



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FARKLI GÜNEŞ PANELİ ÜRETİM
SÜREÇLERİNİN ÇEVRESEL
ETKİLERİNİN LCA YÖNTEMİ İLE
KARŞILAŞTIRILMASI

Olcayto Doğukan ERYILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği
Anabilim Dalı

Ađustos-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Olcayto Doğukan ERYILMAZ tarafından hazırlanan “Farklı Güneş Paneli Üretim Süreçlerinin Çevresel Etkilerinin LCA Yöntemi ile Karşılaştırılması” adlı tez çalışması 29/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman

Unvanı Adı SOYADI

Üye

Unvanı Adı SOYADI

Üye

Unvanı Adı SOYADI

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Olcayto Doğukan ERYILMAZ

Tarih:13.09.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI GÜNEŞ PANELİ ÜRETİM SÜREÇLERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN LCA YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Olcayto Doğukan ERYILMAZ

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atıf Emre DEMET

2024, 75 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Atıf Emre DEMET

Prof. Dr. Hidayet OĞUZ

Doç. Dr. Ahmet Ali SERTKAYA

Günümüzde çevresel sorunlar ve enerji taleplerindeki artış, güneş enerjisinin temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmasını sağlamaktadır. Bu araştırma, güneş paneli üretim süreçlerinde kullanılan farklı yöntemlerin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi/Life Cycle Assessment (LCA) yöntemini kullanmaktadır. Bu çalışmada, multi-kristal güneş paneli ve kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkileri incelenmiştir. Yaşam döngü değerlendirmesi, güneş paneli üretim süreçlerinin her aşamasında ortaya çıkan çevresel etkileri kapsamlı bir çerçeve içinde değerlendirir. Ham madde çıkarma, üretim, taşıma, kullanım ve bertaraf aşamalarında çeşitli çevresel göstergeler analiz edilmiştir. Özellikle, multi-kristal güneş paneli ve kadmiyum tellür ince film güneş paneli üretim süreçlerindeki dört ana aşama (İngot üretimi, Wafer üretimi, Güneş hücresi üretimi, Güneş paneli üretimi) OpenLCA uygulaması kullanılarak analiz edilmiştir. Çevresel göstergeler arasında enerji tüketimi ve su kullanımı yer almaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle elde edilen veriler, her iki güneş paneli teknolojisinin çevresel göstergeler açısından farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Polikristal güneş paneli üretiminde kullanılan etil vinil asetat (EVA) için abiyotik tükenme değeri $6,72 \times 10^{-6}$ Kg 1,4-DB eq iken, kadmiyum tellür panellerde bu değer $3,66 \times 10^{-6}$ Kg 1,4-DB eq olarak hesaplanmıştır. Solar cam üretiminde ise polikristal panellerde $6,41 \times 10^{-7}$ Kg 1,4-DB eq, kadmiyum tellür panellerde $6,06 \times 10^{-7}$ Kg 1,4-DB eq abiyotik tükenme değeri ölçülmüştür. Bu sonuçlar, kadmiyum tellür panellerin hem daha az enerji tükettiğini hem de daha sürdürülebilir bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir enerji üretimine yönelik stratejiler geliştirilirken, endüstride tercih edilecek güneş paneli teknolojilerinin seçiminde rehberlik sağlamaktadır. Çalışma, gelecekteki enerji üretimi ve çevresel politika oluşturulması konularında önemli bir rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel etki, Güneş enerjisi, Güneş paneli, OpenLCA, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA).

ABSTRACT

MSc THESIS

COMPARING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF DIFFERENT SOLAR PANEL PRODUCTION PROCESSES USING THE LCA METHOD

Olcayto Doğukan ERYILMAZ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ENERGY SYSTEMS ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Atif Emre DEMET

2024, 75 Pages

Jury

**Asst. Prof. Dr. Atif Emre DEMET
Prof. Dr. Hidayet OĞUZ
Assoc. Prof. Dr. Ahmet Ali SERTKAYA**

In today's world, the increase in environmental issues and energy demands has highlighted solar energy as a clean and sustainable energy source. This research utilizes the Life Cycle Assessment (LCA) method to evaluate the environmental impacts of different methods used in solar panel production processes. In this study, the environmental impacts of the production processes of multi-crystalline solar panels and cadmium telluride (CdTe) thin-film solar panels were examined. The life cycle assessment comprehensively evaluates the environmental impacts arising at every stage of solar panel production. Various environmental indicators were analyzed in stages such as raw material extraction, production, transportation, use, and disposal. Specifically, the four main stages of the production processes of multi-crystalline solar panels and cadmium telluride thin-film solar panels (Ingot production, Wafer production, Solar cell production, Solar panel production) were analyzed using the OpenLCA software. Environmental indicators include energy consumption and water usage. The data obtained through the life cycle assessment method reveal differences in environmental indicators between the two solar panel technologies. For ethylene vinyl acetate (EVA) used in the production of polycrystalline solar panels, the abiotic depletion value was calculated as 6.72×10^{-6} Kg 1.4-DB eq, while for cadmium telluride panels, this value was 3.66×10^{-6} Kg 1.4-DB eq. In solar glass production, the abiotic depletion value was measured as 6.41×10^{-7} Kg 1.4-DB eq for polycrystalline panels and 6.06×10^{-7} Kg 1.4-DB eq for cadmium telluride panels. These results indicate that cadmium telluride panels not only consume less energy but also represent a more sustainable option. The findings provide guidance in selecting solar panel technologies for the industry, particularly when developing strategies for sustainable energy production. This study plays a significant role in shaping future energy production and environmental policy.

Keywords: Environmental impact, Solar energy, Solar panel, OpenLCA, Life Cycle Assessment (LCA).

ÖNSÖZ

Güneş enerjisi, günümüzde dünya genelinde enerji üretiminin dönüşümünde önemli bir rol oynamakta olan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Enerji sektörü, insanlığın yaşam biçimini sürdürülebilir bir şekilde sürdürebilme sorumluluğu ile karşı karşıyadır. Fosil yakıtların yaygın kullanımı, sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine katkıda bulunurken, doğal kaynakların aşırı tükenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, çevresel ve enerji güvenliği kaygıları, dünya liderlerini ve enerji sektörünü daha sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Bu bağlamda, güneş enerjisi güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi, güneş panelleri aracılığıyla güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme temel ilkesine dayanmaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynağının kullanımı, hem enerji maliyetlerini düşürme potansiyeli sunmakta hem de çevre dostu bir enerji üretimi yolunu açmaktadır. Bununla birlikte, bu güneş panellerinin üretimi de kendi benzersiz çevresel ve sosyal etkilere sahiptir. Bu çevresel ve sosyal etkilerin belirlenip hesaplanabilmesi için LCA kullanılmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi/Life Cycle Assessment (LCA) bir ürünün veya bir sürecin başlangıcından sonuna kadar olan tüm aşamalarda çevresel etkilerini değerlendiren bir metodolojidir. Yani, bir ürünün ham madde çıkarma, üretim, dağıtım, kullanım ve atılma aşamalarındaki çevresel etkileri sistematik olarak analiz eder. Bu durumda, güneş paneli üretim sürecini değerlendirmek için yaşam döngü değerlendirmesini kullanmaktayız. Bu, ham madde madenciliği, malzeme üretimi, panel montajı ve kullanım sürecinden atılma aşamasına kadar olan tüm adımları içermektedir. Bu değerlendirme, enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, su kullanımı gibi çevresel parametreleri ölçerek, güneş paneli üretiminin çevresel etkilerini belirlemektedir. Yüksek lisans tezimde, güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini OpenLCA uygulaması ile derinlemesine incelemek ve farklı üretim yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla yapılan bir kapsamlı araştırmanın sonucunu sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında ve tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen sayın Dr. Öğretim Üyesi Atıf Emre DEMET Hocama teşekkürlerimi sunarım.

Olcayto Doğukan ERYILMAZ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Metodoloji.....	2
2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PANELLERİ TEKNOLOJİSİ.....	4
2.1. Güneş Enerjisi: Teknik Detaylar ve Avantajlar	4
2.1.1. Güneş enerjisinin teknik detayları	4
2.1.2. Güneş enerjisinin avantajları	5
2.2. Güneş Panelleri Teknolojileri: Çeşitler ve Özellikler.....	6
2.2.1. Monokristal güneş panelleri.....	6
2.2.2. Polikristal güneş panelleri.....	8
2.2.3. Kadmiyum tellür güneş panelleri.....	9
2.2.4. Güneş paneli teknolojisi özellikleri	10
2.3. Uygulama Alanları: Güneş Panellerinin Çeşitli Kullanım Alanları	11
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YÖNTEMİ, KULLANILAN TEMEL KAVRAMLAR VE UYGULAMA ALANLARI	13
3.1. Yaşam Döngü Değerlendirmesi Nedir?	13
3.1.1. Yaşam döngü değerlendirme amacı	13
3.1.2. Yaşam döngü değerlendirme dört temel aşaması.....	15
3.2. LCA'nin Uygulama Alanları	16
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
5. OPENLCA UYGULAMASIYLA FARKLI GÜNEŞ PANELİ ÜRETİM SÜREÇLERİNİN ANALİZİ.....	24
5.1. OpenLCA.....	24
5.2. Farklı Güneş Paneli Üretim Süreçlerinin İncelenmesi	25
5.2.1. Sistem sınırları	25
5.3. Veri Toplama	26
5.3.1. İngot üretimi	26
5.3.2. Wafer üretimi	27
5.3.3. Güneş hücreleri üretimi	28
5.3.4. Güneş paneli üretimi	30
5.3.5. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi	31
5.4. Veri Girişi	33
5.5. Veri Sonuçları	38
5.5.1. İngot üretimi veri sonuçları.....	38

5.5.2. Wafer üretimi veri sonuçları	43
5.5.3. Güneş hücresi üretimi veri sonuçları	47
5.5.4. Güneş paneli üretimi veri sonuçları	52
5.5.5. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi veri sonuçları	57
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	61
7. KAYNAKLAR	63



Şekiller Listesi

Şekil 2.1. Mono-kristal güneş paneli	7
Şekil 2.2. Poli-kristal güneş paneli	9
Şekil 2.3. Kadmiyum tellür güneş paneli	10
Şekil 3.1. Yaşam döngüsü aşamaları	13
Şekil 3.2. Yaşam döngü değerlendirmesi (LCA) amacı	14
Şekil 3.3. Yaşam döngüsü metodolojisi	16
Şekil 5.1. İngot-wafer-hücre-panel aşamaları	26
Şekil 5.2. OpenLCA arayüzü.....	34
Şekil 5.3. OpenLCAecoinvent veri tabanı.....	34
Şekil 5.4. OpenLCA süreç-girdiler/çıktılar arayüzü.....	35
Şekil 5.5. OpenLCA uygulamasına ingot üretimi verilerinin girilmesi	35
Şekil 5.6. OpenLCA uygulamasına wafer üretimi verilerinin girilmesi.....	36
Şekil 5.7. OpenLCA uygulamasına güneş hücresi üretimi verilerinin girilmesi.....	36
Şekil 5.8. OpenLCA uygulamasına güneş paneli üretimi verilerinin girilmesi.....	37
Şekil 5.9. OpenLCA uygulamasına kadmiyum tellür güneş paneli üretimi verilerinin girilmesi	38
Şekil 5.10. İngot üretimi hesaplama arayüzü	39
Şekil 5.11. İngot üretimi karasal ekotoksosite sonuçları.....	40
Şekil 5.12. İngot üretimi insan ekotoksitesi sonuçları	42
Şekil 5.13. Wafer üretimi karasal ekotoksosite sonuçları	44
Şekil 5.14. Wafer üretimi insan ekotoksitesi sonuçları.....	47
Şekil 5.15. Güneş hücresi üretimi abiyotik tükenme sonuçları	49
Şekil 5.16. Güneş hücresi üretimi insan ekotoksitesi sonuçları.....	52
Şekil 5.17. Güneş paneli üretimi abiyotik tükenme sonuçları.....	53
Şekil 5.18. Güneş paneli üretimi karasal ekotoksosite sonuçları	56
Şekil 5.19. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi abiyotik tükenme sonuçları	59

Çizelge Listesi

Çizelge 5.1. İngot üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar	27
Çizelge 5.2. Wafer üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar.	27
Çizelge 5.3. Güneş hücreleri üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar	29
Çizelge 5.4. Güneş paneli üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar	30
Çizelge 5.5. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar	32



1. GİRİŞ

Günümüzde dünyanın karşı karşıya kaldığı en büyük zorluklardan biri, artan enerji talebi ve bu talebi karşılamak için kullanılan enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği konusudur. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi, çevresel kirliliğin ve iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Günümüzde fosil yakıtlar yaklaşık 85% oranında en baskın enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Gürel ve ark., 2020). Bu nedenle, insanlığın enerji ihtiyacını karşılamak ve çevresel etkileri en aza indirmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik arayışı, giderek artmaktadır. Bu arayışta, güneş enerjisi, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Güneş enerjisi, dünyamıza her gün muazzam miktarda enerji sağlayan temiz, sınırsız ve çevre dostu bir kaynaktır. Güneş enerjisi ilk olarak sıcak su üretiminde ve mahal ısıtmasında kullanılmıştır. Ardından fotovoltaik hücrelerin yardımıyla elektrik üretimine başlanmıştır (Yu ve ark., 2017). Güneş panelleri, fotovoltaik (PV) hücrelerden oluşan teknolojik cihazlar aracılığıyla güneş ışığını elektrik enerjisine çevirirler. Güneş enerjisi sektörü, teknolojik ilerlemeler ve teşvik politikalarının etkisiyle hızla büyümekte ve birçok ülke tarafından temiz enerji dönüşümünde önemli bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Sektörün günümüzde bu kadar çok rağbet görmesi, uluslararası pazarda rekabet yaratmakta, bu rekabet de teknolojik gelişmeleri hızlandırarak olağan dışı kimyasal madde kullanımı ile panel üretimi gibi birtakım yeniliklere öncülük etmektedir (Dubey ve ark., 2013; Gerbinet ve ark., 2014).

Ancak, güneş panellerinin üretimi de dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri vardır. Güneş panellerinin üretim süreçlerinin çevresel etkileri, hammaddelerin çıkarılmasından, üretim aşamasına, kullanım süresindeki enerji verimliliğine ve son atık yönetimine kadar tüm aşamalarda görülmektedir. Bu nedenle, güneş panellerinin çevresel etkilerini objektif ve sistematik bir şekilde değerlendirmek, sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi ve uygulanması için hayati öneme sahiptir.

Bu yüksek lisans tezi, "Farklı Güneş Paneli Üretim Süreçlerinin Çevresel Etkilerinin LCA Yöntemi ile Karşılaştırılması" başlığını taşımaktadır. Bu çalışma, güneş panellerinin farklı üretim süreçlerinin çevresel etkilerini belirlemek, analiz etmek ve karşılaştırmak amacıyla LCA yöntemini kullanmayı hedeflemektedir. LCA yöntemi, bir ürünün veya hizmetin üretiminden son kullanımına kadar olan tüm aşamalarda çevresel etkilerini

kapsamlı bir şekilde değerlendirerek, çevresel açıdan en uygun üretim sürecini belirlemeyi sağlayan bilimsel ve yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Tezin yapısı şu şekildedir: İkinci bölümde güneş enerjisi ve güneş panelleri teknolojisi ile ilgili genel bir tanım yapılmıştır. Üçüncü bölümde LCA yöntemi ve kullanılan temel kavramlar açıklanmıştır. Dördüncü bölümde genel literatür özeti, beşinci bölümde ise OpenLCA uygulaması hakkında genel bilgi verilip sonrasında farklı güneş paneli üretim süreçleri incelenip ve OpenLCA uygulamasıyla analiz edilmiştir. Altıncı bölümde elde edilen sonuçlar ve çıkarılan sonuçlar tartışılacak ve çevresel açıdan en uygun güneş paneli üretim süreci önerileri sunulmuştur. Bu çalışma, güneş enerjisi teknolojisinin çevresel açıdan değerlendirilmesine katkıda bulunarak, sürdürülebilir enerji üretimine yönelik stratejiler geliştirmeyi hedeflemektedir.

1.1. Metodoloji

Bu çalışmanın temel amacı, güneş paneli üretim süreçlerinde kullanılan farklı yöntemlerin çevresel etkilerini değerlendirmek ve sürdürülebilirliğini karşılaştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

Araştırma Tasarımı

Çalışmanın araştırma tasarımı, güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini belirlemek ve karşılaştırmak için LCA yöntemini kullanmayı içermektedir. Yaşam döngü değerlendirmesi, güneş paneli üretim süreçlerinin her aşamasında ortaya çıkan çevresel etkileri kapsamlı bir çerçevede içinde değerlendirmek için uygun bir araçtır.

Veri Toplama

Güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini belirlemek için gerekli veriler, literatür taraması ve endüstriyel veri tabanlarından elde edilmiştir. Özellikle, multi-kristal güneş paneli ve kadmiyum tellür ince film güneş paneli üretim süreçlerindeki dört aşamada (ingot üretimi, wafer üretimi, güneş hücresi üretimi, güneş paneli üretimi) kullanılan veriler toplanmıştır.

Analiz Yöntemi

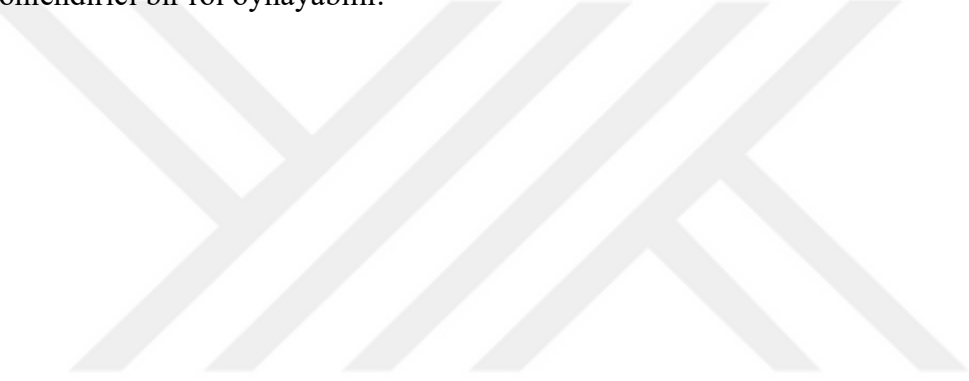
Güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini karşılaştırmak için OpenLCA yazılımı kullanılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, enerji tüketimi, su kullanımı gibi önemli çevresel göstergeler üzerinde odaklanılmıştır.

Karşılaştırma ve Değerlendirme

Çalışmada elde edilen veriler, multi-kristal güneş paneli ve kadmiyum tellür ince film güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini karşılaştırmak için kullanılmıştır. Bu karşılaştırma, farklı üretim yöntemlerinin sürdürülebilirliği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır.

Sonuçların İncelenmesi

Elde edilen sonuçlar, güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini derinlemesine inceleyerek, multi-kristal ve kadmiyum tellür güneş panellerinin sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Bu bulgular, güneş enerjisi sektöründeki sürdürülebilir uygulamalara yönelik önemli bilgiler sunarak, gelecekteki enerji üretimine yönlendirici bir rol oynayabilir.



2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PANELLERİ TEKNOLOJİSİ

2.1. Güneş Enerjisi: Teknik Detaylar ve Avantajlar

Güneş bütün evrenin temel enerji kaynağıdır, bilinen enerji kaynakları arasında en temiz ve en tükenmez olanlardan biridir. Dünyanın güneşten aldığı enerji toplamı bir yılda 1.5 katrilyon (1.5×10^{15}) MW/h'tir. Bu enerji miktarı, dünyada insanların 1 yılda tükettiği enerjinin tam 28.000 katına eşdeğerdir (Kılıç, 2015). Güneş, devasa termal nükleer reaksiyonlar sonucunda sürekli olarak ışık ve ısı yayarak enerji üretir. Bu enerji, güneş panelleri gibi teknolojiler aracılığıyla yakalanabilir ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Güneş enerjisi, çevre dostu, sürdürülebilir ve ekonomik avantajları olan bir enerji kaynağıdır.

