transformatörün elektromanyetik işlevini sağlayan bu yapı, yüksek silisyumlu sac çeliğin (çekirdeğe tahmini ≈ 1000 kg) ve alüminyum iletkenlerin (521,8 kg; %19,6) birleşiminden oluşur. Her iki malzeme de

iklim değişikliği ile fosil kaynak tüketimi kategorilerinde “sıcak nokta” dır; özellikle alüminyumun özgül enerji gereksinimi etki skorlarını yükseltir.

İzolasyon yağı: 520,4 kg mineral bazlı yağ (%19,6) elektriksel izolasyon ve ısı transferi görevini üstlenir. Yağın kütle payı çelik ve alüminyuma kıyasla düşük olsa da petrol kökeni nedeniyle fosil kaynak kullanımı ve ekotoksosite kategorilerine anlamlı katkı yapar.

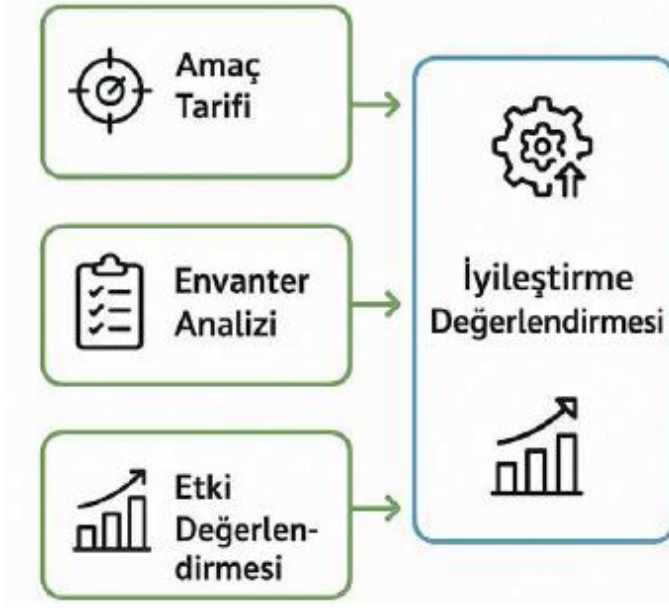
Yapısal çelik (tank, radyatör ve bağlantı elemanları): Toplam çelik kütlesinin kalan bölümü (~480 kg) ile birlikte yaklaşık %18’lik paya sahiptir (toplam çelik %55,6; bunun yaklaşık %30’u olarak kabul edilmiştir). Mekanik koruma sağlamanın yanında ısı dağılıma yardımcı olur.

Yardımcı malzemeler: Porselen, kraft kâğıt, paslanmaz çelik, PVC/PET, seramik, lastik contalar, epoksi reçine ve diğer kalemler toplam kütlenin $\approx$ %5’ini oluşturur. Kütlesel katkıları az olsa da insan toksisitesi, ekotoksosite ve atık yönetimi kategorilerindeki orantısal etkileri söz konusudur.

3.3 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Yaklaşımı ve Standartlar

Bu çalışma, yaşam döngüsü değerlendirmesi metodolojisini uluslararası kabul görmüş çerçevede uygulamak amacıyla ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarının prensiplerine göre yürütölmüştür (ISO, 2006a; ISO, 2006b). ISO 14040, bir YDD çalışmasının kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlanması olmak üzere dört temel aşamasını tanımlamaktadır. ISO 14044 ise YDD uygulamasına dair gereklilikler ve kılavuzlar sunarak veri kalitesi, belirsizlik ve tahsis (allocation) kurallarını detaylandırmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada öncelikle amaç ve kapsam tanımı yapılmış, ardından yaşam döngüsü envanteri oluşturulmuş, seçilen etki değerlendirme yöntemi ile sonuçlar hesaplanmış ve son olarak bulgular yorumlanmıştır. YDD süreci boyunca şeffaflık ve izlenebilirlik sağlanmış, tüm varsayımlar ve sınırlar ISO rehberliğinde dokümente edilmiştir. Böylece, çalışmanın yöntemi bilimsel tutarlılık ve tekrarlanabilirlik esaslarına uygun hale getirilmiştir.

Bir YDD çalışması amaç ve kapsam, envanter analizi etki değerlendirmesi ve iyileştirme değerlendirmesi olmak üzere 4 basamaktan oluşmaktadır (ISO 14040:2006). Yaşam döngüsü metodolojisinin kapsamı Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Yaşam döngüsü metodolojisinin kapsamı.

Bu çalışmada kullanılan YDD metodolojisinin kavramsal şeması Şekil 3.1 'de sunulmuştur. İlk aşama olan amaç ve kapsam tanımı ile sistem sınırları belirlenmiş; ardından envanter analizi safhasında süreç girdileri/çıktıları derlenmiştir. Etki analizi bölümünde EF 3.1 ve ReCiPe 2016 yöntemleri uygulanarak iklim değişikliği başta olmak üzere çeşitli etki kategorileri hesaplanmıştır. Son aşama olan yorumlama adımı bulgular değerlendirilmiştir.

3.4 Kullanılan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Modelleme Aracı

Bu çalışmada yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) modellemesi ve analizleri için SimaPro yazılımı kullanılmıştır. SimaPro, karmaşık ürün sistemlerini modellemek ve girdiler-çıktılar arasındaki ilişkileri izlemek için kullanılan profesyonel bir YDD aracıdır. Bu yazılım, birincil ve ikincil verilerin entegre biçimde kullanılarak süreçlerin oluşturulmasına, farklı senaryoların karşılaştırılmasına ve sonuçların hesaplanmasına imkan tanımaktadır.

Kullanılan SimaPro sürümü, çalışmanın yürütüldüğü dönemdeki en güncel masaüstü versiyon olan SimaPro 10'tir. Bu sürüm, yazılımın en yeni özelliklerini ve veri güncellemelerini içermekte olup; ecoinvent 3.10 gibi güncel yaşam döngüsü envanteri (LCI) veri tabanları ve EF 3.1 ile ReCiPe 2016 gibi güncel yaşam döngüsü etki değerlendirme (LCIA) metotlarını desteklemektedir.

Genel olarak, SimaPro yazılımının veri kütüphaneleri; malzeme üretimi, enerji üretimi, endüstriyel prosesler, nakliye-lojistik, kullanım aşaması ve atık işleme gibi bir ürünün yaşam döngüsünün tüm safhalarına ait arka plan verilerini kapsamaktadır. Özellikle ürünün kullanım ömrü sonu (end-of-life) aşamasını modellemek için, çeşitli atık türleri ve bertaraf yöntemlerine göre tanımlanmış hazır süreçler ve senaryolar yazılımda bulunmaktadır. Böylece bir ürünün ömrü bittikten sonraki geri dönüşüm, yeniden kullanım veya bertaraf işlemlerinin çevresel etkileri de modele dâhil edilebilmektedir. (PRé Sustainability, 2023)

Birincil veriler, incelenen transformatörün üreticisi konumundaki fabrikadan doğrudan toplanmıştır. Fabrikanın kayıtlarından elde edilen bu veriler arasında transformatörün malzeme bileşenleri (kullanılan elektrik çeliğinin, bakırın ve mineral yağın miktarları), üretim süreçlerindeki enerji tüketimi (elektrik ve yakıt kullanımı), üretim esnasında oluşan atık miktarları ve üretim süreçlerinin detayları yer almaktadır. Ayrıca lojistik bilgiler de üreticiden sağlanmıştır; hammaddelerin fabrikaya taşınmasında kat edilen mesafeler, nakliye modları (karayolu, denizyolu vb.) ve transformatörün müşteriye sevkiyat mesafesi gibi veriler toplanmıştır. Bu birincil veriler, yerel ve güncel şartları yansıttığı için çalışmanın özgünlüğünü ve gerçekçiliğini artırmaktadır.

İkincil veriler ise, süreç ağında yer alan arka plân operasyonları (upstream metalürjik rafinasyon, bölgesel elektrik karışımı, standart lojistik modları ve bertaraf prosesleri) için Ecoinvent 3.10 veri tabanından seçilmiştir. Ecoinvent, çeşitli malzeme ve süreçlere ilişkin ortalama çevresel envanter verilerini sağlayan kapsamlı ve güvenilir bir kaynaktır. Bu veri tabanından, birincil verilerle kapsam dahiline alınan ancak detaylı envanteri üretici tarafından sağlanamayan süreçler için gerekli veriler çekilmiştir. Örneğin, çelik sac üretimi, bakır rafinasyonu, izolasyon yağının üretimi, elektrik şebekesinden 1 kWh elektriğin üretilmesi, nakliye süreçleri ve atık işlemleri (geri dönüşüm ve bertaraf) gibi süreçlerin çevresel verileri Ecoinvent 3.10'den temin edilmiştir. Bölgesel bulunmayan prosesler için Avrupa ortalaması seçilmiş, üretimde kullanılan elektrik girdileri Türkiye şebeke karışımına ($0,57 \text{ kg CO}_2\text{-eq kWh}^{-1}$) adapte edilmiştir.

Birincil ve ikincil verilerin birlikte kullanılmasıyla, transformatörün tedarik zincirinden kullanım ömrü sonuna kadar tüm aşamalarını temsil eden kapsamlı bir yaşam döngüsü envanteri oluşturulmuştur. Verilerin tutarlılığını sağlamak için,

birincil ve ikincil veriler zaman, coğrafi bölge ve teknoloji açısından mümkün olduğunca uyumlu seçilmiştir.

3.5 Etki Değerlendirme Metodolojisi

Yaşam döngüsü envanteri hazırlandıktan sonra, bu envanterdeki emisyon ve kaynak kullanım verilerinin çevresel etkilere dönüştürülmesi için yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA) adımı uygulanmıştır.

Bu çalışmada, transformatörün çevresel etkilerini kapsamlı ve karşılaştırılabilir kılmak amacıyla iki tamamlayıcı LCIA yöntemi kullanılmıştır. İlki, Avrupa Birliği'nin çevresel ayak izi yaklaşımı doğrultusunda geliştirilen EF 3.1 metodolojisidir; bu yöntem, iklim değişikliği, asidifikasyon, kaynak kullanımı gibi çok sayıda etki kategorisinde ayrıntılı sonuçlar verir ve Avrupa'daki düzenleyici çerçeveye uyumludur. İkincisi ise literatürde yaygın kullanılan ReCiPe 2016 Endpoint (H/A) metodudur; bu yöntem, söz konusu orta-nokta etkileri insan sağlığı ve ekosistem kalitesi boyutlarında tekil zarar göstergelerine dönüştürerek değerlendirir. İki yöntemin birlikte kullanılması, transformatörün yaşam döngüsü profilini hem detaylı kategori bazında hem de bütünlük bir skor olarak incelemeyi mümkün kılar. Böylelikle, yöntem seçiminin sonuçlar üzerindeki etkisi de görülebilmektedir: Her iki yaklaşım da aynı kritik “sıcak nokta”ları işaret etmektedir ve bulgular yöntemler arası tutarlılık göstermektedir. Çift yöntem kullanımı, sonuçların metodolojik sağlamasını yaparak yorumlara zenginlik katmayı hedeflemiştir.

Dolayısıyla EF 3.1 yöntemiyle veri güncelliği ve AB politika uyumu, ReCiPe 2016 ile ise kategori çeşitliliği ile hasar düzeyinde karar desteği birlikte sağlanmış ve transformatör yaşam döngüsü sonuçlarının hem ayrıntılı kategori bazında hem de üç koruma alanında bütüncül olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

3.5.1 EF 3.1 (çevresel ayak izi) yöntemi

EF 3.1, Avrupa Birliği içinde yöntem birliği ve sonuç karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla geliştirilmiş, güncel bir yaşam döngüsü etki değerlendirme (LCIA) yaklaşımıdır (European Commission JRC, 2022). EF 3.1 yöntemi transformatör yaşam döngüsünün çevresel profilini güncel karakterizasyon faktörleri, AB odaklı normalizasyon ve düzenleyici uyum avantajlarıyla niceliksel olarak ortaya koymaktadır.

EF 3.1 yalnızca orta-nokta (midpoint) göstergeler sunar ve toplam 16 etki kategorisini kapsar. Aşağıda her kategorinin bilimsel temeli ve ölçüm birimi özetlenmiştir:

İlk kategori İklim Değişikliğidir; fosil, biyogenik ve arazi kullanımı kaynaklı sera gazlarının etkisi, IPCC AR6'ya dayalı 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (GWP100) katsayılarıyla kg CO₂-eşdeğeri cinsinden hesaplanır.

Ozon Tabakası İncelmesi kategorisi, WMO (2014) verileri kullanılarak kg CFC-11-eşdeğeri biçiminde belirlenir.

İnsan Toksisitesi kanserojen ve kanser-dışı olmak üzere iki ayrı alt kategoriye ayrılmıştır; her ikisi de USEtox 2.1 modelinden türetilen CTUh (ek vaka) birimiyle ifade edilir.

Partikül Madde göstergesi, UNEP/SETAC modeline göre PM_{2.5} maruziyetinin yol açtığı hastalık insidansını niceler.

İyonlaştırıcı Radyasyon etkisi Dreicer (1995) metodolojisiyle person·Sv biriminde değerlendirilir.

