



**KONVANSİYONEL VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN
ÜRETİLEN ELEKTRİĞİN DAĞITIMINDA KULLANILAN SF₆ GAZSIZ
ANA PANEL ÜNİTELERİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ**

Ali TOĞAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ali TOĞAY

19/12/2025

KONVANSİYONEL VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN ÜRETİLEN
ELEKTRİĞİN DAĞITIMINDA KULLANILAN SF₆ GAZSIZ ANA PANEL
ÜNİTELERİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Ali TOĞAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2025

ÖZET

Günümüzde enerji sistemlerinin düşük karbonlu ve sürdürülebilir kaynaklara yönelmesi elektrik enerjisi dağıtım sektöründeki çevresel etkilerin de kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu, özellikle son kullanıcılara doğrudan hizmet veren ve birincil dağıtım bileşenleri ürünlerine kıyasla önemli ölçüde daha fazla yatırım yapılan çok sayıda ürün ve bu alanda kullanılan çok sayıda yatırım nedeniyle kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, orta gerilim (OG) SF₆ gazsız şalt sistemlerinin çevresel performansı, Yaşam Döngü Analizi (LCA) yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışmada, Eaton Xiria 630 A CCF (sigorta hücreli bileşik) ve CCV (vakum kesici hücreli bileşik) bloğu örnek alınarak, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun şekilde beşikten mezara yaklaşımı benimsenmiş; üretim, dağıtım, kullanım ve ömür sonu aşamaları ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Analizler, PEF EF 3.0 metodolojisi ve EIME v6.1.1 yazılımı kullanılarak yürütülmüş, veri seti olarak CODDE 2024-04 veri tabanı kullanılmıştır. Bulgular, toplam 502 kg kütleye sahip CCF sisteminde çevresel etkinin %59,6'sının üretim, %18,4'ünün kullanım ve %19,7'sinin ömür sonu aşamasından kaynaklandığını göstermektedir. Benzer şekilde toplam 387 kg kütleye sahip CCV sisteminde de çevresel etkinin sırasıyla %58'inin üretim, %21'inin kullanım ve %18'inin ömür sonu aşamasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş malzeme oranının artırılmasının ve yenilenebilir enerji kaynaklarının ürünlerin üretim ve kullanım süreçlerinde etkinleştirilmesi, karbon ayak izini önemli ölçüde düşürmektedir. Elde edilen sonuçlar, hava/vakum yalıtımlı SF₆ gazsız sistemlerin enerji altyapılarında sürdürülebilir dönüşüm için teknik ve çevresel açıdan güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, LCA yaklaşımı, yenilenebilir enerji politikalarının ve eko-tasarım stratejilerinin geliştirilmesinde temel bir karar destek aracı olarak öne çıkmaktadır.

Bilim Kodu : 92812
Anahtar Kelimeler : Yaşam döngü analizi, yenilenebilir enerji, elektrik üretim-dağıtım, orta gerilim, SF₆ gazsız anahtarlama ürünleri
Sayfa Adedi : 114
Danışman : Doç. Dr. Battal DOĞAN
İkinci Danışman : Doç. Dr. Hıdır DÜZKAYA

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SF₆-FREE MAIN PANEL USED IN THE
DISTRIBUTION OF ELECTRICITY GENERATED FROM CONVENTIONAL AND
RENEWABLE ENERGY SOURCES

(M. Sc. Thesis)

Ali TOGAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

In today's energy systems, the shift toward low-carbon and sustainable sources necessitates a comprehensive assessment of the environmental impacts within the electricity distribution sector. This is particularly critical due to the high number of products used and investments made in this area, which directly serve end-users and significantly exceed those in primary distribution components. In this thesis, the environmental performance of medium voltage (MV) SF₆-free switchgear systems has been performed using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The study adopts a cradle-to-grave approach in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, focusing on Eaton Xiria 630 A CCF (fuse component) and CCV (vacuum circuit breaker component) modules. The production, distribution, use, and end-of-life phases are examined in detail. The analyses were conducted using the PEF EF 3.0 methodology and EIME v6.1.1 software, with the CODDE 2024-04 database serving as the data source. Findings indicate that in the CCF system, which has a total mass of 502 kg, 59.6% of the environmental impact originates from the production phase, 18.4% from the use phase, and 19.7% from the end-of-life phase. Similarly, for the CCV system with a total mass of 387 kg, the environmental impact is attributed to the production (58%), use (21%), and end-of-life (18%) phases, respectively. Increasing the proportion of recycled materials and integrating renewable energy sources into the production and operational processes significantly reduces the carbon footprint. The results demonstrate that air/vacuum-insulated SF₆-free systems offer a technically and environmentally robust alternative for sustainable transformation in energy infrastructures. In this context, the LCA approach stands out as a fundamental decision-support tool in the development of renewable energy policies and eco-design strategies.

Science Code : 92812
Key Words : Life cycle assessment, renewable energy, electricity generation-
distribution, medium voltage, SF₆-free
Page Number : 114
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Battal DOĞAN
Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hıdır DÜZKAYA

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışma sürecimde desteklerini ve rehberliklerini esirgemeyen her zaman yol gösterici olan kıymetli tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Battal DOĞAN'a ve Sayın Doç. Dr. Hıdır DÜZKAYA'ya en içten saygılarımı ve hürmetlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimime başlama konusunda beni cesaretlendiren ve destekleyen değerli yöneticilerim Sayın Tolga ÜNVER'e, Sayın Engin GÖKSU'ya, yapmış olduğum çalışmalarda kullandığım verilerin elde edilmesi ve kullanılmasında yardımlarını esirgemeyen EATON yöneticileri ve çalışanlarına, Arge akademik ve teknik çalışmalarımızda desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Müslüm Cengiz TAPLAMACIOĞLU hocamıza, hayatımda her daim yol gösterici olan aile büyüklerimiz Sayın Prof. Dr. Emel KOÇ'a, Sayın Esra KOÇ GÜNGÖR'e, Sayın Sabri GÜNGÖR'e teşekkür ederim.

Sadece yüksek lisans eğitimimde değil hayatım boyunca karşılaştığım tüm zorlukları kolaylıklara çeviren sevgili eşim Sayın Doç. Dr. Şükran Melda ESKİTOROS TOĞAY'a, bugünlere ulaşmam için çok emek veren fedakâr aileme sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak ülkemizde bana ve benim gibi tüm Türk gençlerine eğitimde fırsat eşitliğini mümkün kılan Cumhuriyetimizin mimarı, güzel üniversitemize ismini veren milletimizin Halaskârgazisi Büyük Atatürk'e ve onun yüksek şahsiyet silah arkadaşlarına sonsuz saygı, minnet ve özlemlerle...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Konvansiyonel Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Enerjisinin Yaşam Döngü Analizi Üzerine Yapılan Araştırmalar.....	5
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Enerjisinin Yaşam Döngü Analizi Üzerine Yapılan Araştırmalar.....	8
2.3. Orta Gerilim Anahtarlama Ve Şalt Cihazlarının Yaşam Döngü Analizi Üzerine Yapılan Araştırmalar	12
3. ELEKTRİK ENERJİSİ VE ELEKTRİK ENERJİSİNİN ÇEVRE İLE ETKİLEŞİMİ	17
3.1. Elektrik Enerjisi Ve Önemi	17
3.2. Enerji Talebindeki Artış Ve Sürdürülebilirlik İhtiyacı	17
3.2.1. Kurulu güç kavramı ve Türkiye'nin kurulu gücü	18
3.3. Elektrik Enerjisinin Üretimi	20
3.3.1. Konvansiyonel enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi	20
3.4. Elektrik Enerjisinin İletimi.....	25
3.5. Elektrik Enerjisinin Dağıtımı	26

Sayfa

3.5.1. Konvansiyonel enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin dağıtımdaki rolü	27
3.5.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin dağıtımdaki rolü ve dağıtım sistemlerine entegrasyonu	27
3.5.3. Elektrik enerjisinin dağıtım altyapısının güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından önemi.....	28
3.6. Elektrik Enerjisinin Yaşam Döngüsü Boyunca Çevresel Etkileri.....	28
3.6.1. Konvansiyonel enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin çevresel etkileri	29
3.6.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin çevresel etkileri	29
3.6.3. Elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinin çevresel etkilerdeki rolü.....	30
3.6.4. Çevresel yaklaşım metotları.....	33
3.6.5. Yaşam döngü analizinin (LCA) gerekliliği.....	33
3.7. Yaşam Döngü Analizi (Life Cycle Assessment- LCA)	34
3.7.1. Amaç ve kapsam	35
3.7.2. Envanter analizi.....	35
3.7.3. Etki analizi	36
3.7.4. Yorumlama.....	42
3.8. Çevresel Kural Tanımları	50
3.8.1. EPD (Environmental product declaration-çevresel ürün beyanı)	50
3.8.2. PCR (Product category rules-ürün kategori kuralları)	50
3.8.3. PSR (Product specific rules-ürün spesifik kuralları-)	51
3.8.4. PEP Ecopassport (Product environmental profile-ürün çevre profili kimliği).....	51
3.8.5. PEF (Product environmental footprint-ürün çevresel ayakizi)	52
3.8.6. Eco'DEEEE	53
3.9. Güç Sistemlerinde Yaşam Döngü Analizi	54
3.10. Orta Gerilim Anahtarlama Ve Şalt Ürünleri	54

	Sayfa
4. MATERYAL VE METOD	59
4.1. Amaç Ve Kapsam	59
4.1.1. Kapsam tanımı	59
4.2. Yaşam Döngü Envanteri	67
4.2.1. Ürün üretimi	67
4.2.2. Dağıtım aşaması	70
4.2.3. Kurulum aşaması.....	71
4.2.4. Ürün kullanım aşaması.....	71
4.2.5. Kullanım ömrü sonu aşaması	72
4.2.6. İstatistiksel yöntemler	74
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	77
5.1. Yaşam Döngü Etki Analizi	77
5.2. CCF Ve CCV Bloğunun Enerji Tüketim Değerleri	78
5.3. Xiria 630 Ring Ana Ünitesi CCF Bloğunun Genel Sonuçları	80
5.4. Xiria 630 Ring Ana Ünitesinin - CCV Bloğunun Genel Sonuçları	82
5.5. Tez Çalışmasının Literatür Sonuçları İle Karşılaştırmalı Analizi	86
5.6. Yaşam Döngü Yorumlama.....	92
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	99
EKLER	109
EK-1. CCF ve CCV bloğunun enerji tüketim değerleri örnek hesaplaması	110
EK-2. Xiria CCV bloğu için fazların direnç değişimi örnek hesaplaması	112
ÖZGEÇMİŞ	113

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Konvansiyonel ve yenilebilir enerji kaynaklarından üretilen 1 kWh birim enerjinin gCO ₂ eşdeğer olarak çevresel etkisinin karşılaştırmalı gösterimi	12
Çizelge 3.1. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kurulu güçleri ve elektrik üretimi	24
Çizelge 3.2. Yaşam döngü etki analizi karşılaştırması	37
Çizelge 3.3. Güç sistemleri için potansiyel olarak önemli bazı LCA yazılımları.....	47
Çizelge 3.4. LCA çalışmalarında mevcut kullanılan veritabanları ve kullanım alanları.....	48
Çizelge 3.5. LCA çalışmalarında mevcut kullanılan veritabanları ve birbirlerine göre karşılaştırmaları	49
Çizelge 3.6. EPD tiplerinin açıklamaları	50
Çizelge 3.7. PCR ve PSR'ın karşılaştırmalı tablosu	51
Çizelge 3.8. PEP ve PEF kavramlarının temel karşılaştırmaları	53
Çizelge 4.1. CCF bloğu temel özellikleri.....	60
Çizelge 4.2. CCV bloğu temel özellikleri.....	60
Çizelge 4.3. Referans akışlarının gösterimi	62
Çizelge 4.4. PCR'ye göre zorunlu çevresel etki göstergeleri.....	66
Çizelge 4.5. Xiria CCF bloğu için ağırlık katkısı ve PEP malzeme kategorileri.....	69
Çizelge 4.6. Xiria CCV bloğu için ağırlık katkısı ve PEP malzeme kategorileri	70
Çizelge 4.7. Xiria ürünleri genel atık arıtma istatistikleri.....	74
Çizelge 5.1. Malzeme listesinin kırınımlarının görünümü	78
Çizelge 5.2. Xiria CCF bloğu için fazların direnç değişimi	78
Çizelge 5.3. CCF panelinin toplam enerji tüketim verileri.....	79
Çizelge 5.4. Xiria CCV bloğu için fazların direnç değişimi.....	79
Çizelge 5.5. CCV panelinin toplam enerji tüketim verileri	79

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.6. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCF bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu çevresel etki göstergeleri)	80
Çizelge 5.7. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCF bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu envanter akış göstergeleri)	81
Çizelge 5.8. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCF bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu olmayan çevresel etki göstergeleri)	81
Çizelge 5.9. Xiria 630 Halka ana ünitesi-CCF bloğu için faz bazlı etki katkısı	82
Çizelge 5.10. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCV bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu çevresel etki göstergeleri)	83
Çizelge 5.11. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCV bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu envanter akış göstergeleri)	84
Çizelge 5.12. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCV bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu olmayan çevresel etki göstergeleri)	84
Çizelge 5.13. Xiria 630 Halka ana ünitesi-CCV bloğu için faz bazlı etki katkısı	85
Çizelge 5.14. CCF ve CCV bloklarının zorunlu çevresel etki göstergeleri karşılaştırması	86
Çizelge 5.15. Eaton Xiria CCF ve sektördeki üreticilerin mevcut ürünlerinin zorunlu çevresel gösterge değerleri	87
Çizelge 5.16. Eaton Xiria CCF ve sektördeki farklı bir üreticinin mevcut ürünlerinin zorunlu çevresel gösterge değerleri karşılaştırması	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Dünyadaki en büyük kurulu güce sahip ilk 10 ülke	20
Şekil 3.2. Elektrik enerji şebekesindeki güç üretim sistemleri arasındaki ilişki.....	21
Şekil 3.3. Toplam yenilenebilir enerji kaynağı kurulu gücü (2019-2024).....	25
Şekil 3.4. SF ₆ 'ya alternatiflerin GWP ve atmosferik yaşam ömürleri.....	31
Şekil 3.5. ISO 14040 Çevre Yönetimi, hayat boyu değerlendirme, ilkeler ve çerçeve	35
Şekil 3.6. LCA çalışması iş akış şeması	54
Şekil 4.1. Ürün sisteminin sistem sınırları	63
Şekil 4.2. LCA aşamaları; Dahil edilenler ve hariç tutulanlar	63
Şekil 4.3. EIME iş akış şeması.....	67
Şekil 4.4. Kullanım ömrü sonu şematik gösterimi.....	73
Şekil 4.5. ANOVA akış şeması.....	75
Şekil 5.1. Verilerin dağılımının incelenmesi	87
Şekil 5.2. Verilerin varyans kontrolünün yapılması	88
Şekil 5.3. Anova One way Tukey analizi	89
Şekil 5.4. Aralık gösterimi yöntemi.....	89
Şekil 5.5. İklim değişikliği dağıtım kategorisinin yaşam döngüsü aşamasını dikkate alarak şalt ekipmanlarının karşılaştırılması.....	92

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Elektrik üretim, iletim, dağıtım şebekesinin entegrasyonu	26
Resim 3.2. Bir ürünün yaşam döngüsü	43
Resim 3.3. Xiria CCF blok ünitesi.....	56
Resim 3.4. Xiria CCV blok ünitesi	56



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

I	Akım (amper)
m²	Metrekare
m³	Metreküp
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
R	Direnç (ohm)

Kısaltmalar

Açıklamalar

AIS	Hava yalıtımlı şalt cihazları
BoM	Bill of Material (Ürün ağacı)
CCF	2 yük ayırıcılı ve 1 sigortalı 24 kV orta gerilim hücre
CCV	2 yük ayırıcılı ve 1 kesicili 24 kV orta gerilim hücre
g CO₂ e	Gram olarak CO ₂ eşdeğer ağırlığı
GHG	Sera gazı
GIS	Gaz yalıtımlı şalt cihazları
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
LCA	Yaşam Döngü Analizi
OG	Orta gerilim
SF₆	Sülfür hekzaflorür
WEEE	Atık Elektrik Elektronik Ekipmanları

1. GİRİŞ

Enerji, sanayi toplumlarının ekonomik kalkınma düzeyini ve yaşam kalitesini belirleyen temel bir unsurdur. Küresel enerji talebinin artışı, enerji üretiminde kullanılan kaynakların çevresel etkilerini daha görünür hâle getirmiştir. Özellikle fosil yakıtların yoğun kullanımı sonucu ortaya çıkan karbon emisyonları, küresel ısınma, iklim değişikliği ve ekosistem tahribatı gibi çevresel sorunların ana sebepleri arasında yer almaktadır. Bu durum, enerji sektörünü sürdürülebilir üretim, temiz teknolojiler ve düşük karbon stratejilerine yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle vb.) kullanımının yaygınlaşması, yalnızca enerji arz güvenliğini güçlendirmekle kalmamış, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması konusunda da önemli bir dönüşüm sağlamıştır. Ancak enerji üretim süreci kadar, bu enerjinin iletim ve dağıtım altyapısının da çevresel etkileri giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Özellikle ikincil dağıtım ürünleri olan orta gerilim anahtarlama ve şalt ürünleri son tüketiciye hitap etmesinden dolayı, birincil dağıtım ürünlerine göre çeşit ve sayı bakımından oldukça fazladır. Tüm bu değerler birlikte düşünüldüğü zaman, yenilenebilir enerji kaynaklarının temel amaçlarından biri olan en verimli, en ekonomik, çevreye en duyarlı yöntem ile ürettikleri elektrik enerjisinin aynı duyarlılık ile dağıtımını sağlandığında amacına daha çok hizmet etmiş olacaktır. Bu yüzden elektrik enerjisinin üretimindeki gösterilen hassasiyet enerjinin dağıtımında da gösterilmesi gerekmektedir.

Elektrik enerjisinin üretimden son kullanıcıya ulaştırılması sürecinde kullanılan orta gerilim anahtarlama ekipmanları, sistem güvenliği ve sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu ekipmanlar; hat açma-kapama, arıza durumunda devre kesme, yük transferi ve kısa devre akımlarını kesme gibi görevleri yerine getirir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan gaz yalıtımlı sistemlerde, yüksek dielektrik dayanımı ve kimyasal kararlılığı nedeniyle kükürt hekzaflorür (SF₆) gazı tercih edilmektedir. SF₆, elektrik arkını bastırma ve izolasyon özellikleri bakımından oldukça etkin olmasına rağmen, küresel ısınma potansiyeli (GWP) CO₂'ye göre yaklaşık 23.500 kat daha yüksek olan bir sera gazıdır. Bu nedenle, SF₆ kullanımı Avrupa Birliği çevre mevzuatları (REACH, F-Gaz Yönetmeliği) ve sürdürülebilir enerji altyapısı politikaları kapsamında giderek daha sıkı düzenlemelere tabi tutulmaktadır.

Bu bağlamda, SF₆ içermeyen (gazsız) orta gerilim anahtarlama sistemlerinin geliştirilmesi, elektrik enerjisi dağıtımında sürdürülebilir çözümler sunmak açısından büyük önem

taşımaktadır. Hava veya vakum yalıtım teknolojilerine dayalı bu yeni nesil sistemler, güvenlik, dayanıklılık ve kompakt tasarım avantajlarını korurken, çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle vakum kesici teknolojisi; uzun ömür, bakım gerektirmeme ve ark söndürme verimliliği açısından konvansiyonel sistemlere kıyasla daha avantajlı bir yapı sunmaktadır. Bu teknolojik dönüşüm, yalnızca mühendislik performansını değil, aynı zamanda ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel yükünü azaltmayı da hedeflemektedir.

Enerji sektöründe ürünlerin çevresel performansının bütüncül biçimde değerlendirilmesi için en uygun yöntemlerden biri yaşam döngü analizi (Life Cycle Assessment - LCA) yaklaşımıdır. LCA, ISO 14040 ve ISO 14044 standartları çerçevesinde, bir ürünün ham madde çıkarımından ömür sonuna kadar geçen tüm aşamalarda çevresel etkilerini sistematik biçimde analiz etmeyi amaçlar. Bu yöntemle üretim, dağıtım, kullanım ve geri dönüşüm aşamalarına ait enerji tüketimi, malzeme girdileri ve emisyon değerleri hesaplanarak çevresel etki göstergeleri (iklim değişikliği, kaynak tükenmesi, ekotoksosite, enerji kullanımı vb.) belirlenir. LCA'nın en önemli katkısı, yalnızca mevcut durumun analiz edilmesi değil, aynı zamanda tasarım aşamasında eko-tasarım stratejilerinin geliştirilmesine imkân tanınmasıdır. Böylece üreticiler, hem mevzuat gerekliliklerine uyum sağlamakta hem de karbon ayak izini azaltarak sürdürülebilir üretim hedeflerine yaklaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen sistemlerde kullanılan SF₆'sız ana panel ünitelerinin yaşam döngü analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, PEF EF 3.0 metodolojisi ve EIME v6.1.1 yazılımı kullanılarak yürütülmüş, analizler beşikten mezara (cradle-to-grave) yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde üretim, dağıtım, kullanım ve ömür sonu aşamaları dikkate alınmış; veri tabanı olarak CODDE 2024-04 seti kullanılmıştır. İncelenen sistem, Eaton Xiria 630 A CCF ve CCV bloğu olup, bu ürünün 24 kV anma gerilimi ve 630 A akım değerine sahip, vakum kesicili ve hava yalıtımlı bir orta gerilim ring ana ünitesi olduğu belirtilmiştir.

SF₆'sız anahtarlama sistemleri, yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da geleceğin enerji altyapısında önemli bir role sahiptir. Bu çalışma, konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin dağıtımında kullanılan SF₆ gazsız sistemlerin çevresel avantajlarını nicel verilerle ortaya koymakta; aynı zamanda yaşam döngü analizinin enerji sistemlerinde karar verme süreçlerine entegrasyonunun gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem

mühendislik hem de çevre bilimleri açısından çok boyutlu bir değerlendirme ortaya koyarak sürdürülebilir enerji dönüşümüne katkı sağlamaktadır.

Tezin amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin dağıtımında kullanılan SF₆ gazsız orta gerilim ana panel ünitelerinin çevresel performansını yaşam döngü analizi yaklaşımıyla değerlendirmektir. Bu kapsamda, SF₆ gazı içeren sistemler ile SF₆ gazsız hava/vakum yalıtımlı sistemlerin yaşam döngüsü boyunca oluşan çevresel etkileri nicel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın hedefi, ürünlerin üretim, dağıtım, kullanım ve ömür sonu aşamalarında ortaya çıkan çevresel yükleri belirleyerek, sürdürülebilir enerji altyapılarının geliştirilmesi için teknik temelli veriler sağlamaktır. Ayrıca, eko-tasarım stratejilerinin belirlenmesi ve yenilenebilir enerji kullanımının çevresel kazanımlara etkisinin ortaya konulması da bu tezin alt hedefleri arasında yer almaktadır.

Tezin önemi

Küresel düzeyde enerji sistemlerinin sürdürülebilirlik odaklı dönüşümü, yalnızca enerji üretimiyle sınırlı kalmayıp, enerji iletim ve dağıtım altyapılarının da çevresel etkilerinin azaltılmasını gerektirmektedir. SF₆ gazı, elektriksel yalıtım ve ark söndürme özellikleri bakımından yüksek performans sunsa da küresel ısınma potansiyeli (GWP) son derece yüksek bir sera gazıdır. Bu nedenle, SF₆ gazsız sistemlerin geliştirilmesi, hem Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) gibi uluslararası çevre politikalarıyla hem de Türkiye'nin karbon nötr hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışma, yaşam döngü analizi (LCA) yöntemiyle SF₆ gazsız teknolojilerin çevresel kazanımlarını ortaya koyarak, enerji sektöründe bilimsel karar destek süreçlerine veri temelli katkı sunmaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kullanımı ve geri dönüştürülmüş malzeme oranının artırılmasının çevresel etkileri azaltmadaki rolünü vurgulaması bakımından hem akademik hem de endüstriyel düzeyde önem taşımaktadır.

Sınırlılıklar

Bu tez çalışmasında, modelleme ve analiz sürecinde bazı sınırlandırmalar dâhilinde yürütülmüştür. Öncelikle, yaşam döngü analizi “beşikten mezara” (cradle-to-grave) yaklaşımıyla yürütülmüş olup kullanım süresi sonrasında bakım ve revizyon etkileri kapsam dışında bırakılmıştır. Kullanılan veriler, EIME v6.1.1 yazılımı ve CODDE 2024-04 veri tabanı aracılığıyla elde edilmiş olup sistemin çevresel etkileri belirli varsayımlar çerçevesinde hesaplanmıştır. Ayrıca, analizler yalnızca Eaton Xiria 630 A CCF ve CCV bloğu referans alınarak yapılmıştır; dolayısıyla sonuçlar diğer marka veya model sistemler için doğrudan genellenemez. Ancak çalışma, metodolojik bir referans modeli sunarak benzer sistemlerin çevresel değerlendirmelerinde kullanılabilir bir altyapı oluşturmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Konvansiyonel Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Enerjisinin Yaşam Döngü Analizi Üzerine Yapılan Araştırmalar

Malode ve çalışma arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada 660 MW kapasiteli süperkritik bir kömürle çalışan Hindistan'da bulunan bir santral ele alınmıştır. Sistem sınırı; kömür çıkarma, taşıma, santral işletimi ve 1 kWh fonksiyonel birimi olan elektriğin iletim kayıplarını içermektedir. Başlangıçta iklim değişikliği potansiyeli büyük bir etki kategorisi olarak tespit edildiği gözlemlenmiş ancak karbon yakalama ve depolama ile azalmakta olduğu sonucuna varılmıştır. Karbon yakalama ve depolama (CCS) tekniği ile karbon değerinin azalmakta olduğu tespit edilen değerinin bile 270 g CO₂ eşdeğeri olup nükleer enerji değerinin ortalama 20 katına denk gelmektedir (Malode ve diğerleri, 2023).

Das ve diğerleri yaptığı çalışmada Çin'deki 530 MW'lık bir enerji santralinin analizini ele almışlardır. Fosil yakıtlardan biri olan kömür, dünya genelinde en önemli enerji kaynaklarından biri olmuştur. Güvenilir bir enerji kaynağı olmanın getirdiği birçok nimetin yanı sıra, küresel ısınma, hava ve su kirliliği ve çevresel etkiler gibi bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Termik üretim üzerine yapılan son araştırmaların, çoğu üretim tekniğinin, gaz halindeki karbondioksitin önemli bir rol oynadığı çevre üzerinde ciddi emisyonlara sahip olduğunu iddia etmektedirler. Bu durumda, bir termik enerji santralinin zararlı sera gazlarının gelişmiş yakalama ve depolama teknolojisiyle birleştirilmesi, termik üretimin yalın halde olan haline göre daha da istikrarlı bir platform sağlayacağını belirtmektedirler (Das ve diğerleri, 2024).

Wibawa ve çalışma arkadaşları (2022) kömürlü termik santrallerin neden olduğu etkilere neden olan hava kirleticileri çoğunlukla CO₂, CH₄, N₂O, SO_x ve Partikül Madde'dir (PM) olduğunu belirtmektedirler. Bu emisyonların küresel ısınmayı artırabileceği, insanları ve çevreyi etkileyen hava kalitesini düşürebileceğini savunmaktadırlar. Bu çalışma, yaşam döngü analizi (LCA) yaklaşımını kullanarak kömürle elektrik üretim faaliyetlerinden kaynaklanan etkileri belirlemektedir. Endonezya Doğu Cava'daki kömür santrallerinden birinin buhar santrali kazan ünitesinin üretim sürecinde elde edilen kWh başına CO₂ değeri 1085 gCO₂ e/kWh olarak hesaplamışlardır (Wibawa ve diğerleri, 2020).

Maloda ve çalışma arkadaşlarının (2022) yaptığı bir diğer çalışma Hindistan'ın kömürle çalışan elektrik tesislerine yapılan kapsamlı bir yaşam döngü analizi için temel araştırmanın bir parçasını içermektedir. Çoğu gelişmekte olan ülkeler için kömürün en önemli enerji kaynağı olduğunu vurgulamakta ve kömür bazlı elektrik üretiminin çevresel etkileri, uzun vadeli sürdürülebilirlik için önemli bir endişe kaynağı olduğunu ve bu nedenle birçok ülkede yoğun bir şekilde araştırılan bir konu olduğuna dikkat çekmekte olup ayrıca yaşam döngü analizi (LCA) yöntemi, elektrik üretiminin çevresel etkisini değerlendirmek için dünya çapında yaygın olarak kullanılmakta olduğunu belirtmektedirler (Malode ve diğerleri, 2022).

Pehl ve diğerleri (2017) yaptığı bu çalışma kapsamında olası bir iklim koruma senaryosunda, 2050 yılı için fosil yakıt karbon yakalama ve tutma tesislerinden kaynaklanan yaşam döngü emisyonlarını 78-110 gCO₂ e/kWh olarak öngörmekte olup bu rakam nükleer, rüzgar ve güneş enerjisi için 3,5-12 gCO₂ e/kWh olasılığına kıyasla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Fosil yakıtlara ait elde edilen bu değer karbon yakalama ve tutma tesislerinin yardımına rağmen yenilenebilir kaynakların katbekat üzerinde olduğunu belirtmektedirler (Pehl ve diğerleri, 2017).

Zhai ve diğerleri (2016) güneş enerji sistemi termal santrallerinden kaynaklanan kirletici emisyonları büyük ölçüde azaltabildiğini göstermek için termal enerji santraline entegre etmişlerdir. Kömür yakıtlı enerji sistemi (S1), termal depolamaya sahip güneş destekli kömür yakıtlı enerji sistemi (S2) ve termal depolaması olmayan güneş destekli kömür yakıtlı enerji sistemi (S3) olmak üzere her sistemin üç kapasitesinin (yani dokuz alt sistemin) performansları tüm yaşam süresi boyunca analiz etmişlerdir. S1, S2 ve S3'ün kirletici emisyonları ve birincil enerji tüketimleri (PEC'ler), yaşam döngü analizi (LCA) kullanarak tahmin etmişlerdir. LCA sonuçları, kirletici emisyonlarının ve birincil enerji tüketimlerinin her üç sistem tipi için de ağırlıklı olarak yakıt işleme ve işletme aşamalarında gerçekleştiğini ve S2'nin üç sistem arasında en iyi performansı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Güneş destekli kömür yakıtlı güç sisteminin, temel durum kömür yakıtlı güç sisteminden ekonomik ve çevresel etkiler olarak daha kârlı olacağını göstermektedirler (Zhai ve diğerleri, 2016).

Gibon ve Menacho (2023) yaptığı çalışmada yaşam döngü analizi literatüründe bildirilen nükleer enerjinin sera gazı emisyonları, küresel olarak birkaç gram CO₂ eşdeğerinden 100 g/kWh'nin üzerine kadar büyük ölçüde değişmekte olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada farklılığın nedenleri arasında sistem sınırlarını etkileyen uranyum zenginleştirme

yöntemini, uranyum çıkarma karışımındaki yerinde liç payını ve uranyum cevheri tenörünü belirlediğini tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar ve 2020 itibarıyla küresel uranyum zincirinin özellikleri (ISL yoluyla daha fazla çıkarma, artık gaz difüzyonu yok, nispeten daha temiz arka plan elektrik karışımı) göz önüne aldıklarında, nükleer enerjinin kWh başına 20 g CO₂ eşdeğerinden fazlasını göstermesi pek olası olmayacağını belirtmişlerdir (Gibon ve Menacho, 2023).

Pomponi ve Hart'ın (2021) çalışmasında devam eden nükleer santral inşaatı göz önüne alındığında, Avrupa'da nükleer enerjiyle ilişkili yaşam döngü sera gazı emisyonlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Süreç tabanlı, girdi-çıkıtı ve hibrit yaşam döngü analizi olarak üç yöntem kullanılmıştır. Senaryolar, nükleer santralin yaşam döngüsü boyunca farklı toplam enerji çıktılarını, farklı kullanım ömrü sonu seçeneklerini ve girdi-çıkıtı hesaplamasında maliyetlerin farklı sektörel dağılımlarını hesaba katmaktadır. Süreç tabanlı, girdi-çıkıtı ve hibrit yöntemler için sonuçlar sırasıyla 16,55-17,69, 18,82-35,15 ve 24,61-32,74 gCO₂ e/kWh arasında değişmekte olduğun belirlenmiştir. Bu değerler arasından süreç tabanlı ve girdi-çıkıtı senaryoları Birleşik Krallık İklim Değişikliği Komitesi için hazırlanan bir raporda belirtilen olasılık aralığının (5-22 gCO₂ e/kWh) ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından sunulan 12 gCO₂ e/kWh'lik ortanca değere göre uymakta olduğunu bildirmektedirler (Pomponi ve Hart, 2021).

Hidroelektrik, nükleer ve rüzgar enerjisi, Çin'deki en büyük üç temiz enerji kaynağıdır. Bu çalışmada, bu üç teknolojinin çevresel etkileri yaşam döngü analizi yaklaşımı ile analiz edilmiş, değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Küresel ısınma potansiyeli açısından, rüzgar enerjisi, yaşam döngüsü boyunca $28,6 \pm 3,2$ gCO₂ e/kWh GWP100 üretir; bu, nükleer enerjiden ($12,4 \pm 1,5$ g CO₂ e/kWh) ve hidroelektrik enerjiden ($3,5 \pm 0,4$ gCO₂ e/kWh) daha yüksektir. Sonuçlar, rüzgar enerjisi teknolojisinin bu üç temiz enerji arasında en önemli çevresel etkilere sahip olduğunu, bunu nükleer enerji ve hidroelektrik enerjinin izlediğini göstermektedir (Wang ve diğerleri, 2019).