Güneş enerjisi, dünya genelinde enerji üretiminde önemli bir rol oynamakta ve enerji sektörünün sürdürülebilirliği için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Gelecekte, güneş enerjisi teknolojileri daha da geliştirilerek enerji üretimindeki paylarını artırabilir ve çevre dostu bir enerji geleceğine katkı sağlayabilir.

2.1.1. Güneş enerjisinin teknik detayları

Güneş enerjisinin temelini, güneş ışığının fotoelektrik etkisi denilen bir fiziksel fenomenle elektrik enerjisine dönüştürülmesi oluşturur. Fotoelektrik etki, bir malzemenin ışığa maruz kaldığında elektronların serbestleştiği bir süreçtir. Güneş panellerinde kullanılan yarıiletken malzemeler, bu elektronların serbestleşmesini ve akım oluşturmasını sağlar. Bu akım, doğru akım (DC) elektriğe dönüştürülerek kullanılabilir enerji elde edilmektedir.

Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş fotovoltaik hücrelerinin alanları 100 cm^2 civarında, kalınlıkları özellikle en yaygın olan silisyum güneş pillerinde $0.2 - 0.4 \text{ mm}$ arasındadır (Karamanav, 2007).

Güneş enerjisi üretiminde en yaygın olarak kullanılan güneş panelleri, kristal ve ince film paneller olarak iki ana kategoriye ayrılır. Kristal paneller de, monokristal ve polikristal paneller olmak üzere iki ana alt kategoriye ayrılmaktadır. Monokristal paneller, tek bir kristal yapıdan oluşur ve yüksek verimliliğe sahiptirler. Polikristal paneller ise birden fazla kristal yapının bir araya getirilmesi ile oluşturulur ve biraz daha düşük bir verime sahiptirler.

İnce film paneller ise daha esnek kullanım ve daha düşük maliyet avantajları sunar. Bu tür paneller, ince bir katman halinde yarıiletken malzeme kullanılarak üretilir ve

genellikle daha hafif ve taşınabilir. Ancak, verimlilikleri genellikle kristal panellere göre daha düşüktür.

Panellerin verimliliği, kullanılan malzemelerin özellikleri ve üretim teknikleri ile belirlenir. Yüksek kaliteli malzemeler ve gelişmiş üretim teknikleri, daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Ayrıca, panellerin konumlandırılması ve güneş ışığına ne kadar iyi maruz kaldıkları da enerji verimliliğini etkilemektedir.

2.1.2. Güneş enerjisinin avantajları

Temiz ve Çevre Dostu: Güneş enerjisi, fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan hava ve su kirliliği ile sera gazı emisyonlarına neden olmayan temiz bir enerji kaynağıdır. Bu, iklim değişikliği ve çevresel sürdürülebilirlik için önemli bir avantajdır.

Sürdürülebilirlik: Güneş enerjisi kaynağı sınırsızdır, çünkü güneş sürekli olarak ışık ve ısı yaymaya devam eder. Diğer fosil yakıtlar gibi tükenmez ve yenilenebilir bir kaynaktır.

Enerji Bağımsızlığı: Güneş enerjisi sistemleri, yerel olarak enerji üretme olanağı sunmaktadır. Bu, bölgelerin enerji bağımsızlığını artırır ve enerji tedarikinde dışa bağımlılığı azaltır.

Uzak Alanlarda Kullanım: Elektrik şebekesine ulaşmanın zor olduğu bölgelerde, güneş panelleri sayesinde temiz enerji üretimi ve kullanımı sağlanabilir.

Düşük Bakım Gereksinimi: Güneş panelleri nispeten düşük bakım gerektirir. Panelleri temizlemek ve ara sıra incelemek, genellikle yeterlidir.

Verimlilik ve Teknolojik Gelişme: Güneş enerjisi endüstrisindeki teknolojik ilerlemeler sürekli olarak devam etmekte olup, her geçen gün yeni gelişmeler yaşanmaktadır. Özellikle, kuantum fiziği ve nano teknolojideki yenilikler, güneş panellerinin etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir ve güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Bu yenilikler, güneş enerjisi alanında çığır açıcı gelişmelere yol açarak, güneş panellerinin verimliliğini iki veya üç katına çıkarabilir.

Uzun Ömür: Güneş panelleri ve sistemleri uzun ömürlüdür ve genellikle 25 ila 30 yıl arasında hizmet verebilirler. Bu, uzun vadeli yatırım getirisi sağlamaktadır.

Elektrik Faturalarını Azaltma: Güneş enerjisi sistemi sahipleri, kendi elektrik enerjilerini üretirler ve fazla enerjiyi şebekeye satabilirler. Bu, elektrik faturalarını azaltmanın yanı sıra gelir elde etme fırsatı sunmaktadır.

Arazi Kullanımı ve Çok Amaçlı Kullanım: Güneş panelleri, arazi kullanımını optimize edebilir. Tarım veya diğer kullanımlarla birleştirilebilirler, bu da toprak kullanımını maksimize ederken enerji üretimini sürdürülebilir kılar.

Mobil Uygulamalar: Güneş enerjisi sistemleri, taşınabilir ve mobil uygulamalar için uygundur. Bu, kırsal bölgelerde, seyahatlerde ve acil durumlarda enerjiye erişimi kolaylaştırır.

Sonuç olarak, güneş enerjisi hem çevre hem de ekonomi açısından önemli avantajlara sahip temiz bir enerji kaynağıdır. Teknoloji geliştikçe ve güneş enerjisi üretim maliyetleri düştükçe, güneş enerjisi dünya genelinde daha geniş çapta benimsenmeye devam edecektir. Bu, gelecekte sürdürülebilir bir enerjiye yönelik önemli bir adımı temsil etmektedir.

2.2. Güneş Panelleri Teknolojileri: Çeşitler ve Özellikler

Güneş enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu enerjiyi elde etmek için kullanılan en yaygın teknolojilerden biri güneş panelleridir. Güneş panelleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren temel bileşenlerdir. Farklı türde güneş panelleri teknolojileri, verimlilik, maliyet ve uygulama alanları açısından farklı özellikler sunmaktadır.

2.2.1. Monokristal güneş panelleri

Güneş enerjisi teknolojisi, enerji sektörünün temiz ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemesine yardımcı olurken, monokristal silikon paneller (Mono-Si) bu dönüşümün önemli bir parçasını temsil etmektedir. Monokristal paneller, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan en verimli ve gelişmiş güneş paneli teknolojilerinden biridir.

Monokristal panellerin belirgin özelliği, tek bir kristal yapısından üretilmeleridir. Bu kristal yapının homojen olması, elektronların daha serbestçe hareket etmesini sağlar. Bu da monokristal panellerin daha yüksek verimliliğe sahip olmalarını sağlar. Yüksek verimlilikleri, daha fazla güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesi anlamına gelir. Sonuç olarak, bu paneller genellikle daha fazla enerji üretmektedir.

Bununla birlikte, monokristal enerji panellerinin fiyatı diğer güneş panellerinden daha yüksektir. Monokristal güneş panellerinin verimi yaklaşık 24%'tür. Bu oran piyasadaki diğer güneş panellerinden çok daha yüksektir. Ancak birim güç başına fiyat, diğer enerji

panellerinin neredeyse iki katıdır. Bu güneş panelleri daha uzun kullanım ve daha fazla elektrik üretim ömrüne sahiptir. Ek olarak, monokristal güneş panelleri sıcak iklimlerde daha verimli çalışabilir (Bilen ve ark., 2022).

Monokristal panellerin yaygın kullanım alanları bulunmaktadır. Ticari uygulamalardan yerleşim bölgelerine kadar geniş bir yelpazede kullanılırlar. Ticari uygulamalarda, işletmeler ve enerji santralleri genellikle monokristal panelleri tercih ederler. Yüksek verimlilikleri, bu tür uygulamalar için önemli bir avantajdır, çünkü daha fazla enerji üretimi sağlamaktadır.

Yerleşim bölgelerinde, ev sahipleri monokristal panelleri çatılarına veya arazilerine monte ederek kendi elektrik enerjilerini üretebilirler. Bu, enerji maliyetlerini düşürmenin yanı sıra ev sahiplerine enerji bağımsızlığı da sağlamaktadır.

Monokristal paneller, güneş enerjisi teknolojisinin sürekli olarak gelişen yüzünü temsil eder. Teknolojik ilerlemelerle birlikte panellerin verimliliği artmış ve maliyetleri azalmıştır. Bu da güneş enerjisi sistemlerinin daha rekabetçi hale gelmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, monokristal silikon paneller, yüksek verimlilikleri ve geniş uygulama yelpazeleri ile güneş enerjisi alanında önemli bir rol oynamaktadır. Temiz, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretimine katkıda bulunan bu paneller, enerji sektörünün dönüşümünde kilit bir unsurdur. Gelecekte, daha fazla inovasyon ve gelişme ile monokristal panellerin kullanımı daha da yaygınlaşabilir, böylece enerji ihtiyaçlarımızı çevre dostu bir şekilde karşılayabiliriz. Şekil 2.1'de mono-kristal güneş pili gösterilmektedir (Oğuz ve ark., 2015).



Şekil 2.1. Mono-kristal güneş paneli

2.2.2. Polikristal güneş panelleri

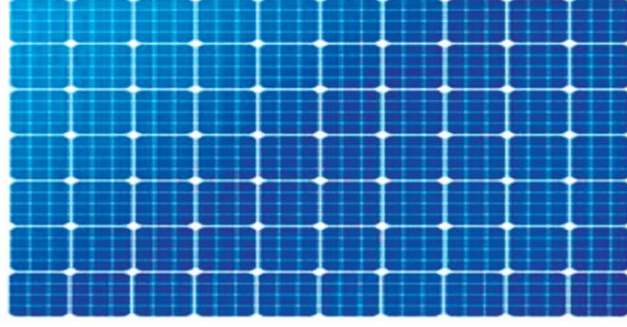
Polikristal paneller, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan, kristal yapıda birden fazla atomun olduğu silikon kullanılarak üretilen güneş paneli teknolojilerinden biridir. Gözle görülür şekilde dalgalı içyapı ve daha açık mavi tonlarında hücreleri vardır. Verimlilikleri 16-18% seviyesindedir. Maliyetleri monokristal panellere göre 25-30% daha düşüktür. Dünya çapında piyasada en yaygın kullanılan hücre tipidir (Pamuk, 2022).

Polikristal panellerin belirgin özelliği, birden fazla kristal yapının bir araya getirilmesi ile oluşturulmalarıdır. Bu, panellerin daha düşük maliyetli olmalarını sağlar. Polikristal paneller, yarıiletken malzemelerin eritilip yeniden katılaştırılması sırasında birden fazla kristal yapının oluşmasından kaynaklanır. Bu nedenle bu paneller, farklı kristal yönlendirmeleri içerirler, bu da elektronların serbest hareketini biraz engelleyebilir ve bu nedenle monokristal panellere göre daha düşük verimliliğe sahip olmalarına yol açmaktadır.

Polikristal panellerin düşük maliyetleri, büyük enerji santralleri ve çatı uygulamaları gibi geniş uygulama alanlarında tercih edilmelerini sağlamaktadır. Büyük enerji santralleri, maliyetleri düşük tutmak ve büyük enerji üretimi sağlamak için polikristal panelleri sıkça kullanmaktadır. Çatı uygulamalarında ise, ev sahipleri güneş enerjisi üretimini kendi çatılarına entegre etmek istediklerinde polikristal paneller maliyet açısından çekici bir seçenek sunmaktadır.

Polikristal paneller, çevresel ve ekonomik avantajları bir araya getirir. Daha düşük maliyetleri, güneş enerjisi sistemlerinin daha erişilebilir olmasını sağlar, böylece daha fazla insan ve işletme temiz enerjiye geçiş yapabilir.

Sonuç olarak, polikristal silikon paneller, enerji üretimini temiz, sürdürülebilir ve maliyet açısından rekabetçi bir şekilde gerçekleştirmek isteyenler için önemli bir seçenektir. Bu paneller, güneş enerjisi teknolojilerinin çeşitliliğini artırarak, enerji sektörünün dönüşümünü hızlandırmada önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekte, polikristal panellerin daha fazla inovasyon ve gelişme ile verimliliği artabilir, bu da güneş enerjisi sistemlerinin daha geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanır. Şekil 2.2'de polikristal güneş pili gösterilmektedir (Oğuz ve ark., 2015).



Şekil 2.2. Poli-kristal güneş paneli

2.2.3. Kadmiyum tellür güneş panelleri

Kadmiyum tellür güneş panelleri ince bir yarı iletken tabakanın güneş ışığını soğurup elektrik enerjisine dönüştürmesi esasına göre çalışan ve kristal silikon bazlı fotovoltaikleri kullanan sistemlere göre daha düşük maliyete sahip olan bir fotovoltaik teknolojisidir (Fenerci, 2019).

Kadmiyum tellür fotovoltaik sistemler ince film teknolojisi ile üretilmiş sistemlerdir ve geleneksel kristal silikon teknolojilerini kullanan sistemlere göre kW başına daha düşük kurulum maliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan kadmiyum tellür modül verimlilikleri 16% civarındadır (Rix ve ark., 2015). Kadmiyum tellür güneş panellerinin kristal silikon bazlı panellerle karşılaştırıldıklarında bir avantajları da güneş ışığının daha düşük dalga boylarını soğurabilmeleridir (Fenerci, 2019).

İnce film panellerin en büyük avantajı, esnek ve hafif olmalarıdır. Geleneksel kristal panellere göre çok daha incedirler ve bu, daha fazla kullanım esnekliği sağlamaktadır. Bu paneller, çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilir ve bu nedenle farklı uygulamalara uyum sağlayabilirler. Ayrıca, esnek yapıları sayesinde çeşitli yüzeylere monte edilebilirler.

Ancak ince film panellerin bir dezavantajı da vardır: verimlilikleri genellikle geleneksel monokristal veya polikristal panellere göre daha düşüktür. Daha ince filmlerden daha az güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilirler. Bu nedenle, büyük ölçekli enerji santrallerinde veya yüksek enerji gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaları tercih edilmektedir.

İnce film panellerin ideal olarak uygulandığı yerler, taşınabilir uygulamalar ve off-grid enerji çözümleridir. Taşınabilir güneş panelleri, açık hava etkinlikleri, seyahatler, kampçılık ve karavan gibi uygulamalarda kullanılırlar. Esnek yapısı, panellerin farklı yüzeylere kolayca monte edilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca, çatı kaplama malzemeleri, binaların dış yüzeyleri ve hatta giyim gibi daha sıra dışı uygulamalarda da kullanılabilirler. Bu, binaların kendi enerjilerini üretmelerine olanak tanırken, giyimde kullanıldığında taşınabilir enerji kaynaklarına dönüşebilirler. Şekil 2.3’de kadmiyum tellür güneş paneli gösterilmektedir (Fenerci, 2019).



Şekil 2.3. Kadmiyum tellür güneş paneli

2.2.4. Güneş paneli teknolojisi özellikleri

Verimlilik: Güneş panellerinin verimliliği, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme yeteneklerini belirler. Monokristal silikon paneller genellikle en yüksek verimliliğe sahiptir (24%), ardından polikristal paneller gelir. İnce film paneller ise daha düşük verimlilikle (1%) karakterizedir.

Maliyet: Panellerin maliyeti, üretim malzemeleri, teknik karmaşıklık ve verimlilik gibi faktörlere bağlı olarak değişir. İnce film paneller, düşük maliyetleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

Uygulama Alanı: Panellerin kullanım alanları da çeşitlidir. Monokristal ve polikristal paneller, genellikle ticari enerji santralleri ve yerleşimler için kullanılırken, ince film paneller daha taşınabilir ve esnek uygulamalarda tercih edilmektedir.

Dayanıklılık: Panellerin dayanıklılığı, kullanılan malzemeler, üretim kalitesi ve yapılan dayanıklılık testleri ile doğrudan ilişkilidir. Genellikle monokristal ve polikristal panellerin 25 ila 30 yıl arasında bir ömre sahip olduğu gözlemlenirken, ince film panellerin ömrü genellikle 20 ila 25 yıldır.

Montaj Kolaylığı: Montaj işlemi de önemlidir. Bazı paneller, çatılara, duvarlara veya diğer yüzeylere kolayca monte edilebilir. İnce film paneller, esnek yapısı nedeniyle daha farklı yüzeylere monte edilmesi daha kolaydır.

Hücre Malzemeleri: Güneş panelleri hücrelerinin yapıldığı malzemeler de farklılık gösterir. Monokristal ve polikristal paneller genellikle silikon tabanlıdır, ince film paneller ise farklı malzemeler içerebilir.

Renk ve Görünüm: Güneş panellerinin estetik görünümleri de önemlidir. Monokristal ve polikristal paneller tipik olarak mavi-siyah renklere sahiptir, ince film paneller ise daha çeşitli renk seçenekleri sunmaktadır.

Çevresel Etkiler: Üretim süreçleri ve malzeme seçimi, güneş panellerinin çevresel etkilerini belirler. Geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı gibi sürdürülebilir üretim yöntemleri ve malzemeler, çevre dostu panellerin oluşturulmasına yardımcı olabilirken, fosil yakıtların kullanımı gibi sürdürülebilir olmayan yöntemler çevresel etkileri artırabilir. Örneğin, güneş panellerinin üretiminde geri dönüştürülmüş cam ve alüminyum kullanımı sürdürülebilir bir yaklaşımdır, ancak fosil yakıtların kullanılması çevreye zararlı emisyonların artmasına neden olabilir.

2.3. Uygulama Alanları: Güneş Panellerinin Çeşitli Kullanım Alanları

Güneş panelleri, temiz ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlayan çok yönlü bir teknoloji olarak, çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. İşte güneş panellerinin farklı kullanım alanları ve bu alanlardaki rolü:

Çatı Üstü Uygulamalar: Evlerde ve işyerlerinde güneş panelleri, çatı üstü uygulamalarla en yaygın şekilde kullanılır. Çatılara monte edilen paneller, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürerek binaların kendi elektrik enerjilerini üretmelerini sağlamaktadır. Bu, enerji maliyetlerini düşürmek, enerji bağımsızlığını artırmak ve çevresel etkiyi azaltmak için ideal bir çözümdür.

Toplu Enerji Üretimi: Büyük enerji santralleri, güneş panellerini geniş araziler üzerine yerleştirerek toplu enerji üretimi gerçekleştirir. Bu tesisler, şehirlerin veya bölgelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılır. Tarla düzenlemesi, güneş panellerinin maksimum güneş ışığına maruz kalmasını sağlar ve böylece yüksek miktarlarda elektrik enerjisi üretmektedir.

Taşınabilir Uygulamalar: Taşınabilir güneş panelleri, açık hava etkinlikleri, kamp, karavan gezileri ve denizcilik gibi taşınabilir enerji çözümleri gerektiren durumlar için idealdir. Bu paneller, hafif ve kompakt tasarımları sayesinde kolayca taşınabilirler. Ayrıca, aküleri şarj etmek veya elektronik cihazları beslemek için kullanılabilirler.

Off-Grid ve Uzak Blgeler: Off-grid fotovoltatik sistemler, elektrik Őebekesinden ayrı olarak kurulan, gũneŐ paneli ile ũretilen elektriği akũler vasıtasıyla depolayıp inverterler ile evimizde kullandığımız elektrik enerjisine dŕnũŐtũren sistemlerdir (Atalay ve ark., 2011). Uzak bŕlgelerde veya elektrik Şebekesine ulaşmanın zor olduğu yerlerde, gũneŐ panelleri enerji ihtiyaçını karşılamak için ŕnemli bir rol oynamaktadır.

TaŐıtlar ve Denizcilik: GũneŐ panelleri, elektrikli araçlar, gemiler ve tekne gibi taŐıtlar için enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu, taŐıtların akũlerini Şarj etmek veya enerji ihtiyaçlarını karşılamak için gũneŐ enerjisini kullanmalarını sağlamaktadır.