Fotokimyasal Ozon Oluşumu, LOTOS-EUROS atmosferik modeline dayanarak kg NMVOC-eşdeğeri ile raporlanır.

Toprak ve su ekosistemlerindeki kimyasal yüklerin etkisi üç başlıkta ele alınır: Asitleşme (Accumulated Exceedance yöntemi, mol H⁺-eşd.), Karasal Ötrofikasyon (AE-N, mol N-eşd.) ile Tatlı Su ve Deniz Ötrofikasyonu (EUTREND modeli, sırasıyla kg P-eşd. ve kg N-eşd.).

Tatlı Su Ekotoksitesi, USEtox 2.1'e göre CTUe (tür·yıl) birimiyle belirlenir. Arazi baskısını ölçen Arazi Kullanımı kategorisi, JRC-LANCA v 2.5'ten türetilen toprak kalite endeksi puanını kullanır; Su Kullanımı ise WULCA-AWARE yöntemine göre m³ H₂O-eşdeğeriyle bölgesel su kıtlığı etkisini gösterir.

Kaynak tükenmesi iki alt başlık altında toplanır: Fosil Kaynak Tüketimi, CML ADP-fossil modeliyle alt ısı değere dayalı MJ (veya kg petrol-eşd.) olarak; Mineral ve Metal Kaynak Tüketimi ise CML ADP-elements yaklaşımıyla kg Sb-eşdeğeri olarak raporlanır.

Böylece EF 3.1 yöntemi, iklim değişikliğinden su kıtlığına, toksisite risklerinden kaynak tükenmesine kadar geniş bir etki yelpazesini güncel karakterizasyon katsayılarıyla nicelendirir ve AB çevre politikalarıyla uyumlu, karşılaştırılabilir YDD

sonuçları elde edilmesine imkân tanır (European Commission JRC, 2022; USEtox Consortium, 2021).

3.5.2 ReCiPe 2016 yöntemi

ReCiPe 2016, LCIA alanında güncel ve kapsamlı bir yöntem olup, envanter akışlarını belirli çevresel etki göstergelerine dönüştürmek için karakterizasyon faktörleri sunar. ReCiPe yönteminin seçilmesinin nedeni, geniş bir etki kategorisi yelpazesini tutarlı bir şekilde değerlendirebilmesi ve literatürde yaygın kullanımı sayesinde sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılabilir olmasını sağlamasıdır. ReCiPe metodolojisi, orta-nokta (midpoint) ve uç-nokta (endpoint) olmak üzere iki düzeyde gösterge hesaplama imkanı sunar. Orta-nokta göstergeler, bir çevresel etki yolunun ortasında yer alan, doğrudan gözlemlenebilir sorun odaklı kategorilerdir (ör., iklim değişikliği, asidifikasyon). Uç-nokta göstergeler ise bu etkilerin nihai sonuçlarını üç ana koruma alanı (insan sağlığı, ekosistem kalitesi ve kaynaklar) üzerindeki potansiyel zarara dönüştürür (Goedkoop vd., 2009; Huijbregts vd., 2017).

ReCiPe 2016 yönteminde toplam 18 adet orta-nokta etki kategorisi tanımlıdır (Huijbregts vd., 2017). Bu çalışma kapsamında bu kategorilerin tamamı hesaplanmış olmakla birlikte, özellikle elektrik-elektronik ekipmanlarla ilişkili önemli bulunan kategorilere odaklanılmıştır. İncelenen başlıca etki kategorileri şunlardır:

İklim Değişikliği (Küresel Isınma Potansiyeli): Atmosfere salınan sera gazlarının küresel ısınmaya katkısını gösterir. 100 yıllık zaman dilimi için CO_{2e} eşdeğeri cinsinden ifade edilir (ör., kg CO_{2e} eşdeğeri). Bu kategori, transformatörün yaşam döngüsü boyunca yol açtığı toplam sera gazı emisyonlarının iklim değişikliğine etkisini yansıtır. İklim değişikliği kategorisi, günümüzün en acil çevresel sorunu olması nedeniyle çalışmada özel bir öneme sahiptir ve sonuçlarda detaylı olarak tartışılacaktır.

İnsan Sağlığına Partikül Madde (PM) Oluşumu: Transformatörün yaşam döngüsündeki emisyonların (ör., üretimdeki yanma süreçleri veya enerji üretimindeki emisyonlar) atmosferde partikül madde oluşumuna katkısını temsil eder. Bu partiküller (PM_{2.5} ve PM₁₀) solunabilir olup insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. ReCiPe, bu etkiyi insan sağlığına indirgenmiş bir gösterge ile veya ara birimler (kg PM 2.5 eşdeğeri) ile ifade eder.

Foto-kimyasal Ozon Oluşumu (Dumanlı Sis): Uçucu organik bileşikler ve NO_x gibi emisyonların güneş ışığı varlığında reaksiyona girerek oluşturduğu yer seviyesindeki ozon, insan sağlığı ve bitki örtüsü için zararlıdır. Transformatörün üretimi ve enerji kullanımı sırasında salınan bu tür gazların, ozon oluşumuna ne kadar katkı yaptığını ReCiPe yöntemi hesaplamaktadır (kg NMVOC eşdeğeri gibi birimlerle).

Asidifikasyon (Toprak ve Su Asitlenmesi): Kükürt dioksit (SO₂), nitrojen oksitler (NO_x) gibi gaz emisyonlarının ekosistemlerde asit yüküne neden olarak toprak ve su kalitesini bozma potansiyelini temsil eder.

Eutrofikasyon: Besin maddesi yüklemesi sonucu sucul ortamlarda yosun patlamalarına yol açan kirlilik etkisidir. ReCiPe, tatlı su ötrofikasyonu (fosfor eşdeğeri ile, ör. kg P eşd.) ve deniz ötrofikasyonu (azot eşd., kg N) kategorileriyle bu etkiyi ayrı ayrı ele alır. Transformatör üretim süreçlerinde oluşan atıksular veya dolaylı etkiler sonucu su ortamlarına azot/fosfor salımı sınırlı da olsa olabileceğinden, bu kategoriler de değerlendirilmiştir.

Toksisite (İnsan ve Ekotoksisite): Üretim süreçlerinde veya malzeme yaşam döngülerinde salınan toksik kimyasalların insan sağlığına (kanserojen ve kanserojen olmayan etkiler) ve ekosistemlere (tatlı su, deniz ve karasal ekotoksisite) zarar verme potansiyelini gösterir. ReCiPe, bunları çeşitli alt kategorilerde, komparatif toksisite üniteleri üzerinden hesaplar.

Kaynak Tükenmesi (Fosil ve Metal Kaynakları): Transformatörün yaşam döngüsünde tüketilen fosil yakıtların (kömür, doğal gaz, petrol) ve metalik kaynakların (bakır cevheri, demir cevheri vb.) gelecek nesiller açısından ne ölçüde tükenmeye katkı sağladığını gösterir. Fosil kaynak tükenmesi genellikle MJ veya yağ eşdeğeri, metal/mineral kaynak tükenmesi ise antropojenik stokta azalma gibi göstergelerle ifade edilir. Transformatör imalatında kullanılan bakır ve çelik miktarları yüksek olduğundan, özellikle metal kaynak tükenmesi kategorisi önem arz etmektedir.

Yukarıda belirtilenler dışında ReCiPe 2016 kapsamında ozon tabakası incelmesi, iyonlaştırıcı radyasyon, karasal ekotoksisite, su kullanımından kaynaklı kıtlık gibi diğer etki kategorileri de hesaplanmıştır. Ancak transformatör özelinde bu kategoriler ya çok düşük etkilidir ya da dolaylı olarak ilişkilidir. Tüm kategorilerin hesaplanması, transformatörün çevresel profilini eksiksiz biçimde ortaya koymak için yapılmıştır; ancak analiz ve tartışmalarda önem düzeyi yüksek olanlara odaklanılmıştır.

Sonuçlar, her etki kategorisi için birincil enerji kullanımı, malzeme üretimi, kullanım aşaması enerji tüketimi vb. alt katkıların paylarını da görebilecek şekilde SimaPro' dan elde edilmiş ve yorumlanmaya hazır hale getirilmiştir.

3.5.3 ReCiPe 2016 ve EF 3.1 yöntemlerinin benzerlikleri ile ayırt edici özellikleri

ReCiPe 2016 ve EF 3.1, yaşam döngüsü etki değerlendirmesinde (LCIA) çok-kategorili yaklaşımla çalışan yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Her ikisi de iklim değişikliği, ozon tabakasının incilmesi, asitleşme, karasal/tatlı su/deniz ötrofikasyonu, insan toksisitesi, ekotoksisite, arazi kullanım değişikliği, su kullanımı ve abiyotik kaynak tüketimi gibi ana çevresel boyutları kapsayan orta-nokta göstergeler üretir. Bu göstergeler, envanterdeki emisyon ve kaynak kullanımlarını karakterizasyon faktörleri yardımıyla ortak bir etki birimine dönüştürerek her süreç katkısının toplama eklenmesini sağlar (Huijbregts vd., 2017; European Commission JRC, 2022). Bu yönüyle iki yöntem, süreç ağının bütüncül çevresel profilini nicel olarak ortaya koyabilmesi bakımından benzerdir.

Çizelge 2.3’de sunulan karşılaştırma, bu tezde kullanılan iki başlıca etki değerlendirme yöntemi ReCiPe 2016 ve Environmental Footprint (EF) 3.1 arasındaki yapısal farklılıkları özetlemektedir. Karşılaştırma, yöntem seçiminin YDD sonuçlarını nasıl yönlendirdiğini ve yorumlamalara hangi boyutları eklediğini vurgulamak amacıyla hazırlanmıştır.

Çizelge 3.10 : ReCiPe 2016 ve EF 3.1 yöntemlerinin karşılaştırılması.

Karşılaştırma Ölçütü	ReCiPe 2016	EF 3.1
Gösterge Düzeyi	Orta-nokta + uç-nokta (insan sağlığı, ekosistem, kaynaklar)	Karakterizasyon
Kategori Sayısı	18	16
Güncellik	2016	2022
Coğrafi Temel	Küresel ortalama karakterizasyon	Avrupa Birliği Karakterizasyonu

3.6 Belirsizlik ve Hassasiyet Analizi

YDD sonuçlarının güvenilirliği ve karar vericiler tarafından doğru anlaşılması için belirsizlik analizi önemli bir adımdır. Bu çalışmada sonuçların istatistiksel dağılımını

incelemek ve veri belirsizliklerinin etkisini değerlendirmek amacıyla Monte Carlo analizine başvurulmuştur. Envanter verilerindeki parametre belirsizlikleri ve model varsayımlarından kaynaklanan belirsizlikler bu analiz ile nicel olarak ele alınmıştır. SimaPro yazılımının Monte Carlo simülasyon aracı kullanılarak her bir etki kategorisi için 1000 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Her iterasyonda, envanterdeki her bir girdinin veya emisyonun olası değeri, ilgili belirsizlik dağılımından rastgele örneklenmiş ve buna dayalı olarak LCIA hesaplamaları yapılmıştır. Bu şekilde, örneğin iklim değişikliği kategorisi için 1000 farklı olası sonuç hesaplanmış ve bunların istatistiksel dağılımı elde edilmiştir. Monte Carlo sonucu olarak, her etki kategorisi için ortalama değerlerin yanı sıra %95 güven aralığı belirlenmiştir. Sonuçların bu şekilde sunulması, hangi kategorilerde belirsizliğin yüksek olduğunu görölmesini sağlar. Monte Carlo yöntemi YDD çalışmalarında belirsizliği değerlendirmek için yaygın bir yaklaşımdır (Lloyd ve Ries, 2007) ve bu çalışmada da sonuçların güvenilirliğini test etmek için kullanılmıştır. Bunun yanında, kritik varsayımların ve senaryoların sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla hassasiyet analizi (sensitivity analysis) gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizinde, temel senaryodaki bazı parametreler veya varsayımlar kasıtlı olarak değiştirilerek (diğer her şey sabit tutulup) sonuçlardaki değişim gözlemlenir.

ISO 14044 standardı da sonuçların yorumlanması aşamasında belirsizlik ve hassasiyet analizlerinin yapılmasını tavsiye etmekte olup, bu çalışma bu önerileri karşılayacak şekilde detaylı bir analiz sunmaktadır (ISO, 2006b). Sonuç olarak, kullanılan metodoloji tüm aşamalarıyla uluslararası standartlara ve akademik literatüre dayanmakta olup, elde edilen bulguların güvenilir, izlenebilir ve sürdürülebilirlik bağlamında anlamlı olmasını sağlamaktadır. Bu amaç ve kapsam ile yöntem bölümlerinde ortaya konan çerçeve sayesinde, 1000 kVA dağıtım transformatörünün yaşam döngüsü performansı özellikle iklim değişikliği ve diğer çevresel etkiler açısından kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, transformatör tasarımı, üretimi ve işletimi süreçlerinde çevresel iyileştirme fırsatlarının belirlenmesine bilimsel bir temel oluşturacaktır.