Siddiqui ve Dincer (2017) yaptıkları çalışmada, Kanada'nın Ontario eyaletindeki nükleer, rüzgar ve hidroelektrik santrallerinin çevresel etkilerini analiz etmiş, değerlendirmiş ve karşılaştırmalı analizleri yapılmışlardır. Hidro rezervuar tesislerinin 15,2 g CO₂ e/kWh'lik bir yaşam döngüsü GWP100'üne sahip olduğu ve bu değer rüzgar (12,05 g CO₂ e/kWh) ve nükleer güç yaşam döngülerinden (3,402 gCO₂ e/kWh) nispeten daha yüksek olduğunu

görmüşlerdir. Ancak, asitlenme potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli, fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli ve insan toksisitesi potansiyeli gibi diğer çevresel etki kategorileri dikkate aldıklarında, hidroelektrik santrallerinin önemli ölçüde düşük etkilere sahip olduğu bulmuşlardır. Bu durum, herhangi bir ürün sisteminin çevresel performansını tanımlamak için yalnızca sera gazı emisyonlarının yeterli olmadığını göstermektedir. Çalışmada sadece rüzgar enerjisi yaşam döngüsünün, asitlenme, ötrofikasyon, fotokimyasal ozon oluşturma ve insan toksisitesi potansiyellerine en önemli katkıyı sağladığını değil bunun yanında nükleer enerji senaryosunun hem yukarı akış hem de devre dışı bırakma aşamaları çevresel etkilere önemli katkıda bulunan faktörlere sahip olduğu vurgulamışlardır (Siddiqui ve Dincer, 2017).

2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Enerjisinin Yaşam Döngü Analizi Üzerine Yapılan Araştırmalar

Piasecka ve çalışma arkadaşları (2020), 1 MW'lık bir fotovoltaik (PV) santralının çevresel etkilerini, en son teknolojiyi analiz etme ve genel çevresel performansında potansiyel iyileştirmeler önerme ikili hedefleriyle, beşikten mezara LCA ile araştırmışlardır. Santralin bulunduğu coğrafi seviye Polonya olarak belirlenmiş olsa da, çeşitli yaşam döngü aşamaları (örneğin üretim ve atık yönetimi) genellikle diğer Avrupa ülkelerinde de gerçekleştiğinden, ana sonuçların bu bölgedeki ortalama durumu temsil ettiği düşünülebilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Enerji kaynaklarından 20 000 MWh elektrik üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonu miktarı IPCC yöntemi kullanılarak analiz etmiş olup en yüksek sera gazı emisyon seviyesi 1500 gCO₂ e/kWh değeri ile doğalgaz olup sırasıyla 1140 gCO₂ e/kWh değeri ile kömür ve son olarak 19 gCO₂ e/kWh değeri ile PV'den elde etmişlerdir. Analiz edilen değişkenler arasında en büyük çevresel yükler, PV panellerinin üretiminde kullanılan yoğun malzeme ve enerji gereksinimlerinden ve çöplüklerdeki nihai bertaraftan kaynaklanan kayıplardan kaynaklanmıştır. Özellikle, sağlık ve ekosistem üzerindeki potansiyel zararlı etkiler, PV panellerindeki metallerin (örneğin, gümüş, nikel, bakır, kurşun ve kadmiyum) ve polimerlerin varlığıyla ilişkilendirilmiştir. Eko-tasarım uygulamaları ve eski PV panellerinin verimli bir şekilde geri kazanılması ve geri dönüştürülmesi gibi çevre dostu yönetim stratejileri başarıyla uygulanırsa, bu etkiler önemli ölçüde azaltılabilir olduğu görüşünü savunmaktadırlar (Piasecka ve diğerleri, 2020).

Herceg ve meslektaşları (2020), PV sistemleri için farklı geri dönüşüm süreçlerinin çevresel performansını karşılaştırmak ve Almanya'daki standart bir PV sistemi tarafından üretilen

elektriğin genel çevresel ayak izine katkılarını değerlendirmek için Yaşam döngü analizi (LCA) uygulanmıştır. Bu çalışmada ele alınan atık yönetimi yaklaşımları, ek malzeme geri kazanımıyla daha da geliştirilen en son geri dönüşüm teknolojilerini ve literatürde tartışılan gelişmiş geri dönüşüm süreçlerini içermektedir. Sonuçlar, geri dönüşümün, özellikle iklim değişikliğinin azaltılması yoluyla PV elektriğinin çevresel profilini iyileştirme konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Çevreye ve kaynakların korunmasına fayda sağlamanın yanı sıra, uygun bir geri dönüşüm planının oluşturulması, lojistik ağının ekonomik ve finansal dengelerini de olumlu yönde etkileyeceği görüşünü savunmaktadırlar (Herceg ve diğerleri, 2020).

Raugei ve meslektaşları (2020), Birleşik Krallık'taki elektrik karışımının agresif bir karbonsuzlaştırma senaryosunun 2050 yılına kadar enerji ve çevresel etkilerini araştırmak için net enerji analizi ve LCA'yı birleştirdiler. Fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları, karbon depolama, enerji depolama sistemleri ve şebekeye iletim için enerji yatırım getirisi, net-brüt birincil enerji oranı ve yaşam döngü etki analizi sonuçlarını hesaplamışlardır. Sonuçlar, agresif karbonsuzlaştırma senaryosunun, ulusal şebeke karışımında yenilenebilir enerji kaynaklarının daha büyük bir payı olması sayesinde, iklim acil durumunu hafifletmek için çok umut verici bir yol olabileceğini göstermektedir (Raugei ve diğerleri, 2020).

Spatari ve arkadaşları (2020), biyorafineri yan ürünlerinin ABD biyoenerji politika hedefleri bağlamındaki rolünü araştırmıştır. Sonuçsal LCA'lar, Orta Atlantik ABD'sindeki yoğun nüfuslu bölgelerin yakınında üretilen biyoyakıtlar için RFS2 kapsamındaki gelişmiş tanımı karşılamak amacıyla dört alternatif kışık arpadan etanole dönüşüm senaryosunu ve ticari kuru öğütme teknolojilerini değerlendirmek için uygulanmıştır. Bu çalışmada incelenen iklim ve tarımsal koşullara benzer nüfus yoğunluğuna sahip bölgelerde, biyorafineri, ileri biyoyakıtlar için karlı ve çevresel olarak tercih edilen bir çözüm olabileceğini öngörmektedirler (Spatari ve diğerleri, 2020).

Jeotermal santral çalışmalarının LCA'sı, değişken doğası ve belirsizliği nedeniyle nadirdir ve sahaya özgüdür. Jeolojik tehlikeler, arazi kullanımı, sera gazı ve su sürekli olarak sürdürülemez ve zamanla değişebilir. Jeotermal enerji santralleri için LCA'nın, sistem elemanlarının üretim süreci dikkate alınarak incelenmesi gerekmektedir (Bayer ve diğerleri, 2013).

Hemeida ve diğerkleri (2022) biyokütle temelli enerji üretim sistemleri için yapılan yaşam döngü analizi (LCA), çevresel, ekonomik ve sosyal etkiler açısından kapsamlı şekilde değerlendirmişlerdir. Bu analizlerde biyokütle gazlaştırma, sentez gazı yanması, hidrojen ve etanol üretimi gibi süreçler; sera gazı emisyonları, enerji verimliliği, karbon yakalama ve sıvılaştırma gibi kriterler doğrultusunda incelemişlerdir. Farklı santral türleri (biyokütle, biyokütle-kömür, kömür) ve ulaşım modları dikkate alınarak yapılan LCA çalışmaları, biyokütlenin fosil yakıtlara kıyasla daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, lignoselülozik biyokütle ve bitki artıklarından enerji üretimi gibi uygulamalar, sürdürülebilirlik açısından umut vadeden alternatifler olarak öne çıkmakta olduğunu vurgulamaktadırlar (Hemeida ve diğerkleri, 2022).

Portekiz’de bulunan Graciosa Adası’nın elektrik sisteminin dönüşümünün bir vaka çalışması olarak inceleyen bu çalışmada ise elektrik üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için bir Yaşam Döngü Analizi (LCA) yaklaşımı seçilmiştir. Graciosa Adası örneğinde, %100 dizel bazlı bir elektrik sisteminden, rüzgar ve fotovoltaik enerjiye dayalı yüksek oranda yenilenebilir enerji içeren (%65) bir sisteme ve bir bataryalar yardımıyla enerji depolama sistemi ile birlikte dönüşüm, normalleştirilmiş çevresel etkilerde yaklaşık %43’lük bir azalmaya yol açmaktadır (Stenzel ve diğerkleri, 2017).

Nwodo ve Anumba (2020) mevcut ekserjetik LCA çalışmalarının bir incelemesini sunmuş ve ekserji analizi ile geleneksel LCA arasındaki entegrasyon için potansiyel iyileştirmeleri tartışmıştır. Nwodo ve Anumba ayrıca, ekserjetik LCA’nın geleneksel sınırlarının emisyonlara da genişletilmesi fırsatını yorumlamışlardır çünkü nihayetinde madde salınımıyla birlikte çevreye bir ekserji kaybını da tanımlamakta olduğunu düşünmüşlerdir.

Yazarlar, ekserji analizi ve LCA arasındaki sistematik entegrasyonun giderek yaygınlaşmasının bu sınırlamaların üstesinden gelinmesini sağlayacağını öngörmekte ve kaynak tükenmesini ve yaşam döngüsü emisyonlarını karakterize etmek için yeni bir araştırma alanı olarak ekserji tabanlı yaşam döngü analizi (Exe-LCA) terimini önermektedirler (Nwodo ve Anumba, 2020).

Enerji kaynaklarının karbonsuzlaştırılmasının ve teknolojik ilerleme yoluyla süreç verimliliğinin iyileştirilmesinin gelecekteki çevresel sürdürülebilirlik için temel stratejiler olarak olumlu etkisi konusunda genel bir fikir birliği açıkça ortaya çıkmaktadır. Enerji

sistemlerinde çevresel sürdürülebilirliğe ulaşmak için tamamlayıcı araştırma çalışmaları kesinlikle gerekmektedir. Bu amaçla, tek başına veya bütünleştirici metodolojilerle birlikte, Yaşam döngü analizi (LCA) çok önemli olabilir ve tam bir sistem anlayışına ulaşılabilceği bilimsel temeli oluşturabilir (Ciacci ve Passarini, 2020).

İskoçya'nın kuzeybatı kıyılarında bir dalga çiftliğine kurulan tek bir Pelamis P1 cihazının üretimine yönelik incelenen vaka çalışmasının kapsamlı LCA'nın sonuçları, Pelamis'in geleneksel fosil yakıtlı enerji üretimine kıyasla daha düşük iklim değerlerine sahip olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca 7,3 gCO₂e/kWh değerini yaklaşık olarak kabul etmektedir. Ancak incelenen 19 etki kategorisinden 8'inde Pelamis'in diğer üretim biçimlerinin çoğundan veya tamamından daha kötü performans gösterdiği tespit edilmiştir. Pelamis modellerinin çevresel etkilerini azaltmada önemli potansiyele sahip alanlar Pelamis'in ana yapısını oluşturmak için kullanılan büyük miktardaki çeliğin yüksek etkilerinden kaynaklandığını belirlemişlerdir. Bu nedenle çelik kütledeki herhangi bir azalma veya geri dönüştürülmüş içerikteki herhangi bir artış tüm çevresel etkileri azaltmalıdır; ayrıca, deniz aracı operasyonlarının etkileri de önemlidir ve bakım gereksinimlerini azaltmak veya limana çok daha yakın bir kurulum yeri seçmek için tasarımı iyileştirme ihtiyacını göstermektedir (Thomson ve diğerleri, 2019).

Çizelge 2.1'de konvansiyonel ve yenilebilir enerji kaynaklarından üretilen 1 kWh birim enerjinin gCO₂ eşdeğer olarak çevresel etkisinin karşılaştırmalı gösterimi yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Konvansiyonel ve yenilebilir enerji kaynaklarından üretilen 1 kWh birim enerjinin gCO₂eşdeğer olarak çevresel etkisinin karşılaştırmalı gösterimi

Referans	Uygulama Alanı	Enerji Üretim Kaynağı	gCO ₂ e/kWh
Malode ve ark. (2023)	660 MW kömür santrali	Konvansiyonel Enerji (Karbon yakalama ve depolama dahil)	270
Wibawa ve ark. (2020)	Endonezya'daki bir kömür santali	Konvansiyonel Enerji	1085
Pehl ve ark. (2017)	Fosil kaynaklar	Konvansiyonel Enerji (Karbon yakalama ve depolama dahil)	Fosil :78-110 Rüzgar, PV :3,5-12
Gibon ve Menacho (2023)	Nükleer santral	Konvansiyonel Enerji	6,1-20
Pomponi ve Hart (2021)	Nükleer santral	Konvansiyonel Enerji	5-22
Wang ve ark. (2019)	Çin'de bulunan enerji santralleri	Entegre Konvansiyonel Enerji ve Yenilenebilir Enerji	Rüzgar : 28,6 Nükleer : 12,4 Hidro : 3,5
Siddiqui ve Dincer (2017)	Kanada Ontario'daki enerji santralleri	Entegre Konvansiyonel Enerji ve Yenilenebilir Enerji	Rüzgar : 12,05 Nükleer : 3,4 Hidro : 15,2
Piasecka ve ark. (2020)	Polonya	Entegre Konvansiyonel Enerji ve Yenilenebilir Enerji	Doğalgaz : 1500 Kömür : 1140 PV : 19
Thomson ve ark. (2019)	İskoçya	Yenilenebilir Enerji	7,3

2.3. Orta Gerilim Anahtarlama Ve Şalt Cihazlarının Yaşam Döngü Analizi Üzerine Yapılan Araştırmalar

Byles ve Mohagheghi (2023) iklim değişikliği politikalarının fosil yakıt bazlı üretimin devre dışı bırakılmasını zorlamasıyla birlikte, güç sistemi kapasite artırma projeleri için yeni temiz ve yenilenebilir üretim teknolojileri değerlendirilmekte olduğunu ancak her güç üretim teknolojisinin, tüm yaşam döngüsü boyunca istenmeyen etkilere neden olabileceğini ve bu da hava kalitesini, su kaynaklarını, malzeme kaynaklarını ve/veya insan sağlığını olumsuz etkileyebileceğini düşünmektedirler. Yaşam döngü analizi (LCA), bir üretim teknolojisinin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel ve toplumsal etkilerinin ölçülmesini sağlayan güçlü bir modelleme aracı olarak görmekteler ve yaşam döngü analizi (LCA), yalnızca farklı teknolojilerin küresel ısınma potansiyelini değil aynı zamanda tüketilen malzeme, enerji ve su kaynakları açısından çevreyle etkileşim biçimlerini ve ayrıca hava, toprak ve su

üzerindeki etkilerini de dikkate aldığını belirtmektedirler. Bu durumun LCA'yı elektrik şebekesi kapasite genişletme modellerine dahil edilebilecek paha biçilmez bir araç haline getirdiği görüşünü savunmaktadırlar (Byles ve Mohagheghi, 2023).

Pinto ve çalışma arkadaşları (2025) tarafından iki şalt cihazı modelinin çevresel performansını beşikten mezara ve kullanım perspektifinden karşılaştırmak için gerçekleştirilmiştir. SF₆ gazı kullanmayan yeni tasarım (neoGEN modeli), SF₆ gazı kullanan modellerle (FluoFix) karşılaştırılmıştır. Bu modellerin çevresel performansı, yaşam döngü analizi metodolojisi kullanılarak, bu yönetime dahil edilen tüm kategoriler analiz edilerek karşılaştırılmıştır. SF₆ kullanılan modelin kullanım aşamasında SF₆ gazı sızıntısı potansiyeli göz önüne alındığında, sistemin iyi sızdırmaz olduğu ve sızıntıların minimum düzeyde olduğu (%7) bir senaryoda, bu modeli SF₆ gazsız ile değiştirerek etkileri azaltma potansiyeli %74'tür. En kötü senaryo olan SF₆ salınımı (%41 kayıp) varsayıldığında, bu emisyonlar SF₆ gazsız üründen yaklaşık 17 kat daha fazla kg CO₂ eşdeğeri üretmekte olduğunu tespit etmişlerdir (Pinto ve diğerleri, 2025).

Billen ve diğerleri (2020) yenilenen Avrupa Birliği yönetmeliğinde yer alan “Florlu sera gazları içeren ekipmanların, gerçekçi sızıntı ve geri kazanım oranları dikkate alındığında, kullanım ömrü boyunca toplam sera gazı emisyonları, florlu sera gazları içermeyen eşdeğer ekipmanlardan kaynaklanacak olanlardan daha düşükse piyasaya arz edilmesine izin verilmelidir.” İfadesini yetersiz bularak yalnızca sera gazlarını değil diğer etki kategorilerini de içeren eksiksiz bir yaşam döngü analizi (LCA) ile alternatiflerin temelini oluşturacağı yönündeki görüşlerini vurgulamaktadır (Billen ve diğerleri, 2020).

Serres (2022) yaptığı çalışma ile 63 MVA trafo kapasiteli 30 ila 130 kV trafo merkezi için aynı LCA, 1287 ton CO₂ eşdeğerini hesaplamaktadır. Dağıtım şirketlerinin de belirttiği gibi, trafo merkezi için SF₆, sera gazı emisyonunun ana kaynağıdır (%31), bunu trafo kayıpları (%18) takip eder sonucuna ulaşmıştır. Ardından, malzemeler (trafo ve şalt cihazları), beton, araçlar ve daha da şaşırtıcı bir şekilde arazi kullanım değişikliği, geri kalan emisyonun çoğundan sorumlu olduğunu, emisyonları azaltmak için öncelikle malzeme etkisini, elektrik kayıplarını ve SF₆ sızıntısını azaltmak üzere çözümler belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Daha küçük sera gazı kaynakları olmasına rağmen, inşaat işlerinin etkisini ve araçları azaltma seçeneklerinin araştırılması gerektiğini savunmaktadır (Serres, 2022).

Yazarlar bu makalede stratejilerine ve kararlarına çevresel değerlendirmeleri dahil etme konusunda farklı yaklaşımlara sahip olan iki büyük Avrupa enerji şirketi RTE ve Stedin'den gelen geri bildirimleri paylaşmaktadır. Yazarlar bir şalt cihazının çevresel etkisinin yaygın değerlendirme yöntemlerini inceleyerek, şebeke operatörlerinin bir projenin herhangi bir aşamasında, kamu ihale aşamalarından sistem genelindeki LCA çalışmalarına kadar kullanabileceği bir şekilde karbon ayak izlerini objektif olarak tahmin etmeyi amaçlamaktadırlar. GWP, LCA ve basitleştirilmiş tahmin sonuçlarını ele alarak kapsamalarını, güçlerini ve zayıf yönlerini, zaman kavramı ve çevresel argümanları yanlış yönlendirmeden bile kaçınma da dahil olmak üzere açıklığa kavuşturılmaktadır (Perret ve diğerleri, 2023).

Cormenier ve çalışma arkadaşları (2023) özellikle parametrik hesaplamalar kullanan yaşam döngü analizinin (LCA) çok fazla veri üretmesinden ve sadece çevresel şartlar değil insana etkisine yönelik veriler de içerdüğinden biri SF₆ gazı kullanan, diğeri hava gazı kullanan iki tür orta gerilim şalt tesisinin (OG) karşılaştırmalı yaşam döngü analizine ilişkin bir çalışma gerçekleştirmiştir (Cormenier ve diğerleri, 2023).

De Sadeleer ve çalışma arkadaşları (2021) elektrikli ve elektronik ürünlerin çevresel performansının belgelendirilmesi ve iletilmesine yönelik artan talep, yaşam döngü analizine (LCA) dayalı çok sayıda yöntemin geliştirilmesine yol açtığını ve bunlar arasında çevresel ürün beyanı (EPD), ürün çevresel ayak izi (PEF), ürün çevresel profili (PEPecopassport) ve karbon ayak izi (ISO 14067) bulunduğunu bildirmektedirler. Çevresel performansı belgelemek için kullanılan yukarıda belirtilen dört yöntemin global bir ürün üreticisi tarafından üretilen gaz yalıtımlı bir şalt cihazının iklim değişikliği üzerindeki etkilerini hesaplamak için karşılaştırmalı olarak uygulandığından bahsetmişlerdir (De Sadeleer ve diğerleri, 2021).

Bas ve çalışma arkadaşları (2023) global bir orta gerilim ve şalt cihazı üreticisinin müşterilerinin ve global elektrik enerjisi dağıtım sistemi operatörünün çevresel beklentilerini LCA metodolojisiyle tespit edilmesini açıklamakta ve bu metodolojiyle elde edilen iklim değişikliği çevresel etki kategorisinin sonuçlarının karşılaştırmalı bir analizini yaparak biri SF₆ gazlı, diğeri ise yalıtım ve anahtarlama ortamı olarak sentetik hava kullanılan iki ring ana ünite orta gerilim şalt cihazı modelinde yaşam döngüsünün temel katkılarını göstermektedir (Bas ve diğerleri, 2023).

Chen ve diğlerleri (2024) SF₆ ve süperkritik karbondioksit (scCO₂) devre kesicileri (CB'ler) arasındaki sera gazı (GHG) emisyonlarının karşılaştırmalı bir yaşam döngü analizi (LCA) sunmaktadır. LCA, çeşitli varsayımları entegre etme esnekliği sunan süreç tabanlı bir metodoloji olduğundan devre kesicilerin yaşam boyu emisyonlarını değerlendirmek için özel olarak tasarlanmış bir beşikten mezara LCA aracı geliştirmişlerdir. LCA sonuçları, scCO₂ devre kesicilerinin dış mekan kurulumları için emisyonları 100 ton CO₂e, iç mekan kurulumları için ise 150 tonun üzerinde CO₂e oranında önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir (Chen ve diğlerleri, 2024).

Bu çalışmada yazarlar 145 kV'a kadar nominal gerilime sahip yüksek gerilimli gaz yalıtımlı şalt cihazlarına odaklanmaktadır. Yazarlar, SF₆ gazının bu tür elektrikli ekipmanlarda kullanıldığında iklim etkisinin en büyük payına neden olsa da tek önemli çevresel etki kategorisi olmadığını, SF₆ ve onun alternatiflerinin bütünsel bir değerlendirmesi gerekmekte olduğunu, bu değerlendirmenin de yaşam döngü analizi ilkeleri ve çerçevesi olan ISO 14040 çerçevesinde en iyi şekilde sağlanabileceğini savunmaktadırlar. Ek olarak aynı çalışmada SF₆ ve mevcut iki alternatif teknoloji bu çerçeve kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir (Energy, 2022).

Pandya ve diğlerleri (2023) 145 kV yüksek gerilim devre kesicili (HVCB) gaz yalıtımlı şalt tesisi trafo merkezinin iki varyantının yaşam döngü analizinin sonuçlarını sunmaktadırlar. İlk olarak, her iki varyant için bir LCA çalışmasının gerçekleştirildiğini daha sonra SF₆ tabanlı ve SF₆ içermeyen HVCB gaz yalıtımlı şalt cihazının karşılaştırmalı bir LCA'sının gerçekleştirildiğini ve ardından sonuçların en etkili parametreler dikkate alınarak yorumlandığını belirtmektedirler (Pandya ve diğlerleri, 2023).



3. ELEKTRİK ENERJİSİ VE ELEKTRİK ENERJİSİNİN ÇEVRE İLE ETKİLEŞİMİ

3.1. Elektrik Enerjisi Ve Önemi

Elektrik enerjisi, sanayi üretiminden sağlık ve eğitim hizmetlerine, dijitalleşmeden ulaşım elektrifikasyonuna kadar tüm sektörlerin verimlilik ve refah düzeyini belirleyen temel girdidir. 2024'te küresel elektrik talebi %4,3 artarak son yılların en güçlü artışlarından birini göstermiş, bu durum elektrik şebekelerinin enerji dönüşümünde 'kritik omurga' rolünü pekiştirmiştir (IEA, 2025).

Elektrik, teknolojik devrimin temel yapı taşlarından biridir. Modern dünyada, artan enerji talebi yalnızca geleneksel enerji kaynaklarından karşılanamaz. Günümüzde elektrik enerjisi talebinin çoğu fosil yakıtların yakılmasıyla karşılanmakta, ancak bu durum olumsuz çevresel etkilere yol açmaktadır. Elektrik talebi ve arzı arasındaki açığı kapatmak için geleneksel olmayan ve çevre dostu enerji üretim yöntemleri değerlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji sistemleri (RES'ler), sera gazlarından (GHG) kaynaklanan zorlukları azaltmak için yeterli bir çözüm sunmaktadır. Ancak, belirli saha gereksinimleri olan öngörülemez bir güç üretimine sahiptirler (Basit ve diğerleri, 2020).

Elektrik enerjisi sektörü, dünyadaki her ülkenin ekonomik büyümesinde ve kalkınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Elektrik enerjisine olan küresel talep hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ekonomilerde artmaktadır. Ekonomilerin karbonsuzlaştırılmasına yönelik taahhüt, yani fosil yakıtların yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (YEK) değiştirilmesi ve küresel ısınma ve tehlikeli iklim değişikliğiyle mücadele etmek için ulaşım ve ısıtmanın elektrikleştirilmesi, dünya çapında elektrik tüketiminde bir artışa yol açacaktır (Strielkowski ve diğerleri, 2021).

Ayrıca, elektrik sistemlerinin kesintisiz işleyişi, ekonomideki aksamaları ve toplumsal maliyetleri asgariye çekmek açısından kritik bir role sahiptir (Klass ve diğerleri, 2022).

3.2. Enerji Talebindeki Artış Ve Sürdürülebilirlik İhtiyacı

Güneş, rüzgar, hidro, jeotermal ve biyokütle dahil olmak üzere çeşitli yenilenebilir enerji biçimlerinin oynadığı rol, küresel enerji dönüşümünün yönünü belirlemede hayati önem

taşıyor. Bu kaynaklar yalnızca teknik alternatifler değil; enerjinin nasıl üretilip tüketildiği konusunda önemli bir dönüşümü simgeliyor ve sürdürülebilirliğe, dayanıklılığa ve doğal dünyayla daha uyumlu bir dengeye daha geniş bir bağlılığı yansıtıyor (Hassan ve diğerleri, 2024).

Enerji, kalkınmanın ön koşuludur ve sürdürülebilir enerji sistemleri de sürdürülebilir kalkınmanın ön koşuludur. Dünya, özellikle son birkaç on yılda, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik arzındaki penetrasyon seviyelerinin birçok ülkede çift haneli yüzdelere ulaşmasıyla hızlı bir gelişmeye tanık olurken, birçok ülke ve ulaştırma gibi diğer sektörler yenilenebilir enerji penetrasyonu açısından hâlâ yalnızca başlangıç seviyesindedir (Østergaard ve diğerleri, 2020).

Tarihsel olarak, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar, küresel enerji altyapısının geliştirilmesi ve sürdürülmesi için temel teşkil etmiş ve modern dünya ekonomik ve teknolojik ilerlemesinin büyük bir kısmını desteklemiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) bir raporuna göre, 2019 itibarıyla dünya birincil enerji arzının %81'i bu fosil yakıtlardan elde edilmiştir (IEA, 2019; Hassan ve diğerleri, 2024).

Elektrik talebi; iklimlendirme, sanayide elektrifikasyon, e-mobilite ve yapay zekâ yükleriyle hızlanırken, enerji sistemlerinin güvenilirlik-ekonomi-çevresel etki üçgeninde dengelenmesi zorunlu hale gelmiştir. Şebekelerin modernizasyonu ve esneklik kaynaklarının devreye alınması, değişken yenilenebilirlerin payı büyürken arz güvenliğini korumanın ana yoludur (IEA, 2025).

Şebeke modernizasyonu, esneklik (depolama, talep yanıtı, kurumsal ölçekli esneklik kaynakları) ve akıllı dağıtım sistemleri bu denklemin ana bileşenleridir (Hachemi ve diğerleri, 2023; Gorman ve diğerleri, 2025).

3.2.1. Kurulu güç kavramı ve Türkiye'nin kurulu gücü

Elektrik enerjisi sistemlerinde kurulu güç, bir enerji üretim tesisinin veya tüm elektrik sisteminin nominal kapasitesini ifade eden temel bir göstergedir. Teknik olarak, belirli bir anda tüm üretim birimlerinin tam yükte ve eşzamanlı olarak çalışması durumunda maksimum üretililecek aktif güç miktarını (MW) temsil eder. Kurulu güç, enerji arz

güvenliği, planlama, yatırım ve sistem yeterliliği analizlerinde referans alınan başlıca parametrelerden biridir. Ancak, kurulu güç değeri tek başına gerçek üretim performansını yansıtmaz; kaynak türüne, kullanılabilirliğe ve kapasite faktörüne bağlı olarak fiili enerji üretimi bu değerden genellikle daha düşük olur. Bu nedenle, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini ve güvenilirliğini değerlendirmede kurulu güç, kapasite faktörü, talep profili ve yedek kapasite oranı gibi tamamlayıcı göstergelerle birlikte analiz edilmelidir.

Enerji arz güvenliğinin sürdürülebilir biçimde sağlanabilmesi için yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarına değil, aynı zamanda konvansiyonel baz santrallere de kurulu güç hesaplamalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle atalet ve harmonizasyon gibi sorunlarının çözüme kavuşturulmasıyla kurulu güç içindeki yüzde değerleri daha da artırılabilir.

Nüfus artışı, teknolojik gelişme, sanayileşme ve insanların yaşam standartlarındaki artış gibi çeşitli nedenlerle, ülkelerin enerji talebi ve kurulu kapasiteleri her geçen gün orantılı olarak artmaktadır. Günümüzde enerji sorunu artık ülkelerin kendi iç sorunları olmaktan çıkmış, küreselleşmiştir (Çelik ve Özgür, 2020).

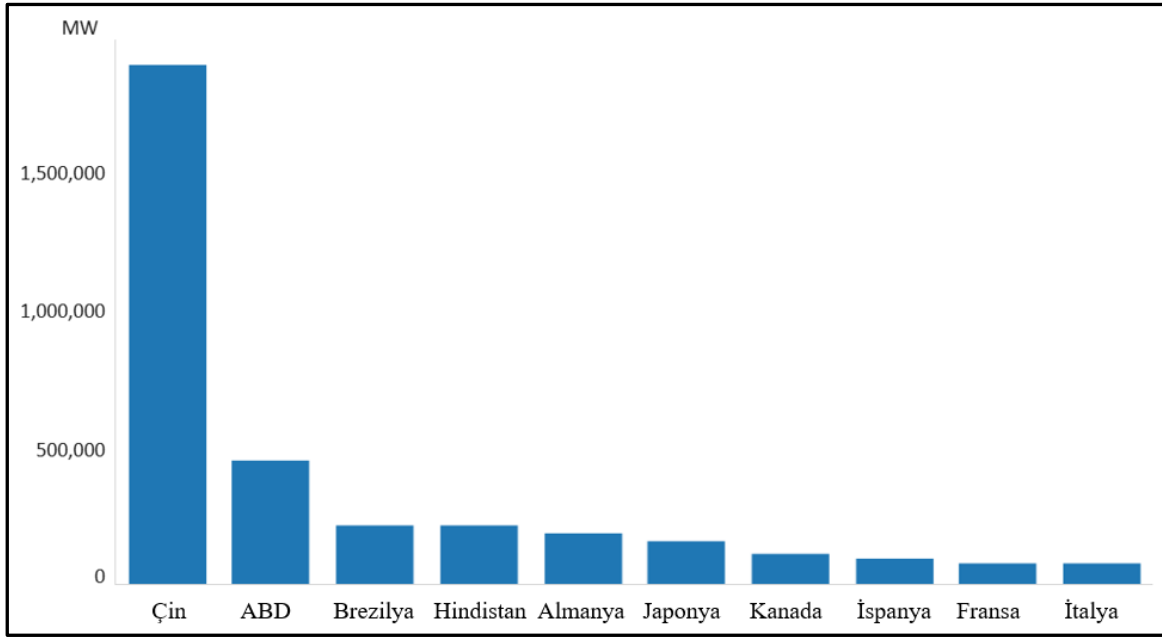
Türkiye enerji kaynaklarını verimli, etkin ve çevre dostu kullanmayı hedeflemektedir. İklim değişikliği konusunda ise Türkiye, Paris Anlaşması'nı imzalayarak 2030 yılına kadar sera gazı emisyonunu %21 oranında azaltmayı taahhüt etmiştir. Enerji dünyası yeşil enerjiye kaçınılmaz bir geçiş içerisindeyken, yenilenebilir enerjide %100 enerji dönüşümünü gerçekleştirme potansiyeli yüksek olan Türkiye, yenilenebilir enerji kullanımı konusunda 2023 hedeflerine ulaşmış olsa da sera gazı emisyonlarını azaltma hedefine ulaşmak için önünde uzun bir yol bulunmaktadır (Erat ve diğerleri, 2021).

Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynakları için üç farklı yatırım senaryosu oluşturulmuştur. Ayrıca, karasal rüzgar ve güneş fotovoltaik santralleri için yine üç farklı senaryoda küresel ve yerel maliyet projeksiyonları yapılmıştır. Bu senaryolar, Türkiye'nin yıllık kurulu güç değişimlerini tahmin etmek için kullanılmıştır (Insel ve diğerleri, 2022).

2025 yılı Eylül sonu itibarıyla Türkiye kuru gücü 121,48 MW'a ulaşmıştır. Kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı ; %26,6'sı hidroelektrik enerji, %20,2'si doğal gaz,

%18,1'i kömür, %11,7'si rüzgar, %19,9'u güneş, %1,4'ü jeotermal ve %2,1'i ise diğer kaynaklar şeklindedir (T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025).

Şekil 3.1'de kurulu güç sıralamasında (güneş, rüzgar, jeotermal, hidro kaynak vb. kaynaklar dahil) dünya sıralamasındaki ilk 10 ülke gösterilmiştir. Türkiye 2024 yılında 115,83 MW kurulu gücü değeri ile Kanada ve Japonya arasında yer almaktadır (International Renewable Energy Agency, 2024)



Şekil 3.1. Dünyadaki en büyük kurulu güce sahip ilk 10 ülke (International Renewable Energy Agency, 2024)

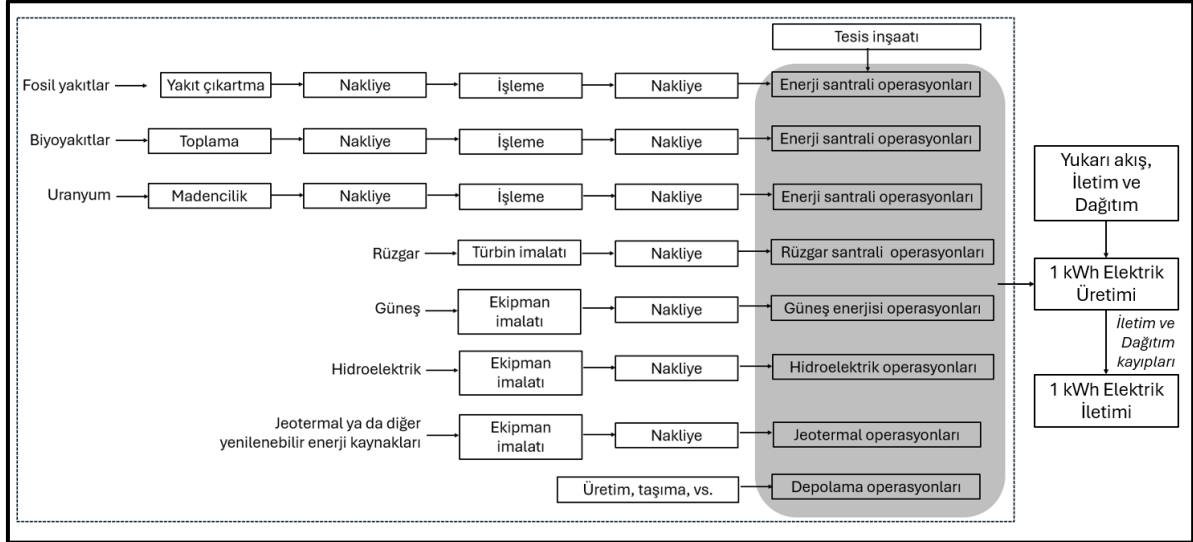
3.3. Elektrik Enerjisinin Üretimi

3.3.1. Konvansiyonel enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi

Elektrik, teknolojik bir devrimin temel yapı taşlarından biridir. Günümüzde elektrik talebinin çoğu fosil yakıtların yakılmasıyla karşılanmakta ancak yalnızca geleneksel enerji kaynakları artan enerji talebini karşılayamaz. Buna rağmen olumsuz çevresel etkilere de yol açmaktadır. Elektrik talebi ve arzı arasındaki açığı kapatmak için geleneksel olmayan ve çevre dostu enerji üretim yöntemleri değerlendirilmektedir (Basit ve diğerleri, 2020).