Aydınlatma ve Őehir Donatıları: Kentlerde, gũneŐ panelleri sokak lambaları, trafik iŐaretleri ve kamusal aydınlatma sistemleri için enerji kaynağı olarak kullanılır. Bu uygulamalar, enerji tasarrufu sağlar ve Őehir altyapısını daha sũrdũrũlebilir hale getirmektedir.

3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YÖNTEMİ, KULLANILAN TEMEL KAVRAMLAR VE UYGULAMA ALANLARI

3.1. Yaşam Döngü Değerlendirmesi Nedir?

LCA bir ürün ya da hizmet üretiminde kullanılan hammaddelerin elde edilmesinden başlayarak, ilgili tüm üretim, sevkiyat, tüketici tarafından kullanım ve kullanım sonrası atık olarak bertarafı da kapsayan yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki çevresel etkilerini belirlemek, raporlamak ve yönetmek için kullanılır (Demirer, 2011). LCA çalışmaları, son 30 yılda giderek artan bir öneme sahip olmuştur ve bugün su tüketiminden inşaat malzemelerine ve elektronik cihazlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Özellikle, çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği odaklı kuruluşlar ve endüstriler LCA'yı benimsemekte ve kullanmaktadır. LCA, ürünlerin ve hizmetlerin çevresel etkilerini sistematik olarak analiz ederek, çevresel performanslarını artırmak için veri odaklı kararlar alınmasına olanak tanır. Bu analizler, üretici firmaların ve hizmet sağlayıcıların sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına ve yeşil ürün ve hizmetler sunmalarına yardımcı olur. Ayrıca, LCA'nın sürekli olarak gelişen bir alan olması, yeni yöntemlerin ve teknolojilerin entegrasyonunu teşvik eder ve gelecekte çevresel etkilerin daha kapsamlı ve hassas bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Şekil 3.1'de LCA'nın aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yaşam döngüsü aşamaları

3.1.1. Yaşam döngü değerlendirme amacı

Yaşam döngü değerlendirme'nin amacı, ürünlerin veya hizmetlerin çevresel etkilerini ve kaynak tüketimini anlamak, yönetmek ve azaltmak için bir temel oluşturarak daha sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmaktır. Bu, çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek ve kaynakları daha verimli kullanmak için önemli bir araçtır. LCA'nın genel olarak amaçları şunlardır:

Çevresel Etkileri Değerlendirmek: LCA, bir ürünün veya hizmetin üretiminden son kullanıcıya kadar olan her aşamasındaki çevresel etkileri değerlendirmeye yardımcı

olmaktadır. Bu, sera gazı emisyonları, su kullanımı, hava ve su kirliliği, enerji tüketimi gibi çeşitli çevresel etkileri içermektedir.

Kaynak Tüketimini Belirlemek: LCA, bir ürünün üretimi için kullanılan hammadde, enerji, su ve diğer kaynakları belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu, doğal kaynakların ne kadarının kullanıldığını ve nasıl tüketildiğini anlamamıza olanak sağlamaktadır.

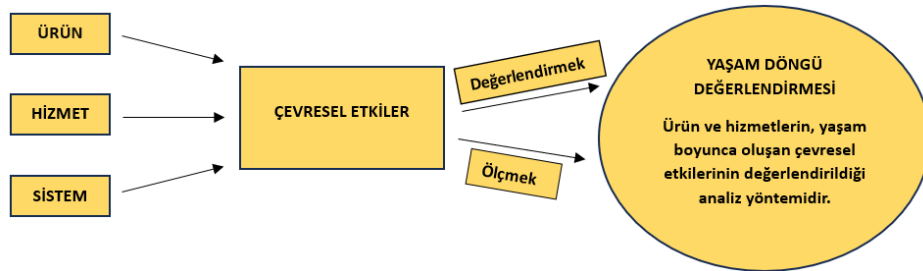
Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi: LCA, ürünlerin veya hizmetlerin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kullanılır. Bu, çevresel sürdürülebilirlikle ilgili hedeflere ulaşmak ve kaynakları daha verimli kullanmak için stratejiler geliştirmemize yardımcı olmaktadır.

Ürün Karşılaştırmaları: LCA, farklı ürünlerin veya hizmetlerin çevresel performansını karşılaştırmak için kullanılabilir. Bu, tüketicilere, işletmelere ve karar vericilere daha sürdürülebilir seçenekleri tercih etme konusunda bilgi sağlamaktadır.

Karar Verme Araçları Geliştirmek: LCA, işletmelerin ve hükümetlerin daha çevresel açıdan sürdürülebilir kararlar almalarına yardımcı olmaktadır. Ürün tasarımı, tedarik zinciri yönetimi ve enerji politikaları gibi alanlarda stratejiler geliştirmek için kullanılmaktadır.

Çevresel Düzenlemeleri Desteklemek: LCA sonuçları, çevresel düzenleyicilerin politika ve düzenlemelerini oluştururken temel bilgiler sağlamaktadır. Örneğin, karbon vergileri veya çevresel sertifikasyon programları oluşturulurken LCA sonuçları kullanılabilir.

Çevresel Bilincin Artırılması: LCA, tüketicilerin ve işletmelerin çevresel bilincini artırmaya yardımcı olmaktadır. Ürün etiketleme ve çevre dostu ürünlerin tanıtımı için kullanılabilir.



Şekil 3.2. Yaşam döngü değerlendirmesi (LCA) amacı

3.1.2. Yaşam döngü değerlendirmesi dört temel aşaması

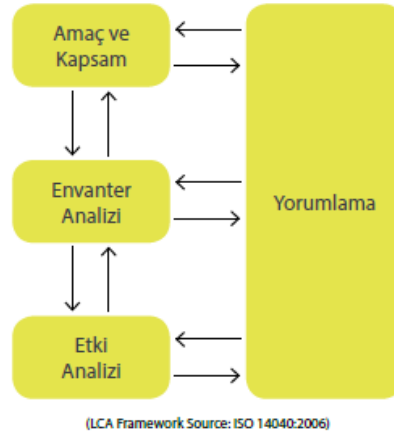
Hedef ve Kapsam Tanımı: Bu aşamada çalışmanın amacı, kapsamı, sınırları ve detaylandırma düzeyi tanımlanmaktadır (Döngüsü Analizi, n.d.). Bu süreçte, değerlendirme amaçları, hedef kitle, uygulama alanları ve değerlendirmenin kapsamı netleştirilir. Ayrıca, hedefin analitik bir incelemeye tabi tutulması gerekip gerekmediği belirlenmektedir.

Envanter Analizi: Bu aşamada çalışılan sistemin kapsamı dahilinde gerçekleşecek enerji, su, ham madde kullanımı ve bunlara bağlı çevresel emisyonlar belirlenmektedir (Demirer, 2011). Bu envanter analizi, veri toplamanın yanı sıra, ürün veya hizmetin çevresel etkilerinin belirlenmesi için temel bir veri tabanı sağlamaktadır.

Etki Değerlendirmesi: Envanter analizi aşamasında belirlenen enerji, su, ham madde kullanımı ile çevresel emisyonların insan sağlığı ve çevresel değerler üzerindeki olası etkileri değerlendirilir (Demirer, 2011). Bu değerlendirme, çeşitli etki türlerinin ve kaynakların çevresel etkilerinin göreceli önemini belirlemeye yardımcı olur. Böylece, LCA çalışmasının amacına uygun olarak, önemli etki faktörleri önceliklendirilebilir.

Yorumlama: Bu aşamada, elde edilen veriler ve sonuçlar detaylı bir şekilde incelenir ve değerlendirilir. Bulguların katkıları, alaka düzeyi, güvenilirlik, veri kalitesi ve sınırlamaları göz önünde bulundurularak yorumlanır. Ayrıca, ürün veya hizmetin çevresel etkilerini azaltma potansiyeline sahip tüm fırsatlar sistematik olarak değerlendirilir ve öneriler sunulur.

Yukarıda yaşam döngü değerlendirmesini oluşturan 4 temel aşama ayrıntılı açıklamalarıyla birlikte verilmiştir ve bu açıkladığımız 4 aşamanın Şekil 3.3' de ise görsel bir şekilde sunumu yer almaktadır.



Şekil 3.3. Yaşam döngüsü metodolojisi

3.2. LCA'nin Uygulama Alanları

LCA'nin uygulama alanları oldukça geniştir. İşte bazı örnekler:

Ürün Geliştirme ve Tasarım: LCA, ürün tasarım aşamasında çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olur. Ürünlerin daha uzun ömürlü, enerji verimli ve geri dönüştürülebilir olmasını teşvik etmektedir.

Ürün Etiketleme ve Sertifikasyon: LCA sonuçları, tüketicilere ürünlerin çevresel performansını karşılaştırma olanağı sunmaktadır. Bu nedenle, bazı ürünlerin üzerinde çevre dostu veya enerji verimliliği sertifikaları bulunmaktadır.

Endüstriyel Ekoloji: Endüstriyel Ekoloji, “endüstriyel proseslerin birbirleriyle sadece ekonomik olarak değil aynı zamanda birbirlerinin yan ürünlerini ve atıklarını doğrudan kullanarak oluşturdukları ağ olarak tanımlanmaktadır. Bu programın analiz amacı ürünlerden çok, endüstriyel prosestir ve çevresel etkileri farklı üretim proseslerini oluşturdukları atıklar yoluyla birbirine bağlayarak azaltmak için daha fazla sinerji oluşturmaya odaklanmıştır. Endüstriyel ekoloji programının LCA'yle doğrudan bir ilişkisi olmadığı düşünülmektedir. Fakat, endüstriyel ekoloji programına giren şirketler LCA'de olduğu gibi ürünlerinde gelişmiş bir çevresel profil oluşturmayı amaçlamaktadırlar. Bu da LCA'de kullanılan ayırma prosedürlerinin, çok sayıda endüstri arasında uygun bir şekilde karmaşık atık akımlarını oluşturmaya yönelik olarak geliştirilmesini gerektirmektedir (Gülşen ve ark., 2014).

Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED): ÇED'in detay derecesi, açığa çıkan kirleticilerin konsantrasyonları ve maruz kalma süresi gibi etkileri ele aldığından, LCA'den daha yüksektir (Gülşen ve ark., 2014).

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Güneş Paneli Üretim Süreçlerinin LCA Yöntemi ile Karşılaştırılması konusunda çeşitli türlerde ve alanlarda literatür mevcuttur.

Hussien Rabaia ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, güneş enerjisi sistemlerinin çevresel etkilerini ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. Çalışma, ticari ve yeni gelişen güneş fotovoltaik ve konsantre güneş enerjisi (CSP) sistemlerini incelemiş, bu sistemlerin temel bileşenleri ve yenilikçi teknolojilerini değerlendirmiştir. Araştırma, sistemlerin erken tasarım aşamasından başlayarak üretim, malzeme kullanımı, inşa veya kurulum, kullanım süresi ve sökme aşamasına kadar olan süreçleri kapsamaktadır. Hem küçük hem de büyük ölçekli sistemler için yaşam döngü değerlendirmesi yapılmış ve atık minimizasyonu ile geri dönüşüm gibi çözümler sunulmuştur. Çalışma, kristalin silikon tabanlı PV sistemlerinin çevresel etkilerinin iyi araştırıldığını, ancak yeni gelişen teknolojilerin (örneğin, galyum arsenit, OPV, DSSC, kuantum nokta güneş hücreleri) daha fazla dikkat gerektirdiğini vurgulamaktadır. CSP sistemlerinin ve özellikle termal depolama sistemlerinin çevresel etkilerinin daha fazla araştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Rabaia ve ark., 2021).

Ün'nün yapmış olduğu çalışma, fotovoltaik güç sistemlerinin hızla artan kullanımının çevresel ve ekonomik etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Fotovoltaik teknolojinin öne çıkan avantajları, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından ayrıntılı bir analize tabi tutulmuştur. Fotovoltaik sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca oluşan emisyonları ve geleneksel enerji üretim sistemleri ile karşılaştırarak, PV sistemlerinin çevresel faydalarını vurgulamaktadır. Bu karşılaştırma, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve geri ödeme sürelerinin ne kadar hızlı olduğu gibi önemli çevresel parametreleri ele almaktadır. Ayrıca, çalışma PV sistemlerinin uygulama alanlarına ve dünya genelinde bu teknolojiyi desteklemek için yürütülen projelere odaklanmaktadır. Fotovoltaik teknolojisinin enerji üretiminin yanı sıra çevresel iyileştirmeler, su temizliği ve sürdürülebilir enerji uygulamaları gibi farklı alanlarda nasıl kullanılabileceğini tartışmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak PV güç sistemlerinin yaygınlaşmasının çevresel ve ekonomik açıdan önemini vurgulamaktadır (Ün, 2003).

Castelazo ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, Meksika'da kurulu çatı üstü monokristalin silikon (mc-Si) PV sisteminin yaşam döngü değerlendirmesini yaparak çevresel etkilerini incelemiştir. SoPVS-CDMX sistemi için karbon ayak izi 47.156 g CO₂-eq./kWh olarak hesaplanmış ve bu değer büyük kısmının PV panellerinin üretiminden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, önceki çalışmalarda bildirilen değerlere kıyasla daha düşük olup, mc-Si PV teknolojisinin diğer PV teknolojilerine göre daha düşük çevresel etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, enerji ve mineral tüketiminin azaltılmasıyla emisyonların daha da düşürülebileceğini vurgulamıştır. Ayrıca, LCA sonuçları, hem konut hem de ticari uygulamalar için stratejik planlamada kullanılacak değerli bilgiler sunmakta ve Meksika'daki PV sistemlerinin genişlemesi için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır. Bu bulgular, Meksika'nın daha yüksek güneş ışınımına sahip bölgelerinde yapılacak gelecekteki PV sistem değerlendirmeleri için de yol gösterici olabilir (Castelazo ve ark., 2021).

Muteri ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, fotovoltaik sistemlerin LCA çalışmalarını inceleyerek, ilk nesilden üçüncü nesile kadar olan PV teknolojilerinin çevresel etkilerini, anahtar parametrelerini ve metodolojik perspektiflerini değerlendirmiştir. Literatür taraması, farklı PV hücreleri, üretim teknolojileri ve analiz metodolojilerinin sonuçları büyük ölçüde etkilediğini ve bu durumun çalışmaların karşılaştırılmasını karmaşıktırdığını göstermektedir. Elektrik tüketiminin çevresel etkiler üzerindeki önemi vurgulanmış, enerji yoğunluğu düşük üretim süreçleri ve fosil yakıtlara dayanmayan enerji karışımlarının kullanımı gerektiği belirtilmiştir. Birinci nesil PV'lerin enerji yoğunluğu yüksek üretim süreçleri çevresel etkilere önemli katkıda bulunurken, ikinci ve üçüncü nesil PV'lerin daha az enerji gerektirdiği ve daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Geri dönüşüm ve malzemelerin yanma sonucu elde edilen enerji, çevresel etkileri azaltmada önemli rol oynamaktadır. Verimlilik artışı, yeni nesil güneş hücrelerinin sürdürülebilirliğini belirleyen kritik bir faktör olarak öne çıkmıştır. Sonuç olarak, gelecekte modüllerin emisyon faktörlerinin ve maliyetlerinin değişeceği, daha iyi enerji verimliliği, teknolojik yenilikler ve sürdürülebilir üretim süreçleriyle yaşam döngüsü çevresel performansının iyileştirilebileceği belirtilmiştir. Bu çalışma, PV teknolojilerinin çevresel performansını artırmaya yönelik öneriler sunarak, sürdürülebilir enerji üretimi için değerli bilgiler sağlamaktadır (Muteri ve ark., 2020).

Ekinci'nin yapmış olduğu çalışma, fotovoltaik sistemlerin çevresel etkilerini, enerji gereksinimlerini ve enerji geri ödeme sürelerini incelemektedir. Kristal silikon yapıları

güneş panellerinin, ince film güneş panellerine göre daha çok üretim aşamasına uğradığı ve bu nedenle daha çok enerji gerektirdiği belirtilmiştir. Bu durum, daha yüksek enerji kullanımı nedeniyle sera gazı emisyonlarının artmasına neden olabilir. İnce film PV teknolojileri, özellikle CIS ve CdTe, benzer çevresel performanslar göstermektedir. Genel olarak, mono-kristal panel sistemlerinin daha fazla enerji ihtiyacına sahip olduğu, buna karşılık CdTe ve a-Si ince film PV sistemlerinin daha düşük enerji ihtiyacına sahip olabileceği gözlemlenmiştir. Kadmiyum tellür PV sistemleri, az miktarda enerji gereksinimi ve yüksek dönüşüm verimliliği sayesinde en hızlı enerji amortisman süresine sahip olabilir. Mono-Si PV sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle yaşam döngüsü boyunca daha yüksek miktarda sera gazı emisyonu üretebilir. Sonuç olarak, PV teknolojilerinin enerji geri ödeme süresi açısından çevre dostu ve sürdürülebilir olduğu belirlenmiştir. Kadmiyum tellür PV teknolojileri, düşük enerji ihtiyacı ve yüksek dönüşüm verimliliği ile öne çıkarak en iyi çevresel performansa sahip PV teknolojisi olarak görünmektedir (Ekinci, 2019).

Fenerci'nin yapmış olduğu çalışma, fotovoltaik sistemlerin elektrik üretimi yaşam döngüsüne odaklanıyor ve farklı fotovoltaik teknolojilerin çevresel etkilerini ve enerji taleplerini karşılaştırarak Türkiye özelinde önemli veriler sunuyor. Çalışmanın sonuçlarına göre, monokristal ve multi-kristal fotovoltaik sistemler arasında belirgin farklar bulunmaktadır. Monokristal sistemler, daha yüksek verimliliğe sahip olmalarına rağmen, enerji ihtiyaçları daha yüksektir ve bu nedenle enerji geri dönüş süreleri daha uzundur. Bu sistemlerin enerji geri dönüş süresi yaklaşık 3,08 yıl olarak bulunmuştur. Öte yandan, multi-kristal fotovoltaik sistemler, enerji talepleri daha düşük olduğundan ve aynı zamanda yüksek verimlilik sağladıklarından daha kısa enerji geri dönüş sürelerine ve daha düşük sera gazı salımlarına sahiptir. Bu çalışma, güneş enerjisi yatırımlarının hem ekonomik maliyetini hem de çevresel etkilerini değerlendirmek isteyenler için bilgilendirici bir kaynak olarak hizmet edebilir (Fenerci, 2019).

Girgin'in yapmış olduğu çalışma, güneş enerjisinin dünya çapında artan önemini ve elektrik üretimindeki rolünü ele almaktadır. Güneş panellerinin gelişimi ve maliyetlerinin düşmesi, bu enerjinin daha yaygın benimsenmesine olanak tanımaktadır. Özellikle son on yılda güneş enerjisi, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma potansiyeli ile hızla yaygınlaşmıştır. 1998-2008 yılları arasında güneş enerjisi kurulu gücünün hızla arttığı, 2010 yılında ise daha fazla sistemin devreye alındığı belirtilmektedir. Bu, güneş enerjisinin artan bir enerji kaynağı olarak kabul edildiğini göstermektedir. Güneş

panellerinin maliyetlerinin düşmesi, güneş enerjisinin gelecekte daha ekonomik bir seçenek haline geleceğini öngörmektedir. Bu enerji kaynağı, fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlara alternatif olarak öne çıkmaktadır. Dağınık güç sistemleri (Smart Grid) ve yenilenebilir enerji teşvikleri, güneş enerjisinin gelecekteki önemini artırmaktadır. Çalışma, Türkiye'deki güneş enerjisi sistemlerinin enerji ve ekonomik analizini yapmış, farklı enerji üretim seçeneklerini IRR oranlarına göre karşılaştırmıştır. Sonuçlar, enerji üretimi ile ekonomik faktörler arasındaki dengeyi değerlendirerek, güneş enerjisi projelerinin rekabetçiliği ve sürdürülebilirliği hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Girgin, 2011).