3.7 Veri Kalitesi Değerlendirmesi

Bu tezde oluşturulan yaşam döngüsü envanteri (LCA-LCI) verilerinin geçerliliği, Weidema ve Wesnæs (1996) tarafından geliştirilen beş göstergeli Pedigree Matris

yaklaşımı temel alınarak değerlendirilmiştir. Söz konusu matris, daha sonra Guinée vd. (2002) el kitabında standart hâle gelmiş ve inşaat sektörü YDD'si gibi güncel derleme çalışmalarında da (Khasreen, Banfill & Menzies, 2009) yaygın biçimde uygulanmıştır.

Pedigree Matris yöntemi, her veri setini beş bağımsız gösterge açısından 1 (çok yüksek) ile 5 (çok düşük) arasında derecelendirerek nicel bir Veri Kalitesi Endeksi (VKE) üretir. Pedigree Matris beş göstergeden oluşur: Güvenilirlik, Tamlık (Bütünlük), Zamansal Uygunluk, Coğrafi Uygunluk ve Teknolojik Uygunluk (Weidema & Wesnæs, 1996).

Çizelge 3.4'de sunulan Veri kalitesi Endeksi, Weidema & Wesnæs (1996) Pedigree Matrisindeki beş gösterge esas alınarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.11 : Çalışmanın veri kalitesi endeksi.

Göstergeler	Değerlendirme Kriteri	Çalışmanın Durumu
Güvenilirlik	Ölçüme dayalı/ doğrulanmış ↔ tahmini	Birincil fabrika ölçümleri → skor 1; Ecoinvent arka plan verisi → skor 3
Temsil Yeteneği/Tamlık	Örneklem hacmi ve istatistiksel bütünlük	Üretim yılına ait tam kütle-enerji dengesi verileri → 1; kısmi sektör ortalaması → 2
Zamansal Uygunluk	Veri yaşı (≤ 3 yıl ↔ > 15 yıl)	2024 üretim kayıtları → 1; Ecoinvent 3.10 (2022) → 2
Coğrafi Uygunluk	Aynı tesis ↔ farklı kıta	Yerel tesis verisi → 1; Avrupa Kıtası geneli süreç → 2
Teknolojik Uygunluk	Aynı proses/ölçek ↔ laboratuvar prototip	Yağlı tip Trafo üretimi → 1; küresel ortalama hammadde temini → 3

3.7.1 Puanlama ve ağırlıklı endeks

Her veri kümesi için beş gösterge ayrı ayrı puanlanmış ve **Ağırlıklı VKE** aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Weidema & Wesnæs, 1996):

$$VKE = 2R + 2Z + 1T + 1C + 1Te / 7 \quad (3.1)$$

Burada **R** = Güvenilirlik, **Z** = Zamansal uygunluk, **T** = Temsil, **C** = Coğrafi uygunluk, **Te** = Teknolojik uygunluk; güvenilirlik ve zamansal uygunluk göstergeleri literatürde önerildiği üzere iki kat ağırlıkla alınmıştır.

3.7.2 Sonuçların sınıflandırılması

Çizelge 2.5’de VKE aralıklarının hangi nitel sınıfa karşılık geldiği ve bu sınıfların yorumlanma biçimi özetlenmiştir. Sınıflandırma ölçütleri, yaşam döngüsü envanteri literatüründe yaygın olarak benimsenen Weidema ve Wesnæs (1996) yaklaşımı ile ISO 14044’de tarif edilen veri kalite göstergelerinin birlikteliğinden uyarlanmıştır.

Çizelge 3.12 : Veri kalitesi endeksi sonuçlarının sınıflandırılması.

VKE Ağırlığı	Kalite Sınıfı	Açıklama
1,0-2,5	Yüksek	YDD sonuçlarını doğrudan destekler, ek hassasiyet analizi gerekmez
2,5-3,5	Orta	Kritik süreçlerde senaryo/ hassasiyet analizi önerilir
≥3,5	Düşük	Belirsizlik yüksek; mümkünse birincil veriyle ikame edilir

Çalışmamızda birincil veriler $VKE \leq 2,0$ aralığında “yüksek” kalite olarak sınıflandırılmıştır. Ecoinvent kaynaklı ikincil süreçler “orta” sınıfta ($2,6 \leq VKE \leq 3,2$) yer almıştır.



4. BULGULAR

Bu çalışmada 1000 kVA güçte, yağlı tip bir dağıtım transformatörünün mevcut durumuna ait yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları, Environmental Footprint (EF) 3.1 ve ReCiPe 2016 Endpoint etki değerlendirme yöntemleriyle elde edilmiştir. Analizde transformatörün üretiminden bertarafına kadar tüm aşamalar (ham madde çıkarımı, üretim, taşıma, kullanım (30 yıl) ve yaşam sonu işlemleri) dikkate alınmıştır.

4.1 Environmental Footprint 3.1 Çerçevesinde Sonuçların Analizi

Bu çalışmada 1000 kVA gücünde yağlı tip bir dağıtım transformatörünün 30 yıllık kullanım ömrü boyunca iklim değişikliği kategorisindeki sera gazı emisyonları, beş yaşam döngüsü aşaması bazında hesaplanmıştır. EF 3.1 yöntemine göre çeşitli çevresel etki kategorilerinde hesaplanan sonuçlar, transformatörün kullanım aşamasındaki elektrik tüketiminin baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Her bir aşamanın kg CO₂-eşdeğeri cinsinden toplam katkısı Çizelge 2.6’da ve Şekil 4.1’de özetlenmektedir. Özellikle iklim değişikliği kategorisinde, 30 yıllık ömür boyunca toplam 498.726,2 kg CO₂-eşdeğeri sera gazı emisyonu hesaplanmıştır. Buna göre en yüksek emisyon “Kullanım Aşaması” ndan kaynaklanmakta olup, yaklaşık 488336,49 kg CO₂-eş. ile toplamın %97,92’ini oluşturmaktadır. Diğer aşamaların katkıları bunun yanında oldukça düşüktür: “Ham madde Üretimi”nden kaynaklanan emisyon ~8390 kg CO₂-eş. (%1,68), “Üretim (İmalat)” aşamasından ~186 kg CO₂-eş. (%0,04), “Ham madde Taşımacılığı” ve “Ürün Taşımacılığı” aşamalarından ise sırasıyla yalnızca ~497 kg (%0,10) ve 1317 kg (%0,26) CO₂-eş. emisyon gelmektedir. Dolayısıyla, kullanım aşaması transformatörün yaşam döngüsü boyunca iklim değişikliğine etkide belirleyici paya sahip olmaktadır.

EF 3.1 sonuçlarına göre transformatörün yaşam döngüsü boyunca toplam $6,21 \times 10^6$ MJ fosil yakıt enerjisi tüketimi gerçekleşmiş olup bunun %97’den fazlası işletme sürecindeki elektrik tüketiminden ileri gelmektedir. Mineral ve metal kaynak tüketimi göstergesinde ise yaklaşık 0,476 kg Sb eşdeğeri değer saptanmıştır; bu değer önemli bir kısmı (%82’si) kullanım aşamasındaki dolaylı tüketimden, kalanı ise ağırlıklı

olarak üretimde kullanılan ham maddelerden gelmektedir. Su tüketimi göstergesi de yine büyük oranda (%99) kullanım aşamasındaki elektrik üretiminin su çekimine dayanmaktadır (EF 3.1 “water use” sonucu $\approx 243.000 \text{ m}^3$). Bu veriler, transformatörün çalıştırılması için gerekli enerji girdilerinin, fosil yakıt ve su gibi doğal kaynak tüketimi açısından en kritik yaşam döngüsü adımı olduğunu ortaya koymaktadır.

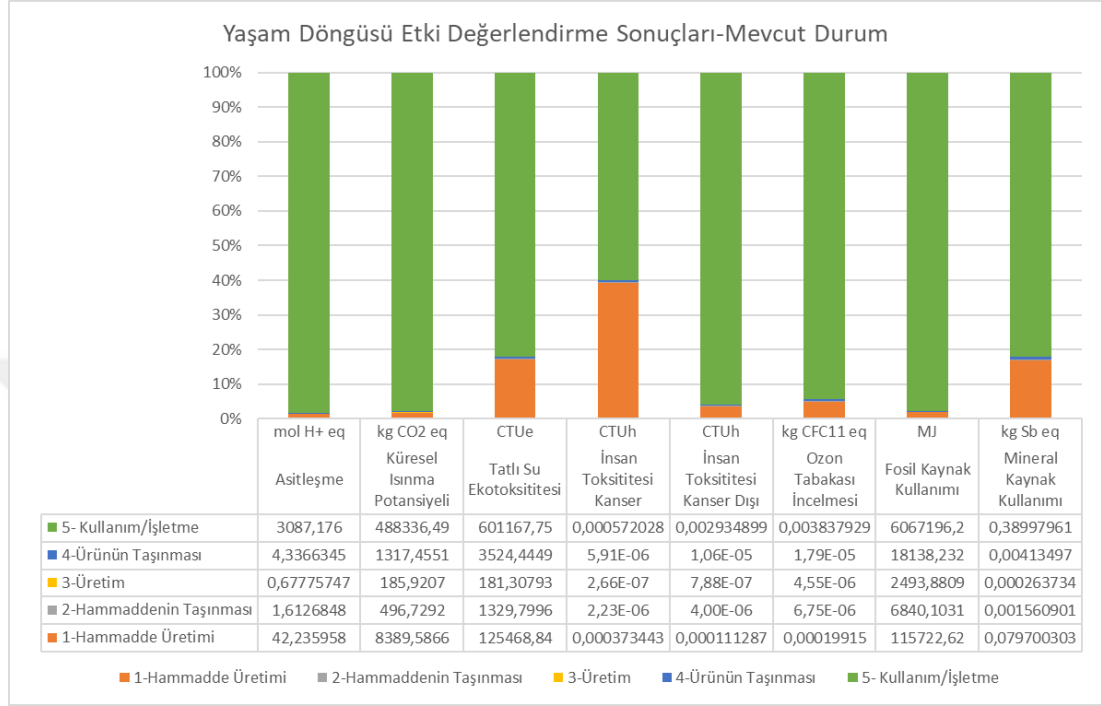
EF 3.1 kapsamındaki asitlenme (acidification), besin zenginleşmesi (eutrophication), ekotoksosite gibi diğer çevresel etki kategorilerinde de kullanım aşaması genellikle baskın konumdadır. Örneğin, asitlenme potansiyeli toplam $\approx 3136 \text{ mol H}$ eşdeğeri iken, bunun %95’inden fazlası transformatörün işletme aşamasındaki emisyonlardan kaynaklanmıştır. Tatlı su ekotoksitesi kategorisinde kullanım aşamasının payı biraz daha düşük olsa da hâlâ belirleyicidir (toplam $\approx 1,2 \times 10^6 \text{ CTUe}$ değerinin yaklaşık %80’i kullanım kaynaklıdır). Özellikle fosil yakıtlara dayalı elektrik üretimi, SO_2 ve NO_x gibi asitlenmeye yol açan gazların ve çeşitli toksik emisyonların ana kaynağı olduğu için, işletme aşaması bu kategorilerde de öne çıkmaktadır. Üretim aşamasından kaynaklanan çevresel etkiler ise, kullanım aşamasına kıyasla oldukça düşük düzeyde kalmıştır. Bununla birlikte, üretimde kullanılan bazı materyallerin spesifik kategorilerde kayda değer etkileri olabilmektedir; örneğin epoksi reçine, boyalar ve özellikle metal bileşenlerin üretimi, insan toksisitesi ve tatlı su ekotoksitesi gibi kategorilerde küçük de olsa katkı sağlamıştır. Sonuç olarak EF 3.1 sonuçları, dağıtım transformatörünün çevresel performansında en kritik adımın cihazın kullanım ömrü boyunca harcanan elektrik enerjisi olduğunu net bir biçimde ortaya koymaktadır.

Çizelge 2.6’ da 1000 kVA yağlı transformatörün 30 yıllık kullanım ömrü için yaşam döngüsü aşamalarına göre iklim değişikliği (Climate Change) etkisi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Yaşam döngüsü aşamalarına göre iklim değişikliği (Climate Change) etkisi sonuçları.

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Sera Gazı Emisyonu (kg CO_2e)	Oran (%)
Hammadde Üretimi	8389,59	1,68
Hammadde Taşımacılığı	496,73	0,10
Üretim (İmalat)	185,92	0,04
Ürün Taşımacılığı	1317,46	0,26
Kullanım Aşaması	488336,49	97,92
Toplam	498726,19	100

EF 3.1 yöntemiyle karakterizasyon sonucu elde edilen veriler, “kullanım aşaması”nın toplam sera gazı emisyonlarının % 97,9’unu oluşturduğunu göstermektedir; hammadde üretimi ikinci sırada gelmekle birlikte toplamın yalnızca % 1,68’ine katkı yapmaktadır.



Şekil 4.1 : 1000 kVA yağlı tip transformatörün yaşam döngüsü boyunca etki değerlendirmesi.