Şekil 3.2'de gri alan, şebekeyi ve güç üretim birimleri arasındaki etkileşimleri temsil eder. Tüm konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının amacı en verimli, en ekonomik, en

çevreye duyarlı yöntem ile kWh biriminde üretilen elektrik enerjisinin son kullanıcıya ulaştırılmasıdır (Jordaan ve diğerleri, 2021).



Şekil 3.2. Elektrik enerji şebekesindeki güç üretim sistemleri arasındaki ilişki (Jordaan ve diğerleri, 2021).

Kömür ve doğal gaz çevrimleri hâlen taban ve yük izleme işlevleriyle sistem işletiminde rol oynamakta; ancak karbon maliyetleri, yakıt fiyat oynaklığı ve çevresel etkiler nedeniyle 'esnek ve daha düşük emisyonlu' bir geçiş işlevine evrilmektedir.

Geleneksel fosil yakıtlar, kaynakların tükenmesi şeklinde potansiyel bir tehdit oluşturan yenilenemeyen bir türdür. Küresel ölçekte, yıllık 11 milyar ton fosil yakıt tüketimi ve fosil yakıtlardan tüketilen enerji %82,67'dir (Nanthagopal ve diğerleri, 2019), bu da küresel ısınmaya ve şebeke karbonsuzlaşmasına katkıda bulunmaktadır (Aghajanzadeh ve Therkelsen, 2019).

Konvansiyonel üretim tesislerinin minimum yüklerini düşürme, hızlı devreye girme/çıkma kabiliyeti kazanma ve hibrit işletme stratejileri üzerine çalışmalar artmaktadır (Gui ve diğerleri, 2024; Nassar ve diğerleri, 2025).

Fosil yakıtlardan kaynaklanan iklim değişiklikleri ve sağlık sorunları insanları tehdit etmektedir. Hükümetler, bu sorunları en aza indirmek için enerji stratejilerini ve politikalarını gözden geçirmeye başlamıştır. Sera gazlarını ve ilgili sorunları kısmen veya tamamen azaltmak için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Mevcut teknolojilerin verimliliğini

artırmak, verimli ve daha düşük çevresel etkilere sahip yeni cihazlar geliştirmek ve/veya yenilenebilir enerji kaynaklarına kısmen veya tamamen geçiş yapmak önerilen farklı yöntemlerdir. İkincisi, yani yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) güvenmek, fosil yakıtlardan kısa sürede kurtulmak için en umut verici yöntemdir (Olabi ve diğerleri, 2022).

Ülkelerin altyapı, otomasyon, ulaşım ve teknoloji açısından sürekli büyümesi ve gelişmesiyle birlikte çevreye çok miktarda zararlı emisyon yayılmaktadır. Artan çevre bilinci ve iklim değişikliğinin olumsuz sonuçları, hükümetleri karbon ayak izlerini azaltmaya yöneltmektedir (Barman ve diğerleri, 2023).

İklim değişikliğiyle ilgili zorlukların artan aciliyeti, enerji güvenliği ve ekonomik istikrara olan eş zamanlı ihtiyaçla birleşince, enerji kaynaklarımızın geleceği hakkında küresel bir tartışmayı başlatmıştır. Bu tartışmanın merkezinde, giderek yalnızca geleneksel enerji kaynaklarına bir alternatif olarak değil, aynı zamanda çevre, ekonomi ve daha geniş toplumsal değerlerle ilişkimizi kökten yeniden şekillendirmede önemli bir unsur olarak görülen yenilenebilir enerjiye geçiş yer alıyor (Hassan ve diğerleri, 2024).

Yenilenebilir enerji kaynakları, kendini yenileyebilen ve azalmayan yakıt kaynaklarından üretilen enerjidir. "Yenilenebilir" terimi, tükenmeyen ve yeniden doldurulabilen ortak özelliklere sahip enerji kaynakları ve teknolojileri için kullanılır. Yenilenebilir kaynaklar arasında güneş enerjisi, rüzgar, düşen su, jeotermal enerji, bitkisel maddeler, biyokütle, dalgalar, okyanus akıntıları, sıcaklık farkları, okyanus enerjisi ve gelgitler bulunur (Strielkowski ve diğerleri, 2021).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) elektrik üretmek için kullanımı dünya çapında önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Bunun nedeni, atmosfere muazzam miktarda karbondioksit ve diğer sera gazları salan enerji dönüşümü için fosil yakıt yakmanın olumsuz çevresel etkisidir (Viteri ve diğerleri, 2019).

Güneş ve rüzgâr enerjisi, maliyet düşüşleriyle birlikte elektrik üretim karmasında hızlı bir büyüme göstermektedir (Advancements and Challenges in Integrating Renewable, 2024). Ancak bu kaynakların doğası gereği değişken olması, üretim ile talep arasındaki saatlik ve mevsimsel eşleştirme, enerji depolama sistemleri ve ağ esnekliği gerektirir (Alanazi et al.,

2025). Ayrıca hibrit sistemler (nükleer + yenilenebilir) planlaması da araştırmalarda öne çıkmaktadır (Nassar ve diğerleri, 2025).

Güneş ve rüzgâr başta olmak üzere temiz kaynakların payı küresel üretimde 2024'te %40'ı aşan 'temiz elektrik' bileşiminin temel sürükleyicisidir. Düşen LCOE değerleri bu ivmeyi desteklemektedir. Ancak yüksek penetrasyon; şebeke kısıtları, aralıklılık ve esneklik gereksinimleri nedeniyle iletim-dağıtım altyapısında yatırım gerektirir.

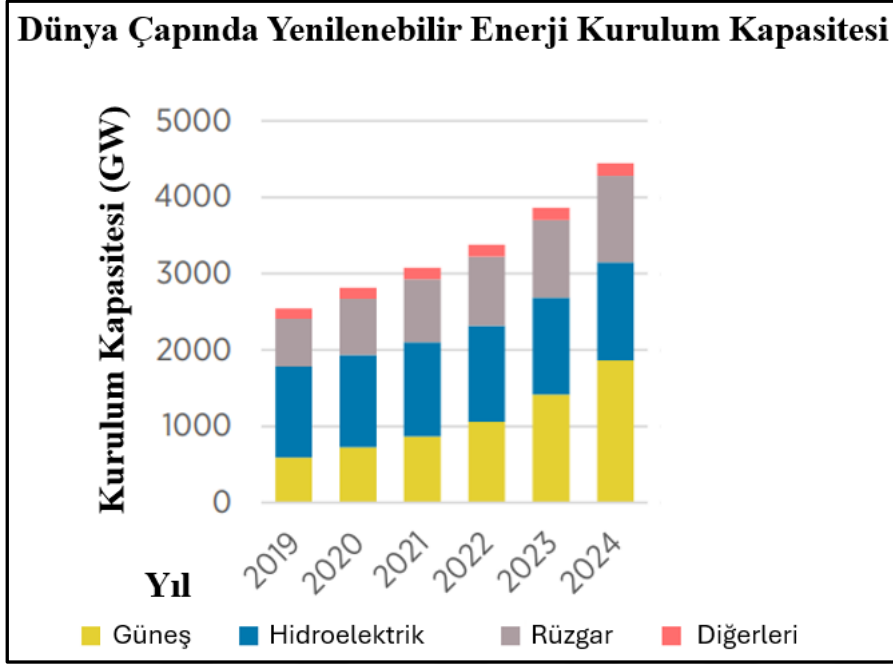
Yenilenebilir enerji haritası senaryosundan elde edilen verilerden yararlanan bulgular, yenilenebilir enerji kaynaklarının 2050 yılına kadar küresel birincil enerji arzının üçte ikisine kadarını karşılayabileceğini gösteriyor (Hassan ve diğerleri, 2024).

2012 yılından bu yana dünya genelinde milyonlarca yenilenebilir enerji kapasitesi kurulmuş ve bu da yeni yenilenebilir projelerin geliştirilmesi, kurulumu ve işletilmesinde önemli teknolojik ilerlemeler kaydedildiğini göstermektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından yapılan son bir değerlendirmeye göre, 2022 yılına kadar 3068 GW kurulu güç elde edilmiş olacaktır. Bu kurulu gücün %1,8'i Afrika'da, %21,1'i Avrupa'da, %14,94'ü Kuzey Amerika'da, %8'i Güney Amerika'da ve %47,4'ü Asya'da kurulmuştur. Bu da Asya'yı, geleneksel enerji kaynaklarının yerini almaya en çok katkıda bulunan kıta haline getirmektedir. Çizelge 3.1, beş kıta için güneş, rüzgar, biyoenerji ve hidroelektrik enerji kaynaklarının 2021 yılına kadar kurulu kapasiteleri ve 2020 yılındaki enerji üretimi istatistiklerini göstermektedir (Sayed ve diğerleri, 2023).

Çizelge 3.1. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kurulu güçleri ve elektrik üretimi (Sayed ve diğerleri, 2023)

Kıta	Güneş Enerjisi		Rüzgar Enerjisi		Biyoenjerji		Hidroelektrik	
	Kapasite (MW)	Enerji (GWh)	Kapasite (MW)	Enerji (GWh)	Kapasite (MW)	Enerji (GWh)	Kapasite (MW)	Enerji (GWh)
Asya	485,948	447,985	385,393	555,824	56,969	211,827	594,267	1,927,807
Afrika	11,393	17,037	7334	10,557	1785	3203	37,677	141,437
Avrupa	187,360	167,605	220,760	488,412	41,712	206,760	224,393	608,207
Kuzey Amerika	105,881	137,703	154,733	397,157	16,956	72,683	198,026	722,078
Güney Amerika	19,649	22,126	29,754	79,601	18,484	71,882	178,033	672,569
Okyanusya	23,242	21,548	9827	22,760	1104	4285	14,498	41,314
Toplam	854,795	843,855	823,484	1,588,586	143,195	583,775	1,360,502	4476,230

Yenilenebilir enerji tabanlı üretim kapasitesi yıllar içinde kademeli olarak artmaktadır. COVID-19 pandemisinin ciddi etkilerine rağmen 2021 yılı sonunda yenilenebilir enerji kurulu gücü yaklaşık 3060 GW değeri ile küresel kurulu gücün %38'ine ulaşmıştır (Hemeida ve diğerleri, 2022). 2024 yılı sonunda ise küresel yenilenebilir enerji kurulu gücü 4448 GW değerine ulaşmış olup Şekil 3.3'de gösterildiği gibi bu artış yukarı yönlü olarak artmaktadır. Yıllar içerisinde güneş enerjisinden ve rüzgar enerjisinden üretilen enerjinin artışı dikkat çekmektedir (IRENA., 2025).



Şekil 3.3. Toplam yenilenebilir enerji kaynağı kurulu gücü (2019-2024) (IRENA., 2025)

Gaz türbinleri pahalı, tehlikeli ve ileri teknolojiler gerektirdiği için gelişmiş ülkelerde yoğunlaşmıştır. Son zamanlardaki katkıları ihmal edilebilir düzeydedir ve 2050 yılına kadar %3'ü aşmaması beklenmektedir. Çoğu yenilenebilir enerji kaynağı, kaynağının bölgesine özgüdür, ancak belirli bir yer incelenen tüm yenilenebilir türlerinin kurulumu için uygunsa, önce güneş termik santralleri, ardından güneş fotovoltaik santralleri gelir. Rüzgar santrallerini takiben biyokütle santralleri gelir. Jeotermal santraller ise en son gelir (Hemeida ve diğerleri, 2022).

3.4. Elektrik Enerjisinin İletimi

Yüksek paylı yenilenebilir enerji entegrasyonu için iletim altyapısının kapasitesinin artırılması, enterkoneksiyonların güçlendirilmesi ve akıllı iletim teknolojilerinin (WAMS, geniş alan stabilizasyon kontrolü) uygulanması gereklidir (Gui ve diğerleri, 2024).

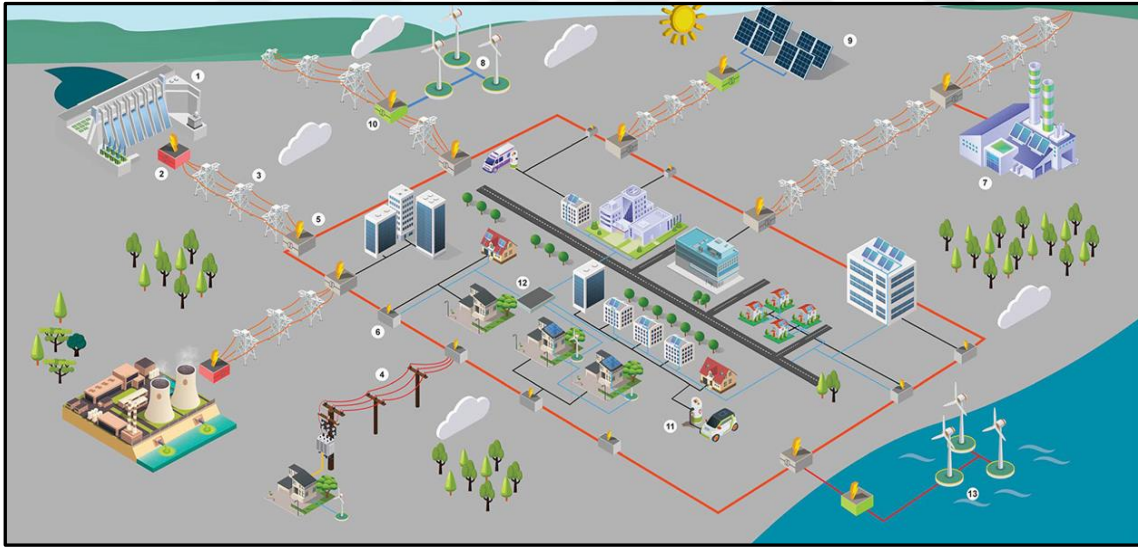
Aşırı iletim yoğunluğu (grid congestion), enerji güvenliğini tehdit eden bir unsur haline gelmektedir (IEA, 2025). Ayrıca, büyük ölçekli yenilenebilir bağlantı projeleri birçok ülkede bağlantı kuyruklarında beklemektedir (Gorman ve diğerleri, 2025).

İletim tarafında ise, temel modern güç iletim teknolojileri, esnek AC iletim sistemi (FACTS) ve yüksek gerilim DC iletim sistemi (HVDC) gibi güç elektroniği dönüştürücülerine

dayanmaktadır. Elektrik enerjisinin esnek ve verimli iletimi için, güç iletim sisteminde FACTS ve HVDC'nin oranı dünya çapında artmaktadır (Shair ve diğerleri, 2021).

3.5. Elektrik Enerjisinin Dağıtımı

Elektrik iletim ve dağıtım şebekesi; Elektrik üretim santrallerinde üretilen elektriği kullanıcılara iletmek için oluşturulmuş bileşik bir ağıdır. Bu şebeke üretim santralleri, iletim ve dağıtım hatları ile çeşitli gerilim ve güçlerdeki trafo merkezlerinden oluşur. Akıllı ve dağıtık şebekeler kapsamında elektrik şarj istasyonları, enerji depolama merkezleri, güneş ve rüzgar santralleri de artık bu ağın ayrılmaz birer parçasıdır. Resim 3.1'de gösterimi verilen üretim, iletim, dağıtım şebekesinde; 1) Elektrik üretim santrali (HES), 2) Yükseltici trafo merkezi, 3) Elektrik iletim hattı, 4) Elektrik dağıtım hattı, 5) İndirici trafo merkezi, 6) OG/AG trafo merkezi, 7) Endüstri tesisi, 8) Rüzgar santrali (RES), 9) Güneş santrali (GES), 10) Toplayıcı trafo merkezi, 11) Elektrikli araç şarj istasyonu, 12) Enerji depolama merkezi, 13) Deniz üstü rüzgar santrali (DRES) olarak tanımlanmıştır.



Resim 3.1. Elektrik üretim, iletim, dağıtım şebekesinin entegrasyonu

Dağıtım sistemleri de dağıtılmış üretim (DG), dc dağıtım şebekeleri ve güç elektroniğinin temel etkinleştirici teknoloji olduğu mikro şebekeler dahil olmak üzere hızlı tempolu pratik uygulamalara sahip yeni ortaya çıkan kavramlar nedeniyle dönüşüm geçirmektedir (Shair ve diğerleri, 2021).

3.5.1. Konvansiyonel enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin dağıtımdaki rolü

Dağıtım şebekeleri, merkezi üretimin yanı sıra dağıtık enerji kaynaklarının hızla yayıldığı 'aktif ağlara' dönüşmektedir (Adefarati and Bansal, 2017).

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yerel ölçekte uygulanabilirliğinin artması ile birlikte şebekeye entegre edilen çok sayıdaki dağıtık üretim birimi, enerji akışının tek yönlü olduğu merkeziyetçi modelin etkinliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu gelişmeler beraberinde dağıtım şebekelerinin hem bölgesel düzeyde üretilen enerjiyi hem de geleneksel kaynaklardan sağlanan gücü eş zamanlı olarak yönetebilen dinamik ve esnek altyapılara dönüşmesini zorunlu kılmaktadır. Merkezi üretim yaklaşımı güncelliğini önemli ölçüde yitirirken dağıtık enerji üretim odaklı aktif elektrik enerji dağıtım ağları enerji sistemlerinin yeni normu haline gelmektedir.

3.5.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin dağıtımdaki rolü ve dağıtım sistemlerine entegrasyonu

Enerji iletim ve dağıtım şebekeleri, başlangıçta merkezi santrallerden kilometrelerce uzaktaki tüketicilere elektrik dağıtmak için tasarlanmış ve tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, esas olarak değişken yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanan dağıtılmış üretim sistemlerinin artan varlığı ve şebekeye bağlı elektrikli arabalar ve düşük gerilim noktaları gibi değişken yük kullanıcılarının sayısının artması nedeniyle artık geçerliliğini yitirmiştir (Zarco-Soto ve diğerleri, 2021).

Merkezi olmayan üretimin gelişimi o kadar ilerledi ki, bugün küresel yıllık dağıtılmış üretim kapasitesi artışları merkezi elektrik sistemlerini geride bıraktı (Kabeyi ve diğerleri, 2022).

Yüksek PV/rüzgâr penetrasyonu; gerilim kontrolü, ters akım akışı, koruma koordinasyonu, yük dengesizlikleri ve harmonik bozulmalar gibi konularda teknik zorluklar doğurur. Akıllı cihazlar, enerji depolama, dağıtık kontrol sistemleri ve güç elektroniği tabanlı çözümler (örneğin SOP/STATCOM) bu zorlukların üstesinden gelmek için öne çıkan yaklaşımlardır (Choobdari ve diğerleri, 2024; Alanazi ve diğerleri, 2025).

Son dönem çalışmalar, SOP'ların LV/MV dağıtım ağlarında gerilim kararlılığını ve dağıtım kapasitesini anlamlı ölçüde artırdığını göstermektedir (Mardanimajd ve diğerleri, 2024).

3.5.3. Elektrik enerjisinin dağıtım altyapısının güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından önemi

Yenilenebilir DG + depolama kombinasyonları, uygun konum-boyutlandırma ile sistem güvenilirliğini artırır; Markov temelli modeller ve maliyet-değer (worth) analizi literatürde yerleşik yaklaşımlardır (Adefarati ve Bansal, 2017).

Yenilenebilir enerji üretiminin büyümesi ve şebekeye entegrasyonu, güç sistemi operasyonunun güvenliği ve istikrarını etkilemeye başlamıştır. Dolayısıyla, rüzgar ve güneş fotovoltaik (FV) gibi yenilenebilir enerji kaynakları (RES) yavaş yavaş geleneksel enerji santrallerinin yerini almaya başladıkça, şebeke entegrasyon gereksinimleri önemli bir endişe haline gelmiştir. Bu doğrultuda, şebeke istikrarını sağlamak için bazı yeni gereksinimler ve teknik düzenlemeler oluşturulmuştur (Al-Shetwi ve diğerleri, 2020).

Dağıtım seviyesinde yenilenebilir-depolama entegrasyonu, yaşam döngüsü emisyonlarının (gCO_{2e}/kWh) düşürülmesinde üretim karmasıyla birlikte belirleyici rol oynar; şebeke yatırımları, kısıntıların azalması ve kayıpların düşmesiyle dolaylı etkiler üretir (Jordan, 2021).

Güncel LCOE/LCOS eğilimleri ve talep artışı (EV, ısı pompaları, veri merkezleri) ışığında, dağıtım altyapısının güçlendirilmesi hem kısıntıları hem de fosil yedek ihtiyacını azaltarak çevresel etkilerin yönetimine katkı verir.

3.6. Elektrik Enerjisinin Yaşam Döngüsü Boyunca Çevresel Etkileri

Elektrik enerjisi, üretim, iletim, dağıtım ve tüketim süreçlerinin tümü boyunca çok sayıda çevresel etki oluşturur. Bu etkilerin analizinde yaşam döngüsü bakışı sunan çalışmalar, enerji sistemlerinde sürdürülebilir kararları desteklemek açısından kritik öneme sahiptir.

Enerji sektörü, Sera Gazı (GHG) emisyonlarına en büyük katkıda bulunan sektörlerden biridir. Elektrik üretimi kaynaklı GHG emisyonlarını azaltmak için enerji sektörü önemli ölçüde dikkat çekmiştir (Wang ve diğerleri, 2019).

3.6.1. Konvansiyonel enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin çevresel etkileri

Konvansiyonel enerji teknolojileri - özellikle kömür ve doğal gaz santralleri - yaşam döngüsü boyunca yüksek sera gazı emisyonları, hava kirliliği (NO_x, SO₂, partikül maddeler), su kullanımı ve arazi bozunumu gibi etkiler üretir. Ayrıca altyapı ve yakıt tedariki zincirindeki faaliyetler (örneğin maden işletmeleri, taşımacılık) bu etkileri artırır.

Fosil yakıtların yanması, metan ve karbon oksitler ile nitrür gibi sera gazlarının (GHG) salınmasıyla ciddi bir çevre sorununa neden olur. Yük talebindeki üstel artış, iklim değişikliğine, deniz seviyesinin yükselmesine ve ciddi sağlık sorunlarına neden olan GHG emisyonlarını artırır. Fosil yakıtlar sürdürülebilir değildir ve tükenme tehlikesiyle karşı karşıyadır. Ayrıca fiyatları da hızla artmaktadır (Hemeida ve diğerleri, 2022).

Fosil yakıtlar geri dönüştürülemez olduğundan, fosil yakıtların tükenmesi tehlikeli enerji güvenliğini, fiyat dalgalanmalarını ve istikrarsız piyasaları artırır. Ayrıca, sağlık sorunları nedeniyle olumsuz bir sosyal etkiye sahiptir (Arora ve diğerleri, 2022; Asongu ve diğerleri, 2020).

Bir diğer sorun ise, fosil yakıt tüketiminden doğrudan ve dolaylı olarak kötü etkilenen insan sağlığı ve sonuçlarının tedavisinin kaçınılmaz maliyetidir. Fosil yakıt tüketimi ile ölüm oranı arasındaki ilişki, çoğunlukla fosil yakıt ve küçük bir oranda yenilenebilir enerji sistemlerine bağımlı olan Bağımsız Devletler Topluluğu için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, karbondioksit emisyon oranı ile kardiyovasküler hastalık, kanser ve kronik solunum yolu hastalıklarından kaynaklanan ölüm oranı arasında pozitif orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir (Rasoulinezhad ve diğerleri, 2020; Hemeida ve diğerleri, 2022).

3.6.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin çevresel etkileri

Güneş, rüzgâr, biyokütle gibi kaynaklara ilişkin yaşam döngü analizleri, bu teknolojilerin genel olarak daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Ancak bu avantaj, kullanılan malzemeler (örneğin cam, silisyum, çelik, beton), üretim süreçleri, bakım, ömür sonu geri kazanım/kaldırma süreçleri gibi faktörlerle hassaslaşır.

Enerji üretimi için fosil yakıtların kullanılması, iklim değişikliğinin ve küresel ısınmanın başlıca sebebinin meydana getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, karbon emisyonlarının önlenmesinde ve iklim değişikliğinin azaltılmasında hayati öneme sahiptir (Osman ve diğerleri, 2023).

İklim değişikliği ve çevresel bozulma karşısında sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru önemli bir kaymaya yol açmıştır (Gayen ve diğerleri, 2024). Çevresel kaygılara ve özellikle iklim değişikliğine karşı duyarlılık, yenilenebilir enerjiye desteğin önemli bir itici gücüdür (Virah-Sawmy ve diğerleri, 2025).

Azalan fosil yakıt rezervleri ve çevresel endişeler göz önüne alındığında, artan küresel enerji zorluklarını karşılamak ve enerji seçeneklerini çeşitlendirmek için sürdürülebilir, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine acil ihtiyaç duyulmaktadır (Thirumalaivasan ve diğerleri, 2024).

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde çevresel etkiler arasında büyük bir sapma vardır. En az çevresel riske sahip en iyi tür, güneş santrallerine aittir. En yüksek ve en ciddi çevresel etkilere sahip yenilenebilir enerji kaynak türü ise jeotermal santraller ve biyokütle santralleridir. Güneş ve rüzgar santralleri bunların arasındadır (Hemeida ve diğerleri, 2022).

3.6.3. Elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinin çevresel etkilerdeki rolü

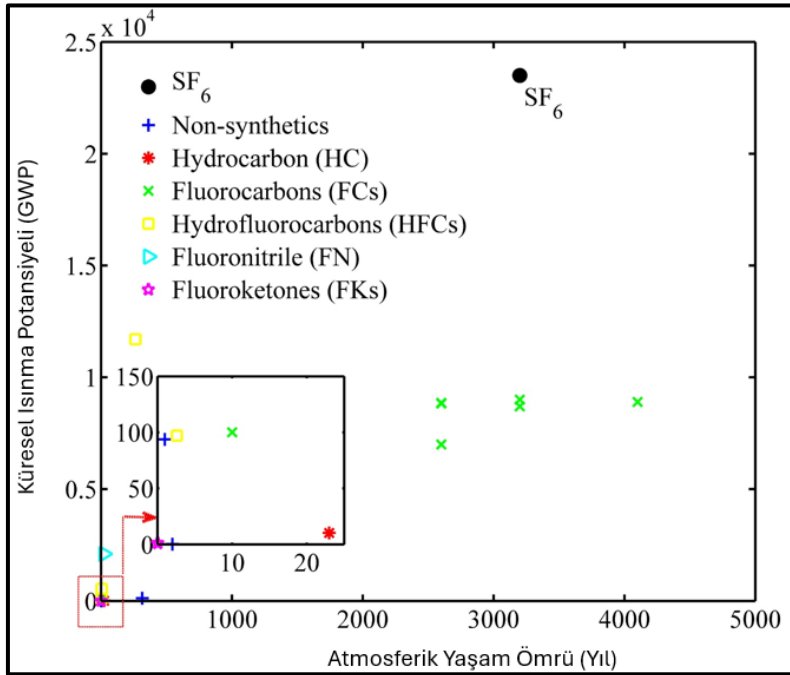
Dağıtım şebekeleri, kablo, trafo, anahtarlama teçhizatları gibi altyapı bileşenlerinin üretimi ve inşası ile işletme sırasında meydana gelen kayıplar ve kaçaklar üzerinden çevresel etki yaratır. Özellikle SF₆ yalıtkan gazı kullanan ekipmanlardan kaynaklanan kaçaklar, yüksek global ısınma potansiyeli nedeniyle önemli katkı sağlar.

Kükürt hekzaflorür (SF₆), 100 yıllık bir zaman diliminde 23.500 GWP değeri ile bilinen en yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip sera gazıdır. Öncelikle enerji endüstrisindeki yüksek voltajlı elektrik ekipmanlarında, örneğin gaz yalıtımlı şalt tesislerinde, iletim hatlarında ve transformatörlerde kullanılır ve burada dielektrik ve yalıtkan görevi görür (Vojta ve diğerleri, 2024).

Kükürt hekzaflorür (SF_6), toksik olmayan, kokusuz, yanıcı olmayan ve kimyasal olarak kararlı bir gazdır. Kimyasal kararlılığının yanı sıra, ısı ve ışık kaynaklı enerji emisyonlarında da etkili bir soğurucudur. Yüksek elektrik alanlarında bile elektron bağlanma kesiti toplam iyonlaşma kesitinden daha büyük olduğundan yüksek dielektrik sabitine sahip elektronegatif bir gaz olan SF_6 , 1950'lerden beri güç sistemi iletim ve dağıtım ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Düzkaya ve diğerleri, 2020).

Endüstriyel amaçlarla kullanılan sentetik gazlar arasında en yüksek GWP değerlerinden birine sahip olan SF_6 kullanımının, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) taraf olan ülkelerle, 1997 Kyoto Protokolü ve 2012 Kyoto Protokolü Doha Değişikliği anlaşmalarıyla sınırlandırılması önerilmektedir.

SF_6 gazının atmosferik ömrü yaklaşık 3200 yıldır ve bu da çevresel etkileri daha da önemli hale getirmektedir. SF_6 kullanımının kısıtlanmasını öneren bu anlaşmalara rağmen, atmosferdeki oranı artmaya devam etmektedir. Kyoto Protokolü'nün imzalandığı 1997 yılında atmosferdeki oran 3,94 ppt (trilyonda parça) iken, bu oran 2015 yılında 8,61 ppt'ye yükselmiştir. Atmosferdeki SF_6 konsantrasyonu 20 yılda iki kattan fazla artmıştır. Şekil 3.4'de SF_6 gazının diğer gazlara göre atmosferik yaşam ömrünün küresel ısınma potansiyeline etkisini göstermektedir (Düzkaya ve diğerleri, 2020).



Şekil 3.4. SF_6 'ya alternatiflerin GWP ve atmosferik yaşam ömürleri (Düzkaya ve diğerleri, 2020)

Çoğu orta gerilim tasarımları, enerjili faz iletkenlerinin sızdırmaz ve basınçlı gaz dolu bölmelerle çevrelediği bu bara yalıtım sistemi için SF₆ kullanır. Açıklandığı gibi, gaz saf halde toksik olmasa da, elektriksel deşarj sırasında meydana gelen bir sistem arızası, arklı SF₆ ve çok sayıda toksik kimyasalın potansiyel olarak salınmasına neden olur. SF₆, anahtarlama ürünü sökülürken ve hizmetten çıkarılırken de salınabilir (Durocher ve diğerleri, 2015).

SF₆ gazına alternatif çözümlerin büyük ölçekli uygulamaları, mevcut teknolojik altyapı tarafından desteklenmektedir. SF₆ içermeyen şalt cihazlarının tasarımına yönelik araştırmalar halen sürmektedir. Bu durum, uzun yıllardır süregelen kompakt ve rekabetçi şalt cihazlarının üretimi ile sahada etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, SF₆'sız anahtarlama ekipmanlarının dielektrik dayanımı, termal performansı, mekanik özellikleri ve kullanım ömrü sonu kriterleri açısından bütüncül ve sistematik bir tasarım yaklaşımı gerektirdiği vurgulanmaktadır. Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan raporda, bu teknolojiler ileri düzey çözümler olarak nitelendirilmektedir (European Union Regulations 2024/573; Binnendijk ve diğerleri, 2021).

Avrupa Komisyonu ve Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu (CARB) gibi çeşitli florlu gaz düzenleyici kuruluşlar, şalt cihazlarının hem yalıtımı hem de anahtarlama davranışı için SF₆ gazına alternatifler talep etmektedir. Bu durum, şu anda piyasada farklı üreticiler tarafından sunulan çeşitli alternatiflerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Her birinin, günümüzün SF₆ gazlarıyla karşılaştırıldığında farklı özellikleri ve kullanım gereksinimleri vardır (Venna ve diğerleri, 2023).

SF₆ gazına alternatif olarak flor içeren C5-FK ve C4-FN gibi bileşiklerin yanı sıra, azot (N₂), oksijen (O₂) ve karbondioksit (CO₂) gazlarının çeşitli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen gaz karışımları da değerlendirilmektedir. Bu alternatiflerin uygunluğu, elektriksel performans testleri ve çevresel etki analizleri aracılığıyla belirlenebilmektedir (Venna ve diğerleri, 2023).

Sentetik hava olarak adlandırılan kuru hava türüyle, yüksek saflıkta azot (N₂) ve oksijen (O₂) gazlarının karıştırılmasıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, 24 kV gerilim seviyesinde SF₆ gazına çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif sunulmaktadır (Inchausti ve diğerleri, 2023).

Dielektrik ortam olarak en iyi çözüm kuru hava ve kesme cihazı olarak bir vakum kesici kullanılması, bu çözüm ile kırılma sonrasında alternatif gazların ve bunların toksik yan ürünlerinin oluşmasını önleneceği için ve kazara gaz salınımı durumunda insan güvenliği açısından herhangi bir risk oluşmasını engellenecektir (Preve ve diğerleri, 2020).