Çalış'ın yapmış olduğu çalışma, güneş enerjisi panellerinin çevresel etki potansiyelini araştırmaktadır. İki ana fotovoltaik panel teknolojisi olan polikristal ve kadmiyum tellür panellerin yaşam döngüsü boyunca çevreye saldırdığı emisyon miktarları ve enerji geri ödeme süreleri karşılaştırılmıştır. Araştırmanın temel bulguları şunlardır: Hem 1 m² polikristal hem de kadmiyum tellür PV panellerinin yaşam döngüsü boyunca çevreye saldırdığı emisyon miktarları hesaplanmıştır. Polikristal panelin yaşam boyunca çevreye saldırdığı emisyon miktarı 201,4 kg-CO₂ olarak bulunmuş, kadmiyum tellür panel ise 115,04 kg-CO₂ emisyonu üretmiştir. Kadmiyum tellür panelin çevresel etkileri daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, polikristal ve kadmiyum tellür panellerin enerji geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Polikristal panelin ortalama enerji geri ödeme süresi 0,92 yıl iken, kadmiyum tellür panel için bu süre 0,57 yıl olarak belirlenmiştir. Fotovoltaik panellerinin çevresel etkileri, kömür santralleri ve doğalgaz termik güç santralleri ile karşılaştırılmıştır. Fotovoltaik panellerinin kullanımı, termik santrallere göre daha temiz bir enerji kaynağıdır ve 17 yıllık bir süre boyunca 1,72 ton CO₂ emisyon tasarrufu sağlar. Bu çalışma, güneş enerjisi panellerinin çevresel etki potansiyelini inceleyerek, kadmiyum tellür panellerin polikristal panellere göre daha çevre dostu olduğunu ve enerji geri ödeme sürelerinin oldukça kısa olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi panellerinin diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha çevreci olduğunu ve gelecekte enerji üretiminde önemli bir rol oynayabileceğini vurgulamaktadır (Çalış, 2021).

Alam ve Xu'nun yapmış oldukları çalışma, Kanada'da mono-Si güneş paneli sistemlerinin çevresel ve insan sağlığı etkilerini LCA yöntemiyle incelemiştir. Çalışmada PV elektrik üretiminin asitlenme, kanserojen etkiler, ekotoksisite, ötrofikasyon, fosil yakıt tükenmesi ve küresel ısınma gibi etki kategorilerine katkıları hesaplanmıştır. Mono-Si panel üretimi, bu kategorilerde en yüksek katkıyı sağlamıştır. Kanada'nın 13 bölgesi

arasında PV potansiyeli değişmekte olup, bazı bölgelerde daha düşük çevresel etkilere yol açmaktadır. Duyarlılık analizi, panel ve montaj sistemindeki artışların bazı etkileri artıracaklarını, PV sistem ömründeki artışın ise çevresel etkileri azaltacağını göstermiştir. Çalışma, ekotoksinite ve kanserojen etkilerin önemini vurgulamakta ve PV sistemlerinin çevresel performansını iyileştirmek için gelecekte daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmektedir (Alam ve Xu, 2023).

Ardente ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, fotovoltaik atık geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkilerini ve kaynak verimliliğini değerlendirmiştir. Çalışmada, yeni bir yüksek teknoloji geri dönüşüm süreci olan FREL, geleneksel geri dönüşüm yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. FREL süreci, Avrupa'nın Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipmanların (WEEE) geri dönüşüm hedeflerini karşılayabilme potansiyeline sahipken, geleneksel süreçlerin bu hedeflere ulaşma kapasitesinin sınırlı olduğu belirtilmiştir. Çalışma her iki sürecin çevresel etkilerini ve geri kazanım verimliliklerini karşılaştırmıştır. FREL'in daha yüksek çevresel etkilere sahip olmasına rağmen, sunduğu geri kazanım faydaları da daha yüksektir. Geleneksel geri dönüşüm süreçleri ise düşük geri dönüşüm verimliliğine rağmen, özellikle alüminyumun etkili geri dönüşümü sayesinde iklim değişikliği açısından yüksek çevresel faydalar sağlamaktadır. Sonuç olarak, PV atık geri dönüşümünün genel çevresel faydalarının, PV sistemlerinin kullanım aşamasındaki faydalarına kıyasla genellikle düşük olduğu, ancak bazı istisnaların bulunduğu ortaya konmuştur. Çalışma, PV atık geri dönüşümünün daha etkili ve çevre dostu süreçlere ihtiyaç duyduğunu vurgulamaktadır (Ardente ve ark., 2019).

Liang ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, fotovoltaik üretiminin yerleştirilmesinin iklim değişikliği ve enerji kullanımı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz eder. Yeniden yerleştirilmiş c-Si PV üretiminin, lojistik zorlukları aşmasına rağmen sera gazı emisyonları ve enerji tüketimini ne kadar etkili bir şekilde azaltıp azaltmadığını nicel analizlerle değerlendirir. Çalışma, 2010, 2015 ve 2020 yıllarındaki offshore üretim senaryolarını ve 2020'de ABD'ye üretimin geri getirilmesinin iklim üzerindeki etkilerini inceleyen bir yaşam döngü değerlendirmesi sunmaktadır. Ayrıca, 2020'den 2050'ye kadar olan süreçte, beş yıllık aralıklarla temiz enerji bileşenlerini içeren gelecekteki senaryoları tahmin eder. Bu senaryolar, yenilenebilir enerji katkısının 2020'de %21'den 2050'de %42'ye çıkarılmasını öngörür. Çalışma, belirsizlikler ve hızlı bir şekilde artan iç PV üretimi, ekipman ve işgücü eğitimi genişlemesi konusundaki belirsizlikleri değerlendirir. Ticaret kısıtlamalarının ve yerleştirme vurgusunun, sürdürülebilir enerji teknolojilerinin

benimsenmesini yavaşlatabileceği ve ABD'nin iç güneş paneli üretim kapasitesine hazır olmayabileceği konusundaki endişeleri de ele alır. Bu makale, fotovoltaik üretiminin yerleştirilmesinin iklim ve enerji üzerindeki etkilerini değerlendiren geniş bir zaman aralığını kapsayan bir dizi analiz sunmaktadır (Liang ve ark., 2023).

Shah ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, çok kristalli silikon modüller kullanan PV güç üretim sistemlerinin Pakistan'daki çevresel yükünü LCA yöntemiyle incelemektedir. Çalışma, enerji geri ödeme süresini (EPBT) ve iklim değişikliği, asidifikasyon, eutrofikasyon gibi çevresel etkileri değerlendirmiştir. Üretim aşamalarını içeren bu süreçte, enerji yoğun malzemelerin kullanımı ve kritik üretim aşamaları üzerinde durulmuştur. Pakistan'da multi-kristal PV sistemlerinin EPBT'si 2.5-3.5 yıl arasında değişmekte ve bu, sistem ömründen oldukça kısadır. Sonuçlar, bu sistemlerin 0.519 MJ/kWh birincil enerji talebiyle pratik ve ekonomik olarak uygun olduğunu göstermektedir. Multi-Si üretimi, hücre işleme ve panel montaj aşamaları, çevresel etki açısından en büyük katkıya sahip süreçlerdir. Çalışma, Pakistan'da güneş enerjisinin rüzgar enerjisinden daha avantajlı bir yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu vurgulamakta ve ekonomik, çevre dostu bir elektrik üretme yöntemi olduğunu belirtmektedir. Ancak, tutarsız politikalar, uyumsuzluk, altyapı yetersizliği ve yatırım teşviklerinin eksikliği gibi sorunlar, güneş enerjisinin yaygınlaştırılmasını engellemektedir. Bu nedenle, olumlu politikaların ve proaktif önlemlerin uygulanması önerilmektedir (Shah ve ark., 2023).

Soares ve ark.'nın yapmış oldukları çalışma, bir LCA yaklaşımının kullanımını ele almaktadır ve birinci ve ikinci nesil fotovoltaik hücrelerinin üretimine atfedilen çevresel ve enerji etkilerini değerlendirmektedir. Bu çalışmada, silikon ve $CuInSe_2$ (CIS) ince filmlere dayalı PV teknolojileri dikkate alınmıştır. Amorf silikon (a-Si) ile hazırlanan PV sistemleri, kristal silikon (c-Si) kullanılarak elde edilenlere kıyasla düşük bir çevresel etkiye ve kısa bir enerji geri ödeme süresine sahiptir. Mono-kristal (mono-Si) ve polikristal silikon (multi-Si) ile ilişkilendirilen PV teknolojileri, işlenen her bir PV paneli metrekare başına CO_2 , azot oksitleri, metan dışı uçucu organik bileşikler, partiküller ve SO_2 gibi büyük miktarlarda emisyon göstermiştir. Ayrıca, bu teknolojiler önemli miktarda fosil yakıt talebi, biyolojik oksijen talebi ve küresel ısınma potansiyeli sergilemiştir, bu da onları çevre dostu olmayan hale getirmiştir. Şerit silikon (ribbon-Si) ve CIS ince filmler orta düzeyde etki skorları göstermiştir, ancak bu cihazların ticari olarak kullanılmadan önce üretim zincirlerinde daha fazla iyileştirme yapılması gerekmektedir. Burada incelenen teknolojiler, çevresel etkilerini ve dönüşüm verimliliklerini

karşılaştırmak amacıyla birinci ve ikinci nesil teknolojilere kategorize edilmiştir. Ayrıca, üçüncü nesil PV hücrelerinin geliştirilmesine de daha fazla dikkat edilmiştir, bunlar daha yüksek dönüşüm verimliliklerine ve daha düşük çevresel etkilere sahip olabilirler (Soares ve ark., 2018).

Tez çalışmamız ile literatür kısmında yer alan çalışmalarla karşılaştıracak olursak,

Öncelikle, tez çalışmamız ve literatür kısmında yer alan çalışmalar da genel olarak güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerini derinlemesine incelemeyi ve farklı üretim yöntemlerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. LCA metodolojisi kullanılarak, güneş paneli üretim süreçlerinin her aşamasındaki çevresel etkiler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. Bu aşamalar arasında ham madde çıkarma, üretim, taşıma, kullanım ve bertaraf gibi süreçler bulunmaktadır. Bu değerlendirmeler, güneş paneli teknolojilerinin sürdürülebilirlik açısından farklılıklarını anlamak için kritik öneme sahiptir.

İkinci olarak, güneş enerjisi endüstrisinin sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği konularında politika yapıcılar için önemli öneriler sunmaktadır. Bu öneriler, güneş enerjisi teknolojilerinin çevresel etkilerinin ve sürdürülebilirliklerinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunarak, sektörün gelecekteki gelişimi için yol gösterici olmaktadır. Ayrıca, çalışmalar güneş enerjisi endüstrisinin çevresel politikalarının oluşturulması ve uygulanmasında önemli bir role sahiptir.

Son olarak, bu çalışmalar güneş enerjisi teknolojisinin çevresel performansının değerlendirilmesine ve sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu, güneş enerjisi endüstrisinin çevresel etkilerinin azaltılması ve daha verimli hale getirilmesi için yapılan araştırmaların ve çalışmaların önemini vurgulamaktadır.

5. OPENLCA UYGULAMASIYLA FARKLI GÜNEŞ PANELİ ÜRETİM SÜREÇLERİNİN ANALİZİ

5.1. OpenLCA

OpenLCA, LCA ve sürdürülebilirlik değerlendirmesi için açık kaynaklı bir yazılımdır. GreenDelta tarafından 2006 yılından bu yana geliştirilmektedir (Ciroth ve ark., 2020).

LCA, bir ürünün veya hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini anlama ve değerlendirme yöntemidir. Bu, hammaddelerin çıkarılmasından üretim ve kullanım süreçlerine kadar, atık yönetimine kadar tüm aşamaları içerir. OpenLCA, bu süreçleri modellemek ve bu aşamalardaki çevresel etkileri hesaplamak için kapsamlı bir yöntem sunmaktadır.

OpenLCA'nin önemli özellikleri ve işlevleri şunlardır:

LCA Modelleme: OpenLCA, kullanıcıların ürünlerin veya süreçlerin karmaşıklığını ve farklı aşamalardaki çevresel etkilerini ayrıntılı bir şekilde modellemelerine yardımcı olur. Bu, malzeme akışlarını, enerji tüketimini, atık yönetimini, emisyonları ve diğer çevresel faktörleri içeren LCA modelleri oluşturmayı içermektedir.

Veri Tabanları ve Malzeme Kütüphaneleri: OpenLCA, kullanıcıların geniş bir veri tabanına erişim sağlamaktadır. Bu veri tabanları, malzeme özellikleri, enerji tüketimi bilgileri, emisyon faktörleri ve daha fazlasını içermektedir. Bu veriler, kullanıcıların LCA analizlerini daha verimli bir şekilde gerçekleştirmelerine yardımcı olmaktadır.

Kullanıcı Dostu Arayüz: OpenLCA, kullanıcıların LCA modellerini kolayca oluşturmalarına, düzenlemelerine ve görselleştirmelerine olanak tanımaktadır. Kullanıcılar grafiksel arayüzü kullanarak malzeme akışlarını ve süreçleri görsel olarak inceleyebilirler.

Sonuç Analizi: Kullanıcılar OpenLCA'yı kullanarak LCA sonuçlarını görselleştirebilir, farklı senaryoları karşılaştırabilir ve çevresel etkileri daha iyi anlamak için raporlar oluşturabilirler. Bu, sürdürülebilirlik stratejilerini geliştirmek için önemlidir.

İş birliği ve Paylaşım: OpenLCA, projeleri ve verileri paylaşmak için OpenLCA Nexus gibi çevrimiçi platformlarla entegre edilebilir. Bu, farklı kullanıcılar ve organizasyonlar arasında iş birliğini kolaylaştırmaktadır.

OpenLCA, sürdürülebilirlik değerlendirmeleri, ürün tasarımı, tedarik zinciri yönetimi, çevresel politika geliştirme ve çevre etkisi azaltma gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca,

açık kaynak bir proje olması, geniş bir kullanıcı topluluğunun katkıda bulunmasına ve sürekli olarak güncellemelere olanak tanır. OpenLCA, çevresel sürdürülebilirlikle ilgilenen kişiler ve organizasyonlar için güçlü bir araçtır ve çevresel etkileri daha iyi anlama ve azaltma amacıyla önemli bir rol oynamaktadır.

5.2. Farklı Güneş Paneli Üretim Süreçlerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, 2 farklı güneş paneli üretim süreci incelenmiştir. Bunlar:

- **Polikristal Silikon Güneş Panelleri:** Bu panel tipi, düşük saflıkta silikon kullanılarak üretilir. Polikristal silikon, silisyumun düşük saflıkta kristalleşmesi ile elde edilir. Bu yöntem, monokristalin yöntemle göre daha az enerji tüketir ve daha düşük maliyetlidir.
- **İnce Film Güneş Panelleri:** Bu panel tipi, ince bir tabaka halindeki fotovoltaik malzemelerin (amorfl silikon, CdTe, CIGS vb.) bir yüzey üzerine birleştirilmesi ile üretilir. Bu yöntem, diğer yöntemlere göre daha az enerji tüketir ve daha düşük maliyetlidir.

5.2.1. Sistem sınırları

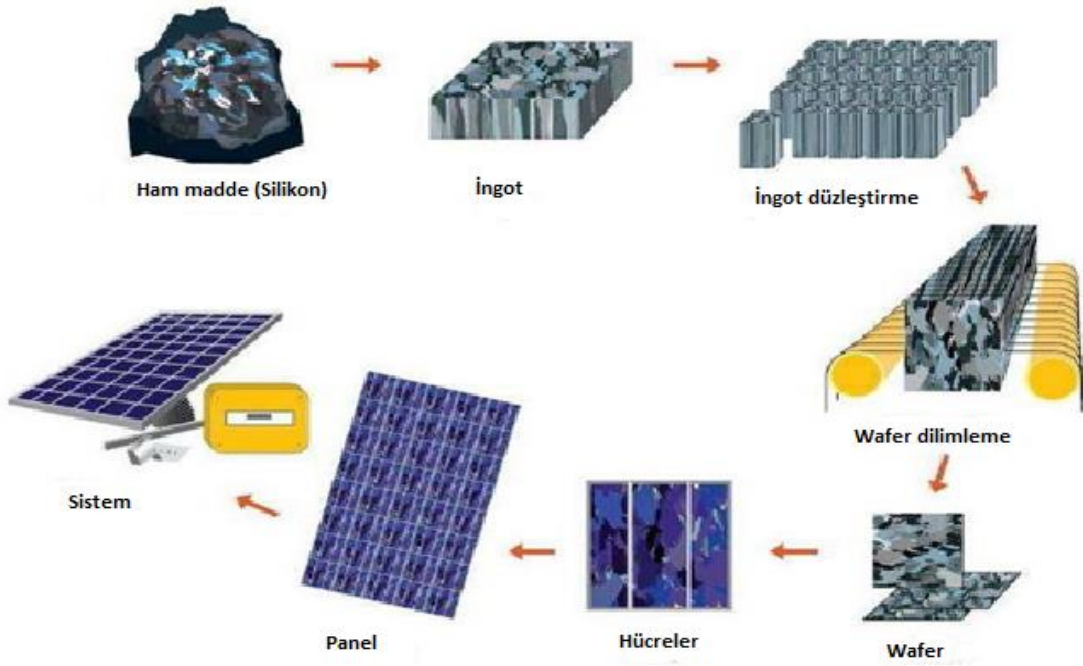
Bu çalışmada, güneş paneli üretim sürecinin aşağıdaki aşamaları dikkate alınmıştır:

İngot Üretimi: Güneş paneli üretiminin ilk aşaması ingot üretimidir. İngotlar, kristal silikon malzemenin temel yapı taşlarıdır. Ham silisyum saflaştırılır, eritilir ve dökme işlemiyle İngotlar oluşturulur. İngotlar, belirli boyutlara kesilerek hazırlanır.

Wafer Üretimi: Kesilen İngotlar daha sonra wafer'lar haline getirilir. Bu aşamada İngotlar ince diskler halinde kesilir ve yüzeyleri düzleştirilir. Wafer'lar, belirli kalınlık ve düzgünlük kriterlerine sahip olacak şekilde işlenir.

Güneş Hücresi Üretimi: Wafer'lar, güneş hücreleri olarak da bilinen fotovoltaik hücrelere dönüştürülür. Bu aşamada wafer'ların üzerine ince bir anti-yansıtıcı kaplama uygulanır ve ön ve arka elektrik kontakları eklenir. Bunun sonucunda, wafer'daki güneş enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür.

Güneş Paneli Üretimi: Güneş hücreleri, güneş panellerini oluşturmak için bir araya getirilir. Birçok güneş hücresi paralel veya seri olarak bağlanır ve elektriksel bağlantılar yapılır. Bu hücrelerin arka tarafı koruyucu bir kaplama ile kaplanır ve ön tarafları ise güneş ışığını emmek ve maksimum enerjiyi üretmek için tasarlanmış bir cam veya plastik tabaka ile kapatılır. Son olarak, güneş panelinin çerçevesi ve montaj aparatları eklenir. (Şekil 5.1; Zengin, 2015).



Şekil 5.1. İngot-wafer-hücre-panel aşamaları

5.3. Veri Toplama

Bu çalışmada, güneş paneli üretim süreçleri için veriler, literatür araştırmalar ve endüstriyel veri tabanlarından toplanmıştır. Veriler, üretim aşamaları, enerji tüketimi, malzeme kullanımı, emisyonlar ve atık yönetimi gibi faktörleri içermektedir. Verilerin doğruluğunu artırmak için, farklı kaynaklardan elde edilen veriler ortalama değerler kullanılarak birleştirilmiştir. OpenLCA uygulamasında kullanılan veriler aşağıda listelenmiştir:

5.3.1. İngot üretimi

Güneş hücreleri üretim sürecinde, çok kristalli güneş hücreleri için ilk adım ingot kütüklerinin üretimidir. EG-silikon, dereceli silikon ve SoG silikon, özel ocaklarda eritilir. Eritilen silikon, özel kalıplara dökülerek ingot formunda şekillendirilir. Bu kalıplar genellikle dikdörtgen veya kare kesitlidir. Dökülen silikon, kontrollü bir şekilde soğutulur ve katılaşır. Bu süreç, silikonun istenen kristal yapıya sahip olmasını sağlar. Katılaşmış silikon ingotlar, uygun boyutlara ve şekillere kesilir. Kesim işlemi genellikle büyük testereler veya benzeri ekipmanlarla gerçekleştirilir.