İncelenen 30 yıllık süre boyunca transformatörde meydana gelen enerji kayıplarının (boşta ve yük altında) yol açtığı dolaylı emisyonlar, transformatörün imalatı ve taşınması gibi diğer tüm aşamalarındaki emisyonları katbekat aşmaktadır. Hammadde üretimi aşaması, iklim değişikliği potansiyeline en fazla ikinci katkıyı yapan süreç olup, özellikle elektrik çeliği, bakır iletken, trafo yağı gibi malzemelerin birincil üretimleri sırasında açığa çıkan emisyonları içermektedir. İmalat aşamasında (transformatörün fabrika içerisindeki montaj ve test süreçleri), kullanılan elektrik ve enerjinin yol açtığı emisyonlar toplam içinde sınırlı bir pay tutmaktadır. Benzer şekilde, lojistik süreçlerden kaynaklanan emisyonlar da sınırlı düzeydedir.

Diğer EF 3.1 kategorilerinde de benzer biçimde kullanım aşamasının baskın olduğu görülmüştür. Örneğin, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan asidifikasyon ve partikül madde etkileri gibi kategorilerde de emisyonların büyük bölümü kullanım sırasında ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, kaynak kullanımı veya toksisite gibi bazı kategorilerde transformatörün üretim aşamasının görece daha yüksek paya sahip

olduğu görülmüştür; zira çelik ve bakır gibi malzemelerin üretimi bu kategorilerde önemli etkilere yol açabilir (Mansilha vd., 2019; Liu vd., 2024)

4.2 ReCiPe 2016 Endpoint Çerçevesinde Sonuçların Analizi

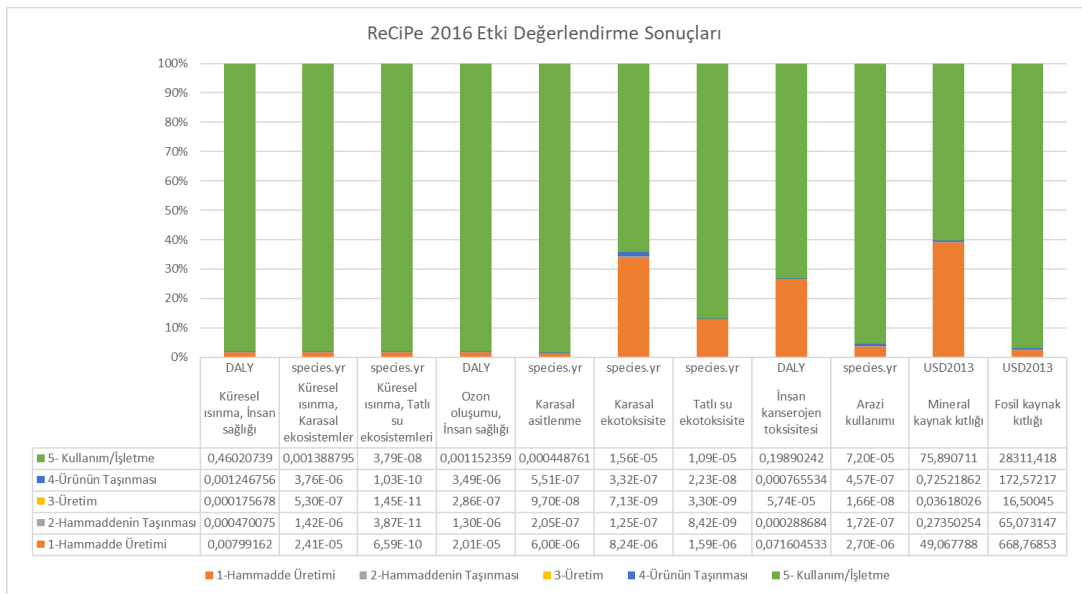
ReCiPe 2016 Endpoint (H/A) sonuçları da EF 3.1 bulgularını destekler niteliktedir. ReCiPe yönteminde çevresel etkiler insan sağlığına ve ekosistemlere olan zarar üzerinden değerlendirilmektedir. Hesaplamalar, transformatörün 30 yıllık yaşam döngüsü boyunca insan sağlığı etkisinin belirgin olduğunu ve toplam yaklaşık DALY (Disability Adjusted Life Years) cinsinden anlamlı bir değer ortaya koyduğunu, ekosistem kalitesi üzerindeki etkinin ise species·yr (kaybedilen tür-yıl) birimiyle ölçülen belirgin bir hasar değeriyle ifade edildiğini göstermektedir. Bu iki uç nokta göstergesinde de kullanım aşaması açıkça baskın etkindir. Özellikle iklim değişikliğine bağlı etkiler, hava kirleticileri emisyonları ve diğer kullanım kaynaklı süreçler, insan sağlığına düşen toplam zarar yükünün büyük kısmını oluşturur. Benzer şekilde ekosistem hasarının da önemli bir bölümü, kullanım sürecindeki emisyonlardan ileri gelmektedir. Sonuçlar, kullanım aşamasının DALY ve species·yr cinsinden değerlendirmelerde ana katkıyı yaptığını, üretim ve diğer aşamaların ise bu uç nokta göstergelerine çok daha sınırlı katkı sağladığını ortaya koymaktadır. ReCiPe sonuçlarında insan sağlığı üzerindeki toplam etki içinde kullanım kaynaklı emisyonların payı %90'ların üzerinde saptanmıştır; ekosistem zararları için de transformatörün işletme dönemi belirleyici olmuştur.

Diğer yandan, bazı etki kategorilerinde hammadde temini ve üretim aşamasının görece daha yüksek paya sahip olduğu görülmüştür. Özellikle insan sağlığı toksisitesi (kansere yol açan ve yol açmayan toksisite, DALY cinsinden) kategorilerinde transformatörün hammadde üretimi süreci önemli bir etki kaynağıdır. Örneğin, insan sağlığı – kanserojen toksisite etkisinin yaklaşık %25-30'u hammadde çıkarımı ve işlenmesi aşamasından gelmektedir (örneğin bakır, çelik gibi metallerin cevher çıkarımı ve rafinaj süreçlerinde açığa çıkan ağır metaller ve toksik emisyonlar). Kalan ~%70'lik kısım ise büyük ölçüde kullanım aşamasındaki dolaylı emisyonlardan (özellikle fosil yakıtlı elektrik üretiminin ağır metal ve kirleticiler salımları) kaynaklanmaktadır. Karasal ve tatlı su ekotoksikitesi gibi kategorilerde de benzer bir dağılım söz konusudur: Kullanım aşamasındaki uzun dönemli emisyonlar (örneğin termik santrallerden ağır metal ve kirleticilerin çevreye yayılımı) bu ekotoksikite

potansiyelinin önemli bölümünü oluştururken, hammadde-odaklı süreçler de hatırı sayılır bir pay sahibidir. Örneğin ReCiPe sonuçlarına göre karasal ekosistem toksisitesi ve tatlı su ekosistem toksisitesinin %60+'lık kısmı kullanım aşamasından, geri kalanı ise özellikle transformatör bileşenlerinin üretiminden kaynaklanmaktadır (metal ergitme, petrokimya ve yalıtım malzemeleri üretimi gibi alt süreçler). Bu durum, ağır metal ve toksik kimyasal salımlarının hem üretim hem kullanım safhalarında önemli olduğunu, ancak etkilerin nihai olarak büyük oranda kullanım kaynaklı enerji üretimine bağlandığını göstermektedir.

Genel olarak ReCiPe Endpoint analizinin ortaya koyduğu en önemli bulgu, enerji tüketimine dayalı kullanım sürecinin iklim değişikliği, asidifikasyon, partikül madde oluşumu gibi birçok çevresel etki kategorisinde baskın olması, buna karşın malzeme ve üretim süreçlerinin ise toksisite ve kaynak tüketimi kategorilerinde küçümsenmeyecek katkılar sunduğudur. Bu bulgu, transformatör yaşam döngüsünde işletme dönemi kaynaklı çevresel yüklerin, üretim-ağırlıklı yüklerden çok daha yüksek olduğunu açıkça göstermektedir.

ReCiPe 2016 uç-nokta (endpoint) yöntemiyle elde edilen toplam etki puanlarının yaşam döngüsü aşamalarına göre dağılımı Şekil 4'te yığılmış sütun grafik olarak sunulmuştur. Grafikte yeşil alanlar transformatörün kullanım/işletme evresini, turuncu alanlar hammadde üretimini, gri alanlar hammadde taşımayı, sarı alanlar fabrika içi üretim süreçlerini, mavi alanlar ise bitmiş ürünün müşteriye taşınmasını temsil etmektedir.



Şekil 4.2 : ReCiPe 2016 etki değerlendirme sonuçları.

ReCiPe 2016 sonuçlarının genel değerlendirmesi, insan sağığı boyutunda en kritik etkinin fosil kaynaklı elektrik üretimine bağılı hava emisyonları olduğunu, ekosistem boyutunda ise iklim değışikliği ve asitlenme etkilerinin öne çıktığını ortaya koymaktadır. Kaynak tüketimi boyutunda da fosil enerji kullanımı belirleyici olduğu için, yaşam döngüsü boyunca enerji verimliliğinin ve temiz enerji kullanımının artırılması bu olumsuz etkilerin azaltılmasında kilit önemdedir.

ReCiPe Endpoint ve EF 3.1 karşılaştırıldığında, her iki yöntem de transformatörün yaşam döngüsünde kullanım aşamasının belirleyici çevresel yük olduğunu ortaya koymaktadır. ReCiPe Endpoint, nihai zarar potansiyeli (damage) odaklı bir yöntem olduğundan, iklim değışikliğinin hem insan sağığına (DALY) hem ekosistemlere (tür/yıl) verdiği zararları doğrudan vurgular ve bu sayede işletme kaynaklı emisyonların baskınlığını göstermektedir. EF 3.1 ise orta nokta göstergeleriyle benzer bir resim çizmekle birlikte, toksisite gibi kategorilerde ayrıntılı bir görünüm sunarak, ağır metal ve kimyasal salımlarının önemini daha belirgin hale getirmektedir.

4.3 Sıcak Nokta Analizi

EF 3.1 yöntemi ile belirlenen sonuçlar, 1000 kVA'lık dağıtım transformatörü için yaşam döngüsü boyunca en kritik aşamanın kullanım (işletme) olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sıcak nokta olarak adlandırılabilcek birincil süreç, transformatörün işletme aşamasındaki enerji tüketimi dolayısıyla dolaylı olarak oluşan karbon emisyonlarıdır. Transformatörün şebekeye bağılı kaldığı 30 yıllık süre boyunca hem boşta (uygunsuz yüklere rağmen manyetik çekirdek enerjilenmesi) hem de yük altında (iletkenlerdeki direnç nedeniyle) meydana gelen elektrik kayıpları, elektrik üretiminde fosil yakıt kullanımının payına bağılı olarak yüksek CO₂ emisyonlarına neden olmaktadır. Dolayısıyla, transformatörün enerji verimliliğini artırmaya yönelik iyileştirmeler kapsamında yaşam döngüsü hesaplanan transformatörün pratikte ortalama %99 verimlilikte çalıştığı bilindiğine göre transformatörün beslendiğı elektrik şebekesinin yenilenebilir kaynaklara yönelmesi, bu karbon ayak izinin azaltılması açısından en kritik strateji olarak belirlenmiştir.

Bunun yanında, ikinci derecede önemli görülen aşama hammadde üretimidir. Hammadde üretimi sürecinde özellikle çelik sacların ergitilmesi ve haddelenmesi, bakır iletkenlerin rafinasyonu ve işlenmesi gibi enerji yoğun süreçler bulunmaktadır.

Bu enerji yoğun üretim süreçleri, elektrik ve ısı üretiminde fosil yakıt kullanımı nedeniyle önemli miktarda sera gazı emisyonu oluşturabilmektedir (Liu et al., 2024).

Diğer yaşam döngüsü aşamalarının ve süreçlerinin de belirli kategorilerde öne çıktığı görülmüştür. Malzeme türü ve üretim süreçleri, özellikle toksisite ve ekotoksisite gibi kategorilerde ikincil düzeyde sıcak noktalar yaratabilir. Örneğin, transformatörün üretiminde kullanılan alüminyum alaşımları yaklaşık 3,67 ton CO₂-eş. emisyon ile iklim değişikliği etkisine küçük bir katkı yapsa da, alüminyum üretiminin enerji yoğun doğası ve boksit madenciliği süreçleri ekosistem toksisitesi ve insan sağlığı toksisitesi kategorilerinde önemli yükler getirebilir. Benzer şekilde bakır ve çelik bileşenlerin üretimi de mineral kaynak tüketimi ve toksisite potansiyeli açısından dikkat edilmesi gereken alt süreçlerdir. Söz konusu hammaddelerin çıkarılması, rafinajı ve işlenmesi aşamalarında açığa çıkan emisyonlar, kullanım aşamasına kıyasla düşük olmakla birlikte, toplam çevresel etkinin dağılımını anlamak açısından önemlidir. Bu tez kapsamında malzeme üretimi süreçlerinden kaynaklanan etkiler, tüm kategorilerde toplamın %1–5'i mertebesinde kalarak ikincil planda kalmıştır. Ancak yaşam döngüsü bakış açısı, bu nispeten küçük görünen etkilerin bile sistem genelinde belirli sorunlara yol açabileceğini gösterir. Örneğin, transformatör üretiminde kullanılan epoksi reçine ve plastik bazlı bileşenlerin üretimi sonucu fosil olmayan yenilenemeyen kaynak kullanımı (petrokimyasal hammadde tüketimi) ve ikincil iklim etkileri (biyojenik karbon dâhil) gibi alt kalemlerde etkiler oluşmaktadır. Dolayısıyla, sıcak nokta analizi çok boyutlu ele alındığında, enerji tüketimi odaklı kullanım aşaması yanında malzeme seçimi, üretim verimliliği ve atıksu/atık yönetimi hususlarının da bütüncül çevresel performansa katkıda bulunduğu anlaşılmaktadır.