3.6.4. Çevresel yaklaşım metotları

Ürün ve süreçlerin çevresel etkilerini bütünsel bir bakış açısıyla değerlendirmek ve görünür kılmak için ortak yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; LCA (Yaşam Döngü Analizi), enerji sistemleri için yaygın kullanılan bir yöntemdir. ISO standartları çerçevesinde ürün ya da sistemlerin ham maddeden ömür sonuna kadar çevresel etkileri değerlendirilir. Water footprint (Su Ayak İzi), özellikle su kullanımı baskısı olan bölgelerde, enerji projelerinin su tüketim etkilerini analiz eder. S-LCA (Sosyal LCA) ise yaşam döngüsü perspektifinden sosyal ve iş gücü, haklar, sağlık gibi boyutları değerlendirir. Diğer tamamlayıcı yöntemler arasında Malzeme Akış Analizi (MFA), Kümülatif Enerji Talebi (CED) ve Yaşam Döngü Maliyeti (LCC) gibi yaklaşımlar yer alır.

3.6.5. Yaşam döngü analizinin (LCA) gerekliliği

LCA, alternatif enerji teknolojileri, altyapı kararları ve politika senaryoları arasında karşılaştırma olanağı tanır. Bu sayede üretim ve dağıtım süreçlerinin sistem düzeyinde çevresel etkileri nicelendirilebilir ve sıcak noktalar (örneğin malzeme, taşıma, kaçaklar) belirlenebilir. Karar vericiler bu sonuçları dikkate alarak yatırımlarını ve stratejilerini optimize edebilir.

Yaşam döngü analizi (LCA), bir ürün veya sürecin çevresel yüklerini malzeme çıkarımından atık bertarafına (beşikten mezara veya hatta beşikten beşiğe) kadar değerlendiren güçlü bir karar destek aracıdır. Zamanla, LCA, enerji teknolojilerinin çevresel etkilerini giderek daha fazla ele almaya başlamıştır. LCA'nın enerji politikası için bir karar destek aracı olarak artan rolüyle birlikte, hızlı tempolu ve gelişen bir sektörde belirsiz varsayımlar karşısında sonuçların nasıl kullanılması gerektiği konusunda sorular devam etmektedir. Bazı durumlarda, yaşam döngüsü sonuçları, enerji sistemleri hakkındaki bilgimizi geliştirerek ve hatta politika kararlarını etkileyerek enerji sektörünün evriminde etkili olmuştur (Jordan ve diğerleri, 2021).

LCA, belirli sistem veya ürünlerin çevresel etkileri hakkında nesnel ve bilimsel temelli bilgi sağlamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Skaar ve diğerleri, 2022). Yaşam döngü analizi (LCA), yeni ürün, teknoloji ve sistemlerin erken sürdürülebilirlik değerlendirmelerini sağlayabilen güçlü araçtır (Bisinella ve diğerleri, 2021).

Yaşam döngü analizi (LCA), bir ürün sistemiyle ilişkili çevresel etkileri, yaşam döngüsü boyunca, malzeme kaynaklarını, enerji girdilerini ve emisyonları beşikten mezara yaklaşımıyla envanterleyerek değerlendirmek için kullanılan nicel bir yöntemdir (ISO 14040:2006).

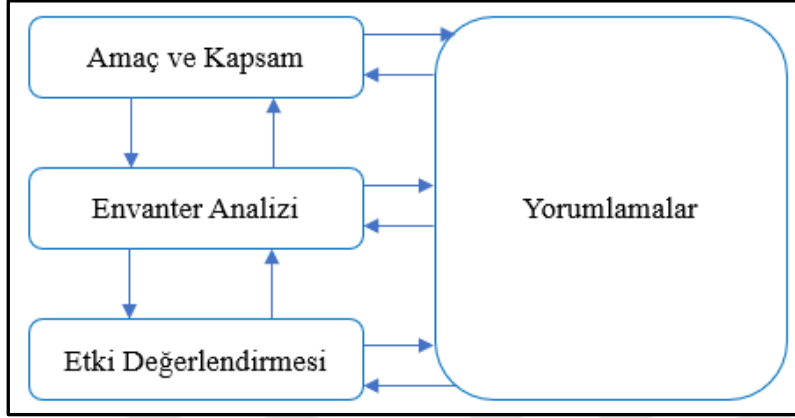
LCA'nın karar alma sürecinde ne tek ne de nihai adım olduğunu kabul etmek çok önemlidir. Aksine, çeşitli girdi alternatiflerinin potansiyel çevresel sonuçlarını değerlendiren şeffaf bir süreçtir (Portillo ve diğerleri, 2024; Shahabian ve diğerleri, 2019). Çevresel ve ekonomik yönleri ele alan entegre LCA, daha bilinçli kararlar almak için hayati önem taşımaktadır (Gobio-Thomas ve diğerleri, 2023).

LCA, politika bağlamında karar desteği için bir referans yöntemi olarak da kabul edilmektedir. Örneğin, AB bağlamında, çeşitli girişimler ve pilot projeler Avrupa Çevresel Ayak İzi girişimiyle (EC 2013) ilişkilidir. Dahası, LCA, AB Daha İyi Düzenleme araç kutusunda (EC 2015) politika etki değerlendirmesini desteklemek için benimsenecek yöntemler arasında dahil edilmiştir. Bu ortamda, LCA sonuçlarının sağlam ve güvenilir bir şekilde yorumlanması şarttır (Sala ve diğerleri, 2020). Hızlı büyüme yaşayan yeni teknolojik ürünler için, kullanılan malzemelere karar vermek, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak açısından kritik öneme sahiptir (Portillo ve diğerleri, 2024).

3.7. Yaşam Döngü Analizi (Life Cycle Assessment-LCA)

Yaşam döngü analizi (LCA), bir ürünün, hizmetin veya sistemin tüm yaşam evreleri boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan kapsamlı bir yöntemdir. Bu analiz, hammadde temininden başlayarak üretim, kullanım, geri dönüşüm ve nihai bertaraf süreçlerini kapsayan "beşikten mezara" yaklaşımını benimsemektedir. LCA, söz konusu süreçler boyunca enerji ve malzeme tüketimi ile çevresel etkilerin nicel olarak belirlenmesine olanak tanır ve bu veriler, çevresel açıdan bilinçli karar alma süreçlerinde önemli bir temel oluşturmaktadır (Taşkın, 2013).

Yaşam döngü analizi Şekil 3.5’de gösterildiği gibi ileri/geri beslemeli ve tekrarlanabilir olmak üzere dört safhadan meydana gelmektedir (Neumann ve diğerleri, 2004; Fenerci, 2019).



Şekil 3.5. ISO 14040 Çevre Yönetimi, hayat boyu değerlendirme, ilkeler ve çerçeve

3.7.1. Amaç ve kapsam

Yaşam döngü analizinin ilk aşamasında, çalışmanın amacı ve kapsamı açık ve net bir biçimde tanımlanmalıdır. Bu bölümde, analizin gerçekleştirilme gerekçeleri ile elde edilen sonuçların hangi hedef kitleye sunulacağı ayrıntılı olarak belirtilmelidir. Çalışmanın kapsamı, belirlenen amaca uygun şekilde yapılandırılmalı; sistem sınırları, fonksiyonel birim, varsayımlar ve mevcut sınırlılıklar bu aşamada açıkça ortaya konulmalıdır (ISO 14040; Fenerci, 2019).

3.7.2. Envanter analizi

Envanter analizi, yaşam döngü analizi sürecinde her bir alt süreç ve sistemin bütünü için gerekli verilerin sistematik biçimde toplandığı aşamayı ifade eder. Bu aşamada derlenen envanter akışları; enerji, su ve hammadde gibi girdilerin yanı sıra, hava, toprak ve suya yönelik emisyonları da kapsamaktadır. Toplanan tüm veriler, analiz kapsamında tanımlanmış olan fonksiyonel birimle ilişkilendirilerek değerlendirilmelidir (ISO 14040; Fenerci, 2019).

3.7.3. Etki analizi

Etki analizi aşamasında, çalışmanın amacı ve kapsamı doğrultusunda toplanan verilerden elde edilen bulgular temel alınarak çevresel etkiler analiz edilmektedir. Bu süreç, envantere yer alan parametrelerin ayıklanarak uygun etki kategorileriyle ilişkilendirilmesiyle başlar. Ardından, kategorize edilmiş yaşam döngü envanteri (LCI) akışları, CML, TRACI, Eco Indicator 99, IPCC, ReCiPe gibi çeşitli yaşam döngü etki analizi (LCIA) metodolojilerinden biri kullanılarak karakterize edilmektedir. Bu sayede, envanter analizinden elde edilen veriler bir araya getirilerek her bir etki kategorisine ilişkin sonuçlar oluşturulmaktadır. Bu çıktılar, yaşam döngü analizinin son aşaması olan yorumlama safhası için temel bilgi kaynağını oluşturmaktadır. Bu aşamada, LCI akışlarının sonuçları dikkate alınarak analiz edilen ürün, hizmet ya da sürecin doğrudan ve dolaylı tüm çevresel etkileri kapsamlı biçimde hesaplanmaktadır.

Bu döngü envanterleri içinde; CML, Leiden Üniversitesinin geliştirdiği bir metodoloji olup problem odaklı yaklaşımı esas almakta ve Küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon, insan toksisitesi ve fotokimyasal oksidant oluşumları değerleri üzerine yoğunlaşmaktadır. TRACI, ABD merkezli geliştirilmiş olup ABD'ye özgü çevre koşullarını dikkate almaktadır. ECO INDICATOR 99, sonuç odaklı bir yaklaşım kullanarak etkileri insan sağlığı, ekosistem kalitesi, kaynak kullanımı olarak üç ana başlık altında toplamaktadır. Diğer yöntemlerin aksine IPCC metodolojisi sadece küresel ısınma potansiyeli (GWP) hesaplamalarında kullanılmakta ve CO₂, CH₄, N₂O gibi gazların etkilerini karbondioksit eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir. ReCiPe ise genel olarak CML + Eco Indicator 99'un birleşimi gibi düşünülmektedir. Hem problem odaklı hem de sonuç odaklı sonuçlar sunmaktadır. Problem odaklı sonuçlarının içerisinde 18 çevresel etki kategorisi, sonuç odaklı sonuçlarının içerisinde ise insan sağlığı, ekosistemler ve kaynaklar bulunmaktadır. Yaşam döngü etki analizleri Çizelge 3.2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir (ISO 14040; Fenerci , 2019).

Çizelge 3.2. Yaşam döngü etki analizi karşılaştırması

Yöntem	Odak Alanları	Geliştirici Kurum/Ülke	Kullanım Alanları
CML	Küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon, insan toksisitesi, fotokimyasal oksidant oluşumu	Leiden Üniversitesi/Hollanda	Akademik çalışmalar, Avrupa odaklı analizler
TRACI	İnsan sağlığı, ekotoksosite, asidifikasyon, küresel ısınma, ozon tabakası incelmeleri	EPA/ABD	ABD merkezli çevresel değerlendirmeler
Eco Indicator 99	İnsan sağlığı, ekosistem kalitesi, kaynak kullanımı	PRé Consultans/Hollanda	Ürün tasarımı, karar destek sistemleri
IPCC	Küresel ısınma potansiyeli (GWP)	IPCC/Uluslararası	Karbon ayak izi hesaplamaları
ReCiPe	İnsan sağlığı, ekosistemler, kaynaklar	RIVM, Radboud Üniversitesi, PRé/Hollanda	Genel amaçlı, çok kriterli çevresel analizler

Çevresel etki tanımları

Küresel ısınma

Küresel ısınma, CO₂, NO₂, CH₄, CFC'ler, HCFC'ler ve CH₃Br gibi sera gazlarından kaynaklanır. Küresel ısınma dünya çapında bir sorundur ve onu değerlendirdiğimiz birim CO₂ eşdeğeridir. Küresel ısınma, kutuplardaki buzulların erimesine, toprak neminin azalmasına, mevsimlerin uzamasına, ormanların değişmesine veya yok olmasına ve rüzgar ve okyanus düzenlerinin değişmesine neden olur. Güneşten gelen kısa dalgalar kısmen emilir ve doğrudan ısınmaya neden olur. Güneşten gelen kalan dalgalar ise yansıtılır. Dünya yüzeyi bu dalgaları atmosfere geri yansıtır, ancak bu dalgalar CO₂, metan ve CFC'ler gibi sera gazları tarafından emilir. Bu etkileşim, dünyanın ısınmasına ve dolayısıyla küresel ısınmaya neden olur. Diğer yandan, insan faaliyetleri sera gazı miktarında artışa neden olur (Sokka ve diğerleri, 2005).

Denklem 3.1'de verilen, kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanan bireysel kimyasallar için Küresel Isınma Potansiyelini hesaplamak amacıyla kullanılır. ISGW, herhangi bir sera gazı için küresel ısınma etkisinin değerini gösterir. EFGWP, herhangi bir sera gazı için bir eşdeğerlik faktörüdür ve bu değer için kullanılan zaman dilimi 100 yıldır. AmtGG, havaya

salınan sera gazı miktarıdır. Denklem 3.1, küresel ısınma potansiyelinin hesaplanmasını göstermektedir (Küçükkaraca, 2020).

$$(ISGW)_i = (EFGWP \times AmtGG)_i \quad (3.1)$$

Sera etkisi, gelen kızılötesi radyasyonun troposferde sera gazları (örneğin karbondioksit, metan, kloroflorokarbonlar vb.) tarafından emilmesi ve yeniden yayılmasıyla ortaya çıkar. Sera etkisi, dünyayı sıcak tutmak için doğal bir olgu olmasına rağmen, özellikle fosil yakıtların yakılması gibi insan faaliyetleri sera etkisini artırarak küresel ısınmaya yol açmıştır. Küresel ısınma potansiyeli, karbondioksit eşdeğeri (CO₂ eşdeğeri) kütlesi cinsinden hesaplanır. Küresel ısınma potansiyeli hesaplanırken gazların atmosferde kalma süresi de hesaba katılarak bir değerlendirme zaman aralığı belirlenmiştir. Bu çalışma için geleneksel 100 yıllık süre dikkate alınmıştır (Khalid, 2019).

GWP, atmosferde sera gazı görevi gören bir bileşiğin olası iklim etkisinin göreceli bir ölçüsünü sağlayan bir endekstir. Bir bileşiğin belirli bir süre boyunca emdiği enerji miktarını, referans bir bileşik olan CO₂'ye kıyasla etkili bir şekilde hesaplar. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından tanımlanan GWP, aynı zaman aralığında (entegrasyon zaman ufku (ITH)) 1 kilogram CO₂'nin neden olduğu ısınmaya kıyasla, o bileşiğin 1 kilogramının salınımından kaynaklanan entegre radyatif zorlama olarak hesaplanır (John ve diğerleri, 2018).

Ozon tükenme potansiyeli

Küresel etkiye sahip olan Stratosferik Ozon Tükenmesi, CFC'ler, HCFC'ler, halonlar ve CH₃Br'den kaynaklanır ve CFC11 olarak gösterilir. Ozon incelmesi, ultraviyole radyasyonda artışa neden olur. Ozon, kısa dalga UV ışınlarıyla stratosferdeki oksijenin parçalanmasıyla oluşur ve bu da stratosferde 15-50 km yüksekliğinde bir ozon tabakasının oluşmasına neden olur. Ancak bu ozon miktarının %10'u troposfere girer.

Dünya için ozon çok önemlidir çünkü ozon tabakasında güneşten gelen kısa dalga boyları emilir ve uzun dalga boyları yansıtılır. Bu sayede dünya az miktarda UV radyasyonuna maruz kalır. İnsan faaliyetleri ozon tabakasını inceltir. Ozon tabakasının inceltme potansiyelini hesaplamak için, ozon tabakasının incelmesine neden olan herhangi bir

kimyasal için CFC-11 eşdeğeri olarak hesaplanan denklem verilir. ISOD, herhangi bir kimyasalın ozon tabakasına olan etkisinin miktarını gösterir. EFODP, ozon tabakasının incelme potansiyelinin karakterizasyon faktörüdür. AmtODC, havaya salınan ozon tabakasını incelten kimyasal miktardır. Denklem 3.2, ozon tabakasının incelme potansiyelinin hesaplanmasını göstermektedir (Sokka ve diğerleri, 2005; Küçükkaraca, 2020).

$$(ISOD)_i = (EFODP \times AmtODC)_i \quad (3.2)$$

Fotokimyasal duman

Fotokimyasal duman, metan olmayan hidrokarbonlardan kaynaklanır ve dumanın etilen eşdeğeri olarak gösterilen yerel bir etkisi vardır. Fotokimyasal dumanın karakterizasyon faktörü, fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyelidir. Fotokimyasal duman, görüş mesafesinin azalmasına, göz ve solunum yollarında tahrişe neden olur ve bitki örtüsü ve malzemeler için zararlıdır. Azot oksitler ve hidrokarbonlar, güneşten gelen UV dalgalarının varlığında karmaşık reaksiyonlara girer ve bu ürünlerden biri, yüksek konsantrasyonlarda insanlar için toksik olan ozondur. Hava yüksek sıcaklık, düşük nem ve statik olduğunda, yüksek ozon konsantrasyonuna neden olur (Boakye-Boaten, 2006).

Denklem 3.3, fotokimyasal dumanın hesaplanmasını göstermektedir. ISPOCP, herhangi bir kimyasal için fotokimyasal dumanın etkisini göstermektedir. EFPOCP, fotokimyasal oksidan oluşturma potansiyelinin bir karakterizasyon faktörüdür. AmtPOC, havaya salınan ve dumana neden olan kimyasal miktardır (Barnthouse, 1999; Küçükkaraca, 2020).

$$(ISPOCP)_i = (EFPOCP \times AmtPOC)_i \quad (3.3)$$

İnsan toksisitesi, tatlı su ve deniz suyu toksisitesi ve karasal toksisite

Karasal toksisite, sucul toksisite ve insan toksisitesi 1,4-Dichlorbenzol olarak gösterilir. LCA, herhangi bir kimyasalın insan sağlığı ve insan toksisitesi üzerindeki etkilerini içerir ve insanlar üzerindeki olumsuz etkilerin bir tahminidir. İnsan toksisitesi, su, toprak veya hava nedeniyle küresel, bölgesel veya yerel olabilir ve hastalık ve ölüm oranlarında artışa neden olabilir. İnsan Toksisitesi şemasını göstermektedir.

Karasal toksisite, kemirgenler üzerinde yerel bir etkiye sahiptir ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya neden olur. Karasal toksisite, toksik kimyasallardan kaynaklanan toksisiteyi gösterir. Canlı organizmaların toksik kimyasallarla etkileşimlerinden kaynaklanan olumsuz etki miktarını inceleyen bir LCA yaklaşımıdır. Karasal Eko-Toksisite Potansiyelini göstermektedir. Sucul toksisite, sucul bitki yaşamında, besin kaynaklarında ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya yol açtığı için balıklar üzerinde yerel bir etkiye sahiptir. Sucul toksisite, sucul organizmaların toksik kimyasallarla etkileşiminin neden olduğu olumsuz etki miktarını dikkate alır (Küçükkaraca, 2020).

İnsan toksisite potansiyeli, havaya, suya ve toprağa toksik madde emisyonlarının insan sağlığı üzerindeki etkilerini gösterir.

Deniz suyu ekotoksisite potansiyeli ise Bu etki kategorisi, toksik maddelerin havaya, suya ve toprağa emisyonlarının deniz suyu ekosistemi üzerindeki etkilerini, 1,4-diklorobenzen eşdeğeri (DCB eşdeğeri) cinsinden ölçülen kütle cinsinden gösterir.

Karasal ekotoksisite potansiyeli; Bu etki kategorisi, toksik maddelerin havaya, suya ve toprağa emisyonlarının karasal ekosistem üzerindeki etkilerini, 1,4-diklorobenzen eşdeğeri (DCB eşdeğeri) cinsinden ölçülen kütle cinsinden gösterir (Khalid, 2019).

Asitleşme

Asitleşme yerel veya bölgesel olabilir, SO_x, NO_x, HCL, HF ve NH₄'ten kaynaklanır ve SO₂-eşdeğeri olarak gösterilir ve H⁺ iyonları salar. Asitleşmenin etkisi, bina korozyonuna, su kütlelerinin asitleşmesine ve bitki örtüsü ile toprağa zarar verici etkilere yol açar. Asitleşmeye neden olan kimyasallar yağış yoluyla yayılır. Hava kirleticilerinin asitlere dönüşmesi, toprak ve suyun asitleşmesine neden olur ve bu da yağmur suyu ve sisin pH'nın 5,6'dan 4'e ve altına düşmesine neden olur.

Denklem, asitleşmeyi belirlemek için hesaplanır. ISAP, herhangi bir kimyasal için asitleşme miktarıdır. EFAP, asitleşme potansiyelinin karakterizasyon faktörüdür. AmtAC, asitleşmeye neden olan kimyasal bir miktardır. Asitleşme potansiyeli hesaplaması Denklem 3.4'te gösterilmiştir (Küçükkaraca, 2020).

$$(ISAP)_i = (EFAP \times AmtAC)_i \quad (3.4)$$

Asitleşme potansiyeli, yağışın (yağmur suyu ve sis dahil) pH değerinin 4 ve altına düşmesinin ölçüsüdür. Toprak besinlerinin yıkanması ve topraktaki metallerin çözünürlüğünün artması gibi zararlı ekosistem etkilerine yol açar. Bu etkiye katkıda bulunan başlıca etkenler, Kükürt ve azot oksitleri ve bunların asitleridir. Asitleşme potansiyeli küresel bir sorun olsa da, bölgesel etkiler değişiklik gösterebilir (Khalid, 2019).

Ötrofikasyon

Ötrofikasyon, su ekosistemlerinde besin yüklemesinin aşırı artmasıyla başlayan ve oksijen azalmasıyla sonuçlanan bir çevresel sorundur. Ötrofikasyon, bitki büyümesini tetikler ve besin maddeleri nedeniyle su kütlesinde oksijen tükenmesine neden olur. Belirli bir alanda besin zenginleşmesi varsa, hava kirleticileri ve atık su nedeniyle ötrofikasyon meydana gelir. Sonuç olarak, hızlı bir alg büyümesi meydana gelir. Bu etki nedeniyle, güneş ışığı su derinliklerine ulaşamaz ve fotosentez hızları düşer. Oksijen azalır; bu nedenle ölü algler aerobik ayrışmayla ayrıştırılamaz. Güneş ışığı ve oksijenin azalması balıkların ölümüne yol açar, anaerobik ayrışma gerçekleşir, bu da H₂S ve CH₄ açığa çıkarır ve ekosistem su kütlesinde yok olur. Denklem, ötrofikasyon potansiyelinin hesaplanmasını verir. ISEUTR, herhangi bir kimyasal için ötrofikasyon etkisini verir. EFEP, ötrofikasyon potansiyelinin karakterizasyon faktörüdür. AmtEC, suda salınan ve ötrofikasyona neden olan kimyasal bir miktardır. Denklem 3.5, ötrofikasyon potansiyeli hesaplamasının nasıl yapıldığını göstermektedir (Küçükkaraca, 2020).

$$(ISEUTR)_i = (EFEP \times AmtEC)_i \quad (3.5)$$

Bu etki, karasal veya sucul ortamdaki besin içeriğinin, özellikle nitrat ve fosfatların arttığını gösterir. Besin maddelerinin aşırı zenginleşmesi, alg patlamaları, hipoksik koşullar, sucul ekosistemin ölümü, karasal ortamlarda bitki stabilitesinin bozulması ve bitkilerin hastalık ve zararlılara karşı duyarlılığının artması gibi ekosistem hasarlarına yol açar. Asitleşme gibi, ötrofikasyon etkileri de bölgesel olarak değişir (Khalid, 2019).

Arazi kullanımı ve su kullanımı

Arazi kullanımı, atılan arazi miktarını etkiler ve küresel, yerel ve bölgesel ölçekte görülebilir. Arazi kullanımının karakterizasyon faktörü arazi mevcudiyetidir. Katı,

radioaktif ve tehlikeli atıklar açısından yaban hayatı için karasal yaşam alanında ve depolama alanlarında azalmaya neden olur.

Su kullanımı, bölgesel ve yerel etkileri olan tüketilen su anlamına gelir. Su kıtlığı potansiyeli, su kullanım birimidir. Su kaynağındaki bir azalmayı ifade eder. Ayrıca, su kalitesi, yaşam döngü analizi için bir diğer önemli parametredir. BOD (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) ve TSS (Toplam Askıda Katı Madde), su kalitesi için iki temel faktördür (Küçükkaraca, 2020).

Su kullanımı, ürün yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarında tatlı suyun net su giriş ve çıkış dengesini gösterir. Gösterge, üretilen kWh elektrik başına gram cinsinden ölçülür (Khalid, 2019).

Birincil enerji talebi

Birincil enerji talebi, herhangi bir yenilenebilir veya yenilenemeyen enerji kaynağından herhangi bir insan kaynaklı değişiklik olmaksızın çekilen enerji miktarıdır ve MJ/kWh cinsinden ölçülür.

Yenilenemeyen kaynaklardan elde edilen birincil enerji

Bu, rüzgar enerjisi projesinin yaşam döngüsü boyunca yenilenemeyen enerjinin (örneğin kömür, gaz, petrol, nükleer enerji) tüketiminin bir ölçüsüdür. Net kalorifik değer MJ/kWh cinsinden ifade edilir.

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen birincil enerji

Bu, projenin yaşam döngüsü boyunca hidroelektrik, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve biyokütle dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından tüketilen enerji miktarıdır ve MJ/kWh cinsinden ifade edilir (Khanlid, 2019).

3.7.4. Yorumlama

Envanter analizi ve etki analizi süreçlerinde elde edilen bulguların sistematik biçimde değerlendirildiği son sayfayı temsil etmektedir. Bu aşamada, analiz sonuçlarının çalışmanın

başlangıcında tanımlanan amaç ve kapsam doğrultusunda tutarlılık göstermesi beklenmektedir. Elde edilen bulgulara dayalı olarak yapılan yorumlar, hedef kitleye yönelik karar alma süreçlerinde bilgi temelli katkı sağlamalıdır (ISO 14040; Fenerci, 2019).

LCA, ürün ve hizmetlerin potansiyel çevresel etkilerini değerlendirmek için standartlaştırılmış bir metodolojidir (ISO 14040, 2006; ISO 14044,2006). Hem dahil edilen faaliyetlerde (yani, ham madde çıkarımından kullanım ömrünün sonuna kadar tüm yaşam döngüsünü kapsayan) hem de incelenen konularda (örneğin, küresel ısınma, mineral kaynaklarının tükenmesi, ekosistem kalitesi, vb.) bütünsel olma avantajına sahiptir. LCA metodolojisi dört aşamadan oluşmaktadır: hedef ve kapsam tanımı, envanterdeki yaşam döngüsü (dahil olan tüm malzeme ve enerji akışlarını listeleme), yaşam döngü etki değerlendirmesi (potansiyel etkileri hesaplama) ve yorumlama (Pinto ve diğerleri, 2025).

LCA, çevresel etkileri değerlendirmek için kullanılan birçok teknikten biridir. Bu teknik, ham madde çıkarımından son bertarafa kadar ürün, hizmet ve tesislerin yaşam döngüsü boyunca etkilerin değerlendirilmesini mümkün kılar. ISO 14040, bir LCA çalışması yürütmek için ilkeleri ve çerçeveyi belirlerken, ISO 14044, çalışmayı uygulamak için gereklilikleri ve yönergeleri belirlemiştir (Radwan, 2023).

Resim 3.2’de bir ürünün hammadde çıkarımından son bertarafa kadar geçen yaşam döngüsü gösterilmiştir.



Resim 3.2. Bir ürünün yaşam döngüsü

Yaşam döngü analizi (LCA), belirli malzemelere veya yaşam döngüsünün belirli aşamalarına ilişkin çevresel etkileri tanımlamak ve bu doğrultuda bilinçli tasarım iyileştirmeleri gerçekleştirmek amacıyla etkili bir araç olarak kullanılabilir. Ancak LCA, yalnızca çalışmanın hedef ve kapsam bölümünde tanımlanan çevresel konulara odaklanır; dolayısıyla analiz edilen sistemin tüm çevresel etkilerini kapsayan bütüncül bir değerlendirme sunmaz (Harrison ve diğerleri, 2010).

ISO 14044'te belirtildiği gibi, bir LCA çalışması dört iteratif aşamadan geçmelidir; hedef ve kapsam tanımı, sistem sınırlarının ve çalışmanın ayrıntı düzeyinin tanımlandığı, kapsamın çalışmanın hedefine karşılık geldiği aşamadır. Bir LCA çalışmasının ikinci aşaması, sistemin girdilerinin ve çıktılarının çalışmanın hedefine hizmet etmek üzere toplandığı yaşam döngü envanter aşamasıdır. Üçüncü aşama, LCI sonuçlarının önceden tanımlanmış kategorilerle LCI öğelerinin önemini değerlendirmek için değerlendirildiği Yaşam Döngü Etki Analizi'dir (LCIA). Kategoriler ve sonuçların önemi bir prosedürden/metodolojiden diğerine farklılık gösterebilmektedir (Rogério, 2021; Andrae ve Andersen, 2011).

Günümüzde yaşam döngü analizi (LCA), sürdürülebilirlik çalışmalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu alanda uluslararası düzeyde kabul gören başlıca referanslardan biri GHG Protokolü'dür. 1990'ların sonlarında, Dünya Kaynakları Enstitüsü ile Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi, kurumsal sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve raporlanmasına yönelik küresel bir standarda duyulan ihtiyacı tespit etmiş ve bu doğrultuda GHG Protokolü'nü geliştirmiştir. İlk olarak 2001 yılında yayımlanan Kurumsal Standart, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında küresel ölçekte standartlaştırılmış bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir. Bu metodoloji; kamu kurumları, özel sektör kuruluşları, sivil toplum örgütleri ve diğer paydaşlar tarafından kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Serres, 2022).

Son yıllarda artan çevresel farkındalığın ardından, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel performansına ilişkin standartlaştırılmış LCA tabanlı bilgilerin tüketicilere ve işletmelere iletilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Çevresel ürün beyanı (EPD) ve ürün çevre profili (PEP), B2B ortamında çevresel performansı iletmenin bir yolu olarak ortaya çıkarken, ürün çevresel ayak izi (PEF) Avrupa arenasında B2C iletişim aracı haline gelmiştir. Ürünler için karbon ayak izi standardı (CFP) yöntemi, karbon etkilerinin iletilmesinden ziyade belgelenmesine odaklanır. CFP, EPD ve PEP, ISO 14025 ve LCA için

ISO standartlarına uygun olarak yazılmış uluslararası tip III çevre beyanlarıdır (Baumann ve Tillman, 2004).

ISO standartlarında tanımlanan daha genel hesaplama yöntemleri, LCA veri toplama kapsamını ve metodolojisini tanımlayan ve dolayısıyla aynı ürün kategorisindeki değerlendirmelerin aynı şekilde hesaplanıp sunulmasını sağlayan sözde ürün kategorisi kuralları (PCR'ler) tarafından daha da belirlenir. Kurallar, EPD ve CFP isimlendirmelerinde PCR olarak adlandırılırken, PEP isimlendirmelerinde ürüne özgü kurallar (PSR) olarak adlandırılır. PEF de kategori kurallarına, sözde ürün çevresel ayak izi kategori kurallarına (PEFCR'ler) dayanmaktadır (de Sadeleer ve diğerleri, 2021).

LCA modellemesi yapmak için veritabanı ve uygulama modelleri seçimi yapmak gereklidir. Veritabanı olarak Ecoinvent 3.6, CODDE veritabanları, program olarak GaBi, Simapro, Ecopro, EIME, OpenLCA program seçenekleri öne çıkmaktadır.

Yaşam döngü analizi (LCA), veri yoğun bir metodolojidir; yani tipik bir yaşam döngüsü binlerce birim sürecini kapsar ve önemli bir zaman ihtiyacı ve yüksek maliyetlere sebep olur. Bu nedenle, veri toplama çabalarını eylem alanını yansıtan seçili faaliyetlere odaklamak ve kalan faaliyetleri modellemek için yaşam döngü envanteri (LCI) veritabanlarından genel veriler kullanmak yaygın bir uygulamadır (Steubing ve diğerleri, 2016).

Tüm üretim süreçleri, beşikten kapıya LCI'nin oluşturulmasını kolaylaştırmak amacıyla, temsili malzeme üretimi veya alt bileşenler için LCI verilerinin Ecoinvent veritabanında mevcut olduğu bir noktaya kadar takip edilir (Nordelöf ve diğerleri, 2019).

Ecoinvent veritabanı, süreçleri iki temel faaliyet türü olarak sınıflandırmaktadır: dönüştürme (üretim) faaliyetleri ve aktarma faaliyetleri (pazarlar olarak tanımlanan tüketim karışımları). Analiz kapsamında, üretim faaliyetlerinin girdilerini pazarlardan sağladığı varsayımı temel alınmıştır. Her iki faaliyet türü bölgesel olarak tanımlanabilse de, üretim süreçleri genellikle bölgesel düzeyde, pazar faaliyetleri ise küresel düzeyde yapılandırılmıştır (Steubing ve diğerleri, 2022).

Bureau Veritas CODDE tarafından oluşturulan EIME, çevresel etki değerlendirmesi için kullanılmasının yanı sıra yaşam döngü analiziyle ilgili nicel sonuçlar sağlayan bir programdır (Veritas, 2022; Thai ve Liu, 2017).

EIME (Çevresel Bilgi ve Yönetim Tarayıcı-Environmental Information and Management Explorer-) birçok Elektrik ve Elektronik Ekipman (EEE) tedarikçisi ve müşterisi tarafından da desteklenen etkileri değerlendirmek için seçilen yazılımlardan biridir (Houstin ve diğerleri, 2015; Halater ve diğerleri, 2025)

LCA araçlarından elde edilen veritabanları belirli veriler sağlar ve genellikle düzenli güncellemelerden faydalanır. Pirson, T ve arkadaşlarının çalışmasında yarı iletkenler için mevcut tüm araçlar ve veritabanları arasında yaygın olarak kullanıldığı için en son teknolojiye sahip LCA veritabanları arasından EIME de yararlanılan veritabanları arasına dahil edilmiştir (Pirson ve diğerleri, 2022).

Yazılım aracının seçimi, özellikle malzeme ve proses veritabanları ve söz konusu ürünler için hesaplama yöntemi olmak üzere çeşitli kriterlere bağlıdır. Çizelge 3.3, güç elektroniği için potansiyel olarak önemli olan bazı LCA yazılımlarını listelemektedir (Salomez ve diğerleri, 2024).