Çizelge 5.1'de ingot üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar gösterilmiştir. (Ekinci, 2019; Fthenakis ve ark., 2015).

Çizelge 5.1. İngot üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar

Sisteme Giren Öğeler	Sistemden Çıkan Öğeler
Soğutucu su (m ³)-Şebeke suyu (kg)	Atık; Isı (MJ)
Argon (sıvı)-Helyum-Azot (sıvı)	
Sodyum hidroksit, 50% (H ₂ O içinde) (kg)	
Fotovoltaik silikon bileşimi (kg)	
Silikon yapı (ünite)	
Taşıma çeşidine göre işlemler (tkm)	
Muhafaza edilmiş seramik karolar (kg)	

5.3.2. Wafer üretimi

Polikristal silikon, mevcut sütunlarda dökülür. Bu sütunlar, çok sayıda dilim içeren bir testereye konumlandırılır ve silikon devre levhaları biçiminde dilimlenir. Her bir dilim, birkaç kilometre uzunluğa erişebilir ve paralel olarak uzanır. Kesim işlemi, silisyum karbür ile aşındırma özelliği olan bulamaç kullanılarak gerçekleştirilir. Ardından, silikon devre levhaları temizlenir; bu amaçla KOH veya NaOH, asetik asit gibi çeşitli kimyasallar kullanılabilir. Temizlenen silikon devre levhaları, polistiren ve plastik folyo içinde paketlenir. Üçüncü bir tip olan şerit silikon devre levhaları da incelenmiştir. Bu levhalar da çok kristalli silikondan üretilir. Bloklardan kesilmeyip direkt sıvı silikondan çekilir veya dökülür, bu da testere kayıplarını önleyerek daha verimli malzeme kullanımını sağlar. Tipik olarak, 100 ila 300 mikron kalınlığında bir silikon filmin üretimi direkt olarak gerçekleştirilir. Genel olarak, silikon devre levhalarının kalınlığı 100µm'ye kadar ulaşabilir. Ancak, üretim tesisleri genellikle kırılmaları azaltmak için taşınabilirliği artırmak amacıyla daha kalın ürünler üretir. Kesim sonrasında silikon devre levhaları temizlenir, bu da HF, HCL veya asetik asit gibi asitlerin uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu işlem sonucu oluşan emisyonlar, bir gaz arıtma ünitesine yönlendirilir ve sodyum hidroksit ile nötrleştirilir. Elektronik sektörüne yönelik üretilen silikon yonga plakaları, estetik parlaklıkta levhalar elde etmek için yüzey parlatma adımı içerir (Liang ve You, 2023). Çizelge 5.2'de wafer üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar gösterilmiştir (Ekinci, 2019; Fthenakis ve ark., 2015).

Çizelge 5.2. Wafer üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar.

Sisteme Giren Öğeler	Sistemden Çıkan Öğeler
Şebekeden orta düzeyde voltaj (kWh)	0%'ı su olan geri dönüşümsüz katı atık (kg)
Endüstriyel fırınlarda düşük NO _x emisyonlu yanmış doğalgaz > 100kW (MJ)	%9,4'lük su içeriği bulunan geri dönüştürülebilir inorganik atık (kg)
Şebeke suyu (kg)- Arıtılmış su (kg)- Deiyonize su (kg)	Atık; Isı (MJ)

cz-sc silikon (kg)	Su (arıtma ünitesi)
Dökülmüş mc-silikon (kg)	Azot oksitler (kg)
Fotovoltaik silikon bileşimi (kg)	Kadmiyum(iyon) (kg)-Krom (iyon) (kg)
SiC ve geri dönüştürülmüş SiC (kg)	Bakır (iyon)-Nikel (iyon)
Kaplamasız düz Argon (sıvı)-Grafite (kg)	Kurşun (kg)-Cıva (kg)-Azot (kg)
NaOH, 50% H ₂ O (kg)	DOC, Çözünmüş Organik Karbon (kg)
Hidrolik asit, 30% H ₂ O (kg)	BOD5, Biyolojik Oksijen İhtiyacı (kg)
Asetik asit, 98% H ₂ O (kg)	KOI, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (kg)
Nitrik asit, 50% H ₂ O (kg)	AOX, Klor olarak ifade edilen emilebilir organik Halojen (kg)
Fabrikadan ve yeniden işlenilmiş Trietilen glikol (kg)	Fosfat (kg)
Dipropilen glikol monometil eter (kg)	TOC, Toplam Organik Karbon (kg)
Petrokimyasal alkilbenzen sülfonat (kg)	
Akrilik polimer, 34% H ₂ O (kg)	
Cam yünü levha-Kaplamasız düz cam (kg)	
Ahşap dışı kaplamalı kâğıt (kg)	
Yoğun etkide polistren (HIPS) (kg)	
Paketleme filmi (LDPE) (kg)	
Pirinç (kg)-Düşük alaşımlı çelik (kg)	
Çelik tel çekme (kg)	
Taşıma çeşidine göre işlemler (tkm)	

5.3.3. Güneş hücreleri üretimi

Güneş pili, yarı iletkenin 'p-n' birleşme noktasında ışığın etkisi altında elektrik üreten yarı iletken cihazdır. Güneş ışığı, pilin yüzeyine temas ettiğinde, bir bölümü yansır, emilir ve bir bölümü da hücre içinden geçer. Absorbe edilen ışık, bağlanmış elektronları daha yüksek enerji seviyelerine çıkararak onları serbest elektronlara dönüştürür. Bu fotovoltaik etki, ışınlanma sonucunda ortaya çıkar ve serbest elektronlar oluşturularak elektrik üretimini tetikler. Bu süreç, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme prensibine dayanır, bu da güneş pillerini temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı haline getirir (Liang ve You, 2023).

Güneş enerjisi uygulamalarında kullanılacak silikon devre levhalar, 'p/n' birleşimini meydana getirmek için doping işlemine tabi tutulur. Bu genellikle fosforlu bir n⁺ doping içerir. Güçlendirme işlemi, güçlendirilen camın birleştirilmesi ve Fosfor oksiklorür (POCl₃) kullanarak bir konveyör fırınında veya tüp fırınında difüzyonu içerir. Güçlendirilen camı kullanarak yapılan bu basit yöntem, sürekli bir işlem olarak konveyör fırınında uygulanabilir. Sonrasında, silikon devre levhaları, negatif iletken bir film oluşturmak için yüzeyden kaplanır.

Elektrik bağlantısını sağlamak için, ön ve arka taraflara baskı metalizasyonu uygulanır. Ardından, temas malzemesi fırındaki silikon devre levhasına entegre edilir. Verimliliği artırmak için ön yüzeyde yansımayı azaltıcı bir kaplama uygulanır. Üretilen güneş hücreleri çeşitli testlere tabi tutularak performansları ölçülür. Bu testler, hücrelerin verimliliği, dayanıklılığı ve diğer elektriksel özellikleri üzerine yapılır. Sonrasında hücreler belirli kalite standartlarına göre sınıflandırılır.

Öte yandan, şerit silikon güneş hücreleri diğer silikon hücrelerinden farklı özelliklere sahiptir. Şeritlerin pürüzlülüğü olmadığı için dokularının oluşturulması zordur ve bu nedenle farklı birleşimler kullanılmaktadır. Bu özellikler, üretim sürecinde dikkate alınarak, şerit silikon güneş hücrelerinin özel gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanır ve üretilir. Çizelge 5.3'de güneş hücreleri üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar gösterilmiştir (Ekinci, 2019; Fthenakis ve ark., 2015).

Çizelge 5.3. Güneş hücreleri üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar

Sisteme Giren Öğeler	Sistemden Çıkan Öğeler
Şebeke suyu (m ³)	%9,4'lük su içeriği bulunan geri dönüştürülebilir inorganik atık (kg)
Şebekeden orta düzeyde elektrik(kWh) Endüstriyel fırınlarda düşük NOx emisyonlu yanmış doğal gaz > 100kW (MJ)	Tamamen yumuşatılmış su (kg)
1MW endüstriyel fırında yanmış ham hafif yakıt yağı (MJ)	Hücre üretimi sırasında atık su arıtma (m ³)
Mono kristalli silikon levha (m ²) Polikristal silikon levha (m ²)	Atık; Isı (MJ)
Polikristal bant silikon(ribbon) devre levha (m ²)	Hidrojen klorür (kg)
Metal kaplama macunu, ön bölge (kg)	Hidrojen florür(kg)
Metal kaplama macunu, arka bölge (kg)	Alüminyum (kg)
Alüminyum metal kaplama macunu, arka bölge (kg)	Kurşun (kg)
Amonyak(sıvı) (kg)-Azot(sıvı) (kg)	Azot oksitler(kg)
Oksijen(sıvı) (kg)-Argon(sıvı) (kg)	Etan, heksafloro (HFC-116) (kg)
Fosforik asit, gübre niteliği, 70% H ₂ O (kg)	
Fosforil klorür(kg)- Hidrojen florür (kg)	Metan, tetrafloro (R-14) (kg)
Titanyum dioksit (üretim karışımı) (kg)	Parçacıklar, <2,5 um (kg)
Etilen kaynaklı etanol (kg)-İsopropanol (kg)	Silikon(kg)
Organik solventler (kg)-Silikon ürünleri (kg)	Gümüş (kg)-Sodyum (kg)-Kalay (kg)
Sodyum silikat (sprey tozu 80%)	NMVOC, metan dışı uçucu organik Bileşikler (kg)
Kalsiyum klorür (CaCl ₂)	
Asetik asit, 98% H ₂ O (kg)	
Hidrolik asit, 30% H ₂ O (kg)	
Nitrik asit, 50% H ₂ O (kg)	

Sodyum hidroksit, 50% H ₂ O (kg)	
Tetrafloroetilen (kg)	
Polistren (paket) (kg)	
Taşıma çeşidine göre işlemler (tkm)	

5.3.4. Güneş paneli üretimi

Panel üretimi, öncelikle bakır bağlantılar kullanılarak birbirine bağlanan bir hücre serisi oluşturularak başlanır. Güneş pilleri, her biri ön ve arka yüzeyinde olmak üzere etil-vinil asetat katmanlarına yerleştirilmiştir. Arka kapak genellikle polyester ve polivinilflorür filmlerinden oluşurken, ön kapak için ise genellikle 4 mm kalınlığında düşük demir cam levha kullanılır. Bu bileşenler daha sonra basınç ve sıcaklık etkisi altında birleştirilir, kenarları düzeltilir ve bağlantılar izole edilir. Üretim sürecinde, havaya az miktarda gaz yayılabilir ve bu dikkatle kontrol edilmektedir.

Folyonun üst üste gelen kısımları kesildikten sonra, panel alüminyum çerçeve (AlMg₃) ile donatılır. Yüklenen bir bağlantı kutusu kullanılarak silikon montajı yapılır. Son aşamada, paneller titizlikle test edilir ve ardından paketlenir. Proses verileri, malzeme ve enerji tüketimiyle birlikte üretim atıklarının artırılmasını içermektedir. Bu aşamaların titizlikle uygulanması, yüksek kaliteli güneş panellerinin üretilmesini sağlar, aynı zamanda enerji verimliliğini artırır ve çevresel etkiyi en aza indirir (Liang ve You, 2023). Çizelge 5.4 'de güneş paneli üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar gösterilmiştir (Ekinci, 2019; Fthenakis ve ark., 2015).

Çizelge 5.4. Güneş paneli üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar

Sisteme Giren Öğeler	Sistemden Çıkan Öğeler
Şebekeden orta düzeyde elektrik (kWh) Endüstriyel fırınlarda düşük NO _x emisyonlu yanmış doğalgaz > 100kW (MJ) Yapı ekipmanlarında yanmış durumdaki dizel (MJ)	Atık; Isı (MJ)
Şebeke suyu (kg)	22,9%'u su içeren katı atık (kg)
Temperlenmiş düz cam (kg)	0,2%'si su polivinilflorür (kg)
Bakır (tel çekilmiş) (kg)	15,3%'i su içeren plastik bileşen (kg)
Fotovoltaik silikon hücre (m ²)	Kullanılmış tehlike içeren mineral yağ atıkları (10% su) (kg)
Alüminyum alaşım, (AlMg ₃) (kg)	İyonize edilmiş su (m ³)
Nikel, 99,5% (kg)	Karbondioksit (fosil)
Kalay-Kurşun-Gümüş-Diyot (kg)	NM VOC, metan harici organik uçucu bileşikler belirtilmemiş kökenli (kg)
Kadmiyumsuz lehim işlemi (kg)	
Düşük oranda demir karakteristikli solar cam (kg)	
Bakır (kg)	

Etil vinilasetat (folyo) (kg)	
Enjeksiyonlu kalıplı üretim için cam elyaf destekli plastik (poliamid) (kg)	
Polivinilflorür film (kg)	
Silikon ürün (kg)	
Granül halindeki polietilen tereftalat (amorf) (kg) Polietilen Granülü (HDPE) (kg)	
Aseton (sıvı) (kg)	
Metanol (kg)	
Vinil asetat (kg)	
Yağlama yağı (kg)	
Propanol (kg)	
Düz palet (ünite)	
Hidrojen florid, İzopropanol	
Potasyum hidroksit- Sabun	
Taşıma çeşidine göre işlemler (tkm)	
Tek cidarlı karışık elyaf oluklu mukavva (kg)	

5.3.5. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi

İnce film güneş paneli modülleri, şu ana kadar birkaç firma tarafından üretilmektedir ve bu modüllerin içinde kadmiyum tellür gibi ince film teknolojileri öne çıkmaktadır. Kadmiyum tellür'ün özgün fiziksel özellikleri, güneş enerjisini verimli bir şekilde elektriğe dönüştürme kapasitesini ön plana çıkarmaktadır. Kadmiyum tellür, direkt bir bant aralığına sahip yarı iletken bir malzemedir ve güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimliliği açısından tarihsel teknolojilerle kıyaslandığında yarı iletken malzeme ihtiyacının yaklaşık 1%'i ile benzer bir verimlilik oranına sahiptir. Güneş pilleri genellikle hücre sıcaklıkları arttıkça verimlilik azalır. Ancak, verimliliği, hücre sıcaklığındaki artışlara karşı daha az duyarlıdır. Bu özellik, kadmiyum tellür güneş panellerinin yüksek sıcaklıkta ve daha fazla elektrik üretebilmesini sağlar. Kadmiyum tellür'ün avantajlarından biri de pahalı özel ekipmanlara duyulan ihtiyaç olmaksızın otomatik, yüksek performanslı üretim süreçlerinin başarıyla kullanılabilmesidir. Kadmiyum ve tellür, elde etmek için madencilik işlemlerinin yan ürünleri olarak üretilen stabil ve inert bir yarı iletken haline dönüştürülmektedir. Bu durum, sürdürülebilir bir şekilde temin edilebilen hammaddelerle üretim avantajını beraberinde getirir. Bu faktörler, kadmiyum tellür tabanlı ince film fotovoltaik modüllerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Liang ve You, 2023).

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde, temel girdi adımları çeşitli unsurları içermektedir:

Elektrik üretimi: modül üretim sürecinde hayati bir enerji tüketimini ifade etmektedir. Modül işleme, film kaplama, modül kurulumu içeren aşamalar, elektrik talebinin temel bileşenleridir. Ayrıca, genel işletme masrafları ve ofis kullanımı gibi faktörler de elektrik tüketimine önemli katkıda bulunur. Genel masraflar arasında çevresel kontroller, aydınlatma, sağlık ve güvenlik kontrolleri gibi unsurlar da bulunmaktadır.

Kimyasal maddelerin kullanımı: Üretim ve işletme sürecinde, temizlik, kaplama ve atık işleme için sülfürik asit, nitrik asit, izopropil alkol ve cam temizleme çözeltileri gibi kimyasallar kullanılmaktadır.

Tüketim malzemeleri: Kadmiyum tellür üretim tesisinde, temel üretim kaynaklarında kullanılan teller, kaynak çubukları ve filtreler gibi unsurlar önemli bir rol oynamaktadır. Bu materyaller, üretim sürecinde kaliteli ve etkili bir şekilde kullanılmak üzere seçilmektedir. Aynı zamanda, tesisin verimli işleyişi ve sürdürülebilirliği için tamir ve bakım malzemeleri de kritik bir öneme sahiptir.

Bu kapsamda teller, kablolar ve montaj parçaları, tesisin düzgün çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Güvenlik malzemeleri: Gözlükler, koruyucu dişliler ve eldivenler gibi unsurlar, çalışanların güvenliğini sağlamak ve potansiyel risklere karşı koruma sağlamak adına kullanılır. Bu güvenlik önlemleri, kadmiyum tellür üretim tesisinin çalışanlarına uygun bir çalışma ortamı sağlamak ve endüstriyel standartlara uygunluğunu sürdürmek için kritik bir rol oynamaktadır.

Su kullanımı: Özellikle cam/alt tabaka ve modül temizliği ile ilişkilendirilirken, kimyasal solüsyonlar ve laboratuvar kullanımı da dikkate alınmaktadır. Bu faktörlerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, malzeme tüketimi ve enerji harcamasının yanı sıra üretim atıklarının etkin bir şekilde yönetimini de içermektedir. Çizelge 5.5’de kadmiyum tellür güneş paneli üretim sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar gösterilmiştir (Ekinci, 2019; Fthenakis ve ark., 2015).