Diğer yandan, transformatörün imalat fabrikasındaki montaj, test ve yardımcı işletim adımlarında tüketilen enerji miktarı, bir dağıtım transformatörü için nispeten düşük olduğundan, üretim (imalat) aşaması katkısı sınırlı kalmaktadır.

Ömrü sonu (bertaraf) aşaması ise mevcut analizde oldukça sınırlı bir etkiye sahiptir. Transformatörün kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan atıkların (örneğin metal hurdalar, atık yağ vb.) büyük ölçüde geri kazanılabilir olması sayesinde, ömrü sonu senaryosunda çevresel yükler asgari düzeyde kalmaktadır. SimaPro modellemesinde Cut-off yaklaşımı benimsendiğinden, ömrü sonunda ekonomiye geri kazandırılan malzemelerin çevresel yükü sistem dışında bırakılmıştır. Bu nedenle, bertaraf

süreçlerinden kaynaklanan potansiyel etkiler (örneğin düzenli depolama veya yakma ile oluşabilecek emisyonlar) analiz sonuçlarına yansımamıştır.

Sonuç olarak, yaşam döngüsü değerlendirmesi perspektifinden bu transformatör için odaklanılması gereken sıcak noktalar öncelikle kullanım aşamasındaki enerji kaynaklı emisyonlar, ikincil olarak da hammadde üretimindeki enerji tüketimine bağlı emisyonlardır.

4.4 Senaryo 1: Yenilenebilir Enerji Kullanımı

4.4.1 Senaryonun amacı ve kapsamı

Birincil sistem sınırlarımız (beşikten mezara) korunmakla birlikte, enerji kaynağının karbon yoğunluğunun YDD sonuçları üzerindeki duyarlılığını test etmek amacıyla alternatif bir senaryo geliştirilmiştir. Transformatörün kullanım aşamasında Türkiye’de eğimli çatı kurulumu için modellenmiş çok-kristalli silikon (multi-Si) fotovoltaik sistem elektriği ile ikame edilmiştir. Böylece enerji karması dışındaki tüm süreç parametrelerinin sabit tutulması sağlanmış, enerjiye bağlı çevresel fayda veya maliyetlerin yalıtılmış olarak izlenebilirliği hedeflenmiştir.

4.4.2 Elektrik ikame mekanizması

Referans Enerji Akışı: “Electricity, low voltage {TR} | market group” veri seti (ecoinvent v3.9; Cut-off model).

Yenilenebilir Enerji Akışı: “Electricity, low voltage {TR} | electricity production, photovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, multi-Si, mounted | Cut-off | S” veri seti.

Bu senaryoda, transformatörün 30 yıllık işletme süresince şebekeden çektiği elektrik enerjisinin tamamının yenilenebilir enerji karışımından geldiği varsayılmıştır. Diğer yaşam döngüsü aşamalarında (hammadde girdileri, üretim, kullanım ömrü, taşıma, bertaraf/geri kazanım) herhangi bir değişiklik yapılmamış, yalnızca işletme döneminin enerji kaynağı değiştirilerek sonuçlar yeniden hesaplanmıştır.

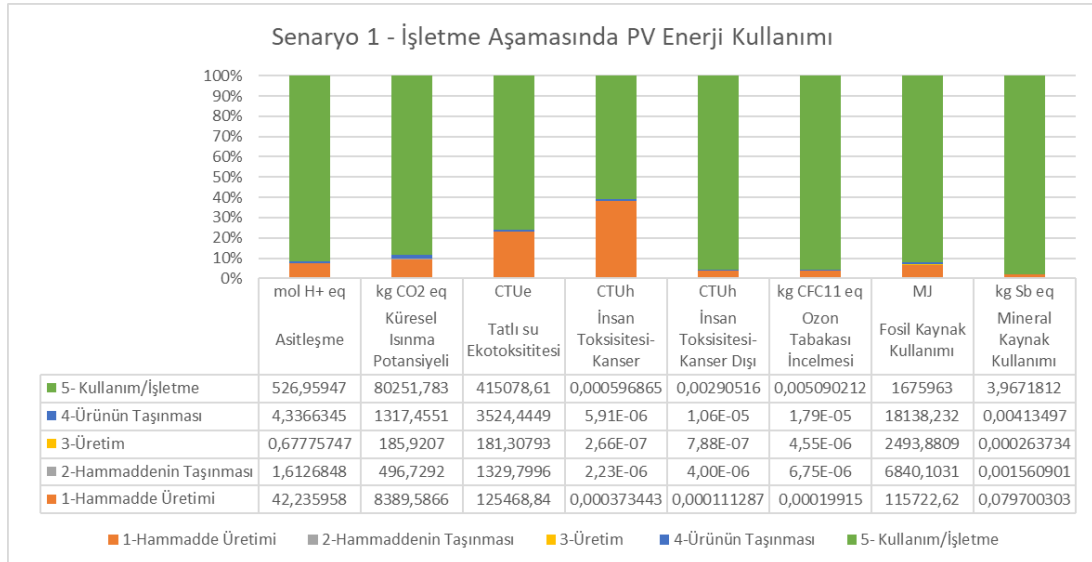
1000 kVA yağlı tip dağıtım transformatörünün “beşikten mezara” yaşam döngüsü değerlendirmesinde, enerji kaynağındaki değişimin çevresel etki kategorilerine yansımaları Karakterizasyon sonuçları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Mevcut Türkiye şebeke elektriği karışımı ile Senaryo 1 (SimaPro-Ecoinvent veritabanındaki %100 fotovoltaik elektrik) sonuçları Şekil 4.3 ve Çizelge 4.2’de bir

arada sunulmaktadır. Bu kapsamda Küresel Isınma Potansiyeli (GWP100), Asitleşme, Tatlı su ekotoksitesitesi, İnsan sağlığı toksisitesi, Kaynak kullanımı ve Ozon tabakası incelenmesi gibi başlıca etki kategorilerindeki değerler iki durum için karşılaştırılmış; yenilenebilir enerji kullanımının çevresel performansa etkisi nicel olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2 : Seçili çevresel etki kategorileri mevcut durum (şebeke elektriği) ve senaryo 1 (fotovoltaik elektrik) sonuçlarının karşılaştırılması (EF 3.1 karakterizasyon) ve değişim oranları.

Etki Kategorisi	Birim	Mevcut Durum (Şebeke) Toplam	Senaryo 1 (FV) Toplam	Değişim (%)
Küresel Isınma Potansiyeli	kg CO ₂ eşd	498726,18	90641,475	-%82
Asitleşme	mol H ⁺ eşd	3136,039	575,82251	-%81
Tatlı Su Ekotoksitesitesi	CTUe	731672,14	545583	-%25
İnsan Toksisitesi (kanser)	CTUh	0,00095388134	0,000979	+%4
İnsan Toksisitesi (kanser dışı)	CTUh	0,0030615754	0,003032	-%1
Ozon Tabakası İncelenmesi	kg CFC-11 eşd	0,0040662922	0,005319	+%30
Fosil Kaynak Kullanımı	MJ	6210391,1	1819158	-%71
Mineral Kaynak Kullanımı	kg Sb eşd	0,47563951	4,052841	+%850

(Pozitif yüzde değerleri Senaryo 2’de ilgili etkinin arttığını (olumsuz), negatif değerler ise azaldığını (iyileşme) göstermektedir.)



Şekil 4.3 : Senaryo 1 etki değerlendirme sonuçları.

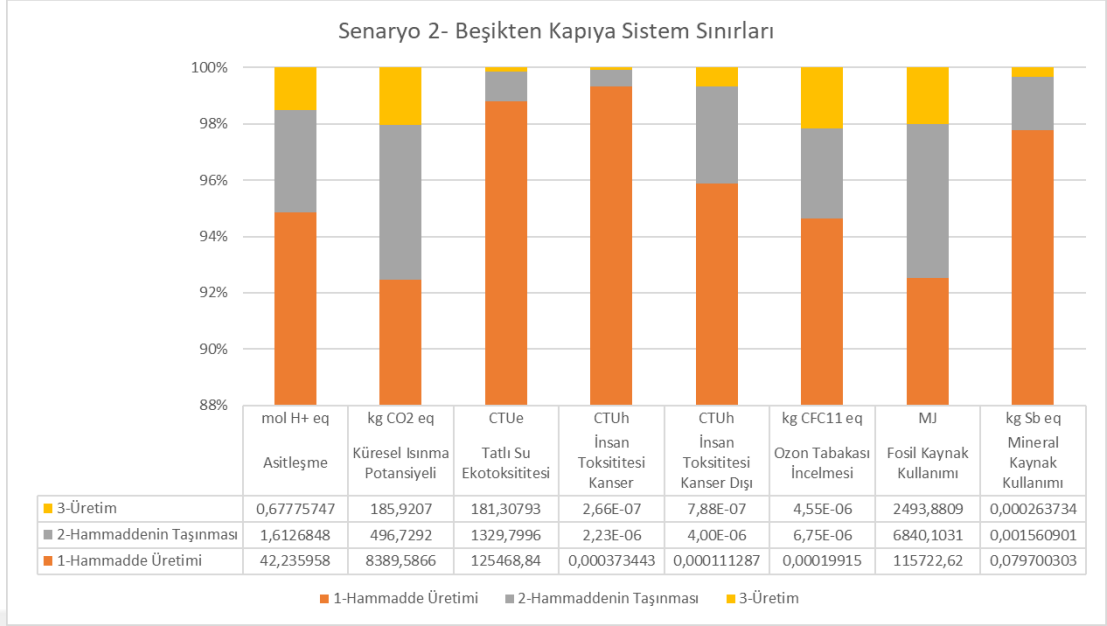
FV senaryosunda iklim değişikliği, asitleşme, fosil yakıt tüketimi gibi kategorilerde elde edilen büyük ölçekli iyileşmeler, şebeke elektriği üretiminin fosil yakıtlara dayalı

olmasından kaynaklanan emisyonların ortadan kalkmasıyla açıklanabilir. Öte yandan mineral kaynak kullanımı, ozon tabakası incilmesi ve kısmen insan toksisitesi gibi göstergelerde FV lehine bir kazanım elde edilememesinin temel sebebi, güneş enerjisine geçişin gizli çevresel maliyetleri ile ilgilidir. Güneş panellerinin ve ilgili altyapının üretimi sırasında maden çıkarımı, malzeme işleme ve endüstriyel proseslerden kaynaklı çeşitli çevresel yükler oluşmaktadır. Bu yükler, yaşam döngüsü toplamına eklendiğinde bazı kategorilerde fosil kaynaklı senaryoya kıyasla daha yüksek değerlere yol açabilmektedir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen senaryo analizi, enerji kaynağının yaşam döngüsü üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymuştur. FV güneş enerjisi senaryosu, iklim değişikliği, asitleşme ve fosil kaynak tüketimi gibi kritik göstergelerde dağıtım transformatörünün çevresel yükünü dramatik biçimde azaltmaktadır. Bununla birlikte, mineral kaynak kullanımı ve belirli toksisite etkilerindeki artış gibi bulgular, sürdürülebilir enerji planlamasında kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmasının önemine dikkat çekmektedir. Bu kapsamlı bakış açısıyla, enerji arzında yenilenebilir kaynaklara geçiş yapılırken olası etki değişimleri de göz önünde bulundurularak, hem sera gazı emisyonlarını hem de doğal kaynakların tüketimini en aza indirecek dengeli stratejiler geliştirilmelidir

4.5 Senaryo 2: Beşikten Kapıya Sistem Sınırlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada ikinci bir senaryo olarak, sistem sınırları “beşikten kapıya” olacak şekilde yeniden tanımlanmıştır. 1000 kVA gücünde yağlı tip dağıtım transformatörünün yaşam döngüsü boyunca farklı sistem sınırlarında (mevcut durum: beşikten mezara ve Senaryo 2: beşikten kapıya) çevresel etki kategorilerine katkıları incelenmiştir. Mevcut Bu senaryoda transformatörün kullanım (işletme) aşaması kapsam dışı bırakılmış; yani yalnızca hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesi, üretim süreçleri ve ürünün fabrika çıkışına kadarki aşamalar değerlendirmeye alınmıştır. Başka bir deyişle, Senaryo 2 sadece üretim safhalarını içeren bir yaşam döngüsü analizi (YDA) sunmakta, kullanım ömrü boyunca oluşan çevresel etkileri hariç tutmaktadır. Bu yaklaşım, toplam çevresel etkilerde kullanım aşamasının oynadığı rolü izole etmek ve sistem sınırı değişiminin sonuçlara etkisini irdelemek amacıyla uygulanmıştır. Senaryo 2’nin EF 3.1 etki değerlendirme sonuçları şekil 4.4’ te sunulmuştur.