Çizelge 3.3. Güç sistemleri için potansiyel olarak önemli bazı LCA yazılımları

Program	Lisans Kullanımı	Açıklama
OpenLCA	Ücretsiz lisans	Birçok sektörel kullanıma uygundur. Birçok Nexus uyumlu veritabanı vardır.
SimaPro	Ücretli lisans	Birçok hesaplama metoduna sahip bir programdır. Özellikle ilişkili bir veritabanı yok ancak birçok harici veritabanıyla uyumludur.
GabiLCA	Ücretli lisans	Daha çok otomotive sektörüne odaklı olup birçok sektörel kullanıma da uygunluğu bulunmaktadır.
Brightway	Ücretsiz lisans	Modelleme ve parametrelendirme aşamalarında kullanım kolaylığı sağlar. Farklı veritabanlarına entegre edilebilme özelliği vardır.
EIME v6	Ücretli lisans	Elektrik, elektronik sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Kullanımı kolay ve ilgili veritabanlarına ulaşım kolaylığı sağlar.
Umberto 11	Ücretli lisans	Basit arayüz tasarımına sahiptir. İlişkili olduğu özel bir veritabanı olmayıp birçok veritabanına uyumludur.

LCA analizi oluşturmak tüm süreci hızlandırmak ve basitleştirmek için element ve malzeme veritabanlarının oluşturulması gerekir. Bu veritabanlarının birçok faktöre göre güncellenmesi gerekir. Her ülkedeki üretim süreci yöntemleri ve koşullarının tek tip olmaması nedeniyle veritabanları yerel olarak bölünmektedir. Bu yüzden LCA'nın basitleştirilmesi ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için model işleme yazılım araçlarının geliştirilmiştir. Kullanılan malzemeler, teknik detayları hakkındaki bilgiler, operasyonel bilgiler ve diğer bilgiler hakkında tüm bilgilerin toplanarak bu bilgiler yazılımlarda bulunur ve özetlenir. Veritabanları daha sonra sonuçlar üretir. Bu araçlarla tüm analiz süreci basitleştirilmiş ve daha erişilebilir hale gelmiştir (Tomková ve diğerleri, 2019).

Bunlardan bazılarının listesi Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. LCA çalışmalarında mevcut kullanılan veritabanları ve kullanım alanları

Program	Bağlantı linki	Kullanım
Athena (Canada)	http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/	Yapı
Arquimedes (Spain)	http://arquimedes.cype.es/	Yapı
BEES (USA)	http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm	Yapı
Bilan Produit ADEME (France)	http://www.base-impacts.ademe.fr/bilan-produit	Genel
Carbon Footprint (UK)	https://www.carbonfootprint.com/	Genel
COCON (France)	http://eosphere.fr/fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html	Yapı
eToolLCD (Australia)	http://etoolglobal.com/	Yapı
Eco-bat (Switzerland)	http://www.eco-bat.ch/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=14&Itemid=30	Yapı
EcoCalculator (Canada)	http://www.athenasmi.org/tools/ecoCalculator	Yapı
EcoEffect (Sweden)	http://www.ecoeffect.se/	Yapı
ECOSOFT (Austria)	http://www.ibo.at/en/ecosoft.htm	Yapı
EIME (France)	http://codde.fr/en/software/eime-en/eime-presentation	Genel
ELODIE (France)	http://elodie-cstb.fr/default.aspx	Yapı
envest 2 (UK)	http://envestv2.bre.co.uk/	Yapı
EQUER (France)	http://izuba.fr/logiciel/equer/	Yapı
GaBi (Germany)	http://gabi-software.com/	Genel
SimaPro	http://www.pre-sustainability.com/	Genel

Mevcut kullanılan veritabanları, uyumlu oldukları yazılımları da içerecek şekilde ve birbirlerine göre karşılaştırmaları Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. LCA çalışmalarında mevcut kullanılan veritabanları ve birbirlerine göre karşılaştırmaları

Özellik / Veritabanı	Ecoinvent 3.6	GaBi	ELCD	USLCI	Agri-footprint	CODDE
Geliştirici	Ecoinvent Association (İsviçre)	Sphera (Almanya)	Avrupa Komisyonu	NREL (ABD)	Blonk Consultants (Hollanda)	Bureau Veritas (Fransa)
Enerji Verileri	Çok detaylı (yenilenebilir enerji, fosil, bölgesel üretim)	Geniş kapsamlı, sektörel detaylı	Avrupa odaklı, sınırlı detay	ABD odaklı, enerji üretimi dahil	Tarım odaklı, enerji sınırlı	Elektrik ve Elektronik ve ürün odaklı, Yenilenebilir enerji
Coğrafi Kapsam	Küresel, bölgesel detaylı	Küresel	Avrupa	ABD	Avrupa, bazı küresel veriler	Avrupa
Kullanım Alanı	Akademik, endüstriyel, politika	Endüstriyel, kurumsal	Politika, akademik	Akademik, kamu	Tarım ve gıda	Elektronik, otomotiv
Yazılım Uyumluluğu	SimaPro, OpenLCA, Brightway	GaBi Software	OpenLCA	OpenLCA	SimaPro, OpenLCA	EIME

Tutarlılığı sağlamak için, çalışmanın tüm farklı bileşenlerini değerlendirmek için belirli bir veritabanına sahip belirli bir metodoloji kullanılmalıdır. Mevcut metodolojilere örnek olarak CML ve ReCipe verilebilir. Dördüncü ve son aşama, envanter veya LCIA sonuçlarının yorumlandığı ve özetlendiği yaşam döngü yorumlamasıdır; bu aşamada karar alma ve/veya çalışılan ürün/tesisın daha sürdürülebilir hale getirilmesi için önerilerde bulunmak üzere en önemli etki noktalarına varılır (Radwan, 2023).

Tez kapsamında veritabanı olarak belirlenen malzeme ve enerji akışları, hem Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (JRC) tarafından kurulan ELCD veritabanını hem de ESR (Eco-Systemes-et-Recylum) tarafından geliştirilen veritabanını ve LCIE Bureau Veritas tarafından düzenlenen CODDE veritabanını entegre eden CODDE® 2024-04 veritabanındaki ilgili süreçlerle entegre edilmiştir. Bu entegrasyon, kapsamlı arka plan

verilerine erişim sağlayarak daha sağlam bir yaşam döngüsü değerlendirmesini desteklemektedir. Envanter verileri EIME yazılım sürümü 6.1.1 kullanılarak modellenmiştir.

3.8. Çevresel Kural Tanımları

3.8.1. EPD (Environmental product declaration-çevresel ürün beyanı)

Bir ürünün çevresel etkilerini şeffaf ve standartlara uygun şekilde belgeleyen bir rapordur. ISO 14025 ve EN 15804 gibi uluslararası standartlara dayanır ve yaşam döngü analizi (LCA) temel alınarak hazırlanır. Ürünün üretiminden kullanımına ve bertarafına kadar olan süreçteki çevresel etkilerini (karbon ayak izi, enerji tüketimi, su kullanımı vb.) içerir. ISO 14025 standardına göre EPD'ler Çizelge 3.6'da gösterildiği gibi 3 tipe ayrılır:

Çizelge 3.6. EPD tiplerinin açıklamaları

Tip	Açıklama
Tip I	Çok kriterli çevre etiketleri (ör. EU Ecolabel), üçüncü taraf sertifikalıdır, çevresel performans açısından "iyi" olduğu anlamına gelir.
Tip II	Üretici tarafından yapılan kendi beyanları (ör. "geri dönüştürülebilir" etiketi), bağımsız doğrulama gerekmez.
Tip III	LCA tabanlı, kantitatif, üçüncü taraf doğrulamalı, karşılaştırılabilir beyanlar (ör. EPD belgeleri).

Tip III EPD LCA tabanlıdır ve karbon ayak izi (GWP), enerji kullanımı, su tüketimi, atık oluşumu vb. göstergeler ile sayısal veriler sunarak net sayılar içerir. Aynı ürün kategorisi için hazırlanmış EPD'ler arasında karşılaştırma yapılabilir. Bağımsız akredite kuruluşlar tarafından kontrol edilip onaylanır ve çevresel etkiler açıkça raporlanır. Bu tez kapsamında Xiria ürünü için Tip III EPD, 20 yıllık ve 30 yıllık kullanım süresi boyunca toplam küresel ısınma potansiyeli, su tüketimi, atık miktarı, yenilenebilir enerji kullanımı gibi tüm çevresel etki göstergelerini içerir.

3.8.2. PCR (Product category rules-ürün kategori kuralları)

Belirli bir ürün grubunun çevresel etkilerini değerlendirmek için uygulanacak kuralları, hesaplama yöntemlerini ve veri gerekliliklerini tanımlar. Bir ürünün yaşam döngü

(LCA) çalışmasına dayalı çevresel ürün beyanının -EPD- (Environmental Product Declaration) nasıl hazırlanacağını standardize eder. PCR (Product Category Rules) orta gerilim anahtarlama ekipmanları için edition 4, September 2021 (EN2021:09) ise standart olmayıp çevresel ürün beyanı hazırlamak için kullanılan kurallar setidir.

3.8.3. PSR (Product specific rules-ürün spesifik kuralları-)

PSR, PCR ed.4 EN2021:09 belgesine dayalı, PCR'ın daha ayrıntılı, ürün özelinde uyarlanmış bir versiyonudur. Bir ürün grubu için spesifik kuralları detaylandırır. Çevresel Ürün Beyanı (EPD) hazırlanırken ürün özelliklerine özel hesaplamaların nasıl yapılacağını netleştirmek amacıyla kullanılır.

PSR 0005 ed.3 EN 2023:06 orta gerilim şalt cihazları özelindeki GIS, AIS, RMU gibi ürünlerin detaylarını kapsar. Çizelge 3.7'de PCR ve PSR'ın karşılaştırmalı tablosunda benzer ve farklı yanları gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. PCR ve PSR'ın karşılaştırmalı tablosu

ÖZELLİK	PCR	PSR
Odak	Genel kurallar (tüm ürün grubu için)	Ürün spesifik kurallar
Detay seviyesi	Genel	Detaylı ve ürün özelinde
Fonksiyonel birim tanımı	“20 yıl boyunca belirli bir akımı ve gerilimi emniyetli şekilde açma/kapama işlevi gören 1 adet şalt cihazı”.	“20 yıl boyunca 1 devreyi 24 kV anma gerilimi, 630 A anma akımı altında emniyetli şekilde açma/kapama işlevi gören bir ünite”.
Sistem sınırları	Hammaddelerin çıkarımından üretim, dağıtım, kullanım, bakım ve bertaraf (ömürü sonu) aşamalarını kapsar (cradle-to-grave).	Ürün bileşenlerinin (ör. epoksi reçine, bakır, alüminyum, SF ₆ veya alternatif gazlar) LCA'ya nasıl dahil edileceği ve alt bileşenlerin sistem sınırlarına göre nasıl dağıtılacağını kapsar.
Enerji girdileri	Üretim, dağıtım, kullanım ve ömür sonu faaliyetlerindeki sistem sınırlarına giren tüm enerji değerleri kapsar.	Sistem sınırlarına giren tüm enerji kullanım etkisinin LCA'ya yansımaları ve sistem sınırlarındaki enerji kullanımının kayıplarını (stand-by veya işletme kayıpları) kapsar.

3.8.4. PEP Ecopassport (Product environmental profile-ürün çevre profili kimliği)

PEP Ecopassport®, elektrik, elektronik ve HVAC (ısıtma, havalandırma, iklimlendirme) ekipmanları için hazırlanmış, uluslararası tanınan bir çevresel ürün beyanı

(EPD) programıdır. ürünlerin yaşam döngü analizine (LCA) dayalı çevresel etkilerini şeffaf bir şekilde ortaya koymak, Müşterilere, tasarımcılara ve kamu otoritelerine karşılaştırılabilir ve güvenilir çevresel bilgi sunmak, Avrupa Birliği ve global yeşil satın alma (green procurement) projelerinde kullanılmak amaçlarıyla geliştirilen yaşam döngüsü boyunca çevreye olan etkilerini analiz eden ve raporlayan bir çevresel beyan sistemidir.

Kapsamı; Orta gerilim ve alçak gerilim şalt cihazları, kablolar, kontrol cihazları, HVAC bileşenleri, elektrikli tüketici ürünlerini içerir. ISO 14025, ISO 14040 / 14044 çevresel ürün beyanları için genel kuralları ve LCA standartlarını içeren ISO standartlarına ve EN 50693 PCR standartlarına dayanır. Belge, bağımsız ve akredite bir üçüncü taraf tarafından doğrulanır. 5 yıl geçerliliği olup ürünün çevresel etkileri hakkında bilgiler içerir. Bu bilgiler;

- İhracatçının kurumsal bilgilerini,
- Ürün yaşam döngü analizinde kullanılan standartları,
- PEP Belgesinin oluşturulma ve düzenlenme tarihini ve
- Yetkilendirilmiş doğrulayıcı kişiye ait bilgileri ,
- Ürünün işlevsel birimi ve kullanım ömrü ile ekipmanın bir açıklaması,
- Ürünün malzemeleri ve toplam kütlesi,
- 39 gösteregeye dayalı çevresel etki tabloları,
- LCA'nın çeşitli aşamalarında dikkate alınan varsayımları içermektedir.

3.8.5. PEF (Product environmental footprint-ürün çevresel ayakizi)

Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen, ürünlerin çevresel ayak izini ölçmek için kullanılan LCA tabanlı bir metodolojidir. Hem ürünler (PEF) hem de organizasyonlar (OEF) için çevresel performans ölçüm sistemidir. Sürüm 3.0, 2021 sonrası yayınlanan yeni versiyondur ve güncellenmiş karakterizasyon faktörleri, 16 çevresel gösterge ve veri kalitesi kurallarını içerir. PEP Ecopassport® ve EN15804+A2 ile uyumlu olup çevresel etkilerin sayısal verilerle hesaplamasında kullanılır.

PEP ve PEF benzer kısaltmalara sahip olsalar da, farklı sistemleri ve amaçları temsil ederler. PEP, elektrik ve HVAC sektörüne özel, sektör dernekleri tarafından yönetilen, üçüncü taraf doğrulamalı EPD üretim sistemidir. PEF, Avrupa Komisyonu'nun tüm sektörlerde uygulanabilir şekilde geliştirdiği, daha genel ve regülasyon odaklı bir çevresel

değerlendirme metodudur. Çizelge 3.8’de PEP ve PEF kavramlarının temel karşılaştırmaları çizelge halinde gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. PEP ve PEF kavramlarının temel karşılaştırmaları

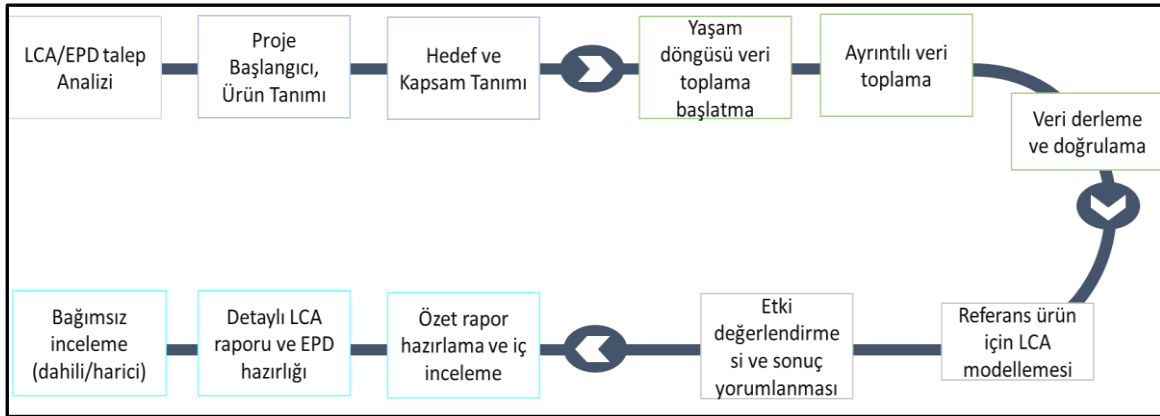
Özellik	PEP (Product Environmental Profile)	PEF (Product Environmental Footprint)
Açılımı	Product Environmental Profile / PEP Ecopassport®	Product Environmental Footprint
Geliştiren kuruluş	PEP Association (Fransa merkezli, sektör odaklı)	Avrupa Komisyonu (Joint Research Centre, JRC)
Amacı	Elektrik, elektronik, HVAC ürünleri için Tip III EPD üretmek	Tüm ürün grupları için AB düzeyinde standart çevresel ayak izi ölçümü
Kapsam	Spesifik ürün grupları (OG/AG şalt cihazları, HVAC vb.)	Tüm ürün ve hizmetler (gıda, tekstil, enerji, inşaat vb.)
Standart temeli	ISO 14025, ISO 14040/44, EN 50693, EN 15804	ISO 14040/44 + PEFCR (Product Environmental Footprint Category Rules)
EPD üretimi	Ürün tipi bazlı, sektörel PSR ve PCR kurallarına dayalı	AB’nin harmonize edilmiş metoduna göre tek bir kurallar seti
Gösterge sayısı (A2 sonrası)	En az 16 (EN 15804+A2 / PEP ed.4)	En az 16 (PEF EF 3.0 metoduna göre)
Doğrulama	Üçüncü taraf doğrulama zorunlu	Genellikle zorunlu (özellikle regülasyon amaçlı)
Kullanım yeri	PEP Ecopassport® veri tabanı, yeşil bina projeleri, ürün karşılaştırması	AB yeşil kamu alımları, regülasyonlar, etiketleme politikaları
Şeffaflık ve format	Sabit PEP deklarasyon şablonu	PEFCR çıktısına dayalı farklı formatlar olabilir
Sürüm örnekleri	PEP ed.4 (2021), Gösterge seti v2.0	PEF EF 3.0 (2021 sonrası)

3.8.6. Eco’DEEE

Eco’DEEE, elektrik-elektronik ürünlerin tasarım sürecinde geri kazanılabilirlik (recoverability) odaklı bir değerlendirme aracı olarak Bureau Veritas CODDE tarafından geliştirilmiş bir araçtır. Bu metodoloji, ürünün alt bileşenlerine ait malzeme listesi (BoM) üzerinden nicel geri kazanılabilirlik göstergeleri hesaplar. Amaç, ürün tasarımının geri dönüşüm ve yeniden kullanım açısından ne kadar uygun olduğunu belirlemek ve tasarım sürecini bu doğrultuda yönlendirmektir. Bu araç, özellikle WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) uyumluluğu, çevresel tasarım (ecodesign) ve geri kazanım performansı gibi kriterleri değerlendirmek için kullanılır.

3.9. Güç Sistemlerinde Yaşam Döngü Analizi

Elektrik şebekesinin tasarımı ve işletimi söz konusu olduğunda, hiçbir teknoloji olumsuz etkilerden muaf değildir. Fosil yakıt temelli üretim yöntemlerinin ciddi çevresel sonuçlar doğurduğu yaygın biçimde bilinmekle birlikte, yenilenebilir enerji teknolojileri de daha sınırlı ölçekte olsa da çeşitli olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji sistemlerine ilişkin çevresel etkilerin büyük bir kısmı genellikle kurulum ve geri dönüşüm aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Örneğin, güneş fotovoltaik (PV) panelleri ve rüzgar türbinlerinin üretimi sırasında partikül madde ve sera gazı emisyonları oluşabilir; ayrıca, PV panellerin üretiminde toksik maddelerin salımı ya da pillerin ve panellerin geri dönüşüm süreçlerinde sera gazı salımı gibi etkiler söz konusu olabilir. Tüm bu etkilere rağmen, çevresel ve toplumsal zararların en aza indirildiği sürdürülebilir bir elektrik şebekesine geçiş, farklı teknolojilerin kapsamlı ve tarafsız biçimde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bölüm, elektrik sistemlerine yönelik yaşam döngü analizi (LCA) çalışmalarını incelemekte ve mevcut teknolojilere ilişkin genel bulguları, karşılaşılan zorlukları ve metodolojik sınırlılıkları tartışmaktadır (Byles ve Mohagheghi, 2023). Güç sistemlerinde yapılan LCA çalışmalarının iş akış diyagramı Şekil 3.6'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. LCA çalışması iş akış şeması

3.10. Orta Gerilim Anahtarlama Ve Şalt Ürünleri

Metal muhafazalı şalt cihazı (Metal-Enclosed Switchgear), elektrik güç sistemlerinde kullanılan ve her bir fonksiyonel bileşenin ayrı metal bölmeler içerisinde yer aldığı bileşenlerden oluşan bir şalt donanımdır. En az üç bölmeden oluşur: kesici, bara ve besleyici. İşletme personelinin canlı parçalarla temasını önleyen mekanik ve elektriksel

kilitlemelere ve yanlış manevra olasılığını önleyen güvenlik önlemlerine sahiptir. Metal muhafazalı hücrelerde kullanılan şalt cihazı ve bağlantı elemanları hava yalıtımlı ve gaz yalıtımlı olmak üzere iki ana bölümde tanımlanır (Yundong ve diğerleri, 2004; Smeets ve diğerleri, 2015).

Bu cihazların temel işlevi, nominal çalışma aralığının dışında bir arıza durumunda akım akışını güvenli bir şekilde kesmektir. Tüm orta gerilim cihazları ilgili IEC veya IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standartlarına göre tasarlanır, bağımsız uluslararası test laboratuvarlarında ilgili standartlara göre test edilir ve onay sertifikaları yapılır. Bu standartlar arasında IEC 62271 standardı, Yüksek Gerilim Şalt Cihazları ve Kontrol Ekipmanları ile ilgili genel tanımları, test yöntemlerini ve gereklilikleri belirtir. IEC 60502, Orta Gerilim Güç Kabloları ve Aksesuarları ile ilgili bilgi sağlar ve IEC 61230, Topraklama ve Kısa Devre Ekipmanları ile ilgilidir. Benzer şekilde, IEEE C37.20 Orta Gerilim Şalt Cihazları ve Kontrol Ekipmanları, IEEE 400 - Güç Kablolarının Test Edilmesi ve Durum Değerlendirmesi standartlarıdır. IEC standartlarına göre bir gaz yalıtımlı (GIS) ürünü için temel testler şunlardır: Dielektrik Testleri (IEC 62271-1; IEC 60060-1), Kısa Süreli Akım Testi (IEC 62271-100; IEC 62271-200), Sıcaklık Artışı Testi (IEC 62271-1), Mekanik Dayanım Testi (IEC 62271-102) ve İç Ark Testi (IEC 62271-200). Bu testlerin tamamlanmasının ardından, GIS ürünü standartlara uygun olarak tasarlanır ve test edilir (El Ouadhane ve diğerleri, 2011).

Bu tez çalışmasında adı geçen Xiria ürünü, IEC standartlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Xiria Ring ana ünitesinin işlevi: Elektrikli ekipmanları kontrol etmek, korumak ve 24 kV/630 A'ya kadar enerji dağıtmaktır. Xiria 630 ring ana ünite - CCF bloğu, Eaton'ın 24 kV / 630 A'ya kadar atanmış değerlere sahip ring ana ünite ve elektrik dağıtım şalt uygulamaları için orta gerilim şalt çözümüdür. Bu üniteler üç (CCF) ve dört (CCCF) panel versiyonlarında tedarik edilir. Resim 3.3'te gösterilen CCF bloğu Bir ana bara, 2 yük kesme şalteri ünitesi ve 1 sigortalı yük kesme şalteri ünitesinden oluşur.



Resim 3.3. Xiria CCF blok ünitesi

Aynı ürün grubunda bulunan bir diğer versiyonu ise bir ana bara, 2 yük kesme şalteri ünitesi ve 1 devre kesici ünitesinden oluşan CCV bloğudur. Kesici ünitesi de üç (CCV) ve dört (CCCV) panel versiyonlarında tedarik edilir. Resim 3.4’de CCV bloğu gösterilmiştir. Şalt tasarımı, yalıtım için aşırı basınçsız doğal hava (Air-GIS) ve vakum kesici teknolojisi kullanan Eaton temel teknolojilerine dayanmaktadır. Birincil parçalar ve anahtarlama mekanizmaları, çevresel koşullara karşı mükemmel şekilde korunan, hermetik olarak kapatılmış, ömür boyu hava geçirmez şekilde kapatılmış bir tanka yerleştirilmiştir.



Resim 3.4. Xiria CCV blok ünitesi

CCF ve CCV blokları aşırı yüklere ve kısa devrelere karşı koruma sağlayan, 24 kV atanmış gerilime ve 630 A yüklü ana baraya sahip, %30 yükte çalışan ve 20 yıllık referans hizmet ömrüne sahip, ana bara, 2 yük kesme şalteri ünitesi ve 1 sigortalı yük kesme şalteri ve 2 yük kesme şalteri ünitesi ve 1 kesici ünitesinden oluşan akımı iletmek, kesmek, izole etmek ve enerjiyi dağıtmak için kullanılan ünitelerdir. Bu tanım ürünün fonksiyonunun bir niceliğidir. Tüm hesaplamalar ve LCA sonuçları bu tanıma göre normalleştirildiğinden, ürünü ve fonksiyonu tanımlama önem arz etmektedir.





4. MATERYAL VE METOD

4.1. Amaç Ve Kapsam

Bu tez çalışması kapsamı, ürün yaşam döngü aşamaları boyunca çevresel etkileri ölçmek, hesaplamaları ve metodolojiyi doğrulamak ve bu etkileri doğrulanmış EPD aracılığıyla iletmek için referans ürün olarak ring ana ünitesi CCF ve CCV bloğu dikkate alan bir Xiria Ring ana ünitesinin bir değerlendirmesidir. Bu tez çalışması, ürünün çevresel etkileri ve kritik noktalar hakkında şirket içi mühendislik ekiplerine bilgi sağlayarak gelecekteki eylemlere karar vermelerine yardımcı olacaktır. Ek olarak etkileri daha da iyileştirmek için kullanılan malzemelerin ve proseslerin çevresel etkilere nasıl yansıdığını somut verilerle öne çıkaracaktır. Ayrıca sektördeki farklı üreticilerin ürünlerinin çevresel verileriyle de istatistiksel analiz yoluyla yapılan karşılaştırmalar ile mevcut teknolojilerin çevresel etkisi verileriyle ortaya konulacaktır.

4.1.1. Kapsam tanımı

Ürün sistemleri

Xiria 630 Ring ana ünitesi CCF ve CCV bloğu, Xiria Ring ana ünitesi için referans ürünler olarak seçilmiştir. Çizelge 4.1’de CCF bloğu ve Çizelge 4.2’de CCV bloğu ürünlerinin temel özelliklerini içermektedir.

Çizelge 4.1. CCF bloğu temel özellikleri

Ürün Tipi	Ürün Ailesi: Xiria 630 ring ana ünitesi CCF block
	Tanım: Xiria 630 ring ana ünitesi CCF block Referans ürünün açıklaması: Xiria 630 ring ana ünitesi CCF block Referans ürünün özellikleri: $U_r = 24 \text{ kV}$, $I_r = 36 \text{ A}$, $I_k = 21 \text{ kA}$ - $t_k = 3 \text{ s}$
Üretim Lokasyonu	Eaton Kritik Sistemler Bölümü İş Kolu: Elektrik Sistemleri ve Çözümleri Yerleşke : Ankara (Türkiye), Hengelo (Hollanda)
Ürün Ağırlığı (Ürün+Ürün Paketi)	502 kg
Uygulama Alanları	Dağıtım şebekeleri, trafo ve enerji altyapı merkezleri, endüstriyel enerji kaynakları ve endüstriyel güç kaynakları.

Çizelge 4.2. CCV bloğu temel özellikleri

Ürün Tipi	Ürün Ailesi: Xiria 630 Ring main unit CCV Block
	Tanım: Xiria 630 ring ana ünitesi CCV block Referans ürünün açıklaması: Xiria 630 ring ana ünitesi CCV block Referans ürünün özellikleri: $U_r = 24 \text{ kV}$, $I_r = 630 \text{ A}$, $I_k = 21 \text{ kA}$ - $t_k = 3 \text{ s}$
Üretim Lokasyonu	Eaton Kritik Sistemler Bölümü İş Kolu: Elektrik Sistemleri ve Çözümleri Yerleşke : Ankara, Hengelo (Hollanda)
Ürün Ağırlığı (Ürün+Ürün Paketi)	387 kg
Uygulama Alanları	Dağıtım şebekeleri, trafo ve enerji altyapı merkezleri, endüstriyel enerji kaynakları ve endüstriyel güç kaynakları.

Ürün fonksiyonu, fonksiyonel birim, referans akışları*Fonksiyon*

Xiria Ring ana ünitelerinin işlevi: “Elektrikli ekipmanları kontrol etmek, korumak ve 24 kV/630 A’e kadar enerjiyi dağıtmak”tır.

CCF ünitesi için fonksiyonel Birim

Fonksiyonel birim, ürünün fonksiyonunun niceliksel ifadesidir. Tüm hesaplamalar ve LCA sonuçları bu birime göre normalleştirildiğinden, tanımı çok önemlidir. Fonksiyonel birim tanımlanırken aşağıdaki temel parametreler dikkate alınır:

Akımı oluşturmak, kesmek, izole etmek ve enerjiyi dağıtmak için aşırı yüklere ve kısa devrelere karşı koruma sağlayan CCF ünitesi, bir ana bara, 2 yük ayırıcı ünitesi ve 24 kV atanmış gerilime sahip 1 sigortalı yük ayırıcı ünitesinden oluşur ve ana bara 630 A ile yüklenir ve 20 yıllık referans hizmet ömrü boyunca %30 yükte çalışır.

Bu koruma aşağıdaki parametrelere uygun olarak sağlanır:

- Ürün standardı: IEC 62271-200
- Anma kısa süreli dayanım akımı: 21 kA – 3s
- Anma normal akım sigortalı yük ayırıcı: 36 A

CCV ünitesi için fonksiyonel birim

Fonksiyonel birim, ürünün fonksiyonunun niceliksel ifadesidir. Tüm hesaplamalar ve LCA sonuçları bu birime göre normalleştirildiğinden, tanımı çok önemlidir. Fonksiyonel birim tanımlanırken aşağıdaki temel parametreler dikkate alınır:

Akımı oluşturmak, kesmek, izole etmek ve enerjiyi dağıtmak için aşırı yük ve kısa devreye karşı koruma sağlayan, 24 kV ve 630 A yüklü ana bara gerilimine sahip bir ana bara, 2 yük kesme şalteri ünitesi ve 1 devre kesici ünitesinden oluşan, 20 yıllık referans hizmet ömrü boyunca %30 yükte çalışan bir sistemdir.

Bu koruma aşağıdaki parametrelere uygun olarak sağlanır:

- Ürün standardı: IEC 62271-200
- Anma kısa süreli dayanım akımı: 21 kA – 3s
- Anma normal akım devre kesicisi (maksimum 630): 100 A

Referans akışlarının hesaplanması

Referans akışları (Çizelge 4.3), fonksiyonel birim tarafından ifade edilen işlevi yerine getirmek için gereken ürün sisteminin süreçlerinden elde edilen çıktıları ifade eder.

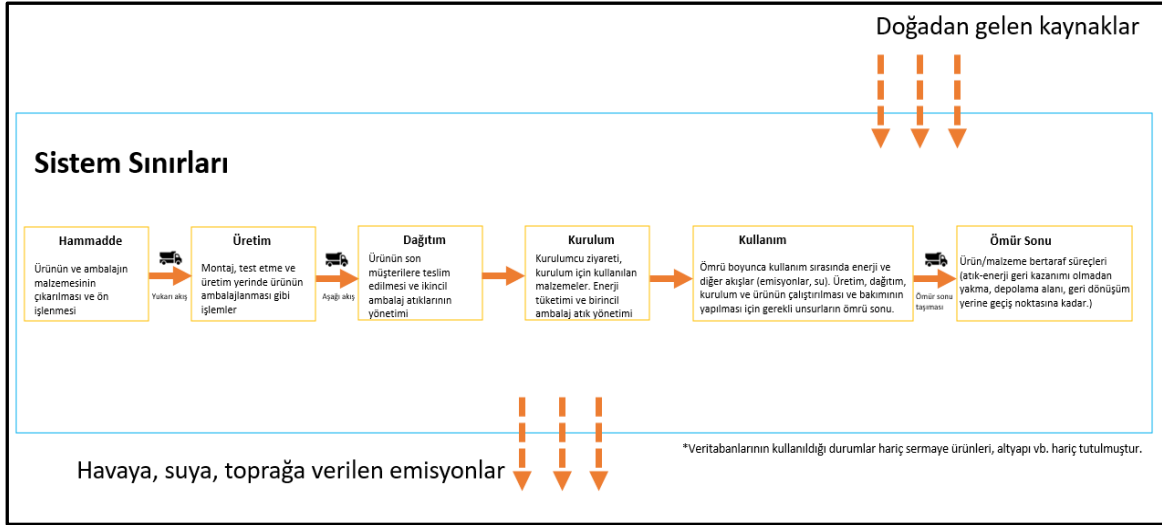
Çizelge 4.3. Referans akışlarının gösterimi

Yaşam döngü aşaması	Kategori	Detaylar
Üretim	Ürün	Ring main unit(CCF Blok, CCV Blok)
	Paketleme	Ambalaj malzemesi (Ürün ambalajı + Bileşen ambalajı)
	Atık	Malzeme kaybı
	Atık	Komponent paketleme
Dağıtım	Paketleme	Yeniden paketleme
	Atık	Ambalajların yenilenmesi
Kurulum	Malzeme	Kurulum elemanları
	Atık	Birincil ve ikincil ambalajların işlenmesi
Kullanım	Malzeme	Bakım elemanları
	Atık	Bakım elemanları
Kullanım sonu	Atık	Ömrünü tamamlamış unsurlar

Sistem sınırları

Genel sistem açıklaması

Şekil 4.1, hammaddenin çıkarılmasından bertarafına kadar (beşikten mezara) tüm aşamaları içeren, tez çalışması için dikkate alınan genel bir ürün sistemini sunmaktadır.



Şekil 4.1. Ürün sisteminin sistem sınırları

Üretim			Dağıtım	Kurulum	Kullanım							Kullanım sonu			Faydalar	
Hammadde tedarigi	Taşıma	Üretim	Taşıma	Kurulum Prosesi	Kurulan ürünün kullanımı veya uygulaması	Maintenance	Repair	Yer değiştirme	İyileştirme	Enerji gereklilikleri (Kullanım boyunca)	Su gereklilikleri (Kullanım boyunca)	Demontaj	Atık arıtma tesisine transfer etme	Atıkların yeniden kullanımı, geri kazanımı ve/veya geri dönüşümü açısından işlenmesi	Ürün bertarafı	Sistem sınırlarının ötesinde faydalar ve yükler

Şekil 4.2. LCA aşamaları; Dahil edilenler ve hariç tutulanlar

Ürünün yaşam döngüsünün ilk aşaması; hammaddelerin çıkarılması, malzemelerin bileşen sınıflarına göre işlenmesi, her bir alt ürün için Eaton'a ait özel tesislerde bileşen ve alt montaj üretimi ile Türkiye'nin Ankara ilindeki Eaton tesisinde nihai montajın gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Ürün ile birlikte kullanılan hammaddeler ve bileşenler, tedarikçiden Eaton tesisine sevk edilirken ambalaj malzemeleriyle korunmaktadır. Nihai olarak paketlenmiş ürün, Avrupa'daki müşteri lokasyonlarına taşınmakta ve kullanım sürecine geçilmektedir.