Çizelge 5.5. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi sürecinde kullanılan girdi ve çıktılar

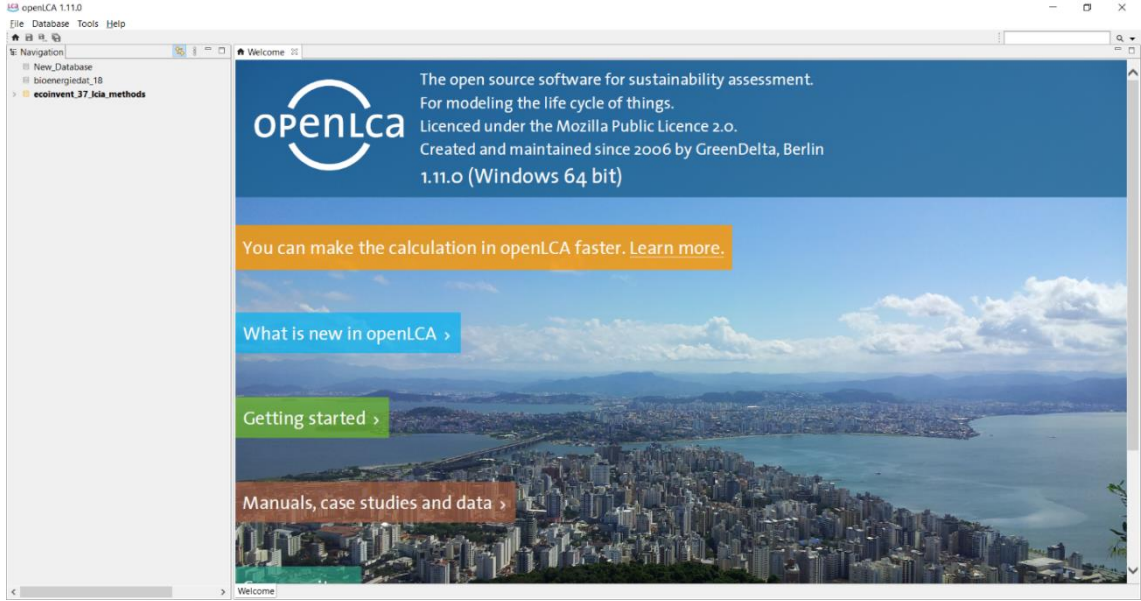
Sisteme Giren Öğeler	Sistemden Çıkan Öğeler
Şebekeden orta düzeyde elektrik (kWh)	22,9%’u su içeren katı atık (kg)
Kazan varyasyonunda kullanılan doğal gaz >100 kW (MJ)	15,3% oranında su içeren plastik karışımı (kg)

Şebeke suyu (kg)	İyonize edilmiş su (m ³)
Sertleştirilmiş düz cam (kg)	Atık; Isı (MJ)
Bakır (kg)	Kadmiyum (kg)
Silikon madde (kg)	Kadmiyum iyonu çözeltisi (kg)
Güneş enerjisi camı (düşük demir içerikli) (kg)	
Kaplama olmayan düz cam (kg)	
Enjeksiyonlu kalıplı üretim için cam elyaf takviyeli plastik, poliamid (kg)	
Etil vinilasetat (folyo) (kg)	
Yarı iletken düzeyde kadmiyum tellürür(kg)	
Yarı iletken düzeyde kadmiyum sülfür (kg)	
Nitrik asit, 50% H ₂ O (kg)	
Sülfürik asit, sıvı (kg)	
Silis kumu (kg)	
Toz formunda sodyum klorür(kg)	
Hidrojen peroksit, 50% (H ₂ O içinde) (kg)	
İzopropanol (kg)	
Sodyum hidroksit, 50% (H ₂ O içinde) (kg)	
Organik ve inorganik kimyasallar (kg)	
Azot (sıvı) (kg)	
Helyum (kg)	
Tek katmanlı oluklu mukavva (karışık fiber) (kg)	
Taşıma çeşidine göre işlemler (tkm)	

5.4. Veri Girişi

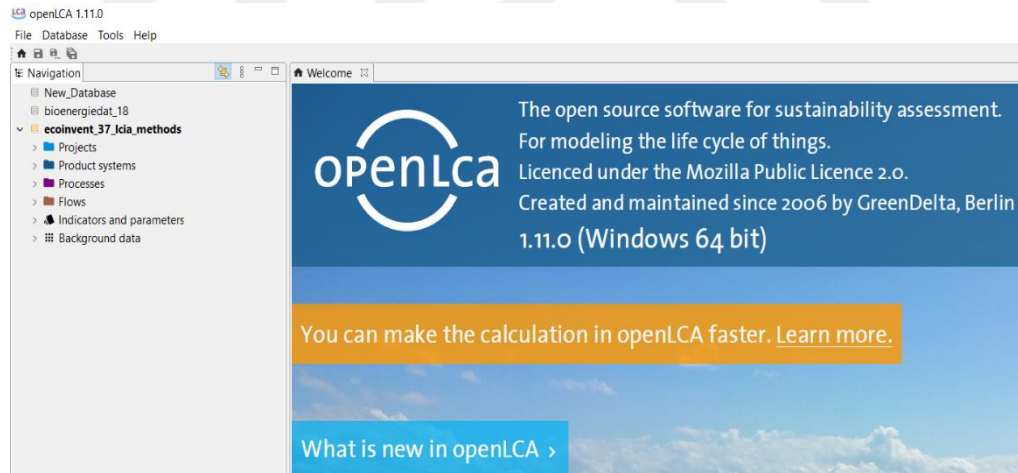
Toplanan veriler, OpenLCA yazılımında kullanılmak üzere uygun formatta giriş yapılmıştır. Bu adımda, güneş paneli üretim süreçlerine özgü aşamalar ve ilgili çevresel etkiler tanımlanmıştır. OpenLCA uygulamasına aşama aşama girilen veriler aşağıdaki şekillerle gösterilmiştir.

İlk olarak OpenLCA uygulamasına girdiğimizde Şekil 5.2’de görüldüğü gibi bizi OpenLCA arayüzü karşılamaktadır. Sol kısımda yer alan ecoinvent veri tabanına giriş yapılmıştır.



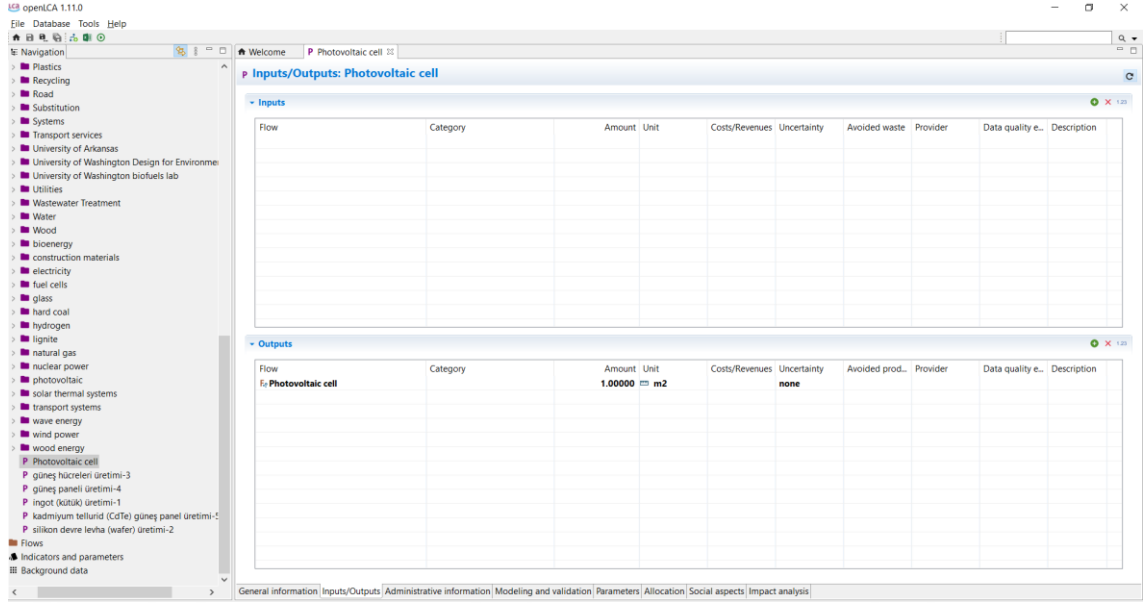
Şekil 5.2. OpenLCA arayüzü

2. Aşama olarak Şekil 5.3’de görüldüğü gibi girdiğimiz ecoinvent veri tabanında sırasıyla projects, product system, processes ve flows sekmeleri açılmıştır. Bu sekmelerden processes kısmına giriş yapılmıştır. Ve ondan sonra projemiz için yeni bir processes oluşturma adımına geçilmiştir.



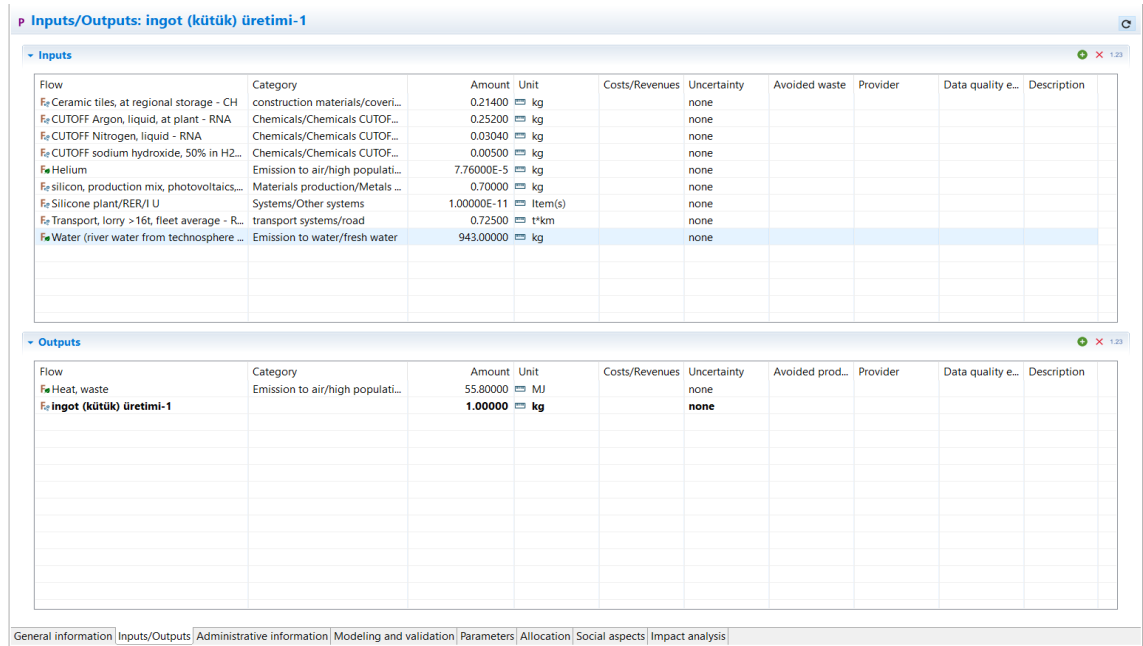
Şekil 5.3. OpenLCA ecoinvent veri tabanı

3. aşama olarak projemiz için Oluşturduğumuz processes kısmına girdiğimizde Şekil 5.4’de görüldüğü gibi bir arayüz karşılıyor. Bu arayüzde sayfanın alt kısmında yer alan girdiler/çıktılar kısmına giriş yapılmıştır ve bu kısma çizelgelerimizde yer alan veriler girilmiştir.



Şekil 5.4. OpenLCA süreç-girdiler/çıktılar arayüzü

Çizelge 5.1'den alınan veriler yardımıyla ingot üretimi sırasında sisteme giren ve çıkan ürünler Şekil 5.5'de görüldüğü gibi OpenLCA uygulamasına girilmiştir. Girdi ve çıktı verileri, enerji tüketimi, hammadde kullanımı, emisyonlar ve atıklar gibi kritik unsurları detaylı bir şekilde gösterir. Bu bilgiler, güneş paneli üretim süreçlerinin sürdürülebilirlik performansını anlamak ve optimize etmek için değerli bir temel sağlamaktadır.



Şekil 5.5. OpenLCA uygulamasına ingot üretimi verilerinin girilmesi

Çizelge 5.2'den alınan veriler yardımıyla wafer üretimi sırasında sisteme giren ve çıkan ürünler Şekil 5.6'da görüldüğü gibi OpenLCA uygulamasına girilmiştir.

Inputs/Outputs: silikon devre levha (wafer) üretimi-2

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e...	Description
Fa Acetic acid, 98% in H2O, at plant - US	Chemicals/Acids (organic)	0.03900	kg		none				
Fa Acrylic binder, without water, in 34% s...	Others/Ecoinvent cut-off S c...	0.00385	kg		none				
Fa Alkylbenzene sulfonate, linear, petroc...	Others/Ecoinvent cut-off S c...	0.24000	kg		none				
Fa Brass, at plant - CH	metals/extraction	0.00744	kg		none				
Fa CUTOFF Dipropylene glycol monomet...	Chemicals/Chemicals CUTOF...	0.30000	kg		none				
Fa CUTOFF Flat glass, uncoated, at plant ...	Manufacturing/Electric and E...	0.04080	kg		none				
Fa CUTOFF Silicon, multi-Si, casted, at pla...	Manufacturing/Electric and E...	1.02000	kg		none				
Fa CUTOFF sodium hydroxide, 50% in H2...	Chemicals/Chemicals CUTOF...	0.01500	kg		none				
Fa Electricity, medium voltage, productio...	Medium Voltage/Transforma...	20.80000	kWh		none				
Fa Hydrochloric acid, 30% in H2O, at pla...	Chemicals/Acids (inorganic)	0.00270	kg		none				
Fa Natural gas, burned in furnace >100k...	Others/Combustion	4.00000	MJ		none				
Fa Silicon carbide, at plant - US	Chemicals/Inorganic	0.62000	kg		none				
Fa Steel, low-alloyed, at plant - US	Metals/Ferro	0.79700	kg		none				
Fa Transport, lorry >16t, fleet average - R...	transport systems/road	0.84600	t*km		none				
Fa Triethylene glycol	Emission to air/high populati...	0.21800	kg		none				
Fa Water, deionised, from tap water, at u...	Others/Ecoinvent cut-off S c...	164.00000	kg		none				
Fa Wire drawing, steel - US	Metals/Chipless shaping	0.80500	kg		none				

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e...	Description
Fa BOD5, Biological Oxygen Demand	Emission to water/fossil-	0.02950	kg		none				
Fa CO2, Chemical Oxygen Demand	Emission to water/fossil-	0.02950	kg		none				
Fa Disposal, waste, silicon wafer product...	End-of-life treatment/Other ...	0.17000	kg		none				
Fa DOC, Dissolved Organic Carbon	Emission to water/fresh water	0.01110	kg		none				
Fa Heat, waste	Emission to air/high populati...	74.90000	MJ		none				
Fa silikon devre levha (wafer) üretimi-2		1.00000	kg		none				
Fa TOC, Total Organic Carbon	Emission to air/high populati...	0.01110	kg		none				

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

Şekil 5.6. OpenLCA uygulamasına wafer üretimi verilerinin girilmesi

Çizelge 5.3'den alınan veriler yardımıyla güneş hücresi üretimi sırasında sisteme giren ve çıkan ürünler Şekil 5.7. OpenLCA uygulamasına güneş hücresi üretimi verilerinin girilmesi Şekil 5.7'de görüldüğü gibi OpenLCA uygulamasına girilmiştir.

Inputs/Outputs: güneş hücreleri üretimi-3

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e...	Description
Fa Ammonia, liquid, at regional storehou...	chemicals/inorganics	0.00892	kg		none				
Fa Calcium chloride, CaCl2, at regional st...	Chemicals/Inorganic	0.03150	kg		none				
Fa CUTOFF sodium hydroxide, 50% in H2...	Chemicals/Chemicals CUTOF...	0.07070	kg		none				
Fa Electricity, medium voltage, productio...	Medium Voltage/Transforma...	14.40000	kWh		none				
Fa Hydrochloric acid, 30% in H2O, at pla...	Chemicals/Acids (inorganic)	0.00859	kg		none				
Fa Hydrogen fluoride	Emission to air/high populati...	0.40300	kg		none				
Fa Light fuel oil, burned in furnace 1MW ...	Others/Combustion	0.00270	MJ		none				
Fa metallisation paste (back aluminium B...	Systems/Electrics and electro...	0.00596	kg		none				
Fa metallisation paste (back contact)	Systems/Electrics and electro...	0.00534	kg		none				
Fa metallisation paste (front)	Systems/Electrics and electro...	0.00912	kg		none				
Fa multi-Si wafer, at regional storage/RE...	Materials production/Metals ...	1.04000	m2		none				
Fa Natural gas, burned in industrial furna...	natural gas/heating systems	0.24700	MJ		none				
Fa Nitric acid, 50% in H2O, at plant - RER	chemicals/inorganics	0.29300	kg		none				
Fa Nitrogen, liquid, at plant	chemicals/inorganics	1.35000	kg		none				
Fa Oxygen, liquid, at plant - RNA	Chemicals/All Other Basic In...	0.00822	kg		none				
Fa Phosphoric acid, fertiliser grade, 70% l...	Chemicals/Acids (inorganic)	0.00863	kg		none				
Fa phosphoryl chloride	Organic chemicals/nan	0.02740	kg		none				

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e...	Description
Fa Aluminium waste	final-waste-flow/unspecified	7.73000E-6	kg		none				
Fa CUTOFF Treatment,maize starch produ...	Waste Management and Re...	0.07890	m3		none				
Fa Disposal, waste, Si waferprod., inorg...	End-of-life treatment/Other ...	2.74000	kg		none				
Fa güneş hücreleri üretimi-3		1.00000	kg		none				
Fa Heat, waste	Emission to air/high populati...	51.80000	MJ		none				
Fa Hydrogen fluoride	Emission to air/high populati...	0.00069	kg		none				
Fa silicone product silicone product pro...	201:Manufacture of basic che...	3.17000E-8	kg		none				
Fa Silver	Emission to air/high populati...	7.73000E-6	kg		none				
Fa Lead (+I)	Emission to air/high populati...	7.73000E-6	kg		none				
Fa Sn(II)	Emission to air/high populati...	7.73000E-6	kg		none				

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

Şekil 5.7. OpenLCA uygulamasına güneş hücresi üretimi verilerinin girilmesi

Çizelge 5.4'den alınan veriler yardımıyla güneş paneli üretimi sırasında sisteme giren ve çıkan ürünler 'de Şekil 5.8'de görüldüğü gibi OpenLCA uygulamasına girilmiştir.

Inputs/Outputs: güneş paneli üretimi-4

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e...	Description
Flat glas, tempering_production mix_a...		8.81000	kg		none				
glass fibre reinforced plastic, polyami...	131:Spinning, weaving and fi...	0.29500	kg		none				
Hydrogen fluoride	Emission to air/high populati...	0.06240	kg		none				
Polyethylene, HDPE, granulate, at plan...	plastics/polymers	0.02380	kg		none				
Potassium hydroxide, at regional stora...	Chemicals/Inorganic	0.05140	kg		none				
Solar glas_production mix_at plant_EU...		8.81000	kg		none				
Transport, lorry > 16t, fleet average - R...	transport systems/road	5.85000	t*km		none				
Water, deionised, from tap water, at u...	Others/Ecoinvent cut-off S c...	5.03000	kg		none				
wire drawing, copper wire drawing, c...	242:Manufacture of basic pre...	0.10300	kg		none				
Photovoltaic cell		0.93500	m2		none				
Lead (+II)	Emission to air/high populati...	0.00072	kg		none				
Sn(II)	Emission to air/high populati...	0.01290	kg		none				
2-Propanol	Emission to air/high populati...	0.00015	kg		none				

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e...	Description
Add PolyVinylFluoride (PVF2) Exterior ...	Coatings, Glue & Paint Dry M...	0.11200	kg		none	<input type="checkbox"/>			
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/high populati...	0.02180	kg		none				
CUTOFF Treatment, sewage, to wastew...	Waste Management and Re...	5.03000	kg		none	<input type="checkbox"/>			
Disposal, municipal solid waste, 22.9%	AGRIBALYSE/Wastes	0.03000	kg		none				
Disposal, plastics, mixture, 15.3% wate...	AGRIBALYSE/Wastes	1.64000	kg		none				
Disposal, used mineral oil, 10% water...	AGRIBALYSE/Wastes	0.00161	kg		none				
güneş paneli üretimi-4		1.00000	kg		none				
Heat, waste	Emission to air/high populati...	13.40000	MJ		none				
NMVOC, non-methane volatilite organi...	Emission to air/high populati...	0.00806	kg		none				

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

Şekil 5.8. OpenLCA uygulamasına güneş paneli üretimi verilerinin girilmesi

Çizelge 5.5'den alınan veriler yardımıyla kadmiyum tellür güneş paneli üretimi sırasında sisteme giren ve çıkan ürünler Şekil 5.9'da görüldüğü gibi OpenLCA uygulamasına girilmiştir.