Şekil 4.4 : Senaryo 2 etki değerlendirme sonuçları.

Bulgular, sistem sınırları “beşikten kapiya” olarak daraltıldığında çevresel sıcak noktaların kullanım aşamasından üretim aşamasına kaydığını açıkça göstermektedir. Başka bir deyişle, kullanım ve bertaraf süreçleri hariç tutulduğunda toplam etki önemli ölçüde azalmakta ve göreceli olarak en yüksek payı alan süreçler artık hammadde çıkarımı ve işleme adımları olmaktadır. Özellikle transformatörün enerji kullanımından kaynaklanan etkileri dışlandığında, malzeme üretiminin enerji ihtiyacı ve emisyonları tüm kategorilerde belirleyici hale gelmektedir.

Temel senaryoda (beşikten mezara) incelenen birçok etki kategorisinde, kullanım aşaması en büyük paya sahipti. İklim Değişikliğine (Küresel Isınma Potansiyeli, GWP) katkı temel senaryoda yaklaşık 498.726,18 kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu toplamın %98’inden fazlası, transformatörün işletme süresince ortaya çıkan elektrik kayıplarından (kullanım aşamasından) kaynaklanmaktaydı. Nitekim literatürde de güç transformatörlerinin yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının %94–99’luk kısmının kullanım (operasyon) safhasından ileri geldiği bildirilmektedir. Beşikten kapiya sınırlar altında (yani kullanım safhası olmaksızın) gerçekleştirilen YDD sonucunda ise transformatörün toplam iklim değişikliği etkisi son derece düşük bir değere gerilemiştir. Hesaplamalar, kullanım aşaması hariç tutulduğunda transformatörün GWP değerinin yalnızca yaklaşık 9.072,24 kg CO₂ eşdeğeri düzeyinde kaldığını göstermektedir.

Beşikten kapıya senaryosunda kullanım fazı elimine edildiğinde, asitleşme etkilerinin tamamına yakını hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi ve transformatörün fabrika içi üretim süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda en büyük pay, enerji-yoğun malzeme üretiminin salımlarına geçmekte ve nakliye gibi yardımcı süreçlerin katkıları da nispeten görünür hale gelmektedir.

Toksisite kategorilerinde, transformatörün üretim aşamasındaki süreçler öne çıkmaktadır. Özellikle metal üretimi ve işleme sırasında çevreye salınan ağır metaller ve toksik kimyasallar, hem insan sağlığı toksisitesi hem de tatlı su ekotoksisitesi potansiyellerinin büyük kısmını oluşturmaktadır. Bakırın madencilik ve ergitme süreçleri ile çeliğin yüksek fırın üretimi sırasında ortaya çıkan emisyonlar, bu kategorilerdeki sıcak noktaları belirlemektedir. Kullanım fazında ise transformatörün doğrudan toksik emisyonu olmamakla birlikte, elektrik üretimindeki kömür yanması gibi dolaylı kaynaklar küçük katkılar yapmaktadır. Beşikten kapıya sistem sınırlarında (kullanım ve bertaraf hariç tutulduğunda) bu durum değişmemekte, aksine kullanım fazında ihmal edilebilir olan toksisite katkıları bütünüyle üretim aşamasına yansıdığı için üretim kaynaklı süreçler tüm toksisite etkilerinin neredeyse tamamını temsil etmektedir.

Mevcut durumda, hammadde üretim aşaması özellikle minerallerin ve metallerin tükenmesi göstergesinde en yüksek paya sahiptir. Transformatör üretiminde kullanılan bakır başta olmak üzere, demir cevheri (çelik üretimi için) ve diğer alaşım elementlerinin tüketimi, mineral kaynak tükenmesi potansiyelini artıran başlıca etkenlerdir. Beşikten kapıya yaklaşımda kullanım elimine edildiğinde, kaynak tüketimi göstergeleri neredeyse tamamen malzeme tedariği ve üretim süreçlerindeki tüketime dayalı olarak hesaplanmaktadır. Yani, transformatörün yaşam döngüsü değerlendirmesini fabrikadan çıkışa kadar sınırlandırdığımızda gerek maden cevherlerinin gerekse enerji amaçlı fosil yakıtların tüketimi açısından sıcak noktalar malzeme üretimi aşamasında yoğunlaşmaktadır.

Beşikten kapıya yaklaşım, ürünün sadece üretim kaynaklı çevresel yükünü ortaya koyarken, uzun ömürlü ve işletme sırasında enerji tüketen bir ekipman olan transformatörün gerçek çevresel etkilerinin önemli bir bölümünü dışarıda bırakmaktadır. Yalnızca beşikten kapıya sınırlar içinde yapılan bir değerlendirme, transformatörün ömür boyu çevresel performansını olduğundan çok daha düşük gösterecektir. Ancak diğer yandan, bu ikinci senaryo sayesinde üretim aşamalarının

Çevresel “ayak izini” net olarak görmek mümkün olmuş ve kullanım safhası olmadan bir karşılaştırma yapılarak hammaddelerin ve üretim süreçlerinin göreceli önemi ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, transformatör üreticileri açısından ürünün fabrikadan çıkana kadarki çevresel etkinliğini değerlendirmeye ve iyileştirme fırsatlarını belirlemeye yardımcı olacaktır.

Sürdürülebilirlik bakış açısıyla değerlendirildiğinde, elde edilen sonuçlar transformatörün yaşam döngüsündeki iyileştirme fırsatlarını net biçimde işaret etmektedir. İklim değişikliği ve asitleşme gibi kategorilerde en büyük payın kullanım aşamasına ait olması, sürdürülebilir tasarım stratejilerinin transformatörün enerji verimliliğini artırmaya odaklanması gerektiğini gösterir. Transformatörde kullanılan çekirdek malzemesinin kalitesinin yükseltilmesi veya tasarım optimizasyonu ile manyetik ve direnç kayıplarının azaltılması, kullanım sresindeki enerji tüketimini ve dolayısıyla bu kategorilerdeki etkileri önemli ölçüde düşürecektir.

Mevcut analizde belirlenen sıcak nokta, kullanım aşamasındaki elektrik tüketimi olması sebebiyle, bu alandaki iyileştirmeler (daha yüksek verimli transformatör çekirdekleri kullanmak, işletme sırasında yenilenebilir enerji kaynaklarından besleme sağlamak vb.) evresel performansı ciddi biçimde iyileştirebilmektedir. Öte yandan, toksisite ve kaynak tüketimi gibi kategorilerde ne çıkan hammadde üretimi kaynaklı etkiler, sürdürülebilir tasarım açısından tedarik zinciri ve malzeme seçimi konularına eğilmek gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, döngüsel ekonomi prensipleri ile uyumlu olarak geri dnştrlmş malzeme kullanımı, malzeme verimliliğinin artırılması veya evre dostu alternatif malzemelere yönelinmesi gibi yaklaşımlar değerlendirilmelidir.



5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

5.1 Tartışma

Transformatörlerin yaşam döngüsü performansına ilişkin bulgular, enerji politikaları ve sürdürülebilir mühendislik uygulamaları bakımından önemli çıkarımlar sunmaktadır. Özellikle dağıtım transformatörlerindeki kayıpların azaltılması, geniş ölçekli enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonu azaltımı için kritik bir fırsattır. Avrupa Komisyonu'nun verilerine göre, Avrupa'da üretilen elektriğin ~%2,9'u transformatör kayıpları nedeniyle tüketilemeden yitirilmektedir, bu da yılda yaklaşık 93 TWh'lik devasa bir enerji israfına karşılık gelmektedir (Alfawaris, 2024). Dolayısıyla transformatör verimliliğini artırmaya yönelik politikalar, enerji sisteminde küçümsemeyecek düzeyde iyileştirmeler sağlayabilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, dağıtım transformatörlerinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin büyük ölçüde kullanım aşamasındaki elektrik tüketimine bağlı olduğunu göstermiştir. Kullanım aşaması, transformatörün şebekeye bağlanarak 30 yıl boyunca maruz kaldığı yük ve boşta kayıplar nedeniyle, iklim değişikliği başta olmak üzere çoğu etki kategorisinde en büyük payı almıştır. Mevcut durumda %98 gibi çarpıcı bir oranın kullanım dönemine ait olması, transformatörlerin enerji verimliliğinin ve elektrik üretim kaynaklarının çevresel performansta ne denli kritik olduğunu vurgulamaktadır. Bu bulgu, farklı coğrafya ve ölçeklerde yapılan diğer araştırmaların sonuçlarıyla uyumludur.

Elde edilen sonuçlar, aynı zamanda elektrik üretim kaynaklarındaki dönüşümün çevresel performansa etkisini de net şekilde göstermiştir. Yenilenebilir enerji senaryosunda, transformatörün kullanım aşamasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarında ~%81'lük bir azalma gözlenmiştir. Bu, elektriğin üretiminde fosil yakıt yerine yenilenebilir kaynak kullanımının ne denli büyük bir fark yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

Şebeke elektriğinin karbonsuzlaştığı durumda, üretimden kaynaklı emisyonların toplam içindeki payı artmıştır. Dolayısıyla literatürde Liu vd.'nin bulguları, gelecekte

elektrik şebekelerinin temiz enerjiye geçişiyle transformatör üretimindeki malzeme kaynaklı etkilerin daha görünür hale gelebileceğini göstermektedir. Bu durum, uzun vadede transformatörlerin malzeme seçimi, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı ve üretim süreçlerinin yenilenebilir enerji ile gerçekleştirilmesi gibi stratejilerin de önem kazanacağını ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, literatürde dağıtım transformatörleri için raporlanan sonuçlarla genel olarak uyumludur. Özellikle işletme aşamasının baskınlığı, birçok çalışma tarafından vurgulanmıştır. Örneğin, Carlen ve arkadaşlarının (2011) 1000 kVA dağıtım transformatörleri üzerinde yaptığı YDD çalışmasında, imalat aşamasının toplam çevresel etkiye katkısının yalnızca %2–10 aralığında kaldığı, buna karşın işletme kaynaklı kayıpların etkisinin %90'ı aşan oranda baskın olduğu belirtilmiştir. Söz konusu çalışmada amorf metal çekirdekli transformatörler incelenmiş ve çekirdek kayıplarının %50–70 oranında azaltılmasıyla, toplam iklim değişikliği etkisinin düşük yük koşulunda %60, yüksek yük koşulunda %40–50 oranında azalabildiği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, 1000 kVA dağıtım transformatörünün 30 yıllık kullanım ömrü için toplam sera gazı emisyonu ~500 ton CO₂-eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Avrupa elektrik şebekesi koşullarında benzer bir transformatör için Carlen ve arkadaşları (2011) tarafından rapor edilen ~400 ton CO₂-eşdeğerinden daha yüksektir. Aradaki fark, Türkiye elektrik üretim karışımının karbon yoğunluğunun Avrupa ortalamasına kıyasla daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Türkiye için 0,75 kg CO₂/kWh; Avrupa için ~0,5 kg CO₂/kWh). Buna karşın, her iki çalışmada da kullanım aşamasının toplam etkiye katkısı %90'ı aşmaktadır, bu da dağıtım transformatörlerinde en büyük çevresel etkinin işletme dönemindeki kayıplardan geldiği yönündeki tespitimizi desteklemektedir.

Benzer şekilde, Chronis ve arkadaşları (2021) da dağıtım transformatörlerinde yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının büyük kısmının kullanım aşamasından kaynaklandığını rapor etmişler; transformatör verimliliğinin artırılmasının iklim hedeflerine katkıda kritik rol oynayacağını vurgulamışlardır. Bu bulgular, bizim çalışmamızda kullanım aşamasının birincil sıcak nokta olduğunu göstermemizle tutarlılık içindedir.

Literatürde düşük güçte transformatörler için de benzer eğilimler gözlenmiştir. Wang ve ekibinin (2025) Çin’de üretilen 200 kVA dağıtım transformatörü için yaptığı karbon ayak izi analizinde, imalat, taşımacılık, kurulum, kullanım ve geri dönüşüm aşamalarına düşen emisyonlar sırasıyla 282 kg, 782 kg, 122,96 kg, 11.079,64 kg ve -88,6 kg CO₂ olarak rapor edilmiştir. Bu sonuç, kullanım aşamasının %90’dan fazla pay ile en büyük etkiyi yaptığını açıkça ortaya koymaktadır. Nitekim yazarlar, işletme sürecindeki kayıplardan kaynaklanan emisyonların, transformatörün çalışmaya başlamasından itibaren 2–3 yıl gibi kısa bir süre içinde imalat sürecini gölgede bıraktığını göstermiştir (Piotrowski & Markowska, 2025). Aynı çalışmada transformatörün düşük yüklere maruz kalması durumunda bile birkaç yıl içinde kullanım kaynaklı birikimli emisyonların üretim aşaması emisyonlarını geçtiği vurgulanmıştır.