Yaşam döngüsünün son aşaması, PCR-4 dokümanının 2.5.6 numaralı bölümüne uygun şekilde modellenmiş olup, ürün ve malzeme bertarafı ECO'DEEE yöntemi esas alınarak değerlendirilmektedir.

Hariç tutmalar ve ihmaller

Bazı faaliyetler, referans akışına tahsis edilmesinin zorluğu nedeniyle hariç tutulmuştur ve PCR Bölüm 2.2.9'a göre ürünle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılmıştır. Modül D, çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Sabitleme ve klipleme işlemleri için gereken enerji, işlemlerde hariç tutulmuştur.

Kesme-ayırma, hariç tutma kuralları

Yaşam Döngü Analizi (LCA) modeli, çalışma kapsamına tüm önemli ve ilgili süreçleri dahil etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, mümkün olduğunca hiçbir akış dışarıda bırakılmamıştır. Bununla birlikte genel bir kesme kriteri tanımlanmıştır: Bir akış veya sürecin, sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca tüm etki kategorilerine olan katkısının %5'ten az olduğu deneysel veriler veya kanıtlarla gösterilebiliyorsa, söz konusu akış veya süreç çalışmanın dışında tutulabilir. Ancak, ürün yüksek çevresel etkiye sahip malzemeler içeriyorsa (PCR Çizelge 4.4'de listelenen malzemeler), bu malzemelere herhangi bir kesme kuralı uygulanmamaktadır.

Tez kapsamında çalışılan Xiria CCF ve CCV ürünleri özelinde kütle kesme kriterleri ürünlerin referans akış ağırlıkları, ölçülen değerler ve bileşenlerin hesaplanan ağırlıkları temel alınarak %0.0 varyans oranıyla çalışılmıştır.

Tahsis yaklaşımı

Çoklu çıktı tahsisi

Çalışma sırasında herhangi bir tahsis uygulanmamıştır, çünkü veriler ürüne özgü olarak toplanmıştır ve ürünün üretimi sırasında herhangi bir yan ürün oluşmamıştır.

Ömür sonu tahsisi

PCR yönergelerine göre, geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı yükünün dikkate alındığı kaçınılmış etki tahsisi yaklaşımı izlenmiştir.

Veri kaynakları

Sistemlerin ön plan verileri, incelenen sistemi yansıtmak üzere yüksek özgüllükle modellenen parçalarla ilgilidir. Bu tez çalışmasında, ön plan verileri, üretim tesisindeki montaj süreci boyunca bileşen ağırlıklarını, malzeme bileşimini, tedarikçilerin konumunu ve kaynak tüketimini içermektedir. Bu verilerin sistematik bir şekilde işlenmesini sağlayan, veri akışını yönlendiren ürün ağacı olarak adlandırılan, ürünlerin alt montajlarından detay standart elemanlarına kadar içeren malzeme listeleridir (BoM-Bill of Material). Malzeme listelerinin elde edilmesinin de temel adımı ürünün üç boyutlu modelinin mühendislik ekipleri tarafından tam ve eksiksiz bir şekilde meydana getirilmesidir. Tüm detay tasarımları tamamlanan bir ürün sadece görsel kontrol ve inceleme olanağı sağlamayıp tasarım aşamasından sonraki bütün mühendislik çalışmaları için de referans teşkil etmektedir. Arka plan veritabanı olarak EIME aracında ELCD ve CODDE veritabanları kullanılmıştır.

Etki kategorilerinin seçimi ve yaşam döngü etki analizi yöntemleri

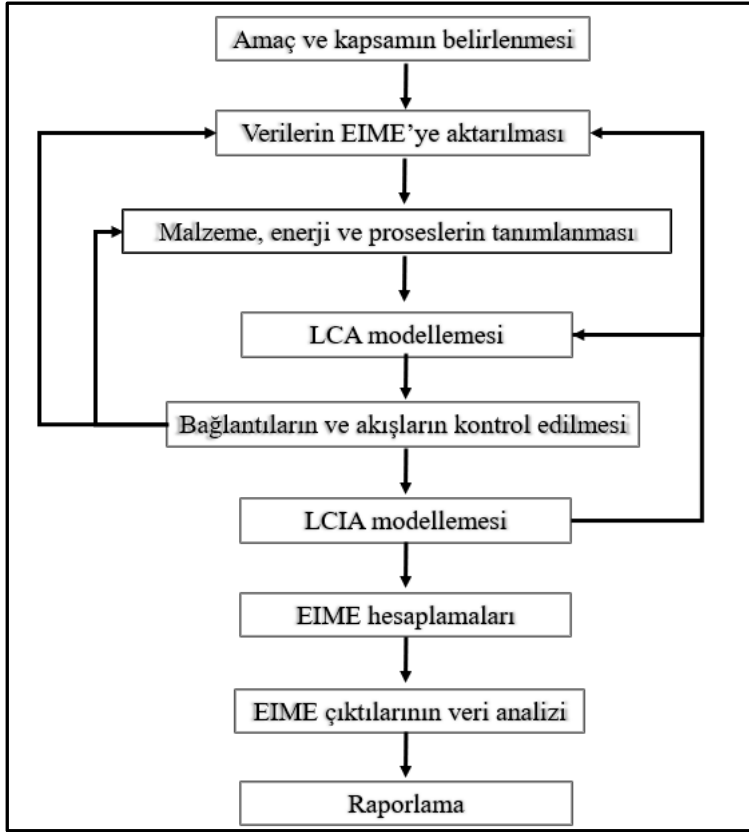
PEP Ecopassport PCR 4. baskının zorunlu çevresel etki göstergeleri ve envanter akış göstergeleri, Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi bu çalışma için uygun kabul edilmektedir. Zorunlu göstergelerin yanı sıra, listelenen isteğe bağlı çevresel göstergeler de Eaton uluslararası çalışmalarına dahil edilmesine rağmen bu tez çalışmasında gizlilik kapsamında beyan edilmemiştir. Gösterge Seti: PEF EF 3.0 (Uyumluluk: PEP ed.4, EN15804+A2) v2.0

Çizelge 4.4. PCR'ye göre zorunlu çevresel etki göstergeleri

Gösterge	Açıklama	Birim
Kaynak kullanımı, mineraller ve metallere	Doğal fosil olmayan kaynakların tükenmesinin göstergesi (doğadan alınan mineral ve metal kaynaklarının antimonmuş gibi miktarını ifade eder)	kg Sb e.
Kaynak kullanımı, fosiller	Gösterge, farklı yenilenemeyen kaynaklardan (petrol, doğal gaz vb.) elde edilen birincil enerji tüketimini temsil eder.	MJ
Asidifikasyon (AP)	Atmosfere azot oksitler, kükürt oksitler, amonyak ve hidroklorik asit salınımı sonucu toprak ve sularda oluşabilecek asitlenme potansiyelinin göstergesi.	mole of H+ e.
Ötrofikasyon, tatlı su	Sucul ekosistemin besin elementlerince zenginleştirilmesinin tatlı suların ötrofikasyonuna katkısının göstergesi.	kg P e.
Ötrofikasyon, deniz suyu	Sucul ekosistemin besin elementlerince zenginleştirilmesinin deniz suyunun ötrofikasyonuna katkısının göstergesi.	kg N e.
Ötrofikasyon, karasal	Besin elementlerinin zenginleştirilmesi yoluyla karasal ekosistemlerin (örneğin çayırlar) ötrofikasyonuna katkıda bulunulması.	mol N e.
İklim değişikliği – toplam	Sera etkisine katkıda bulunan havaya salınan emisyonların neden olduğu potansiyel küresel ısınmanın göstergesi (toplam).	kg CO ₂ e.
İklim değişikliği – biyojenik	İklim değişikliğinin bu alt kategorisi, tüm kaynaklardan biyokütle tarafından başlangıçta yakalanan ve dönüşüm veya bozunma sırasında salınan havaya karbon emisyonlarını ve ayrıca biyokütle büyümesi sırasında CO ₂ emilimini kapsar.	kg CO ₂ e.
İklim değişikliği – fosil	İklim değişikliğinin bu alt kategorisi, fosil yakıtların oksidasyonu veya indirgenmesi sonucu oluşan küresel ısınmayı kapsamaktadır.	kg CO ₂ e.
İklim değişikliği - arazi kullanımı ve arazi kullanım dönüşümü	İklim değişikliğinin bu alt kategorisi, arazi kullanımındaki değişiklikten kaynaklanan ormansızlaşma, yol yapımı veya diğer araziyle ilgili faaliyetlerden kaynaklanan biyojenik karbon değişimlerini kapsar.	kg CO ₂ e.
Ozon tabakasının incelenmesi	Ozon tabakasının tahribatına katkıda bulunan havaya salınan emisyonların göstergesi.	kg CFC-11 e.
Fotokimyasal ozon oluşumu - insan sağlığı	Güneş ışınlarının etkisiyle uçucu organik bileşikler (VOC) ve azot oksitler nedeniyle alt atmosferde fotokimyasal ozon (smog) oluşumunu etkileyen gazların emisyonlarının göstergesi.	kg NMVOC e.
Su kullanımı	Bu gösterge, su tüketiminin, suyun tüketildiği bölgenin su stresini de hesaba katan bir faktörle çarpılmasıyla elde edilen değeri ifade eder ((kıtlığa bağlı su kullanımı).	m ³ e.

Yazılım ve veritabanı

Bu tez kapsamında LCA yazılımı olarak EIME v6.1.1 kullanılmıştır. Arka plan verileri için veritabanı için ise CODDE 2024-04 [Avrupa Komisyonu JRC tarafından kurulan ELCD veritabanını ve ESR (Eco-Systemes-et-Recylum) tarafından geliştirilen veritabanını kapsar] ve CODDE veritabanını [Bureau Veritas tarafından geliştirilen LCIE'i] kapsar.



Şekil 4.3. EIME iş akış şeması

4.2. Yaşam Döngü Envanteri

4.2.1. Ürün üretimi

Üretim aşamasının girdileri ve çıktıları; ürün ve ambalaj için hammadde çıkarımı, endüstriyel dönüşüm ve üretim süreçleri, süreç sırasında oluşan atıklar ve malzemelerin, bileşenlerin ve alt montajların Eaton tesisine yukarı akış nakliyesi ile ilgilidir.

Üretim aşamasını modellemek için bileşenlerin ağırlığını, malzeme özelliklerini, üretim süreçlerini ve tedarikçi bilgilerini içeren malzeme listesi (BoM) kullanılır.

LCI veritabanlarında bulunan ilgili birim süreçleri, her malzeme veya bileşen için aşağıdaki genel yönergeler izlenerek belirlenir:

- Üretim verileri, malzeme veya bileşenin üretildiği bilinen konumu temsil etmelidir. Uygun bölgeyi temsil eden veriler bulunamadığı takdirde, küresel ortalama üretimi temsil eden veriler kullanılır. Bu veriler bulunamazsa, yaklaşık olarak aynı teknolojik

gelişim seviyesine sahip bir bölgeye karşılık gelen veriler kullanılır. Belirli bir malzeme veya bileşen için yalnızca bir veri kümesi mevcutsa, temsil ettiği konumdan bağımsız olarak bu veri kümesi seçilir.

- Bazı durumlarda, süreçlerin uygun olmadığı durumlarda, yaklaşık bir süreç seçilir. PSR-0005-ed3-EN-2023 06 06'ya göre, kesin değerin bilinmediği tüm işlemler için %30 kayıp oranı varsayılmıştır.
- PEP-PCR-ed4-EN-2021 09 06, bölüm 2.5.3 Taşıma Senaryoları uyarınca: Her bir bileşenin tedarikçiden/Eaton fabrikasından ilgili alt ürünün Ankara, Türkiye'deki üretim tesisine olan mesafeleri ve taşıma şekli, tedarikçi konumlarının gerçek bilgilerine göre ve kesin ayrıntılar bilinmiyorsa dikkate alınmıştır. Yerel/yurt içi taşıma: Tedarikçilerin bir kısmı Hollanda bölgesinde/yakınında bulunduğundan kamyonla 3.000 km ve uluslararası taşıma: Uluslararası olarak tedarik edilen bileşenler için 19.000 km tekneyle artı 1.000 km kamyonla.
- Hammadde ve bileşenlerin ambalajlanması, üretim tesislerine nakliyeleri de dahil olmak üzere, tesis tarafından sağlanan tahsis edilmiş bilgilere göre dikkate alınmıştır.
- Çizelge 4.5'de CCF bloğu için, Çizelge 4.6'da CCV bloğu için malzeme kategorileri, temel malzemeler, bunların ağırlıkları ve ürünün toplam ağırlığına katkıları, ambalaj ve aksesuarlar yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Xiria CCF bloğu için ağırlık katkısı ve PEP malzeme kategorileri

CCF BLOK			
Referans Ürün Ağırlığı	502 kg (paketleme dahil)		
Kategori PEP Malzeme	Malzemeler	Kütle (kg)	Yüzde (%)
Metaller	Çelik	3,60E+02	71,7%
Metaller	Bakır	3,72E+01	8%
Diğer	Tahta	2,00E+01	4,0%
Diğer	Silika	1,36E+01	2,1%
Plastikler	Polipropilen (Termoplastik 1)	1,29E+01	2,6%
Plastikler	Epoksi Termoset Plastic	6,49E+00	1,5%
Metaller	Paslanmaz çelik	6,41E+00	1,3%
Plastikler	Polyester (Termoplastik 2)	6,08E+00	1,2%
Diğer	Cam	5,93E+00	1,2%
Diğer	Cardboard	5,00E+00	1,0%
Diğer	Seramik	4,20E+00	0,8%
Diğer	Toz kaplama	3,96E+00	0,8%
Metaller	Galvaniz	3,45E+00	0,7%
Plastikler	Polikarbonat (Termoplastik 3)	2,90E+00	0,6%
Diğer	Kalsiyum karbonat (Mineral Tozları)	2,81E+00	0,6%
Diğer	Çeşitli malzemeler	1,10E+01	1,9%
Toplam		5.02E+02	100 %

Çizelge 4.6. Xiria CCV bloğu için ağırlık katkısı ve PEP malzeme kategorileri

CCV Blok			
Referans Ürün ağırlığı	387 kg (paketlenme dahil)		
Kategori PEP Malzeme	Malzemeler	Kütle (kg)	Yüzde (%)
Metaller	Çelik	2,67E+02	68,90%
Metaller	Bakır	3,10E+01	8,00%
Diğer	Tahta	2,00E+01	5,20%
Diğer	Silika	1,20E+01	3,10%
Plastikler	Polipropilen (Termoplastik 1)	1,08E+01	2,80%
Metaller	Paslanmaz çelik	5,93E+00	1,50%
Plastikler	Epoksi (Termoset plastik)	5,90E+00	1,50%
Diğer	Cam	5,15E+00	1,30%
Diğer	Cardboard	5,00E+00	1,30%
Diğer	Seramikler	4,43E+00	1,10%
Plastikler	Polyester (Termoplastik 2)	4,21E+00	1,10%
Metaller	Galvaniz	3,44E+00	0,90%
Diğer	Toz kaplama	2,97E+00	0,80%
Diğer	Kauçuk	2,64E+00	0,70%
	(Elastomer)		
Diğer	Kalsiyum karbonat (Mineral toz)	2,54E+00	0,70%
Diğer	Çeşitli malzemeler	4,58E+00	1,20%
Total		3.87E+02	100%

Üretim aşamasında oluşan bileşen ambalaj atıkları ve üretim süreci kayıp atıklarının kullanım ömrünün Avrupa'da olduğu varsayılmış olup, hesaplamalar BUREAU VERITAS CODDE tarafından geliştirilen Eco'DEEE yöntemine dayanmaktadır.

4.2.2. Dağıtım aşaması

Ürünün ana pazarı Avrupa olduğundan, bu çalışmada Ankara'daki Eaton tesisinden son kullanıcıya kadar aşağıdaki nakliye senaryosu dikkate alınmıştır.

Kıta içi nakliye: Kamyonla 3.500 km. Varsayılan olarak, yükleme oranı %85 olan 27 tonluk bir tır kullanılmaktadır.

4.2.3. Kurulum aşaması

Ürünün kurulumu Eaton servis ekiplerinden oluşan uzman kişilerden biraraya gelen bir ekiple yapılır ve maneldir. Kurulum aşamasında oluşan atıkların kullanım ömrü sonu, BUREAU VERITAS CODE tarafından geliştirilen Eco'DEEE yöntemine dayanmaktadır. Ayrıca, kurulum süreci herhangi bir ek sabitleme elemanı, enerji kaynağı gerektirmemekte ve bu aşamada herhangi bir atık oluşmamaktadır. Ancak, kurulum sürecinde oluşan ambalaj atıkları için aşağıdaki etkiler dikkate alınmıştır:

Ambalaj atıklarının (Birincil ve İkincil) 100 km boyunca karayoluyla EOL arıtma tesisine taşınması (PCR kurallarına uygun olarak), ardından son kullanıcı konumunda oluşan ambalaj atıklarının EOL yönetimi. Kurulum aşamasında oluşan atıkların kullanım ömrü sonu, ECO'DEEE yöntemine göredir.

4.2.4. Ürün kullanım aşaması

Bir Xiria RMU'nun belirlenen kullanım ömrü boyunca nihai enerji tüketimi, kilowatt-saat cinsinden ifade edilerek aşağıdaki şekilde hesaplanır:

- Toplam Enerji Tüketimi = Toplam Güç Kaybı x Yükleme Oranı x Belirlenen Kullanım Ömrü,
- Güç kaybı = Kullanım süresi boyunca Joule kayıpları ile ifade edilen güç tüketimidir.

Kullanım aşamasındaki güç tüketimi daha sonra aşağıdaki Eşitlik 4.1'e göre ifade edilir:

$$E = R \times I^2 \times \Delta t \quad (4.1)$$

- E: Güç tüketimi, genellikle J cinsinden ifade edilir; burada kWh cinsinden ifade edilir.
- R: Güç bağlantı aksesuarı için referans ürünün iletken kısmının direnci, mΩ cinsinden ifade edilir.
- I: Akım yoğunluğu (A),

➤ Δt : Kullanım süresi (yıl).

$$R_{toplam} = R1 + R2 + R3 \quad (4.2)$$

$$Güç\ kaybi = \sum_{i=1}^3 R_i x I^2 \quad (4.3)$$

Tez kapsamındaki referans ürünler Xiria RMU CCF ve CCV Bloğu için detaylı enerji hesaplamaları Bulgular bölümünde derlenmiştir.

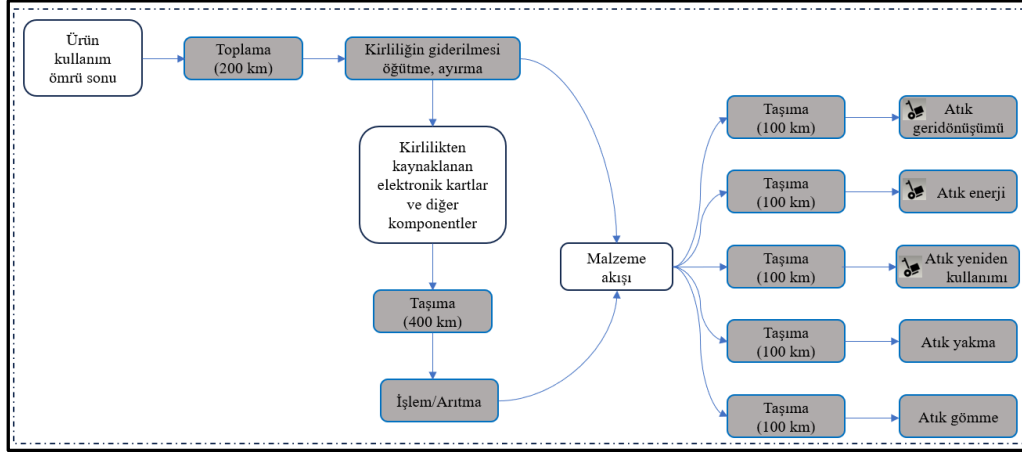
4.2.5. Kullanım ömrü sonu aşaması

Ürün Ömrünün Sonu Aşaması, PCR Bölüm 2.2.7'de önerilen senaryoya uygun olarak modellenmiştir. Bu aşama, ürünün kullanım süresinin tamamlanmasının ardından çevresel etkilerinin değerlendirilmesini kapsamaktadır. Modelleme sürecinde aşağıdaki temel unsurlar dikkate alınmıştır:

1. Atık Toplama: Ürünün kullanım ömrü sonunda oluşan atıkların sistematik biçimde toplanması süreci.
2. Arıtma Süreçleri:
 - Malzeme Geri Kazanımı: Ürünün bileşenlerinin yeniden kullanılabilir hale getirilmesi.
 - Enerji Geri Kazanımı: Atıklardan enerji elde edilmesi, atık enerjinin tekrar dönüşüme sokulması.
 - Bertaraf İşlemleri: Atıkların enerji geri kazanımı ile veya olmaksızın depolanması ya da yakılması.
 - Kirlilik Giderme: Özellikle 2012/19/EU sayılı WEEE Direktifi kapsamındaki ürünler için, özel kullanım ömrü sonu arıtma merkezlerinde nihai işleme kadar gerçekleştirilen kirlilik azaltma faaliyetleri.

Bu süreçlerin tamamı, kullanım ömrü sonu aşamasının çevresel etkilerini bütüncül bir şekilde değerlendirmek amacıyla modele entegre edilmiştir. Şekil 4.3, bu aşamanın şematik gösterimini sunarak sürecin görsel olarak anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.

Ürün ömrünün sonuna ilişkin etki hesaplamaları, BUREAU VERITAS CODE tarafından geliştirilen Eco'DEEE yöntemine dayanmaktadır. Çalışmada kullanılan enerji modeli Avrupa'dır.



Şekil 4.4. Kullanım ömrü sonu şematik gösterimi

Genel atık arıtma istatistikleri, bir bölgedeki veya tesisdeki atıkların nasıl işlendiğini ve hangi oranlarda geri kazanıldığını, bertaraf edildiğini ya da enerjiye dönüştürüldüğünü gösteren nicel verilerdir. Bu istatistikler genellikle aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanır:

Atık miktarlarının belirlenmesi

Tüm kaynaklardan (evsel, endüstriyel, tehlikeli vb.) toplanan atıkların toplamı türlerine göre ayrılarak (organik, plastik, metal, cam vb.) toplam atık miktarı (ton/yıl) olarak değerlendirilir.

Arıtma ve bertaraf yöntemlerine göre dağılım

Her bir atık türü için aşağıdaki oranlar hesaplanır:

- Geri Dönüşüm Oranı (%) = (Geri dönüştürülen atık miktarı / Toplam atık miktarı) × 100
- Enerji Geri Kazanım Oranı (%) = (Yakılarak enerjiye dönüştürülen atık miktarı / Toplam atık miktarı) × 100
- Bertaraf Oranı (%) = (Depolanan veya yakılan atık miktarı / Toplam atık miktarı) × 100

Arıtma Verimliliği

$$\text{Kirlilik Giderme Verimi (\%)} = \left(\frac{\text{Giderilen kirlenici miktarı}}{\text{Girişteki toplam kirlenici miktarı}} \right) \times 100$$

Bu, özellikle su ve hava arıtma tesislerinde önemlidir.

İstatistiksel raporlama

Yıllık veya dönemsel raporlar hazırlanır. Genellikle Eurostat, TÜİK, EPA, OECD gibi kurumlar tarafından yayımlanır. Veriler grafikler, çizelgeler ve göstergelerle sunulur.

Tez çalışması kapsamında Xiria CCF ve CCV bloğu için uzun yıllardır yapılan çalışmaların sonucunda toplanan veriler ile Çizelge 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. Xiria ürünleri genel atık arıtma istatistikleri

Atık kazanımı	Ürün	Paketleme	Toplam
Yeniden kullanım	85,2%	15,0%	81,4%
Yakma	0,8%	39,8%	2,8%
Çöp sahası	14,1%	45,2%	15,8%

4.2.6. İstatistiksel yöntemler

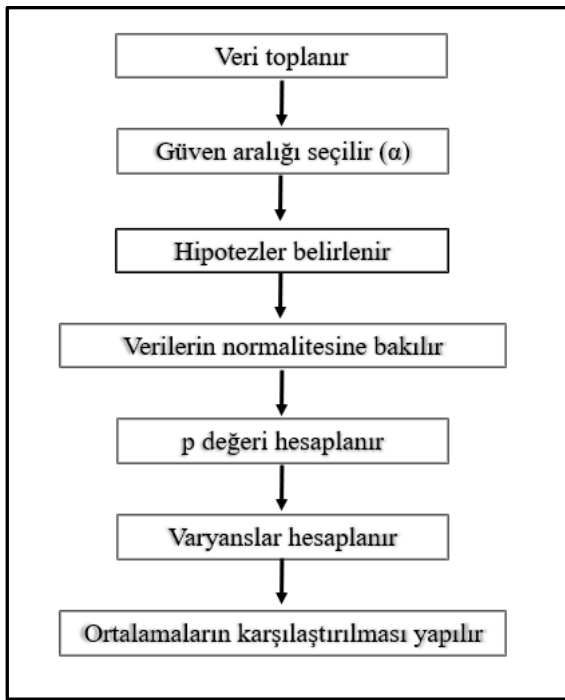
ANOVA

ANOVA (Varyans Analizi), üç veya daha fazla grup ortalaması arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını test eden parametrik bir yöntemdir. Temel prensibi, toplam varyansı iki bileşene ayırmaktır: gruplar arası varyans (treatment variance) ve grup içi varyans (error variance). Eğer gruplar arası varyans, grup içi varyansa göre anlamlı derecede büyükse, bu durum gruplar arasında fark olduğunu gösterir. ANOVA, normal dağılım ve varyans homojenliği varsayımlarına dayanır. Hesaplamalarda elde edilen sonuç, K plan ve plan başına ni simülasyonla yij, öngörülebilir bir bileşenin, μ_i

$$y_{ij} = \mu_i + u_{ij}, u_{ij} \rightarrow N(0, \sigma^2) \quad (4.4)$$

ve açıklanamayan/rastgele bir bileşenin, u_{ij} , toplamı olarak ifade edilebilir. Rastgele bileşenin normal bir dağılım izlediği varsayılır.

İki plandan fazlası birbiriyle karşılaştırıldığı için, uygun yöntem ANOVA'dır. Bu yöntem, sonuçların varyansını iki bileşene bölerek inceler: açıklanan varyans, V_E ve açıklanamayan varyans, V_{NE} . Varyanslar daha sonra, belirli bir güven düzeyi için bir F dağılımına göre karşılaştırılır ve "en az bir ortalama farklıdır" hipotezinin doğru olup olmadığı belirlenir (Moral, 2024).



Şekil 4.5. ANOVA akış şeması

Tez kapsamında ANOVA One-way istatistiksel metodu Eaton Xiria CCF bloğunun sektörde faaliyet gösteren diğer üreticilerin ürünlerinin çevresel etki değerleri ile normalite kıyaslamasının yapılması, varyanslarının kıyaslanması, Tukey metodu ile ortalamalarının karşılaştırılması çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Yaşam Döngü Etki Analizi

Etki kategorilerinin, kritik noktaların ve itici güçlerin daha ayrıntılı biçimde analiz edilmesi için ana bileşen katkıları temel alınmıştır. Çevresel etkilerin her bir etki göstergesi üzerindeki dağılımı, esas olarak iki ana faktör tarafından şekillendirilmektedir: Kullanılan malzemenin ağırlığı ve birim malzeme başına çevresel etki değeri. Bu durum, etki analizinin merkezinde malzeme özelliklerinin yer aldığını açıkça ortaya koymakta ve bu bağlamda malzeme listesinin (BoM) doğruluğu ve netliği kritik bir rol oynamaktadır. Hangi malzemelerin listeye dahil edileceği ya da hariç tutulacağına dair yapılan ayırım, analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Kesme-ayırma hariç tutma başlığında verilen detaylar ile son derece bağlantılıdır.

Netleştirilen ve doğruluğu sağlanan malzeme listesi, çevresel etki analizinin nicel boyutunu elde etmek amacıyla EIME programına yüklenmektedir. Bu program, listedeki her bir malzemenin çevresel etki değerlerini hesaplayarak sayısal veriler sunar. Elde edilen bu veriler, çalışmanın bulgular ve sonuçlar bölümünde çizelgeler halinde sunulur ve değerlendirme sürecine şeffaflık ve ölçülebilirlik kazandırmaktadır. Sonuç olarak malzeme listesi ile EIME programı arasındaki ilişki, çevresel etki analizinin temel yapı taşlarını oluşturur. Çizelge 5.1'de malzeme listesinden bir kesit görünmektedir. Bu kesitte 1.0 ürün seviyesinden 1.1.1.1.1 alt kırımlarına doğru ilerleyerek 9. seviyede en alt parçasına kadar ulaşılabilir. Ürün ve parça kodlama sistemi yedi basamaklı bir sayı olup ticari gizlilik nedeni ile sadece ilk üç rakamı paylaşılabilir.

Çizelge 5.1. Malzeme listesinin kırınımlarının görünümü

Seviye	Adet	Birim	Kod	Tanım	Açıklama	Durum	Versiyon
1.0	0	st	620xxxx			work	01
1.1	1	st	6205xxx			work	01
1.1.1	1	st	605xxxx	CONNECTION	CONNECTION 3P 24kV	released	03
1.1.1.1	6	st	604xxxx	BUSBAR	BUSBAR	released	02
1.1.1.1.1	1	st	6048xxx	SLEEVE TPE	SLEEVE TPE	released	01
1.1.1.1.2	1	st	604xxxx	BUSBAR	BUSBAR	released	02
1.1.1.2	3	st	668xxx	FIXING MATERIAL	FIXING MATERIAL ST_BOLT 3F	released	01
1.1.1.2.1	1	st	668xxx	STUD BOLT	STUD BOLT M8x739-A-8.8	released	01
1.1.1.2.2	1	st	668xxx	SHRINK- SLEEVE	SHRINK- SLEEVE	released	01
1.1.1.3	6	st	1082xxx	WASHER PLAIN 8.4x16S1.6StZn	WASHER PLAIN 8.4x16S1.6StZn	released	D

5.2. CCF Ve CCV Bloğunun Enerji Tüketim Değerleri

Tez kapsamındaki referans ürünler Xiria RMU CCF ve CCV Bloğu için hesaplamalar aşağıda belirtilmiştir. Kullanım aşamasındaki toplam direnç değerleri CCF bloğu için aşağıdaki Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. Direnç değerleri ürünün kalite kontrol aşamalarında ölçüm yapılarak elde edilen değerlerdir.

Çizelge 5.2. Xiria CCF bloğu için fazların direnç değişimi

Parametre	Birim	C Panel	C Panel	F Panel
Akım (I)	A	630	630	36
Direnç L1	[mΩ]	0,082	0,063	0,582
Direnç L2	[mΩ]	0,082	0,063	0,582
Direnç L3	[mΩ]	0,082	0,063	0,582

CCF paneli için direnç ve 20 yıllık kullanımdaki enerji tüketimi Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. CCF panelinin toplam enerji tüketim verileri

Parametre	Birim	C Panel	C Panel	F Panel
Akım (I)	A	630	630	36
Direnç L1	[mΩ]	0,082	0,063	0,582
Direnç L2	[mΩ]	0,082	0,063	0,582
Direnç L3	[mΩ]	0,082	0,063	0,582
20 yıllık kullanım	[kWh]	5132	3943	116
Toplam	[kWh]	9191		

Kullanım aşamasındaki toplam direnç değerleri CCF bloğu için aşağıdaki Çizelge 5.4'te gösterilmektedir. Direnç değerleri ürünün kalite kontrol aşamalarında ölçüm yapılarak elde edilen değerlerdir.