Inputs/Outputs: kadmiyum tellür (CdTe) güneş paneli üretimi-5

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e...	Description
Ethylvinylacetate, foil (RER) productio...	Others/Ecoinvent cut-off S c...	0.47700	kg		none				
Flat glass, uncoated_production mix_a...		8.34000	kg		none				
Glass fibre reinforced plastic, polyami...	plastics/others	0.10800	kg		none				
Helium, at plant/GLO U	Materials production/Inorga...	0.03640	kg		none				
hydrogen peroxide, 50% in H2O, at pl...	Manufacturing/Chemicals	0.01670	kg		none				
natural gas, burned in furnace > 100k...	Others/Combustion	5.50000	MJ		none				
Nitric acid, 50% in H2O, at plant - RER	chemicals/inorganics	0.05720	kg		none				
nitrogen, liquid, at plant	chemicals/inorganics	0.07320	kg		none				
Sodium chloride, powder, at plant, pr...	Transformation/Feedstuff pr...	0.04530	kg		none				
Solar glas_production mix_at plant_EU...		8.34000	kg		none				
Transport, lorry > 16t, fleet average - R...	transport systems/road	5.87000	t*km		none				
Water, deionised, from tap water, at u...	Others/Ecoinvent cut-off S c...	115.00000	kg		none				
2-Propanol	Emission to air/high populati...	0.00208	kg		none				

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e...	Description
Cadmium (+II) [Heavy metals to fresh...	Emissions to water unmappe...	5.34000E-9	kg		none				
Cadmium, ion	Emission to air/high populati...	4.43000E-7	kg		none				
CUTOFF Treatment, sewage, unpollute...	Waste Management and Re...	0.03410	m3		none	<input type="checkbox"/>			
Disposal, municipal solid waste, 22.9%	AGRIBALYSE/Wastes	0.03000	kg		none				
Disposal, plastics, mixture, 15.3% wate...	AGRIBALYSE/Wastes	0.70800	kg		none				
Heat, waste	Emission to air/high populati...	209.00000	MJ		none				
kadmiyum tellür (CdTe) güneş pa...		1.00000	kg		none				

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

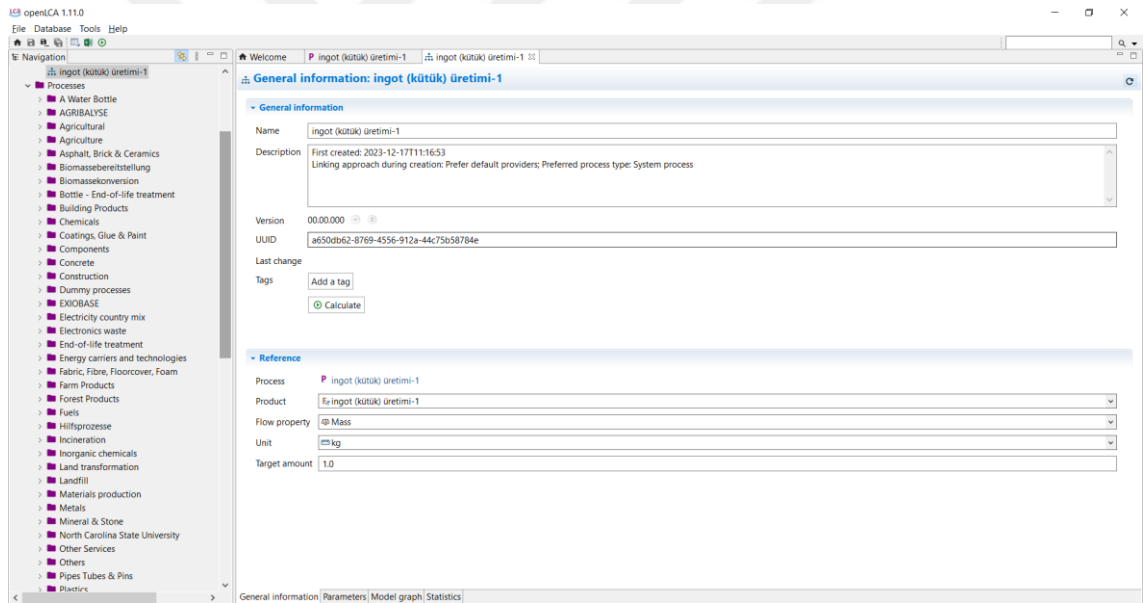
Şekil 5.9. OpenLCA uygulamasına kadmiyum tellür güneş paneli üretimi verilerinin girilmesi

5.5. Veri Sonuçları

Tablolarımızdan aldığımız veriler yardımıyla bir önceki bölümde güneş panelinin üretim süreçlerindeki 4 aşama (ingot üretimi, wafer üretimi, güneş hücresi üretimi, güneş paneli üretimi) ve kadmiyum tellür panel üretimi için OpenLCA uygulamasına veri girişi yaptık. Şimdi ise OpenLCA uygulamasına girdiğimiz verilerin her bir aşama için ayrı ayrı sonuçlar alınmıştır.

5.5.1. İngot üretimi veri sonuçları

Çizelge 5.1'den aldığımız veriler yardımıyla ingot üretimi için OpenLCA uygulamasına veri girişi yapıldıktan sonra şimdi veri sonuçlarını almak için Şekil 5.10'da görüldüğü gibi ingot üretimi processes kısmımızı açtıktan sonra calculate kısmına giriş yapılmıştır.

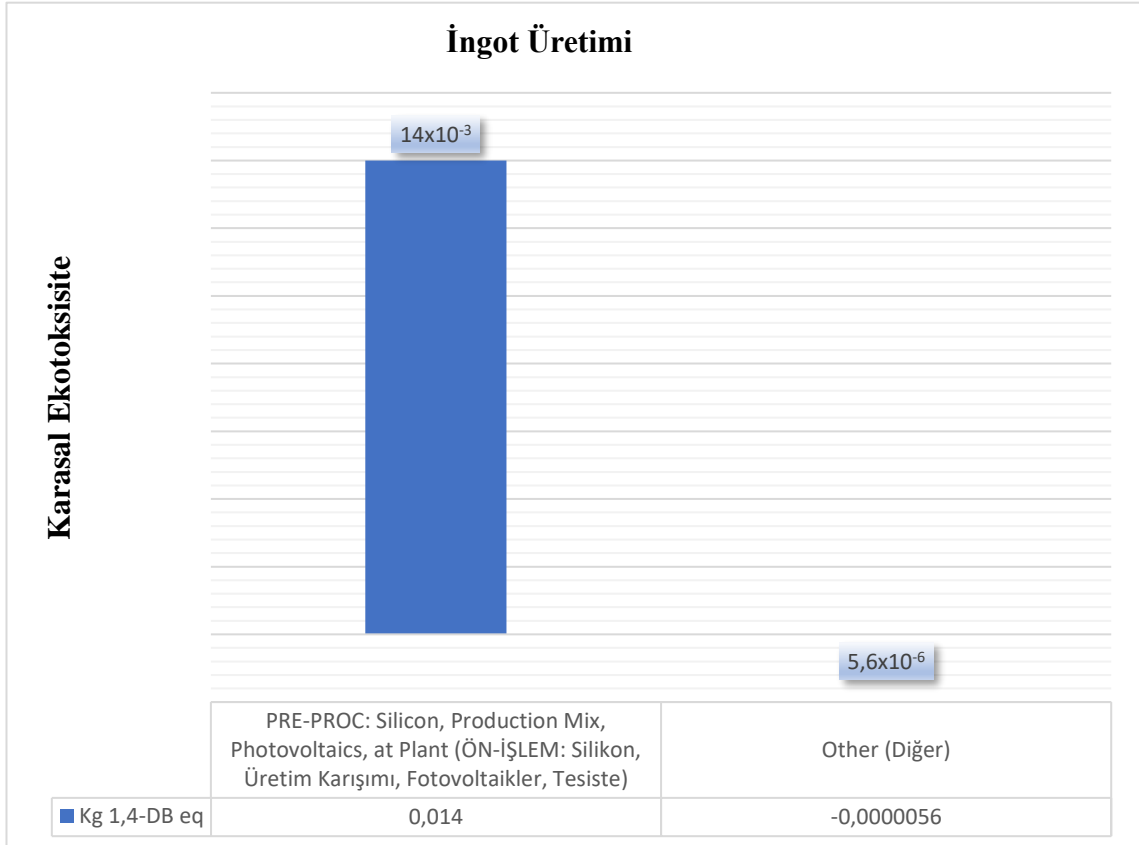


Şekil 5.10. İngot üretimi hesaplama arayüzü

İngot üretimi aşamamız için calculate kısmına giriş yapıldıktan sonra bizi grafikler ile birlikte sonuçların yer aldığı bir arayüz karşılamaktadır. Impact category kısmını kendi tercihimize bağlı olarak değiştirebilir her impact category için ayrı sonuçlar alabiliriz. Impact category kısmında çalışmamız için önemli olan karasal ekotoksosite'yi seçiyoruz. Karasal ekotoksosite, çeşitli endüstriyel faaliyetler, tarım ilaçları, sanayi atıkları, madencilik faaliyetleri ve diğer insan kaynaklı etkileşimler sonucunda ortaya çıkabilir. Bu tür toksik maddeler, su sistemlerine sızabilir ve zamanla çeşitli canlıları olumsuz etkileyebilir. Karasal ekotoksitenin kontrol altına alınması ve azaltılması için çevresel

düzenlemeler, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve çeşitli yönetim stratejileri kullanılarak çaba sarf edilmektedir. Bu, su sistemlerinin sağlığını ve biyolojik çeşitliliğini korumak amacıyla yapılan önemli bir çevre koruma çabasıdır.

Şekil 5.11’de ingot üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan karasal ekotoksisite sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.11. İngot üretimi karasal ekotoksisite sonuçları

Şekil 5.11’de yer alan grafiği yorumlayacak olursak grafik, belirli bir üretim sürecinin karasal ekotoksisite etkisini ölçen bir çevresel etki kategorisine odaklanmaktadır. Her bir değer, farklı üretim aşamalarına ait karasal ekotoksisite etkisini ifade eder. İşte her bir değer için açıklaması:

PRE-PROC: Silicon, Production Mix, Photovoltaics, at Plant (ÖN-İŞLEM: Silikon, Üretim karışımı, Fotovoltaikler, Tesiste) terimi, güneş paneli üretiminde kullanılan silikonun üretim aşamasını ifade eder. Güneş panelleri, güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için kullanılan fotovoltaik sistemlerin temel bileşenlerinden biridir ve bu nedenle silikonun üretimi, güneş paneli üretim sürecinin kritik bir aşamasını oluşturur.

Bu terim, güneş paneli endüstrisinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi için önemlidir, çünkü silikonun üretimi genellikle enerji yoğun ve çevresel etkileri olan bir süreçtir.

Sayısal sonuç olarak 14×10^{-3} değeri, güneş paneli üretiminde kullanılan silikonun çevresel toksisiteye olan katkısının pozitif olduğunu göstermektedir. Pozitif değer, çevresel etkilerin arttığını veya çevresel toksisitenin arttığını belirtmektedir. Bu durum, güneş paneli üretiminde kullanılan silikonun çevresel etkilerinin önemli olduğunu ve çevreye zarar verme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Bu durum, güneş paneli üretim sürecinin çevresel etkilerinin azaltılması ve daha sürdürülebilir bir yaklaşıma geçiş için dikkat gerektirir. Silikon üretimi sürecinde daha çevreci ve daha sürdürülebilir yöntemlerin benimsenmesi gerekebilir. Ayrıca, güneş paneli endüstrisinde daha çevre dostu alternatif malzemelerin araştırılması ve kullanımı da önemlidir. Bu şekilde, güneş enerjisi üretimi sürecinin çevresel etkileri minimize edilebilir ve daha sürdürülebilir bir gelecek sağlanabilir.

Other (Diğer) bu değer ise belirtilmemiş diğer etkilerin toplam karasal ekotoksisite etkisini temsil eder. Negatif bir değer çıktığından dolayı bu "diğer" etkilerin çevresel olarak olumlu bir etki sağladığını düşünebilir ve çeşitli çevresel avantajlar sağlayabilir.

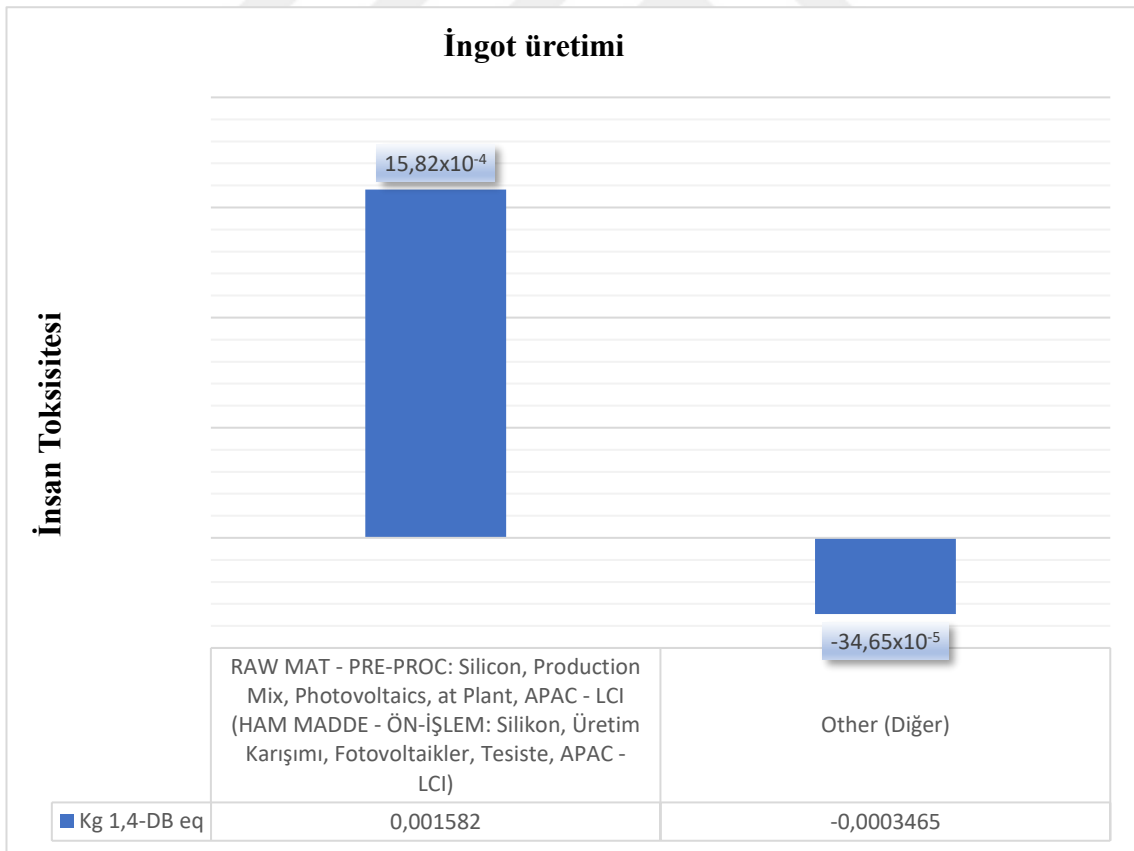
Toplamda, her bir aşamanın karasal ekotoksisite üzerindeki etkisi titizlikle değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar bir araya getirilmiştir. Pozitif değerler genellikle çevreye olumsuz etkiyi, negatif değerler ise olumlu etkiyi temsil eder. Bu kapsamlı değerlendirme, güneş paneli üretim sürecinin çevresel sürdürülebilirliği üzerindeki etkilerini daha kapsamlı bir şekilde anlamak için son derece değerlidir.

Bu bilgilere dayanarak, güneş paneli üretimindeki her bir aşamanın çevresel etkilerini değerlendirerek, daha sürdürülebilir üretim süreçleri ve çevresel uygulamalar geliştirme yolunda önemli adımlar atılabilir. Bu değerlendirme aynı zamanda, çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılmasıyla ilgili karar alıcıları ve endüstriyel uygulayıcıları bilgilendirmede de kılavuz olabilir. Sonuç olarak, bu kapsamlı analiz, güneş enerjisi endüstrisinin çevresel sürdürülebilirliği üzerine odaklanan daha geniş bir çabaya katkıda bulunmaktadır.

İngot üretimi aşamamız için 2. impact category olarak insan toksisitesini seçtik. İnsan toksisitesi kelimesini kısaca açıklayacak olursak;

İnsan toksisitesi terimi, genellikle kimyasal maddelerin veya diğer çevresel faktörlerin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ifade etmektedir. Bu terim, bir maddenin veya faktörün insan vücudu üzerinde toksik veya zararlı etkilere neden olma kapasitesini belirtmektedir. Kimyasal maddelerin insan toksisitesi genellikle maruz kalma düzeyine, süresine, maddenin özelliklerine ve bireysel duyarlılıklara bağlıdır. Bazı maddeler düşük konsantrasyonlarda bile toksik olabilir, bu nedenle insan toksisitesini değerlendirirken dikkatli bir risk analizi yapılmalıdır. Ayrıca çevresel faktörlerin, radyasyonun veya diğer biyolojik etmenlerin neden olduğu sağlık sorunlarını da kapsayabilir. Bu konuda yapılan araştırmalar, toplum sağlığına yönelik riskleri anlamak ve önlem almak için önemlidir.

Şekil 5.12’de ingot üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan insan toksisitesi sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.12. İngot üretimi insan toksisitesi sonuçları

Şekil 5.12’de yer alan grafiği yorumlayacak olursak bu grafik, güneş paneli üretim aşamalarından biri olan ingot üretiminin, çeşitli girdi ve çıktularına bağlı olarak insan

toksisitesi etkilerini ölçen bir çevresel etki kategorisi olan insan toksisitesi etkisi üzerindeki etkileri göstermektedir. İşte grafikteki değerlerin yorumlaması:

RAW MAT - PRE-PROC: Silicon, Production Mix, Photovoltaics, at Plant, APAC – LCI (HAM MADDE- ÖN-İŞLEM: Silikon, Üretim Karışımı, Fotovoltaikler, Tesiste, APAC - LCI) terimi, Asya-Pasifik (APAC) bölgesindeki güneş paneli üretim tesislerinde kullanılan silikonun üretim aşamasını ifade etmektedir. Güneş panellerinin üretiminde kullanılan silikon, güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için temel bir bileşen olan fotovoltaik hücrelerin yapımında kullanılmaktadır. Bu nedenle, silikonun üretimi güneş paneli endüstrisi için kritik öneme sahiptir.

Bu terim, silikonun güneş paneli üretim tesislerindeki üretim aşamasını temsil etmektedir. Silikonun üretimi genellikle enerji yoğun bir süreçtir ve çeşitli kimyasal maddelerin kullanımını içerebilir, bu da çevresel ve insan sağlığı üzerinde potansiyel etkilere neden olabilir. Bu nedenle, bu terim, güneş paneli üretim sürecinin çevresel ve insan sağlığı açısından etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Sayısal olarak, terim $15,82 \times 10^{-4}$ değerine sahiptir. Bu değer, silikon üretimi sürecinin insan toksisitesi üzerindeki etkisini ölçmektedir. Pozitif bir değer olduğundan, bu sürecin insan toksisitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu anlaşılır. Bu durum, üretim sürecinin insan sağlığına potansiyel olarak zarar verebilecek kimyasal maddelerin kullanımını içerdiğini göstermektedir. Bu nedenle, bu değer, güneş paneli üretiminde kullanılan malzemelerin seçiminde ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde dikkate alınması gereken bir faktördür.

Other (Diğer) belirtilmemiş diğer etkilerin toplam insan toksisitesi etkisini temsil etmektedir. Bu aşamamız ise grafiğimizde 0' a yakın bir negatif değer göstermiştir. Çok az da olsa insan toksisitesine olumlu katkı yaptığını söyleyebiliriz.

Bu analiz, ingot üretimi sürecinin insan toksisitesi üzerindeki etkilerini değerlendirerek, bu üretim faaliyetinin çevresel ve sağlık açısından nasıl bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, üretim sürecinin insan toksisitesine olan etkisini belirlemeye yardımcı olmaktadır.