Bu bulgular, bizim 1000 kVA’lık transformatör için 30 yıllık sürede kullanım aşamasının açık ara baskın olduğunu göstermemizle uyumlu bir tablo çizmektedir. Piotrowski ve Markowska (2025) tarafından gerçekleştirilen ve 31,5 MVA ile 25 MVA güçlerinde iki büyük transformatörü inceleyen çalışmada da benzer şekilde, işletme başlangıcından 2–3 yıl sonra kullanım aşamasındaki enerji kayıplarının yol açtığı CO₂ emisyonlarının, transformatör üretiminden kaynaklanan emisyonları aştığı belirtilmiştir.

Öte yandan, yalnızca imalat aşamasını ele alan çalışmalarda transformatörlerin karbon ayak izi daha düşük görünmekte, fakat bu çalışmalar kullanım aşamasını kapsamadığı için sınırlı bir perspektif sunmaktadır. Marcio Mansilha ve arkadaşlarının (2019) 75 kVA dağıtım transformatörü üzerinde yaptığı çalışmada, sadece ham maddeden fabrikaya kadar olan süreçler değerlendirilmiş; bakır ve alüminyum sargılı tasarımlar için üretim aşaması emisyonları birkaç ton CO₂-eşdeğeri mertebesinde hesaplanmıştır. Bu değerler, 30 yıllık kullanım dönemini de içeren bizim çalışmamızın toplamından doğal olarak çok daha düşüktür. Ancak, Mansilha ve arkadaşları özellikle bakır yerine alüminyum kullanımının transformatör ağırlığını azaltıp üretim kaynaklı enerji tüketimini düşürdüğünü göstererek malzeme seçiminin önemine işaret etmişlerdir. Benzer şekilde, Liu ve arkadaşları (2024) farklı tip ve kapasitedeki on transformatörü inceledikleri kapsamlı çalışmalarında, ortalama 223,5 ton CO₂-eş. yaşam döngüsü emisyonu hesaplamış; transformatör karbon ayak izinin yaklaşık %74’ünün metal bileşenlerin üretiminden ileri geldiğini (özellikle çekirdek çeliği %42,98 ve iletken

bakır %30,93) rapor etmişlerdir. Bu bulgu, bizim çalışmamızda ikinci önemli aşama olarak belirlenen hammadde üretimi etkisini doğrulamaktadır. Liu ve arkadaşlarının çalışması ayrıca, elektrik şebekesinin karbonsuzlaştırılması halinde transformatör üretim kaynaklı emisyonların %9–11 oranında azaltılabileceğini öngörmüştür.

Avrupa Birliği'nin transformatörlere yönelik Ekotasarım yönetmeliği kapsamındaki etki değerlendirmesi, kullanım sırasında tüketilen enerjinin küresel ısınma potansiyeli üzerindeki “dominant” etki olduğunu teyit etmektedir. Bu durum, bizim 1000 kVA'lık transformatör analizimizde elde ettiğimiz sonuca tamamen uygundur.

Bu noktada, transformatörlerin kullanım yerindeki elektrik şebekesinin emisyon faktörü önemli bir harici etkendir; daha temiz (örneğin yenilenebilir ağırlıklı) bir elektrik şebekesinde işletilen transformatörün yaşam döngüsü emisyonları, karbon yoğun bir şebekeye kıyasla anlamlı derecede düşük olacaktır.

Yapılan senaryo analizi ve literatür karşılaştırmaları, dağıtım transformatörlerinin çevresel performansını iyileştirmek için iki temel stratejinin altını çizmektedir: (1) Enerji verimliliği – transformatörün tasarımında kayıpların azaltılması (daha iyi çekirdek malzemesi, iletken seçimi, gelişmiş soğutma ve tasarım optimizasyonları yoluyla); (2) Enerji kaynağının karbonsuzlaştırılması – transformatörün beslenmiş olduğu elektrik şebekesinin yenilenebilir ve düşük karbonlu kaynaklara geçiş yapması. Birinci strateji, kullanım aşamasındaki enerji tüketimini mutlak olarak azaltarak hem fosil hem de yenilenebilir senaryoda çevresel etkileri düşürecektir. İkinci strateji ise mevcut altyapı ile çalışan transformatörlerin dahi karbon ayak izini hızla düşürmek için kritik olup, özellikle iklim değişikliği, hava kalitesi ve insan sağlığı üzerindeki etkileri minimize edecektir. Bu iki yaklaşım bir arada uygulandığında (yüksek verimli transformatör + temiz enerji kaynağı), sonuçlarımız göstermektedir ki dağıtım transformatörlerinin yaşam döngüsü çevresel etkileri dramatik biçimde azaltılabilir.

Sonuçlarımızı değerlendirirken, bazı sınırlılıkların da göz önünde bulundurulması gerekir. Çalışma kapsamında EF 3.1 ve ReCiPe 2016 H/A metodolojileri kullanılmış olup, etki değerlendirme yöntemine bağlı belirsizlikler söz konusu olabilir. Farklı LCIA yöntemleri veya bakış açıları (ör. ReCiPe'nin farklı perspektifleri ya da ILCD önerileri) kullanılsaydı, mutlak değerlerde bir miktar farklılık olabilirdi; ancak kullanım aşamasının baskınlığı gibi genel eğilimlerin değişmeyeceği öngörülmektedir. Ayrıca, şebeke elektriğinin %100 yenilenebilir kabul edildiği senaryo bir uç durumdur;

gerçekte elektrik şebekelerinin karbon yoğunluğunun kademeli olarak azalacağı ve %100 seviyesine ulaşmanın zaman alacağı açıktır. Bu nedenle, ara dönemler için transformatörlerin çevresel performansında kademeli iyileşmeler beklenmelidir. Yine de modellediğimiz yenilenebilir senaryo, en iyi iyileştirme potansiyelini ortaya koyması açısından değerlidir. Son olarak, transformatör özelinde boşa ve yük kayıplarının kesin değerleri kullanım oranlarına bağlıdır; farklı yük profillerinde kullanım aşaması etkisi oransal olarak değişebilir. Bu çalışmada tipik bir profil esas alınmıştır. Gelecekte akıllı şebekeler ve dinamik yük yönetimi ile transformatör kayıplarının azaltılması da bir diğer potansiyel iyileştirme alanıdır.

Sonuç olarak, dağıtım transformatörü imalatının çevresel etkilerini Türkiye özelinde bilimsel yöntemlerle ortaya koyarak hem sanayi uygulamalarına ışık tutmakta hem de literatüre katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, karar vericiler ve sektör paydaşları için çevresel iyileştirme fırsatlarını somut verilerle göstermekte; iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşma yolunda atılması gereken adımlar için rehberlik sunmaktadır. Bu çalışma ile transformatör üretiminde çevresel farkındalığın artmasına ve uzun vadede daha sürdürülebilir teknolojik dönüşümlere katkı sunulacağı ümit edilmektedir.

5.1.1 Literatür ile karşılaştırmalı değerlendirme

Çalışmamızda elde edilen sonuçlar, dağıtım transformatörlerinin yaşam döngüsü etkileri konusunda uluslararası literatürde raporlanan bulgularla büyük ölçüde uyumludur. Özellikle kullanım aşamasının baskınlığı hemen her çalışmada vurgulanmaktadır. Carlen ve arkadaşlarının (2011) 1000 kVA'lık dağıtım transformatörleri üzerine yaptıkları ayrıntılı YDD çalışmasında, imalat aşamasının toplam çevresel etkiye katkısının yalnızca %2–10 aralığında kaldığı, buna karşın işletme sırasındaki enerji kayıplarının %90'ı aşan oranlarda baskın olduğu belirtilmiştir. Nitekim çalışmamızda hesapladığımız 30 yıllık karbon ayak izi (~498 ton CO₂-eş.), Carlen ve arkadaşlarının Avrupa şebekesi koşullarında benzer bir transformatör için bildirdiği değere (~400 ton CO₂-eş.) oldukça yakındır; aradaki yaklaşık %20'lik fark, Türkiye elektrik şebekesinin karbon yoğunluğunun Avrupa'ya göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Her iki çalışmada da kullanım fazı toplam sera gazı emisyonlarının %90'ından fazla olduğu ortaya konmuştur. Bu durum

transformatör yaşam döngüsü analizlerinde en büyük etkinin işletme dönemindeki kayıplardan geldiği yönündeki bulgumuzu doğrulamaktadır.

Literatürde, transformatör boyutu veya tipinin değişmesinin de kullanım fazının baskınlığını değiştirmediği görülmektedir. Farklı güç aralıklarında yapılan çalışmalar, ölçekten bağımsız olarak benzer eğilimler bildirmektedir. Piotrowski ve Markowska (2025) Polonya’da 25 MVA ve 31,5 MVA gücünde iki büyük güç transformatörünün karbon ayak izini değerlendirerek, transformatör devreye alındıktan yalnızca 2–3 yıl sonra kullanım aşamasındaki birikimli emisyonların imalat kaynaklı emisyonları geçtiğini ortaya koymuştur.

Benzer şekilde, Wang ve arkadaşlarının (2025) Çin’de üretilen 200 kVA’lık dağıtım transformatörü için yaptığı kapsamlı yaşam döngüsü analizinde de üretilen sera gazı emisyonlarının %90’ından fazlasının 40 yıllık kullanım aşamasındaki kayıplardan kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, gerek büyük güçlü iletim transformatörlerinde, gerekse nispeten küçük dağıtım transformatörlerinde işletme sırasında tüketilen/boşa harcanan elektrik enerjisinin çevresel etkilerde belirleyici olduğunu net biçimde ortaya koymaktadır.

Literatürde üretim ve kullanım aşamalarını birlikte ele alan kapsamlı çalışmalar da tez bulgularımızı destekleyici veriler sunmaktadır. Liu ve arkadaşları (2024) Çin’de farklı tip ve kapasitede on adet dağıtım transformatörünü içeren birYDD çalışması yapmış; burada birden fazla fonksiyonel birim tanımı altında (ör. kVA kapasitesi, aktarılan enerji miktarı gibi) sonuçları değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada ortalama ~223,5 ton CO₂-eşdeğeri yaşam döngüsü iklim değişikliği etkisi rapor edilmiş ve bu etkinin yaklaşık %74’ünün transformatörün çekirdek çeliği (%42,98) ve iletken bakırının (%30,93) üretiminden ileri geldiği belirtilmiştir. Böylece, hammadde üretiminin transformatör karbon ayak izine önemli katkı yaptığı doğrulanmıştır.

Bu tezde yapılan senaryo analizleri, literatürde ortaya konan iyileştirme stratejileriyle de uyum içindedir. Temel senaryomuzda Türkiye’nin mevcut elektrik şebekesi ile hesaplanan karbon ayak izi, esasen Carlen vd. (2011) ve diğer çalışmaların Avrupa koşulları için bildirdiği değerlere kıyasla daha yüksek seyretmiştir; bu da şebeke elektrik karışımının emisyon faktörünün sonuçlar üzerindeki belirleyici etkisini göstermektedir. Nitekim Avrupa Birliği’nin transformatörlere yönelik Ekotasarım çalışmaları da kullanım sırasında tüketilen enerjinin iklim değişikliği potansiyeli

üzerindeki “dominant” etki olduğunu açıkça teyit etmektedir. Bu bağlamda, tezimizde kurgulanan %100 yenilenebilir enerji senaryosu, kullanım aşamasındaki şebeke elektriğinin tamamen karbonsuzlaştırılması durumunda yaşam döngüsü emisyonlarının ne ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir.

Literatürde raporlanan değerler ile tez bulgularımız arasındaki küçük farklılıklar, coğrafi koşullar, sistem sınırları ve yöntemsel tercihlerden kaynaklanan durumlardır.

5.2 Sonuçlar

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesi, 1000 kVA yağlı tip bir dağıtım transformatörünün çevresel etkilerinin büyük ölçüde kullanım aşamasındaki elektrik tüketiminden kaynaklandığını ortaya koymuştur. EF 3.1 yöntemine göre 30 yıllık kullanım ömrü için hesaplanan iklim değişikliği potansiyeli ~498.726 kg CO₂-eş. olup, bunun %98’i transformatörün şebekeden çektiği elektrik nedeniyle dolaylı olarak salınan sera gazlarından oluşmaktadır. ReCiPe 2016 Endpoint (H/A) yöntemine göre de insan sağlığı (DALY) ve ekosistem kalitesi (species·yr) göstergelerinde işletme dönemi en yüksek paya sahiptir. Üretim, taşıma ve bertaraf aşamalarının katkıları ise toplam içerisinde oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu bulgular, dağıtım transformatörleri için kullanım aşamasının kritik bir “sıcak nokta” olduğunu göstermektedir.

Bulgular, transformatörün yaşam döngüsü boyunca çevresel performansını iyileştirmek için odaklanılması gereken kritik noktaları net bir şekilde ortaya koymaktadır. Kullanım (işletme) aşaması, hemen hemen tüm önemli etki kategorilerinde birincil “sıcak nokta” olarak tanımlandığı için, sürdürülebilirlik açısından en büyük kazanımların bu aşamadaki iyileştirmelerle elde edilebileceği söylenebilir. Özellikle iklim değişikliği, asitleşme, fosil kaynak tüketimi gibi kategorilerde %95+ oranında etki kullanım dönemine atfedildiğinden, transformatörün işletme verimliliğinin artırılması ve kayıplarının azaltılması birinci öncelikli strateji olmalıdır.