Çizelge 5.4. Xiria CCV bloğu için fazların direnç değişimi

Parametre	Birim	C Panel	C Panel	V Panel
Akım (I)	A	630	630	100
Direnç L1	[mΩ]	0,082	0,063	0,082
Direnç L2	[mΩ]	0,082	0,063	0,082
Direnç L3	[mΩ]	0,082	0,063	0,082

CCV paneli için direnç ve 20 yıllık kullanımdaki enerji tüketimi Çizelge 5.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. CCV panelinin toplam enerji tüketim verileri

Parametre	Birim	C Panel	C Panel	V Panel
Akım (I)	A	630	630	100
Direnç L1	[mΩ]	0,082	0,063	0,082
Direnç L2	[mΩ]	0,082	0,063	0,082
Direnç L3	[mΩ]	0,082	0,063	0,082
20 yıllık kullanım	[kWh]	5132	3943	130
Toplam	[kWh]	9205		

5.3. Xiria 630 Ring Ana Ünitesi CCF Bloğunun Genel Sonuçları

Zorunlu çevresel etki göstergeleri, zorunlu akış göstergeleri ve zorunlu olmayan çevresel etki göstergeleri için yaşam döngü analizi sonuçları CCF fonksiyonel birimi için sırasıyla Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de, CCV fonksiyonel birimi için ise Çizelge 5.9, Çizelge 5.10, Çizelge 5.11'de yer almaktadır. Kullanım aşamasındaki diğer alt modüller (B1-B5, B7) 0'a eşittir, bu nedenle çizelgede listelenmemiştir. Fonksiyonel ünite sonuçları %30 yük oranı ve 20 Yıl Referans Hizmet Ömrü esas alınarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.6. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCF bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu çevresel etki göstergeleri)

Zorunlu çevresel etki göstergeleri	Birim	Toplam	Üretim (A1-A3)	Dağıtım (A4)	Kurulum (A5)	Kullanım (B6*)	Ömür Sonu (C1-C4)
Asitleşme Potansiyeli (AP)	mole of H ⁺ e.	3,14E+01	2,05E+01	7,59E-01	-2,58E-02	5,78E+00	4,40E+00
Ötrofikasyon, tatlı su (Epf)	kg P e.	3,74E-01	1,24E-01	4,49E-05	1,52E-04	2,77E-03	2,47E-01
Ötrofikasyon deniz (Epm)	kg N e.	3,86E+00	2,15E+00	3,56E-01	1,69E-02	6,57E-01	6,98E-01
Ötrofikasyon, karasal (Ept)	mol N e.	4,52E+01	2,35E+01	3,90E+00	5,34E-02	9,87E+00	7,90E+00
İklim değişikliği-Toplam (GWP)	kg CO ₂ e.	5,48E+03	3,27E+03	1,20E+02	3,49E+01	1,01E+03	1,08E+03
İklim değişikliği-Biyojenik (GWPb)	kg CO ₂ e.	1,07E+02	9,84E+01	0,00E+00	1,65E+01	1,35E+00	7,63E+00
İklim değişikliği-Fosil (GWPf) (GWPf)	kg CO ₂ e.	5,38E+03	3,17E+03	1,20E+02	1,84E+01	1,01E+03	1,07E+03
İklim değişikliği-Arazi kullanımı ve arazi kullanımındaki değişiklik (GWPlu)	kg CO ₂ e.	8,20E-04	5,77E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,43E-04
Ozon tabakasının incilmesi (ODP)	kg CFC-11 e.	1,02E-04	8,69E-05	1,84E-07	-4,52E-07	4,33E-06	1,07E-05
Fotokimyasal ozon oluşumu - insan sağlığı (POCP)	kg NMVOC e.	1,43E+01	8,46E+00	9,84E-01	1,48E-02	2,11E+00	2,74E+00
Su Kullanımı (WU)	m ³ e.	4,42E+03	3,78E+03	4,55E-01	3,90E+00	3,58E+01	6,01E+02

Çizelge 5.7. Xiria 630 Ring ana ünitesi–CCF bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu envanter akış göstergeleri)

Envanter akış göstergeleri	Birim	Toplam	Üretim (A1-A3)	Dağıtım (A4)	Kurulum (A5)	Kullanım (B6*)	Ömür Sonu (C1-C4)
Hammadde olarak kullanılan yenilenebilir birincil enerji hariç yenilenebilir birincil enerjinin kullanımı	MJ	6,07E+03	9,18E+02	2,23E+00	-4,77E+00	4,95E+03	1,96E+02
Hammadde olarak kullanılan yenilenebilir birincil enerji kaynaklarının kullanımı	MJ	7,18E+02	7,18E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Yenilenebilir birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı	MJ	6,79E+03	1,64E+03	2,23E+00	-4,77E+00	4,95E+03	1,96E+02
Hammadde olarak kullanılan yenilenemeyen birincil enerji hariç, yenilenemeyen birincil enerjinin kullanımı	MJ	2,60E+05	1,59E+05	1,67E+03	-5,73E+01	2,58E+04	7,43E+04
Yenilenemeyen birincil enerji kaynaklarının hammadde olarak kullanılması	MJ	1,97E+03	1,97E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Yenilenemeyen birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı	MJ	2,62E+05	1,61E+05	1,67E+03	-5,73E+01	2,58E+04	7,43E+04
Tatlı suyun net kullanımı	m ³	1,03E+02	8,81E+01	1,06E-02	9,08E-02	8,34E-01	1,40E+01

Çizelge 5.8. Xiria 630 Ring ana ünitesi–CCF bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu olmayan çevresel etki göstergeleri)

Zorunlu Olmayan Çevresel etki göstergeleri	Birim	Toplam	Üretim (A1-A3)	Dağıtım (A4)	Kurulum (A5)	Kullanım (B6*)	Ömür Sonu (C1-C4)
Ekotoksosite, tatlı su	CTUe	6,96E+04	3,64E+04	8,07E+01	8,79E+01	1,09E+04	2,22E+04
İnsan toksisitesi, kanser	CTUh	1,36E-02	1,36E-02	2,10E-09	4,35E-07	1,18E-07	6,83E-06
İnsan toksisitesi, kanserojen olmayan	CTUh	2,62E-04	2,16E-04	2,28E-07	3,38E-08	4,68E-06	4,13E-05
Arazi kullanımı	Birim yok	1,38E+03	5,32E+02	0,00E+00	1,07E+01	2,02E+01	8,29E+02

Bir Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCF bloğu için, etki kategorilerinin çoğunun Üretim aşaması tarafından domine edildiği (%32,8-%92,3), Ötrofikasyon ve tatlı su (kg P eşdeğeri) hariç, Ömür Sonu aşamasının (%65,2) domine ettiği görülmektedir.

Çizelge 5.9. Xiria 630 Halka ana ünitesi-CCF bloğu için faz bazlı etki katkısı

Fazlar	Asidifikasyon (mole of H ⁺ e.)	Ötrofikasyon tatlı su (kg P e.)	İklim değişikliği-toplam (kg CO ₂ e.)	Ozon tabakasının incelmeleri (kg CFC-11 e.)	Fotokimyasal ozon oluşumu - insan sağlığı (kg NMVOC e.)	Su kullanımı (m ³ world e.)
Üretim	%65,3	%33,2	%59,3	%85,5	%59,1	%85,5
Dağıtım	%2,4	%0,0	%2,2	%0,2	%6,9	%0,0
Kurulum	%-0,1	%0,0	%0,6	%-0,4	%0,1	%0,1
Kullanım	%18,4	%0,7	%18,4	%4,3	%14,7	%0,8
Ömür sonu	%14	%66,0	%19,6	%10,5	%19,1	%13,6

Her bir etki göstergesi üzerindeki çevresel etkiler esas olarak malzemenin ağırlığı ve kullanılan malzemenin kg başına etkisi olarak iki faktör tarafından yönlendirilir.

502 kg'lık toplam ürün ağırlığının (ambalajlar dahil) %20-%25'i 2C panellerden, %20-25'i F panellerden ve %40-50'si 3P muhafazadan kaynaklanmaktadır. Geriye kalan maksimum %10'luk katkı ise ambalajdan kaynaklanmakta olup, bu katkının en büyüğü ahşap palettir.

Ürün bölümü etkilerine büyük oranda 3P Sigortalı Muhafaza daha sonra sırayla 2C Paneller ve F Paneller katkıda bulunmaktadır. Ötrofikasyon ve tatlı su etkilerine büyük oranda (%88,0) özellikle bakır atıklarının geri dönüşümü (%25,94) katkıda bulunmaktadır.

Bir alt seviye ürün bölümü etkileri büyük ölçüde çelik parçalar ve bunların daha yüksek ağırlık katkıları nedeniyle sırasıyla C panel Mekanizması, Kapı, F panel Mekanizması ve 3P Muhafaza Kapağı/Kapak tarafından sağlanmaktadır.

5.4. Xiria 630 Ring Ana Ünitesinin - CCV Bloğunun Genel Sonuçları

Zorunlu çevresel etki göstergeleri, zorunlu akış göstergeleri ve zorunlu olmayan çevresel etki göstergeleri için yaşam döngü analizi sonuçları CCV fonksiyonel birimi için ise sırasıyla Çizelge 5.10/Çizelge 5.11/Çizelge 5.12'de yer almaktadır. Kullanım aşamasındaki diğer alt

modüller (B1-B5, B7) 0'a eşittir, bu nedenle çizelgede listelenmemiştir. Fonksiyonel ünite sonuçları %30 yük oranı ve 20 Yıl Referans Hizmet Ömrü esas alınarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.10. Xiria 630 Ring ana ünitesi–CCV bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu çevresel etki göstergeleri)

Zorunlu çevresel etki göstergeleri	Birim	Toplam	Üretim (A1-A3)	Dağıtım (A4)	Kurulum (A5)	Kullanım (B6*)	Ömür Sonu (C1-C4)
Asitleşme Potansiyeli (AP)	mole of H ⁺ e.	2,53E+01	1,62E+01	5,85E-01	-2,58E-02	5,16E+00	3,32E+00
Ötrofikasyon, tatlı su (Epf)	kg P e.	2,96E-01	9,99E-02	3,46E-05	1,52E-04	2,48E-03	1,94E-01
Ötrofikasyon deniz (Epm)	kg N e.	3,03E+00	1,63E+00	2,74E-01	1,69E-02	5,86E-01	5,22E-01
Ötrofikasyon, karasal (Ept)	mol N e.	3,56E+01	1,78E+01	3,01E+00	5,34E-02	8,81E+00	5,92E+00
İklim değişikliği-Toplam (GWP)	kg CO ₂ e.	4,37E+03	2,54E+03	9,24E+01	3,49E+01	9,05E+02	8,05E+02
İklim değişikliği-Biyojenik (GWPb)	kg CO ₂ e.	1,08E+02	8,44E+01	0,00E+00	1,65E+01	1,21E+00	6,14E+00
İklim değişikliği-Fosil (GWPf)	kg CO ₂ e.	4,26E+03	2,45E+03	9,24E+01	1,84E+01	9,04E+02	7,99E+02
İklim değişikliği-Arazi kullanımı ve arazi kullanımındaki değişiklik (GWPlu)	kg CO ₂ e.	6,54E-04	4,95E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,58E-04
Ozon tabakasının incilmesi (ODP)	kg CFC-11 e.	8,14E-05	6,97E-05	1,42E-07	-4,52E-07	3,87E-06	8,15E-06
Fotokimyasal ozon oluşumu - insan sağlığı (POCP)	kg NMVOC e.	1,12E+01	6,49E+00	7,58E-01	1,48E-02	1,88E+00	2,05E+00
Su Kullanımı (WU)	m ³ e.	3,76E+03	3,27E+03	3,51E-01	3,90E+00	3,20E+01	4,60E+02

Çizelge 5.11. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCV bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu envanter akış göstergeleri)

Envanter akış göstergeleri	Birim	Toplam	Üretim (A1-A3)	Dağıtım (A4)	Kurulum (A5)	Kullanım (B6*)	Ömür sonu (C1-C4)
Hammadde olarak kullanılan yenilenebilir birincil enerji hariç yenilenebilir birincil enerjinin kullanımı	MJ	5,27E+03	6,91E+02	1,72E+00	-4,77E+00	4,43E+03	1,60E+02
Hammadde olarak kullanılan yenilenebilir birincil enerji kaynaklarının kullanımı	MJ	7,18E+02	7,18E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Yenilenebilir birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı	MJ	5,99E+03	1,41E+03	1,72E+00	-4,77E+00	4,43E+03	1,60E+02
Hammadde olarak kullanılan yenilenemeyen birincil enerji hariç, yenilenemeyen birincil enerjinin kullanımı	MJ	2,10E+05	1,30E+05	1,29E+03	-5,73E+01	2,30E+04	5,54E+04
Yenilenemeyen birincil enerji kaynaklarının hammadde olarak kullanılması	MJ	1,55E+03	1,55E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Yenilenemeyen birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı	MJ	2,11E+05	1,32E+05	1,29E+03	-5,73E+01	2,30E+04	5,54E+04
Tatlı suyun net kullanımı	m ³	8,76E+01	7,61E+01	8,16E-03	9,08E-02	7,45E-01	1,07E+01

Çizelge 5.12. Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCV bloğu yaşam döngü etkileri (Zorunlu olmayan çevresel etki göstergeleri)

Zorunlu Olmayan Çevresel etki göstergeleri	Birim	Toplam	Üretim (A1-A3)	Dağıtım (A4)	Kurulum (A5)	Kullanım (B6*)	Ömür sonu (C1-C4)
Ekotoksosite, tatlı su	CTUe	5,56E+04	2,83E+04	6,22E+01	8,79E+01	9,74E+03	1,74E+04
İnsan toksisitesi, kanser	CTUh	8,46E-04	8,42E-04	1,62E-09	4,35E-07	1,06E-07	3,38E-06
İnsan toksisitesi, kanser dışı	CTUh	2,09E-04	1,73E-04	1,76E-07	3,38E-08	4,18E-06	3,16E-05
Arazi kullanımı	Birim yok	1,12E+03	4,32E+02	0,00E+00	1,07E+01	1,80E+01	6,60E+02

Bir Xiria 630 Ring ana ünitesi-CCV bloğu için, etki kategorilerinin çoğunun Üretim aşaması tarafından domine edildiği (%33,7-%92,8), Ötrofikasyon ve tatlı su (kg P eq.) hariç, Ömür Sonu aşamasının (%65,4) hakim olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.13. Xiria 630 Halka ana ünitesi-CCV bloğu için faz bazlı etki katkısı

Fazlar	Asidifikasyon (mole of H ⁺ e.)	Ötrofikasyon freshwater (kg P e.)	İklim Değişikliği -toplam (kg CO ₂ e.)	Ozon tabakasının incelmesi (kg CFC- 11 e.)	Fotokimyasal ozon oluşumu - insan sağlığı (kg NMVOC e.)	Su kullanımı (m ³ world e.)
Üretim	%64,2	%33,7	%58	%85,6	%58	%86,8
Dağıtım	%2,3	%0,0	%2,1	%0,2	%6,8	%0,0
Kurulum	-%0,1	%0,1	%0,8	-%0,6	%0,1	%0,1
Kullanım	%20,4	%0,8	%20,7	%4,8	%16,8	%0,9
Ömür sonu	%13,1	%65,4	%18,4	%10	%18,3	%12,2

Her bir etki göstergesi üzerindeki çevresel etkiler esas olarak malzemenin ağırlığı ve kullanılan malzemenin kg başına etkisi olarak iki faktör tarafından yönlendirilir.

387 kg'lık toplam ürün ağırlığının (ambalaj dahil) %25-35'i 2C panellerden, %15-20'si V panellerden ve %45-50'si 3P muhafazadan kaynaklanmaktadır ve kalan maksimum %10'luk katkı ambalajdan kaynaklanmaktadır; bu katkının maksimum kısmı ahşap palettir. Ürün bölümü etkilerine büyük oranda 3P muhafaza daha sonra sırayla 2C paneller ve V panel katkıda bulunmaktadır. Ötrofikasyon ve tatlı su etkilerine büyük oranda [%77,4], özellikle bakır atıklarının geri dönüşümünden [toplam etkinin %25,94 kaynaklanmaktadır.

Bir alt seviye ürün bölümü etkileri büyük ölçüde çelik parçalar ve bunların daha yüksek ağırlık katkıları nedeniyle sırasıyla C panel Mekanizması, Kapı, V panel Mekanizması ve 3P Muhafaza Kapağı/Kapak tarafından sağlanmaktadır.

Çizelge 5.14'de zorunlu çevresel etki değerleri kıyaslanan CCF ve CCV ürünlerinin karşılaştırmalı çizelgesi verilmiştir. Aynı ürün grubuna ait farklı iki ürünün üstelik iki üründe de ortak olarak C modüllerinin beraber kullanılması CCF ve CCV ürünlerinin benzerlik oranlarını artırmaktadır. F ve V modüllerinden kaynaklanan ağırlık farklarının daha ağır olan ürünün zorunlu çevresel etkilerini artırması Çizelge 5.14'de açıkça görülmektedir. CCF ve

CCV bloklarının zorunlu çevresel etki göstergeleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.14’de verilmiştir.

Çizelge 5.14. CCF ve CCV bloklarının zorunlu çevresel etki göstergeleri karşılaştırması

Faz	CCF	CCV
Fonksiyonel birim ağırlıkları [kg]	502	387
İklim değişikliği-toplam (GWP) [kg CO ₂ e.]	5480	4370
Asidifikasyon [mole of H ⁺ e.]	3,14	2,53
Ötrofikasyon, tatlı su (Epf) [kg P e.]	3,74E-01	2,96E-01
Ötrofikasyon deniz (Epm) [kg N e.]	3,86E+00	3,03E+00
Ötrofikasyon, karasal (Ept) [mol N e.]	4,52E+01	3,56E+01
Ozon tabakasının incilmesi (ODP) kg CFC-11 e.	1,02E-04	8,14E-05
Fotokimyasal ozon oluşumu - insan sağlığı (POCP) kg NMVOC e	1,43E+01	1,12E+01
Su kullanımı (WU) m ³ e.	4,42E+03	3,76E+03
Yenilenebilir birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı (MJ)	6,79E+03	5,99E+03
Yenilenemeyen birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı (MJ)	2,62E+05	2,11E+05
Tatlı suyun net kullanımı (m ³)	1,03E+02	8,76E+01

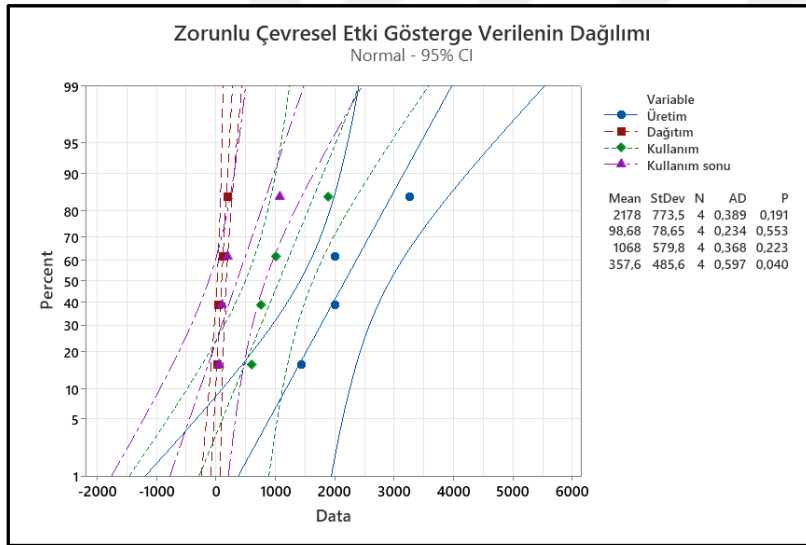
5.5. Tez Çalışmasının Literatür Sonuçları İle Karşılaştırmalı Analizi

Tez çalışması kapsamında çalışılan Xiria CCF ürünü, sektörde bilinen diğer üç farklı firmanın ürünleriyle kıyaslanarak çevresel etki değerlerinin dağılımı, ortalamalarının kıyası, varyanslarının analizi çalışmaları istatistiksel karşılaştırma metodu Anova Oneway ile kıyaslanmıştır. Xiria CCF ürünü ve Örnek 1 (Bas ve diğerleri, 2023). Örnek 2 (Cormenier ve diğerleri, 2023). Örnek 3 (de Sadeleer ve diğerleri, 2021). Çizelge 5.15’de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.15. Eaton Xiria CCF ve sektördeki üreticilerin mevcut ürünlerinin zorunlu çevresel gösterge değerleri

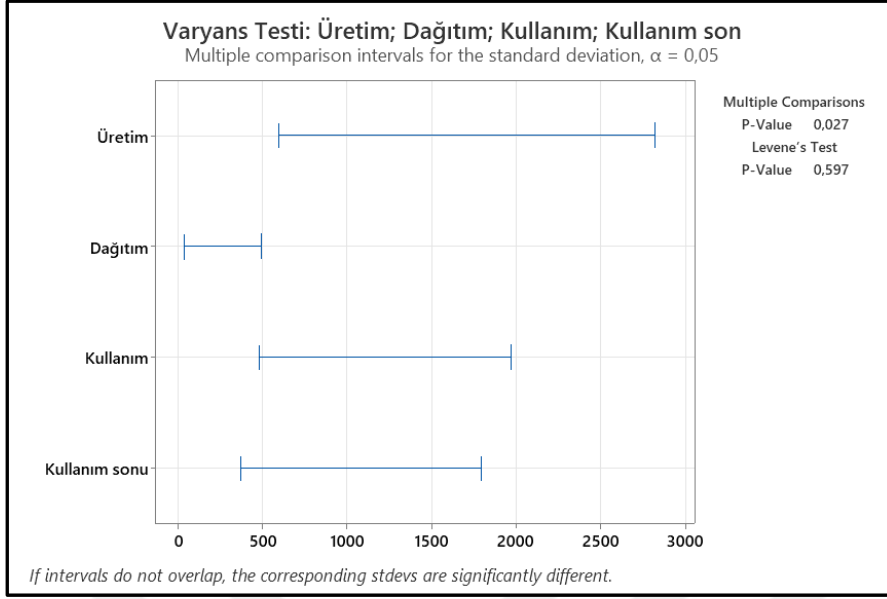
Çevresel Etkiler	Üretim (kgCO ₂ e)	Dağıtım (kgCO ₂ e)	Kullanım (kgCO ₂ e)	Ömür Sonu (kgCO ₂ e)	Toplam
EATON XIRIA 630 CCF	3270	120	1010	1080	5480
Ürün 1	1443,65	24,73	761,64	50,46	2280,48
Ürün 2	2000	200	600	100	2900
Ürün 3	2000	50	1900	200	4150

ANOVA analizinin ilk etabı olan verilerin dağılımı kıyaslanmıştır. $p < 0,05$ koşulu incelenmiş ve kullanım sonu başlığının $p < 0,05$ olmasından dolayı verilerin dağılımı normal gözlenememiştir. Verilerin dağılımı grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Verilerin dağılımının incelenmesi

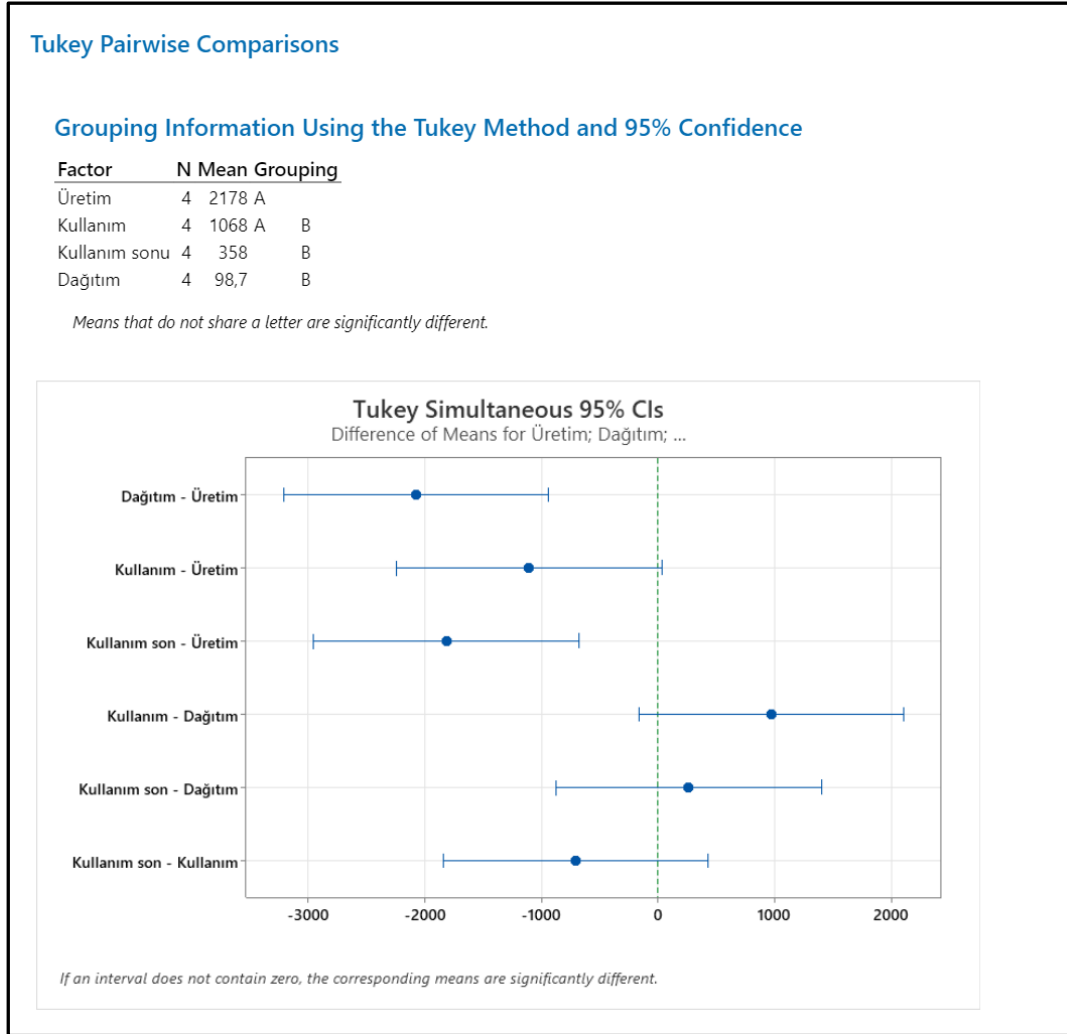
Analiz çalışmasının ikinci etabı olan verilerin varyans testine tabi tutulmasıdır. Varyans testinin sonucu $p > 0,05$ olmasından kaynaklı tüm değişkenlerin varyansları birbirine eşit kabul edilip varyansları arasında fark yoktur yorumu yapılabilmeyle beraber Anova analizi için gerekli ön adımlar tamamlanmış olur. Verilerin varyans kontrolü Şekilde 5.2'de verilmiştir.



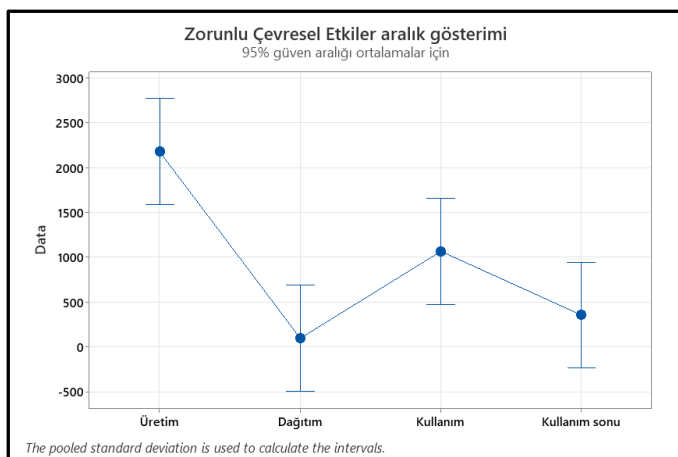
Şekil 5.2. Verilerin varyans kontrolünün yapılması

Varyansların birbirine eşit çıkmasından kaynaklı istatistiksel ikili karşılaştırma metodu olan Tukey çiftli kıyaslama analizi gerçekleştirilmiştir. Aksi durumda varyanslar birbirine eşit olmaması durumunda Games-Howell denilen kıyaslama metodu seçilecekti. Bu tamamen varyansların analizinin sonucunun etkili olduğu bir durum olup analizlerin uygulanması Minitab 22 programı aracılığıyla icra edilmiştir.

Şekil 5.3'de Tukey çiftli karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Yüzde 95 güven aralığında gerçekleştirilen Tukey karşılaştırmasında yapılan grupta üretim etkilerinin bariz bir şekilde diğer çevresel etkilerden farklı şekilde öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca kullanım sonu, dağıtım benzer grupta olup kullanım çevresel etki değerinin üretim ve kullanım sonu gruplarıyla ortak alanda bulunmaktadır. Bunun yanında Şekil 5.4'de de aralık gösterimi metoduyla grafiksel gösterim yapılmıştır.



Şekil 5.3. Anova One way Tukey analizi



Şekil 5.4. Aralık gösterimi yöntemi

Yukarıdaki kıyaslamalara ek olarak sektördeki başka bir ürün olan Ürün-4 (Pinto ve diğerleri, 2025) ile diğer zorunlu çevresel etki göstergeleri kıyaslamaları Çizelge 5.16'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 5.16. Eaton Xiria CCF ve sektördeki farklı bir üreticinin mevcut ürünlerinin zorunlu çevresel gösterge değerleri karşılaştırması

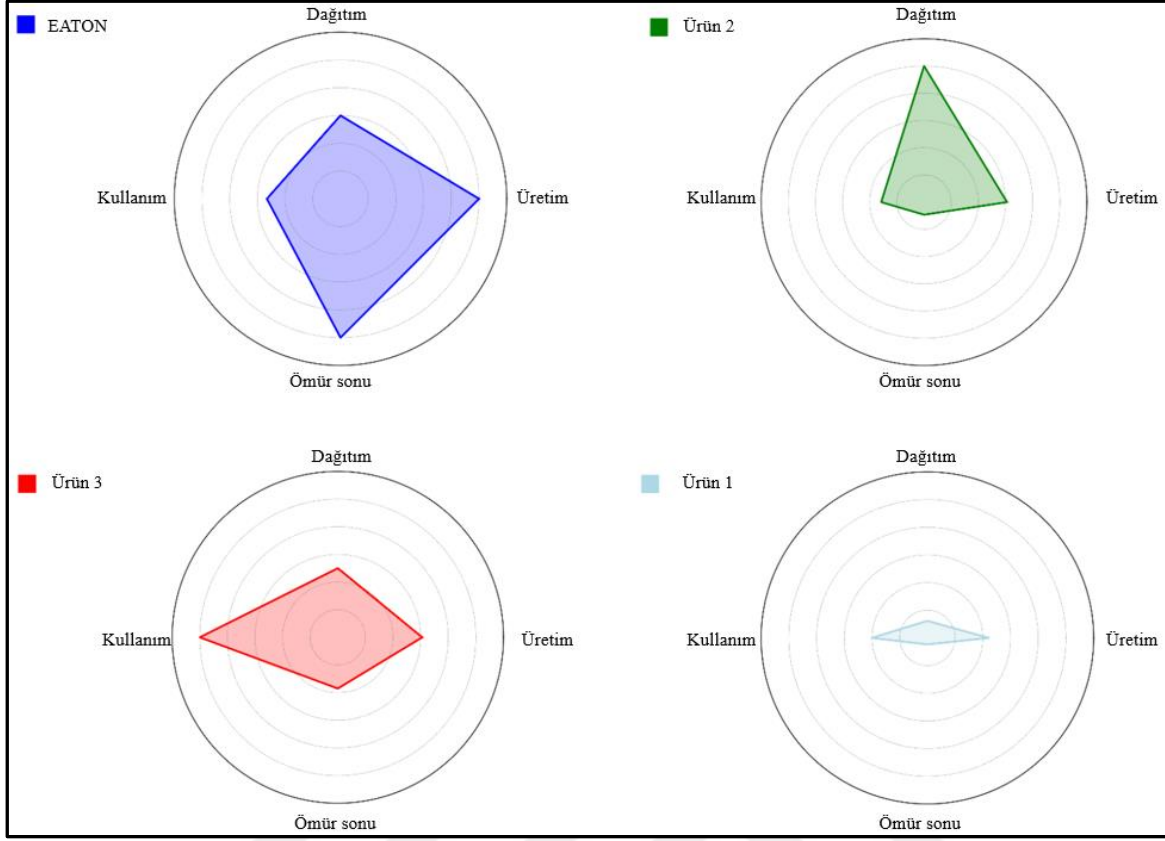
Zorunlu çevresel etki göstergeleri	Birim	Xiria CCF	Ürün 4
Asidifikasyon Potansiyeli (AP)	mole of H ⁺ e.	3,14E+01	3,71E+01
Ötrofikasyon-Temizsu (Epf)	kg P e.	3,74E-01	3,94E-01
İklim Değişikliği-Toplam (GWP)	kg CO ₂ e.	5,48E+03	2,67E+03
Ozon tabakasının incilmesi (ODP)	kg CFC-11 e.	1,02E-04	2,15E-03
Fotokimyasal ozon oluşumu- insan sağlığı (POCP)	kg NMVOC e.	1,43E+01	1,06E+01
Su kullanımı (WU)	m ³ e.	4,42E+03	2,91E+01
Ecotoksisite, tatlı su	CTUe	6,96E+04	1,21E+01
İnsan toksisitesi, kanserojen	CTUh	1,36E-02	2,89E+02
İnsan toksisitesi, kanserojen olmayan	CTUh	2,62E-04	1,24E+04
Arazi kullanımı	Birim yok	1,38E+03	4,41E+03

Bu tez çalışmasında elde edilen iklim değişikliği dağılım oranı verileri literatürle karşılaştırılmıştır. Xiria CCF ve diğer üreticiler birbirleriyle etkili bir şekilde karşılaştırmak için her yaşam döngüsü değerlendirme aşamasının kendi içinde normalleştirildiği sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu değerler, Şekil 20'de karşılaştırmalı bir ağ grafiğiyle gösterilmiştir.

Sonuçlar, AIR/vakum şalt cihazları için karşılaştırılabilir çevresel etkileri ortaya koyarak, çevre dostu tasarımının avantajlarını vurgulamaktadır. Genel olarak, AIR/vakum şalt cihazlarının çevresel performansı iyileşmiş ve tercih edilen bir alternatif olarak konumunu daha da güçlendirmiştir. Şekil 20, farklı küresel şirketler tarafından üretilen AIR/vakum teknolojisine dayalı şalt cihazı ürünlerinin karşılaştırmalı analizlerini göstermektedir. Dağıtım ve kullanım ömrü sonu faktörlerinin iklim değişikliği üzerindeki etkisi nispeten düşük olsa da, ürünün üretim etkilerinin ve kullanım süresinin iklim değişikliği üzerindeki etkisi büyük önem taşımaktadır. Bunun başlıca nedeni metallerin ve diğer malzemelerin

enerji yoğun üretimdir. Üretim ve kullanım etkilerinde atılacak ciddi adımlar, çevresel etkilerin olumlu yönde azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunacaktır.

Şalt cihazı üreticilerinin her etki kategorisinin ağırlıklandırma faktörleri dikkate alınarak yapılan son karşılaştırması, Şekil 5.4'te bir ağ tipi diyagramı olarak gösterilmiştir. Bu gösterimde, dairenin merkezi sıfır olarak kabul edilmiş ve dairenin en dış çapı, sistem sınırlarını kapsayacak maksimum değeri göstermektedir. Sistem sınırları, üretim tesislerindeki üretim süreçleri sırasında meydana gelen iklim değişikliği etkilerini "üretim" aşaması olarak tanımlar. Ürünün kullanım noktasına taşınmasıyla ilişkili çevresel etkiler "dağıtım" aşaması altında ele alınır. Ürünün hizmet ömrü boyunca ortaya çıkan iklim değişikliği etkileri "kullanım" altında incelenir. Son olarak, ürün hizmet ömrünün sonuna ulaştıktan sonra meydana gelen çevresel etkiler "ömür sonu" aşaması olarak tanımlanır. Eaton'a göre normalize edilmiş üretim toplam iklim değişikliği değerleri Ürün 2 için yaklaşık 0,61, Ürün 3 için 0,61 ve Ürün 1 için 0,44'tür. Benzer şekilde, Ürün 3'e göre normalize edilmiş elektrik kayıpları Eaton için yaklaşık 0,53, Ürün 2 için 0,32 ve Ürün 1 için 0,40'tır (Bas ve diğerleri, 2023; Cormenier ve diğerleri, 2023; de Sadeleer ve diğerleri, 2021). Üretim döneminde geri dönüşümden kullanılan malzemelerin oranını artırmak, daha düşük karbon ayak izi seçenekleri sunan alt tedarikçilerle çalışmak, kullanımda daha fazla yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik kullanmak ve böylece şalt tesisi elektrik kayıplarının etkisini azaltmak, iklim değişikliği üzerinde olumlu ve önemli bir etkiye sahip olacaktır.



Şekil 5.5. İklim değişikliği dağıtım kategorisinin yaşam döngüsü aşamasını dikkate alarak şalt ekipmanlarının karşılaştırılması

Bu verilere ek olarak; Ürün 1, Ürün 2, Ürün 3 ve Ürün 4'ün bağlı olduğu global üreticilerin yukarıda değerleri verilen SF₆'sız ürünlerine dair yaptıkları LCA çalışmalarının toplam küresel ısınma potansiyeli değeri (Total GWP) yine kendi SF₆'lı ürünlerine göre kıyasla sırasıyla %74, %35, %35 ve %73 daha düşük tespit edilmiştir (Bas ve diğerleri, 2023; Cormenier ve diğerleri, 2023; de Sadeleer ve diğerleri, 2021; Pinto ve diğerleri, 2025). Bu değerler ile SF₆'nın sistem sınırlarına girdiği her durumda toplam küresel ısınma değerini kritik derecede yukarı yönlü değişime zorladığı net bir şekilde anlaşılmaktadır.

5.6. Yaşam Döngü Yorumlama

Yaşam döngü analizi kapsamında yapılan yorumlamada, modelleme ve veri bütünlüğü titizlikle sağlanmıştır. Ürünlerin üretim süreçleri, özgün koşullarını yansıtacak şekilde detaylı biçimde modellenmiş; envanter verilerinin eksiksizliği ise sektör ortalaması veri setleri ve kütle dengesi kontrolleriyle güvence altına alınmıştır. Kullanılan veri setlerinin zamansal, coğrafi ve teknolojik temsiliyetleri değerlendirilmiş; mümkün olan durumlarda

bölgeye özgü ve güncel veri kaynakları tercih edilmiştir. Sistem sınırları, PCR gereklilikleriyle uyumlu şekilde belirlenmiş ve tüm veri kaynakları ELCD ile CODDE veri tabanlarından tutarlı biçimde temin edilmiştir. Özellikle ürün bileşimlerinin Eaton teknik ekibi tarafından sağlanması ve üretim süreçlerinin sektör ortalamasıyla modellenmesi, çalışmanın güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, EIME programı aracılığıyla elde edilen veri setleri ve modelleme yaklaşımı, çalışmanın tekrarlanabilirliğini destekleyecek düzeyde şeffaflık sunmakta ve bağımsız hesaplamalarla benzer sonuçlara ulaşılmasını mümkün kılmaktadır.





6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik dağıtım sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından yaşam döngü yaklaşımı temel bir mühendislik aracı haline gelmiştir. SF₆ gazsız sistemler, yalnızca çevresel açıdan değil maliyet, güvenlik ve bakım kolaylığı yönlerinden de geleceğin dağıtım teknolojilerini temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlar, üretim aşamasındaki yenilenebilir enerji kullanımı ve geri dönüştürülmüş malzeme oranlarının artırılması halinde SF₆ gazsız sistemlerin yaklaşık %25–30 oranında ek çevresel iyileşme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, enerji sektörü paydaşlarının yaşam döngü analizi tasarım, üretim ve sertifikasyon aşamalarına entegre etmesi, sürdürülebilir enerji altyapısının temelini oluşturacaktır. Sonuç olarak, SF₆ gazsız orta gerilim anahtarlama sistemleri, karbon nötr enerji vizyonuna geçiş sürecinde önemli bir adım olarak değerlendirilmeli; bu sistemlerin yaygınlaşması, enerji dağıtımında çevresel etkinin azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu tez kapsamında, konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin dağıtımında kullanılan SF₆ gazı içermeyen orta gerilim ana panel ünitelerinin çevresel performansı, yaşam döngü analizi (LCA) yöntemiyle kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Çalışma, EIME v6.1.1 yazılımı ve PEF EF 3.0 metodolojisi kullanılarak ve ISO 14025 ve EN 15804+A2'ye uyumlu olacak şekilde beşikten mezara (cradle-to-grave) yaklaşımıyla yürütülmüştür. Yapılan analizde üretim, dağıtım, kullanım ve ömrü sonu aşamaları dikkate alınmış; CODDE 2024-04 veri tabanı kullanılarak sistemin çevresel etkileri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre CCF ürünü için iklim değişikliği potansiyeli (GWP) açısından toplam 5480 kg CO₂ eşdeğeri çevresel etki belirlenmiştir. Bu etkinin %59,6'sı üretim aşaması, %18,4'ü kullanım aşaması, %19,7'si ömrü sonu işlemleri ve %2,2'si dağıtım süreci kaynaklıdır. CCV için bu değerler ; iklim değişikliği potansiyeli (GWP) açısından toplam 4370 kg CO₂ eşdeğeri çevresel etki belirlenmiştir. Bu etkinin %58'i üretim aşaması, %21'i kullanım, %18'inin ömrü sonu işlemleri ve %2,9'u dağıtım süreci kaynaklıdır. Üretim aşamasındaki yüksek etki, ağırlıklı olarak çelik ve bakır gibi enerji yoğun malzemelerin işlenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, literatürdeki benzer çalışmalarla (Bas ve diğerleri, 2023; Cormenier ve diğerleri, 2023; de Sadeleer ve diğerleri, 2021) uyum göstermektedir.

Yapılan analizler, hava/vakum yalıtımlı SF₆'sız sistemlerin, çevresel performans bakımından SF₆ gazlı geleneksel sistemlere göre belirgin avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle üretim süreçlerinde geri dönüştürülmüş malzeme oranının artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik kullanımı ve düşük karbon ayak izine sahip tedarik zincirlerinin tercih edilmesi durumunda toplam çevresel etkinin önemli ölçüde azalacağı belirlenmiştir.

Ayrıca kullanım aşamasında enerji kayıplarının azaltılması, iletim hatlarında direnç kaynaklı ısı kayıplarının minimize edilmesi ve ürünlerin uzun ömürlü tasarım prensipleriyle geliştirilmesi, çevresel etkilerin sürdürülebilir biçimde düşürülmesini sağlayacaktır. Ömür sonu analizleri ise, %85,2 oranında geri dönüştürülebilirlik potansiyeli ile sistemin döngüsel ekonomi yaklaşımına uygun olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma SF₆ gazsız sistemlerin teknik yeterliliğini, ekonomik uygulanabilirliğini ve çevresel sürdürülebilirliğini birlikte değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, elektrik dağıtım altyapılarında yeşil dönüşümün teknik temellerinin güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu sistemlerin Avrupa Yeşil Mutabakatı, REACH ve WEEE gibi uluslararası çevre düzenlemeleriyle tam uyumlu olduğu ortaya konulmuştur. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında;

- Üretim aşamasında kullanılan çelik, bakır ve epoksi reçine gibi enerji yoğun malzemelerin geri dönüştürülmüş versiyonlarının tercih edilmesi, toplam çevresel etkiyi azaltacaktır.
- Üretim ve test aşamalarında yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgar vb.) elde edilen elektrik kullanımı, karbon ayak izini doğrudan düşürecektir.
- Ürün tasarımında modülerlik, malzeme azaltımı ve bakım gerektirmeyen bileşenlerin kullanılması, hem ömür süresini artıracak hem de kullanım aşamasındaki enerji kayıplarını düşürecektir.
- Alt tedarikçilerin seçimi aşamasında düşük karbonlu üretim sertifikasyonlarının (ISO 14067, ISO 14064) zorunlu tutulması, dolaylı emisyonları azaltacaktır.
- Elektriksel kayıpların azaltılması için iletken geometrisinin optimizasyonu ve ısı döngünün veriminin artırılması ürünü termal dengeye getireceğinden sürdürülebilirlik göstergelerini olumlu yönde etkileyecektir.

- Ürün ömrü sonunda malzeme ayrıştırma kolaylığı sağlayacak tasarımlar geliştirilerek, geri kazanım oranı %90'ın üzerine çıkarılabilir.
- Ulusal düzeyde yerel enerji karışımı, ulaşım verileri ve geri dönüşüm oranlarının güncel tutulması, LCA analizlerinin doğruluğunu artıracaktır.
- Elektrik dağıtım sektöründe SF₆ gazının kademeli olarak sınırlandırılması yönündeki AB mevzuatlarına paralel olarak, Türkiye'de de EPD ve PEF uyumlu ürün sertifikasyon sistemlerinin yaygınlaştırılması önerilmektedir.

Önerileri sunulmaktadır. Planlanan gelecek çalışmalar için ise;

- Monte Carlo ve SHAP temel belirsizlik analizleri ile model hassasiyeti ölçülebilir veya mevcut durumlar için öngörülebilir bulunulabilir.
- Enerji ve ekserji verimliliği parametreleri ile çevresel etki değerleri ilişkilendirilebilir.
- Entegre LCA-LCC (ekonomik analiz) çalışmalarıyla teknik değerlerin ekonomik ölçekleri de incelenmesi önerilmektedir.

Yaklaşımları değerlendirilmektedir. Çünkü çevre ile ilgili atılacak adımlarda artık somut adımlar atılması gerekmektedir. Çevresel etkiler sonuçlarını anlık olarak vermediğinden dolayı günümüzde yaşadığımız iklim değişiklikleri aslında geçmiş zamanda atılmayan adımların sonuçlarıdır.



KAYNAKLAR

- Adefarati, T. ve Bansal, R. C. (2017). Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation. *Applied Energy*, 185, 158–171.
- Aghajanzadeh, A. ve Therkelsen, P. (2019). Agricultural demand response for decarbonizing the electricity grid. *Journal of Cleaner Production*, 220, 827-835.
- Alanazi, M. (2025). A sustainable approach to renewable integration in distribution grids through coordinated control of flexibility technologies. *Cleaner Engineering and Technology*, 4(1), 101053.
- Al-Shetwi, A. Q., Hannan, M. A., Jern, K. P., Mansur, M. ve Mahlia, T. M. I. (2020). Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods. *Journal of Cleaner Production*, 253(1), 119831.
- Andrae, A. S. ve Andersen, O. (2011). Life cycle assessment of integrated circuit packaging technologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 258–267.
- Arora, S., Kumar, A., Ogita, S. ve Yau, Y. (2022). *Innovations in environmental biotechnology*, (1st Ed.). Singapore: Springer, 4-36.
- Asongu, S. A., Agboola, M. O., Alola, A. A. ve Bekun, F. V. (2020). The criticality of growth, urbanization, electricity and fossil fuel consumption to environment sustainability in Africa. *Science of The Total Environment*, 712(2), 136376.
- Barman, P., Dutta, L., Bordoloi, S., Kalita, A., Buragohain, P., Bharali, S. ve Azzopardi, B. (2023). Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183(2), 113518.
- Barnthouse (1999). *Chapter 3 life-cycle impact assessment*. Reston, Virginia: Scientific Applications International Corpus, 1–215
- Bas, T., Izcara, J., Aizpuru, I. ve Tejedo, J. R. (2023, June 6-9). *A simplified tool for the life cycle analysis of a medium voltage switchgear*. In IET Conference Proceedings CP823. Stevenage, UK, 2843-2847.
- Basit, M. A., Dilshad, S., Badar, R. ve Sami ur Rehman, S. M. (2020). Limitations, challenges, and solution approaches in grid-connected renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4132-4162.
- Baumann, H. ve Tillman, A. M. (2004). *The hitch hike's guide to LCA*. Sweden: Studentlitteratur. 2-113.
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P. ve Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26(1), 446–463.

- Billen, P., Maes, B., Larrain, M. ve Braet, J. (2020). Replacing SF₆ in electrical gas-insulated switchgear: technological alternatives and potential life cycle greenhouse gas savings in an EU-28 perspective. *Energies*, 13(7), 1807.
- Binnendijk, M., Schoonenberg, G., Besseling, F. ve Borgers, N. (2021, September 20-23). *Compact green MV GIS with atmospheric air innovation built on decades of heritage*. CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Geneva, 30- 34.
- Bisinella, V., Christensen, T. H. ve Astrup, T. F. (2021). Future scenarios and life cycle assessment: systematic review and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2143-2170.
- Boakye-Boaten, A. (2006). *Life cycle assesment: Principles and practice*. Reston, Virginia: Scientific Applications International Corpus, 4-25.
- Byles, D. ve Mohagheghi, S. (2023). Sustainable power grid expansion: life cycle assessment, modeling approaches, challenges, and opportunities. *Sustainability*, 15(11), 8788.
- Celik, A. N. ve Özgür, E. (2020). Review of Turkey's photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134(1), 110344.
- Chen, Y., Grijalva, S., Jin, Z. ve Graber, L. (2024, October 13-15). *Lifecycle analysis of greenhouse gas emissions: comparing SF₆ and scCO₂ circuit breakers*. 2024 56th North American Power Symposium (NAPS), Texas, 1-6.
- Choobdari, M., Samiei, M. M., Davarzani, R., Azarfar, A. ve Hoseinpour, H. (2024). Robust distribution networks reconfiguration considering the improvement of network resilience considering renewable energy resources. *Scientific Reports*, 14(1), 23041.
- Ciacci, L. ve Passarini, F. (2020). Life cycle assessment (LCA) of environmental and energy systems. *Energies*, 13(22), 5892.
- Cormenier, T., Marty, F., Medjadj, G., Trichon, F., Serve, D., Canaguier, B. ve Summer, R. (2023, 12-15 June). *Life cycle assessment of SF₆ vs. pure air medium voltage equipment*. 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Roma, 2119-2123.
- Das, U., Nandi, C., De, D., Das, S. ve Nandi, S. S. (2024). A comparative study on methods used in life cycle assessment of coal-fired power plant. *Thermal Engineering*, 71(7), 617-630.
- De-Sadeleer, I., Rønning, A., Silva, M., Lyng, K. A. ve Attar, E. (2021, September 20-23). *Different approaches for calculating impacts on climate change from network components*. CIRED 2021-The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Geneva, 390-394.
- Durocher, D. B., Haim, M., Connor, L. T. ve De Jong, J. (2015). Safety by design: Solid insulated technologies challenge the use of SF₆ in medium-voltage switchgear. *IEEE IAS Electrical Safety Workshop*, 4(1), 1-9.

- Düzkaya, H., Tezcan, S. S., Acartürk, A. ve Yılmaz, M. (2020). Environmental and physiochemical properties of gaseous dielectrics alternatives to SF₆. *El-Cezeri*, 7(3), 1460-1470.
- El Ouadhane, H., Haim, M., Spitzer, H., Kaltenborn, U. ve Summer, R. (2011, June 6-9). *Solutions for internal arc protection acc.. iec 62271-200 with pressure relief into the switchgear room for gas and air insulated medium voltage switchgears*. The 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, 1-5.
- Energy, H. (2022). *Life cycle assessment of different concepts of SF₆-free gas insulated switchgear*. Swedish: Energiforsk, 55-87.
- Erat, S., Telli, A., Ozkendir, O. M. ve Demir, B. (2021). Turkey's energy transition from fossil-based to renewable up to 2030: milestones, challenges and opportunities. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(2), 401-412.
- Fenerci, E. (2019). *Fotovoltaik sistemlerin karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi ve maliyet analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-36.
- Gayen, D., Chatterjee, R. ve Roy, S. (2024). A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 5285-5310.
- Gibon, T. ve Hahn-Menacho, A. (2023). Parametric life cycle assessment of nuclear power for simplified models. *Environmental Science & Technology*, 57(38), 14194-14205.
- Gobio-Thomas, L. B., Darwish, M. ve Stojceska, V. (2023). Environmental impacts of solar thermal power plants used in industrial supply chains. *Thermal Science and Engineering Progress*, 38(1), 101670.
- Gorman, W., Kemp, J. M., Rand, J., Seel, J., Wisser, R., Manderlink, N., Kahrl, F., Porter, K. ve Cotton, W. (2025). Grid connection barriers to renewable energy deployment in the United States. *Joule*, 9(2), 101791.
- Gui, Y., Jiang, S., Bai, L., Xue, Y., Wang, H., Reidt, J., Ojetola, S. T., Schoenwald, D. A. ve Schoenwald, D. A. (2024). Review of challenges and research opportunities for control of transmission grids. *IEEE Access*, 12(1), 94543.
- Hachemi, A. T., Sadaoui, F., Saim, A., Ebeed, M., Abbou, H. E. ve Arif, S. (2023). Optimal operation of distribution networks considering renewable energy sources integration and demand side response. *Sustainability*, 15(24), 16707.
- Halter, T. M. ve Peralta, M. (2025, May 28-30). *Quick and accurate methodology of simplified life cycle assessment for printed circuit boards ecodesign*. Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Computing Frontiers: Workshops and Special Sessions, Cagliari, 117-120.
- Harrison, G. P., Karamanlis, S. ve Ochoa, L. F. (2010). Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain. *Energy Policy*, 38(7), 3622-3631.

- Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., Al-Jiboory, A. K., Sameen, A. Z., Salman, H. M. ve Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy transformations. *Renewable Energy Focus*, 48(1), 100545.
- Hemeida, M. G., Hemeida, A. M., Senjyu, T. ve Osheba, D. (2022). Renewable energy resources technologies and life cycle assessment. *Energies*, 15(24), 9417.
- Herceg, S., Pinto-Bautista, S., Weiß, K. A. (2020). Influence of waste management on the environmental footprint of electricity produced by photovoltaic systems. *Energies*, 13(1), 2146.
- Houstin, A., Denizet, I., Deleu, F., Mammer, M. ve France, G. C. (2015). Life cycle assessment improvement for medium voltage cable for French market. *Jicable*, 15(1), 1-5.
- Inchausti, J. M., Arostegui, J. ve Sebastian, S. (2023, June 12-15). *Avoiding uncertainties on safety and reliability in 24 kV SF₆ free secondary distribution switchgear*. 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Roma, 1- 4.
- Insel, M. A., Sadikoglu, H. ve Melikoglu, M. (2022). Assessment and determination of 2030 onshore wind and solar PV energy targets of Türkiye considering several investment and cost scenarios. *Results in Engineering*, 16(1), 100733.
- Internet: International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable capacity highlights*, Web:https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf Erişim Tarihi: 29.10.2025.
- ISO (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment -- Principles and framework*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 3-26.
- Internet: European Union. (2024). European Union, "Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending directive (EU) 2019/1937 and repealing regulation (EU) No 517/2014", *Official Journal of the European Union*, Web: <https://www.europeansources.info/> Erişim Tarihi: 04.05.2025.
- Internet: IEA. (2025). Global energy review 2025. *IEA, Paris*, Web: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025> Erişim Tarihi: 04.03.2025.
- Internet: International Energy Agency. (IEA). (2019). *World Energy Outlook 2019*, Web: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> Erişim Tarihi: 11.03.2025.
- Internet: International Renewable Energy Agency. (2024). *Country rankings*, Web: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings> Erişim Tarihi: 29.10.2025.
- John, G. ve Owens, P. E. (2018, April 16-19). *Greenhouse gas emission reductions in power equipment through use of a sustainable alternative to SF₆*. 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, 1-9.

- Jordaan, S. M. (2021). *Life cycle assessment of electricity generation*. Cham: Springer International Publishing, 3-36.
- Jordaan, S. M., Combs, C. ve Guenther, E. (2021). Life cycle assessment of electricity generation: A systematic review of spatiotemporal methods. *Advances in Applied Energy*, 3(1), 100058.
- Kabeyi, M. J. B. ve Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*, 9(1), 743114.
- Khalid, S. (2019). *Life cycle assessment of wind power for electricity generation in Pakistan*. Master Thesis, Middle East Technical University Earth System Science, Ankara, 4-25.
- Klass, A., Macey, J., Welton, S. ve Wiseman, H. (2022). Grid reliability through clean energy. *Stanford Law Review*, 74(1), 969.
- Küçükkaraca, B. (2020). *Life cycle assessment in wind turbines*. İstanbul: İstanbul Technical University, 3-26.
- Malode, S., Mohanta, J. C. ve Prakash, R. (2022). A review on life cycle assessment approach on thermal power generation. *Materials Today: Proceedings*, 56(2), 791-798.
- Malode, S., Prakash, R. ve Mohanta, J.C. (2023). A life cycle assessment of coal-fired thermal power plants with post-combustion control techniques: an India scenario. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(39), 90639-90655.
- Mardanimajd, K., Karimi, S. ve Anvari-Moghaddam, A. (2024). Voltage stability improvement in distribution networks by using soft open points. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155(2), 109582.
- Moral-Otegui, G. (2024). Replacement of sulfur hexafluoride (SF₆) equipment in the power system: An economical and environmental sustainable approach. Swedish: Energiforsk, 12-25.
- Nanthagopal, K., Ashok, B., Garnepudi, R. S., Tarun, K. R. ve Dhinesh, B. (2019). Investigation on diethyl ether as an additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine application. *Energy Conversion and Management*, 179(2), 104-113.
- Nassar, S. M., Saleh, A. A., Eisa, A. A., Abdallah, E. M. ve Nassar, I. A. (2025). Optimal planning of integrated nuclear-hybrid renewable energy systems for electrical distribution networks based on artificial intelligence. *Scientific Reports*, 15(1), 26004.
- Neumann, C., Baur, A., Buscher, A., Luxa, A., Ploger, F., Reimuller, A., Zahn, B., Schnettler, A., Smolka, T., Mersiowsky, I. ve Pittroff, M. (2004). Electrical power supply using SF₆ technology—an ecological life cycle assessment. *Proceedings of the Cigré*, 24(1), 25-52.

- Nordelöf, A., Alatalo, M. ve Söderman, M.L. (2019). A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—Part I: Design and composition. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 78-92.
- Nwodo, M. N. ve Anumba, C. J. (2020). Exergetic life cycle assessment: A review. *Energies*, 13(11), 2684.
- Olabi, A. G. and Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158(2), 112111.
- Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., Rooney, D. W. ve Yap, P. S. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 741-764.
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H. ve Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy*, 146(1), 2430-2437.
- Pandya, K. S., Gotti, M. ve Mantilla, J. (2023, April 10-13). *Comparative life cycle assessment of SF 6-based SP-3 and SF 6-free eco 145kV gas insulated switchgears*. 2023 IEEE PES Grid Edge Technologies Conference & Exposition (Grid Edge), San Diego, 1-5.
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G. ve Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939-945.
- Perret, M., Berteloot, T., Sasaki, Stoa-aanensen, N., Hovestad, P., Kr-stoffersen, M., Inversin, M., Ronning, A. ve De Sadeleer, I. (2023). *Emerging substation & HV equipment strategies*. New York: Sage, 12.63.
- Piasecka, I., Bałdowska-Witos, P., Piotrowska, K. ve Tomporowski, A. (2020). Eco-energetical life cycle assessment of materials and components of photovoltaic power plant. *Energies*, 13(2), 1385.
- Pinto, S. M., Gouveia, J. R., Atilano, J., Goncalves, R. C., Tovar, L., Lima, P. C., Rocha, F., Leite, R. ve Oliveira, L. (2025). Cradle-to-gate life cycle assessment comparison between two switchgear designs: Eliminating SF₆ gas under European legislation. *Environmental Impact Assessment Review*, 112(1), 107791.
- Pirson, T., Delhaye, T. P., Pip, A. G., Le Brun, G., Raskin, J. P. ve Bol, D. (2022). The environmental footprint of IC production: Review, analysis, and lessons from historical trends. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 36(1), 56-67.
- Pomponi, F. ve Hart, J. (2021). The greenhouse gas emissions of nuclear energy—Life cycle assessment of a European pressurised reactor. *Applied Energy*, 290(1), 116743.
- Portillo, F., Alcayde, A., Garcia, R. M., Fernandez-Ros, M., Gazquez, J. A. ve Novas, N. (2024). Life cycle assessment in renewable energy: solar and wind perspectives. *Environments*, 11(7), 147.

- Preve, C., Maladen, R. ve Piccoz, D. (2020). *Innovative SF₆ free load break switch with shunt vacuum interruption (SVI) technology*. Paris, France: Cigré, 14-52.
- Radwan, M. (2023). *Life cycle assessment of power semiconductor module manufacturing*. Master's Programme in Smart Systems Integrated solutions (SSIs), School of Electrical Engineering, Aalto University, Finland, 3-25.
- Rasoulinezhad, E. ve Taghizadeh-Hesary, F. (2020). How is mortality affected by fossil fuel consumption, CO₂ emissions and economic factors in CIS region? *Energies*, 13(2), 2255.
- Raugei, M., Kamran, M. ve Hutchinson, A. (2020). A prospective net energy and environmental life-cycle assessment of the uk electricity grid. *Energies*, 13(1), 2207.
- Sala, S., Laurent, A., Vieira, M. ve Van Hoof, G. (2020). Implications of LCA and LCIA choices on interpretation of results and on decision support. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(12), 2311-2314.
- Salomez, F., Helbling, H., Almanza, M., Soupremanien, U., Vine, G., Voltaire, A. ve Crébier, J. C. (2024). State of the art of research towards sustainable power electronics. *Sustainability*, 16(5), 2221.
- Sayed, E.T., Olabi, A.G., Alami, A.H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A. ve Abdelkareem, M. A. (2023). Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, 16(3), 1415.
- Serres, H. (2022). *Life Cycle Assessment of typical projects of the distribution power network: Assessment, improvement & recommendations*. New York: Sage, 3-54.
- Shahabian, A., Fadai, A. ve Peruzzi, T. (2019). *Future of life-cycle assessment in a smart and/or sustainable world: Interdisciplinary approaches to public policy and sustainability*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 365.
- Shair, J., Li, H., Hu, J. ve Xie, X. (2021). Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145(2), 111111.
- Siddiqui, O. ve Dincer, I. (2017). Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 164(2), 848-860.
- Silva R., Aragao J. V., Matos P. H. D., Milanez V. F., Macedo J. S., Duarte A. D., Araujo O., Silva G. L. ve Costa A. (2021). Life cycle analysis of dye degradation using advanced oxidative processes. *Chemical Engineering Transactions*, 86(2), 589-594.
- Skaar, C., Lausset, C., Bergsdal, H. ve Brattebø, H. (2022). Towards a LCA database for the planning and design of zero-emissions neighborhoods. *Buildings*, 12(5), 512.
- Smeets, R., Van der Sluis, L., Kapetanovic, M., Peelo, D.F. ve Janssen, A. (2015). *Switching in electrical transmission and distribution systems*. New York: John Wiley & Sons, 3-45.

- Sokka, L., Henclik, A., Goralczyk, M., Koneczny, K., Kulczycka, J., Seppälä, J. ve Koskela, S. (2005). A life cycle assessment of electricity production from hard coal. *International Mining Forum 2005 Report*. Cracow, 13–24.
- Spatari, S., Stadel, A., Adler, P. R., Kar, S., Parton, W. J., Hicks, K .B., McAloon, A. J. ve Gurian, P. L. (2020). The role of biorefinery co-products, market proximity and feedstock environmental footprint in meeting biofuel policy goals for winter barley-to-ethanol. *Energies*, 13(2), 2236.
- Stenzel, P., Schreiber, A., Marx, J., Wulf, C., Schrieder, M. ve Stephan, L. (2017). Renewable energies for Graciosa Island, Azores–life cycle assessment of electricity generation. *Energy Procedia*, 135(3), 62-74.
- Steubing, B., de Koning, A., Merciai, S. ve Tukker, A. (2022). How do carbon footprints from LCA and EEIOA databases compare? A comparison of ecoinvent and Ex10base. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4), 1406-1422.
- Steubing, B., Wernet, G., Reinhard, J., Bauer, C. ve Moreno-Ruiz, E. (2016). The ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1269-1281.
- Strielkowski, W., Civín, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M. ve Petrenko, Y. (2021). Renewable energy in the sustainable development of electrical power sector: A review. *Energies*, 14(24), 8240.
- Taşkın, A. (2013). *Rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin yaşam döngü analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2-39.
- Thai, R. ve Liu, G. (2017). Eco-design pilot project in China-Monsoon offer 2 upgrade. *Earth and Environmental Science*, 94(1), 012170.
- Thirumalaivasan, N., Nangan, S., Kanagaraj, K. ve Rajendran, S. (2024). Assessment of sustainability and environmental impacts of renewable energies: Focusing on biogas and biohydrogen (Biofuels) production. *Process Safety and Environmental Protection*, 189(2), 467-485.
- Thomson, R.C., Chick, J.P. ve Harrison, G.P. (2019). An LCA of the Pelamis wave energy converter. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 51-63.
- Tomková, Ž. ve Vilčeková, S. (2019). Analysis of current situation in field of LCA. *Materials Science and Engineering*, 566(1), 012034.
- Venna, K. R., Luis, C. L. G. ve Wolfrum, F. (2023). *F-Gas free switchgear-a real alternative to SF₆ gas insulated switchgear*. 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Orlando, Florida: 1-5.
- Internet: EIME - LCA and eco-design software. *Bureau Veritas CODDE*. Web: <https://codde.fr/en/our-brands/eime-software> Erişim tarihi: 29.10.2025
- Virah-Sawmy, D. ve Sturmberg, B. (2025). Socio-economic and environmental impacts of renewable energy deployments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207(2), 114956.

- Viteri, J.P., Henao, F., Cherni, J. ve Dyner, I. (2019). Optimizing the insertion of renewable energy in the off-grid regions of Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 235(3), 535-548.
- Vojta, M., Plach, A., Annadate, S., Park, S., Lee, G., Purohit, P., Lindl, F., Lan, X., Mühle, J., Rona L. ve Thompson Stohl, A. (2024). A global re-analysis of regionally resolved emissions and atmospheric mole fractions of SF₆ for the period 2005–2021. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(21), 12465-12493.
- Wang, L., Wang, Y., Du, H., Zuo, J., Li, R. Y. M., Zhou, Z., Bi, F. ve Garvlehn, M. P. (2019). A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study. *Applied Energy*, 249(2), 37-45.
- Wibawa, B. S. S., Iswara, A. P. ve Boedisantoso, R. (2020). Impact assessment of coal power plant using life cycle assessment (LCA). *Earth and Environmental Science*, 506(1), 012023.
- Yundong, C., Xiaoming, L., Erzhi, W., Changxie, L. ve Hongfeng, L. (2004, September 21-26). *Investigation on insulation performance for medium voltage vacuum switch cabinet*. The 21th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Chengdu, China, 660-663.
- Zarco-Soto, F. J., Zarco-Periñán, J. ve Martínez-Ramos, J.L. (2021). Centralized control of distribution networks with high penetration of renewable energies. *Energies*, 14(14), 4283.
- Zhai, R., Li, C., Chen, Y., Yang, Y., Patchigolla, K. ve Oakey, J. E. (2016). Life cycle assessment of solar aided coal-fired power system with and without heat storage. *Energy conversion And Management*, 111(2), 453-465





EKLER

EK-1. CCF ve CCV bloğunun enerji tüketim değerleri örnek hesaplaması

C1 paneli için;

$$E = R \times I^2 \times \Delta t$$

Burada:

- E: Enerji tüketimi (kWh)
- R: Direnç (mΩ)
- I: Akım (A)
- Δt: Kullanım süresi (20 yıl)

$$\text{Watt kaybı} = \sum_{i=1}^3 R_i \times I^2$$

Burada:

- R₁, R₂, R₃: Her fazın direnci (mΩ)
- I: Akım (A)
- Yükleme oranı: %30
- $R_{\text{toplam}} = R_1 + R_2 + R_3$
- C1 paneli için Enerji (kWh) = Güç kaybı × Kullanım süresi (saat)
- $R_{\text{toplam}} = 0,082 + 0,082 + 0,082 = 0,246 \text{ m}\Omega = 0,000246 \Omega$
- Güç kaybı = $0,000246 \times 630^2 = 97,63 \text{ W}$

Bu değer tam yükteki kayıptır. Ancak ürün %30 yükleme oranında kullanılmaktadır:

$$\begin{aligned} \text{Güç kaybı} &= 97,63 \times 0,30 = 29,29 \text{ W} \\ &= 29,29 \text{ W} \times 20 \text{ yıl} \times 365 \text{ gün} \times 24 \text{ saat} / 1000 \\ &= 29,29 \times 175200 / 1000 = 5131,82 \approx 5132 \text{ kWh} \end{aligned}$$

EK-1. (devam) CCF ve CCV bloğunun enerji tüketim değerleri örnek hesaplaması

C2 paneli için ;

- $R_{\text{toplam}} = 0,063 + 0,063 + 0,063 = 0,000189 \Omega$
- $\text{Güç kaybı} = 0,000189 \times 630^2 \times 0,3 = 22,5 \text{ W}$
- C2 paneli için Enerji (kWh) = $22,5 \times 175200/1000 = 3942,74 \approx 3943 \text{ kWh}$

F paneli için ;

- $R_{\text{toplam}} = 0,582 + 0,582 + 0,582 = 0,0017 \Omega$
- $\text{Güç kaybı} = 0,0017 \times 36^2 \times 0,3 = 0,66 \text{ W}$
- F paneli için Enerji (kWh) = $0,66 \times 175200/1000 = 115,8 \approx 116 \text{ kWh}$

EK-2. Xiria CCV bloğu için fazların direnç değişimi örnek hesaplaması

- Yükleme oranı: %30
- C1 paneli için Enerji (kWh) = Güç kaybı × Kullanım süresi (saat)
- $R_{\text{toplam}} = 0,082 + 0,082 + 0,082 = 0,246 \text{ m}\Omega = 0,000246 \Omega$
- Güç kaybı = $0,000246 \times 630^2 = 97,63 \text{ W}$
- Bu değer tam yükteki kayıptır. Ancak ürün %30 yükleme oranında kullanılmaktadır:

$$\begin{aligned} \text{Güç kaybı} &= 97,63 \times 0,30 = 29,29 \text{ W} \\ &= 29,29 \text{ W} \times 20 \text{ yıl} \times 365 \text{ gün} \times 24 \text{ saat}/1000 \\ &= 29,29 \times 175200/1000 = 5131,82 \approx 5132 \text{ kWh} \end{aligned}$$

C2 paneli için;

- $R_{\text{toplam}} = 0,063 + 0,063 + 0,063 = 0,000189 \Omega$
- Güç kaybı = $0,000189 \times 630^2 \times 0,3 = 22,5 \text{ W}$
- C2 paneli için Enerji (kWh) = $22,5 \times 175200/1000 = 3942,74 \approx 3943 \text{ kWh}$

V paneli için;

- $R_{\text{toplam}} = 0,082 + 0,082 + 0,082 = 0,246 \text{ m}\Omega = 0,000246 \Omega$
- Güç kaybı = $0,000246 \times 100^2 \times 0,3 = 0,738 \text{ W}$
- V paneli için Enerji (kWh) = $0,738 \times 175200/1000 = 129,3 \approx 130 \text{ kWh}$



Gazili olmak ayrıcalıktır