Tez kapsamında mevcut duruma ek olarak kurgulanan yenilenebilir enerji senaryosu, çevresel etkilerin azaltılması noktasında büyük bir potansiyele işaret etmektedir. Bu senaryoda 30 yıllık toplam sera gazı emisyonu 90.641,475 kg CO₂-eş. gibi çok daha düşük bir seviyeye gerilemiş, yani mevcut duruma kıyasla %81 oranında azalma

kaydedilmiştir. Benzer şekilde, ReCiPe 2016 sonuçlarında da insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki zarar göstergeleri ciddi oranda düşüş göstermiştir. Bu iyileşmeler, elektrik üretimindeki karbonsuzlaşmanın, transformatör gibi elektrik ekipmanlarının yaşam döngüsü çevresel performansını artırmada son derece etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle iklim değişikliği kategorisinde fosil kaynaklı emisyonların elimine edilmesi, transformatörün ömür boyu karbon ayak izini dramatik biçimde azaltmıştır.

Kullanım aşamasının domine edici rolü, üretim ve hammadde temini aşamalarının ihmal edilebileceği anlamına gelmemektedir. Özellikle insan sağlığı toksisitesi ve ekotoksisite gibi kategorilerde hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesi süreçleri ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle, transformatörün sürdürülebilir tasarımı, sadece verimlilik odaklı değil aynı zamanda dögüsel ekonomi ilkelerini de gözetten bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Geri dönüştürölmüş malzeme kullanımı, bu noktada kilit öneme sahiptir. Transformatör üretiminde bakır, çelik ve alüminyum gibi metallerin geri kazanılmış hurdadan elde edilmesi, birincil cevher madenciliğine duyulan ihtiyacı azaltarak hem enerji tasarrufu sağlar hem de ağır metal emisyonlarını büyük ölçüde düşürür. Bakır üretiminde geri dönüşüm, yeni bakır üretimine kıyasla çok daha düşük enerji ve kimyasal tüketimiyle gerçekleşir; bu da küresel ısınma ve toksisite potansiyellerine olumlu yansır. Benzer biçimde, transformatör yağı gibi bileşenlerin rafine edilip yeniden kullanılması veya alternatif çevre dostu yalıtım sıvılarına geçilmesi de değerlendirilebilir.

Elde edilen bulgular, dağıtım transformatörlerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik politika ve stratejilerin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle enerji verimliliği yüksek transformatör tasarımlarının teşviki ve elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payının artırılması, Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakat hedefleriyle uyumlu kilit adımlar olarak dikkat çekmektedir (European Commission, 2025). Çalışmamız, yenilenebilir enerji senaryosunda sera gazı emisyonlarının ~%81 oranında azalabildiğini göstererek, elektrik şebekesinin karbon yoğunluğunu düşürmeye yönelik politikaların yaşam döngüsü boyutundaki önemini somut verilerle desteklemektedir. Benzer şekilde, AB Eco-Design (Eko-Tasarım) Yönetmelikleri kapsamında transformatörler için belirlenen verimlilik standartlarının (örn. düşük kayıplı çekirdek kullanımı) çevresel kazanımları, bu tezdeki bulgularla örtüşmektedir. Dolayısıyla, çalışmanın sonuçları yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla

kalmayıp aynı zamanda enerji sektörü politika yapıcılarına ve endüstri düzenleyicilerine, dağıtım altyapısında daha sürdürülebilir teknoloji ve uygulamaların benimsenmesi hususunda bilimsel bir temel sunmaktadır. Bu veriler, 2050 karbon nötr hedefleri doğrultusunda şebeke ekipmanlarına yönelik stratejik kararların alınmasında yol gösterici olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma dağıtım transformatörlerinin çevresel etkilerini azaltmak için hem teknoloji hem de enerji politikası boyutunda önemli çıkarımlar sunmaktadır. Elektrik şebekesinin yenilenebilir enerjiye geçişinin hızlandırılması, mevcut transformatör parkının dahi karbon ayak izini azaltacak ve gelecekte devreye girecek verimli transformatörlerle birlikte toplam etkileri çarpan etkisiyle küçültecektir.

Elde edilen bulgulara göre, enerji üretimindeki dönüşüm gerçekleştikçe transformatörlerin malzeme kaynaklı etkileri görece daha önemli hale gelecektir. Bu nedenle, uzun vadede çevre dostu malzeme kullanımı, geri dönüşüm oranlarının artırılması ve üretimde temiz enerji kullanılması gibi önlemler de devreye alınmalıdır.

Sonuçlar genel perspektiften değerlendirildiğinde, dağıtım transformatörleri gibi elektrik şebekesinin kritik bileşenlerinin karbon ayak izinin azaltılmasının, sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş için elzem olduğu görülmüştür. Kullanım aşamasındaki sıcak noktaların iyileştirilmesi ve enerji arzının yeşilleştirilmesi ile desteklenen entegre bir yaklaşım, transformatör kaynaklı çevresel etkilerin minimize edilmesini sağlayacaktır (Carlen vd., 2011; Mansilha vd., 2019; Liu vd., 2024). Bu tez çalışmasının bulguları, literatüre özgün bir katkı sunmakta ve elektrik şebekesi ekipmanlarının yaşam döngüsü sürdürülebilirliği konusunda gelecekteki çalışmalara yön verecek önemli tespitler içermektedir.

Son olarak, transformatörlerin sürdürülebilirlik boyutu, enerji sistemi bütününe karbondan arındırılması hedefiyle birlikte ele alınmalıdır. Şebeke elektriğinin yenilenebilir kaynaklara dayalı hale gelmesi, transformatörlerin kullanım aşamasındaki emisyonları otomatik olarak azaltacaktır. Bu durumda, üretim aşamasının görece önemi artacağından, gelecekte transformatör imalat süreçlerinde yeşil elektrik kullanımı, düşük karbonlu çelik üretimi ve malzeme verimliliği gibi önlemler daha da kritiklik kazanacaktır. Yani enerji üretiminin temizlenmesiyle, ekipman üretiminin payı yükselir – bu nedenle sanayi politikalarının da paralel biçimde dekarbonizasyonu hedeflemesi gerekecektir. Bu çalışma, Türkiye’de ve

dünyada artan elektrik talebiyle birlikte dağıtım şebekelerinde kritik öneme sahip transformatörlerin çevresel etkilerine ışık tutmaktadır. Bulgular, beşikten mezara yaklaşımıyla elde edildiğinden, karar vericilere ve tasarımcılara ürünün tüm yaşam döngüsünü dikkate alan bir perspektif sunmaktadır. Sonuçlarımız, enerji verimliliğini artırmaya yönelik politikaların bilimsel temelini ortaya koyarken, aynı zamanda transformatör teknolojilerinde sürdürülebilir inovasyonların gerekliliğine işaret etmektedir. Gelecekte, belirsizlik ve hassasiyet analizlerimizi genişleterek farklı coğrafi bölgeler, farklı yük profilleri ve şebeke senaryoları için detaylı değerlendirmeler yapmak yararlı olacaktır. Böylece dağıtım transformatörlerinin sürdürülebilirlik performansı daha kapsamlı anlaşılabilir ve daha yeşil bir elektrik altyapısı için somut adımlar desteklenecektir.



KAYNAKLAR

- Alfawaris A** (2024) Transformer decarbonisation: life cycle assessment study. Workshop Session 2C, AUE Conference 2024 – Engineering Technology, Efficiencies and Innovations for Tomorrow’s Estate, University of Surrey, Guildford, UK, 4–6 Eylül 2024. Association of University Engineers, Guildford.
- Bas Andreu, T.** (2023). Development of a Tool for the Life Cycle Assessment of a Medium Voltage Transformer for the Distribution Grid (Yüksek Lisans Tezi, Universidad Pontificia Comillas-ICAI, Madrid, İspanya).
- Birleşmiş Milletler Türkiye,** Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları. <https://turkiye.un.org/tr/sdgs> (Erişim Tarihi: 11.08.2024).
- European Commission** (2025). Europe’s Most Efficient Distribution Transformer. Energy Manager Magazine, 29 Nisan 2025. <https://www.energymanagemagazine.co.uk/europes-most-efficient-distribution-transformer/> (Erişim Tarihi: 11.01.2025).
- European Commission JRC,** (2022). Product Environmental Footprint Methodology – Version 3.1. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html> (Erişim Tarihi: 10.02.2025).
- European Commission.** (2019). Commission Regulation (EU) 2019/1783 of 1 October 2019 amending Regulation (EU) No 548/2014 on Ecodesign requirements for small, medium and large power transformers. Official Journal of the European Union, L 272, 107-127. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1783> (Erişim Tarihi: 10.09.2024).
- European Commission.** (2025). 2050 Long-term Strategy: Striving to Become the World’s First Climate-Neutral Continent. Directorate-General for Climate Action. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en (Erişim Tarihi: 03.02.2025)
- Guinée J. B., Heijungs R., Huppes G., vd.,** (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards, Kluwer, Dordrecht.
- Güldürek, M., & Esenboğa, B.** (2024). Assessment of Corporate Carbon Footprint and Energy Analysis of Transformer Industry. Sustainability, 16(13), Article 5800. <https://doi.org/10.3390/su16135800>

- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., et al.** (2017). ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104, National Institute for Public Health and the Environment <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf> (Erişim Tarihi: 13.01.2025).
- International Organization for Standardization.** (2006). ISO 14040:2006 Çevre yönetimi — Yaşam döngüsü değerlendirmesi — İlkeler ve çerçeve. ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html> (Erişim tarihi: 11.06.2025)
- Khasreen M. M., Banfill P. F. G., Menzies G. F.,** (2009). “Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review”, Sustainability, 1(3), 674-701.
- Liu, C., Miao, B., Li, S., Yu, W., Yuan, Q., Cao, Y., Yu, Y., & Yang, Q.** (2024). Assessing the life cycle CO₂ emissions of various transformers under different scenarios with multiple functional units. Advances in Climate Change Research (Hakem değerlendirmesinde, SSRN ön baskı). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5036631>
- Lloyd SM, Ries R** (2007) Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: a survey of quantitative approaches. Journal of Industrial Ecology 11(1):161–179.
- Mammadov, A. ve Cılız, N.** (2017). Yaşam döngüsü analizi: tanımı, amacı, sürdürülebilirlik kavramlarıyla ilişkisi ve sanayideki yeri. *Kalkınmada Anahtar Verimlilik Dergisi*, 29(345), 4-9.
- Mansilha, M. B., Brondani, M., Farret, F. A., da Rosa, L. C., & Hoffmann, R.** (2019). Life Cycle Assessment of Electrical Distribution Transformers: Comparative Study Between Aluminum and Copper Coils. Environmental Engineering Science, 36(1), 114–135
- Moreno Ruiz, E., Valsasina, L., FitzGerald, D., Symeonidis, A., Turner, D., Müller, J., Minas, N., Bourgault, G., Vadenbo, C., Ioannidou, D., & Wernet, G.** (2020). Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.7 & v3.7.1. Zürich: ecoinvent Association.
- Piotrowski, T. & Markowska, D.** (2025). Carbon Footprint of Power Transformers Evaluated Through Life Cycle Analysis. Energies, 18 (6), 1373. <https://doi.org/10.3390/en18061373> (Erişim Tarihi: 10.06.2025)
- PRé Sustainability.** (2023). Research and innovation with SimaPro Craft – Uncertainty analysis (Monte Carlo feature)
- Ramanan, V. R., & Carlen, M.** (2011). Life Cycle Assessment of Dry-type and Oil-immersed Distribution Transformers with Amorphous Metal Cores. Proceedings of 21st Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED 2011), Paper No. 1145, Frankfurt, Germany
- Wang, Y., Zhang, H., Zhou, E., Xie, L., & Li, J.** (2025). Carbon Footprint Analysis of Distribution Network Transformers Based on Life Cycle Assessment. Energies, 18(3), 600 <https://doi.org/10.3390/en18030600> (Erişim Tarihi: 03.03.2025).

- Weidema B. P., Wesnæs M. S.**, (1996). “Data Quality Management for Life-Cycle Inventories—An Example of Using Data Quality Indicators”, *Journal of Cleaner Production*, 4(3-4), 167-174.
- World Bank.** (2025). Towards a Greener and More Resilient Türkiye. <https://www.worldbank.org/en/country/turkey/brief/towards-a-greener-and-more-resilient-turkiye> (Erişim Tarihi: 22.11.2024).
- World Steel** (2021). *Eighth global LCI study for steel products*. World Steel Associations.
- Yakovlev, V.A. ve Belyaev, G.A.** (2023). Global climate change, its consequences and ways to solve the problem. *E3S Web of Conferences*, 390, 1-7.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

:Yağmur BİLGİN PİLCİOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Fatih Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-2019: Ulus Mühendislik Çevre Danışmanlık Hiz. Ltd. Şti.-Çevre Mühendisi/ Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanı
- 2020-2024: ÇİGEM Çevre Danışmanlık Hiz. Ltd.Şti. - Çevre Mühendisi/Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanı
- 2024-Devam Ediyor : CGE Sürdürülebilirlik Değerlendirme Merkezi-Sürdürülebilirlik Uzmanı