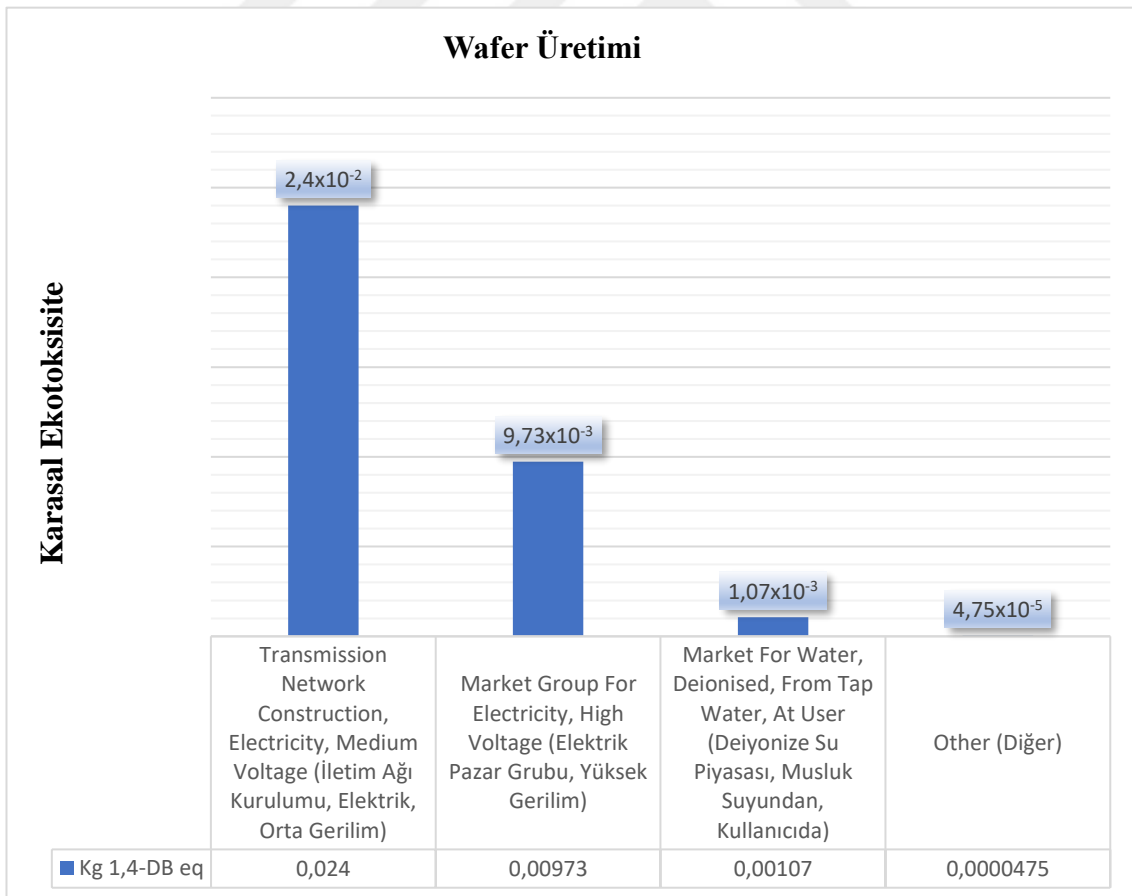
İngot üretimi sürecinde, özellikle silikon üretimi aşamasında, çeşitli kimyasal maddelerin kullanımını yaygındır. Bu kimyasalların bazıları insan sağlığı üzerinde potansiyel riskler taşıyabilir ve bu nedenle çevresel etkiyi artırabilir. Sonuç olarak, bu analiz, ingot üretimi

sürecinin insan toksisitesi açısından dikkate alınması gereken potansiyel riskleri vurgulamaktadır. İyileştirme çabaları, daha güvenli ve çevre dostu üretim yöntemlerinin benimsenmesini ve endüstriyel faaliyetlerin insan sağlığına ve çevreye olan etkilerinin azaltılmasını hedeflemelidir. Bu şekilde, güneş enerjisi endüstrisi daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde gelişmeye devam edebilir.

5.5.2. Wafer üretimi veri sonuçları

Çizelge 5.2'den aldığımız veriler yardımıyla wafer üretimi için OpenLCA uygulamasına veri girişi yapıldıktan sonra şimdi veri sonuçlarını almak için bir önceki aşamamız olan İngot üretiminde yaptığımız gibi processes kısmımızı açtıktan sonra calculate kısmına giriş yapılmaktadır.

Impact category kısmına geldiğimizde ise çalışmamız için önemli olan karasal ekotoksisite seçilmektedir. Şekil 5.13'de wafer üretimi için impact category kısmında yer alan karasal ekotoksisite sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.13. Wafer üretimi karasal ekotoksisite sonuçları

Şekil 5.13'de yer alan grafiği her bir terim için yorumlayacak olursak:

Transmission Network Construction, Electricity, Medium Voltage terimi (İletim Ağı Kurulumu, Elektrik, Orta Gerilim) elektrik enerjisinin iletim ağı inşası için orta gerilim seviyesindeki elektrik altyapısını ifade etmektedir. Bu, elektrik enerjisinin iletim ağı boyunca taşınması için kullanılan orta gerilimdeki elektrik hatlarının ve bağlantıların kurulumunu içermektedir. Bu bağlamda, wafer üretimi için gereken elektrik enerjisinin iletim ağı altyapısını temsil etmektedir. Wafer üretimi sürecinde kullanılan elektrik, genellikle bu tür iletim hatları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu nedenle, wafer üretimi için elektrik altyapısının çevresel etkisi değerlendirilirken, bu tür iletim ağı altyapısının çevresel etkileri dikkate alınmalıdır. Grafiğe bakacak olursak görüldüğü gibi terimimiz için değerimiz $2,4 \times 10^{-2}$ olarak çıkmıştır. Bu değer, wafer üretimi sürecinde elektrik enerjisi üretimi için orta gerilim seviyesinde iletim ağı inşasının karasal ekotoksositeye olan etkisini temsil eder ve değerimiz pozitif ve yüksek bir değer çıktığından dolayı çevreye olan etkisi de büyüktür. Daha az çevresel etkiye sahip elektrik üretim yöntemlerinin benimsenmesi veya enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler alınması, wafer üretiminin çevresel ayak izini azaltmaya yardımcı olabilir. Bu bilgi, endüstriyel uygulamalarda çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma çabalarını yönlendirmek için değerli bir kaynak olabilir.

Market Group for Electricity, High Voltage (Elektrik Pazar Grubu, Yüksek Gerilim) terimi, yüksek gerilim seviyesinde elektrik enerjisinin pazar grubunu ifade etmektedir.

Terimimiz, elektrik enerjisinin yüksek gerilim seviyesindeki pazarını temsil ettiği için wafer üretimi ile doğrudan ilişkili değildir. Ancak, wafer üretimi için elektrik enerjisi gereklidir ve bu elektriğin bir kısmı yüksek gerilim seviyesindeki iletim hatları aracılığıyla sağlanabilir. Dolayısıyla, wafer üretimi için gerekli olan elektrik enerjisinin temini, elektrik pazarı ve yüksek gerilim ile ilgili faktörlere bağlı olabilir. Değerimiz $9,73 \times 10^{-3}$ çıkmıştır. Bu değer, yüksek gerilim seviyesindeki elektrik enerjisinin çevresel etkilerini temsil eder ve bu değerimiz de yüksek çıktığından dolayı çevreye olumsuz olarak etkisi büyüktür. Bu sonuç, wafer üretimi sürecinin çevresel etkilerini değerlendirmenize ve kararlarınızı yönlendirmenize yardımcı olmaktadır.

Market for Water, Deionised, From Tap Water, At User terimi (Deiyonize Su Piyasası, Musluk Suyundan) kullanıcı noktasında musluk suyundan arıtılmış su alımını temsil etmektedir. Bu, musluk suyunun arıtılarak iyonlarının giderildiği ve içerdiği minerallerin

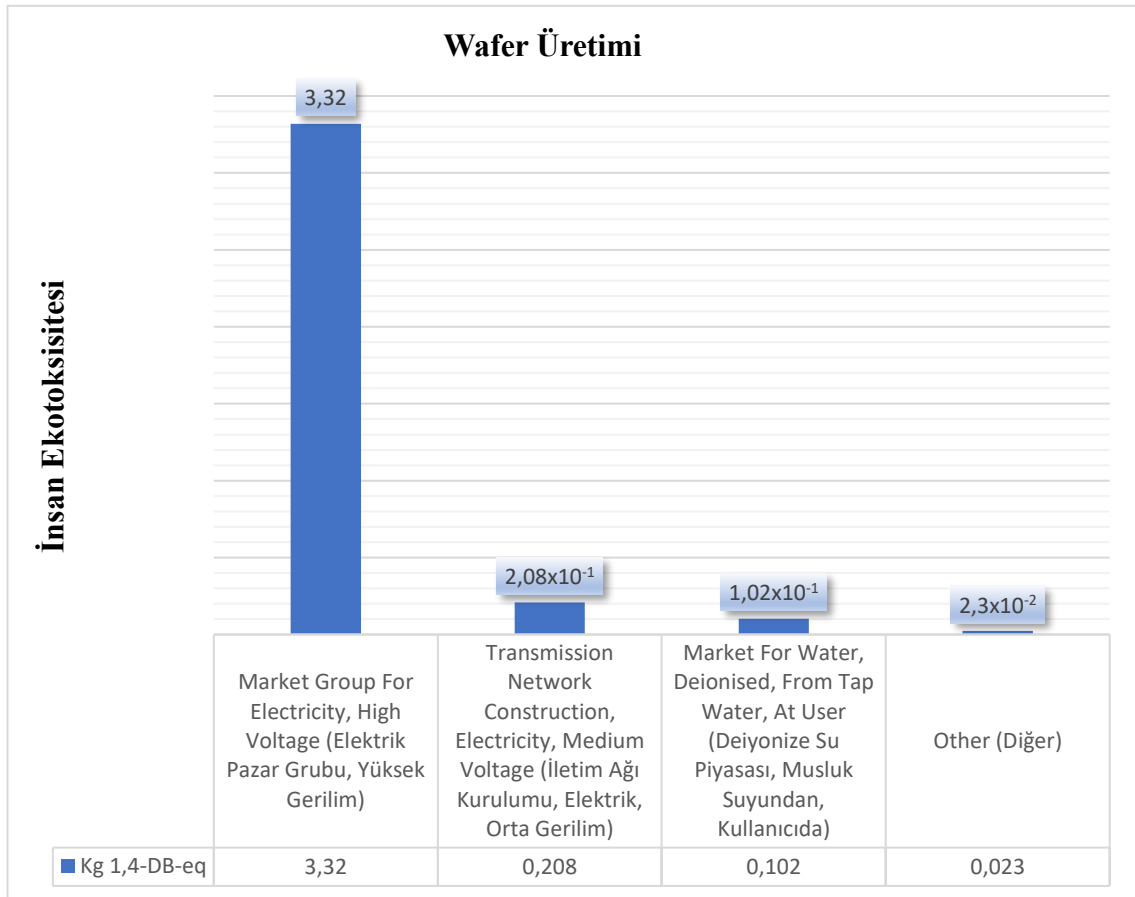
azaltıldığı bir süreçtir. Arıtılmış su, endüstriyel uygulamalarda, laboratuvarlarda, elektronik üretiminde ve diğer çeşitli endüstriyel işlemlerde kullanılabilir.

Güneş panelleri üretimi aşamalarından olan wafer üretimi ile bağlantılı olarak, bu terim wafer üretimi sürecinde kullanılan su kaynaklarının çevresel etkilerini değerlendirmek için önemli olabilir. Wafer üretimi, Çizelge 5.2' de girdiğimiz verilerinden de görüleceği üzere su kullanımını gerektiren bir süreçtir. Bu nedenle, kullanılan suyun kaynağı, arıtma yöntemleri ve işlemlerinin çevresel etkileri wafer üretiminin çevresel sürdürülebilirliği üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, terimimiz için grafiğimize baktığımızda $1,07 \times 10^{-3}$ değeri çıkmıştır. Bu veri, az da olsa çevreyi olumsuz olarak etkilemektedir ve bu değer Wafer üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmek ve süreci daha sürdürülebilir hale getirmek için kullanılır wafer üretimi sürecinde kullanılan su kaynaklarının arıtılması ve kullanılmasıyla ilgili çevresel etkilerin değerlendirilmesinde bir gösterge olarak önemli bir rol oynamaktadır.

Other (Diğer) bu terim ise belirtilmemiş diğer çevresel etkileri temsil etmektedir. Grafikte de görüldüğü çok düşük bir miktar olduğu için diğer çevresel etkilerin neredeyse yok denecek kadar az olduğunu söyleyebiliriz.

Impact category kısmında çalışmamız için önemli olan bir başka terimimiz olan insan toksisitesi seçilmektedir. Şekil 5.14'de wafer üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan insan ekotoksisitesi sonuçları görülmektedir.

Karasal ekotoksisite sonuçlarındaki terimleri detaylı bir şekilde açıkladıktan sonra, şimdi sayısal verilere odaklanarak yorumlar yapacağız ve önceki terimimizle karşılaştıracacağız. Her bir terimin çevresel etkiye olan katkısını belirlemek için bu analizler önemlidir. Karasal ekotoksisite sonuçlarında gözlemlediğimiz yüksek veya düşük değerler, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli ipuçları sunabilir. Bu değerlendirmeler, wafer üretim sürecinin çevresel etkilerini anlamamıza ve daha sürdürülebilir bir üretim süreci için stratejiler geliştirmemize yardımcı olabilir. Bu şekilde, verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, endüstriyel uygulamalarda çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma çabalarını yönlendirmede değerli bir araç olabilir.



Şekil 5.14. Wafer üretimi insan toksisitesi sonuçları

Grafik verilerine baktığımızda, Market Group for Electricity, High Voltage (Elektrik Pazar Grubu, Yüksek Gerilim) terimi için elde ettiğimiz değerin 3,32 olduğunu gözlemlemekteyiz. Önceki terimimiz olan karasal ekotoksiste içindeki aynı terimle karşılaştırıldığında, bu değer biraz daha yüksek olduğunu fark etmekteyiz. Bu durum, yüksek gerilim seviyesindeki elektrik enerjisinin çevresel etkilerini temsil ettiğinden, yüksek değer çevreye olumsuz bir etki yarattığını göstermektedir. Bu sonuçlar, wafer üretimi sürecinin çevresel sürdürülebilirliğini artırmak için alternatif enerji kaynaklarına yönelik stratejilerin gözden geçirilmesine ve kullanılmasına işaret etmektedir. Özellikle, daha temiz ve çevre dostu enerji kaynaklarının kullanılmasıyla, wafer üretimi sürecinin çevresel etkilerinin azaltılması mümkün olabilir. Bu çerçevede, alternatif enerji kaynaklarına geçiş ve enerji verimliliğini artırma çabaları, wafer üretimi sürecinin çevresel ayak izini azaltmak için etkili bir adımdır.

Transmission Network Construction, Electricity, Medium Voltage (İletim Ağı Kurulumu, Elektrik, Orta Gerilim) terimi için elde ettiğimiz sonuca baktığımızda, grafikte $2,08 \times 10^{-1}$ değerini gözlemledik. Bu değer, elektrik iletim ağlarının kurulumu ve orta gerilimdeki

elektrik iletim sürecinin çevresel etkilerini ifade etmektedir. Önceki terimimiz olan karasal ekotoksosite içindeki aynı terimle karşılaştırıldığında, bu değer oldukça yüksek çıkmıştır. Yani, elektrik iletim ağlarının inşası ve orta gerilimdeki elektrik iletim süreci, çevresel açıdan oldukça belirgin bir etkiye sahip. Daha az çevresel etki yaratan elektrik üretim yöntemlerinin benimsenmesi veya enerji verimliliğini artırmaya yönelik adımlar, wafer üretiminin çevresel etkisini azaltmada önemli bir rol oynayabilir. Dolayısıyla, wafer üretimi sürecinde çevresel etkileri azaltma stratejileri oluşturulurken, elektrik iletim ağlarının kurulumu ve orta gerilimdeki elektrik iletimi gibi faaliyetlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Market for Water, Deionised, From Tap Water, At User (Deiyonize Su Piyasası, Musluk Suyundan, Kullanıcıda) terimine odaklandığımızda, elde ettiğimiz değer grafikte $1,02 \times 10^{-1}$ olarak görülüyor. Bu değer, musluk suyundan deiyonize edilmiş suyun kullanıcının eline ulaşması sürecinin çevresel etkilerini temsil etmektedir. Önceki terimimiz olan karasal ekotoksosite içinde aynı terimle karşılaştırıldığında, bu değer yüksek olduğunu gözlemlemekteyiz, yani kullanıcıya ulaşan suyun çevreye olan etkileri oldukça belirgin. Ancak, bu değer diğer İnsan Toksikitesi değerlerimizle kıyaslandığında daha düşük bir seviyede olsa da, hala çevresel etkiler açısından önem taşımaktadır. Bu veri, wafer üretimi sürecinin çevresel etkilerini değerlendirmek ve daha sürdürülebilir hale getirmek için önemli bir gösterge olarak kullanılabilir. Özellikle, wafer üretimi sürecinde kullanılan su kaynaklarının arıtılması ve kullanılmasıyla ilgili çevresel etkilerin değerlendirilmesinde bu veri önemli bir role sahip olabilir. Dolayısıyla, su kaynaklarının etkin kullanımı ve çevresel etkilerin azaltılması, wafer üretimi sürecinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir adım olabilir.

Other (Diğer), bu terim ise belirtilmemiş diğer çevresel etkileri temsil etmektedir. Grafikte de görüldüğü çok düşük bir miktar olduğu için diğer çevresel etkilerin neredeyse yok denecek kadar az olduğunu söyleyebiliriz.

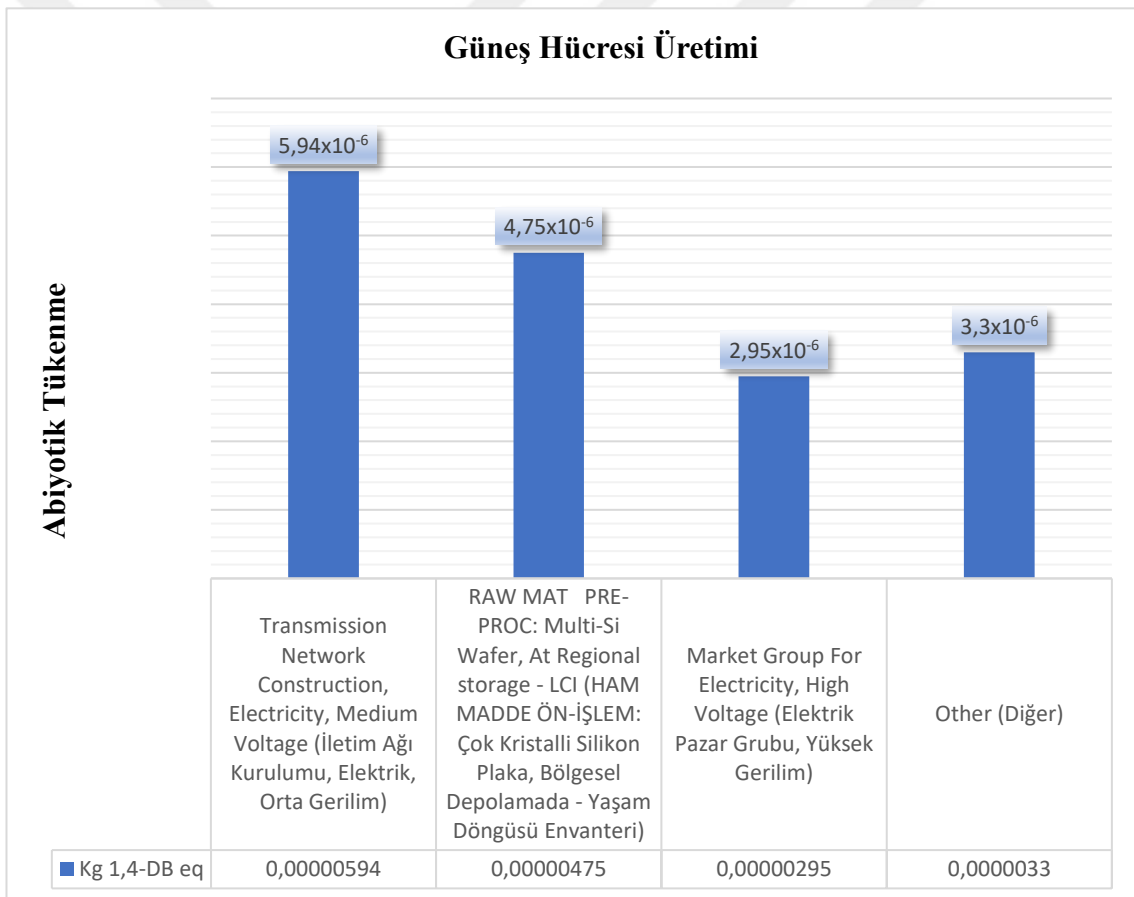
5.5.3. Güneş hücresi üretimi veri sonuçları

Çizelge 5.3'den aldığımız veriler yardımıyla güneş hücresi üretimi için OpenLCA uygulamasına veri girişi yapıldıktan sonra şimdi veri sonuçlarını almak için diğer aşamalarımızda yaptığımız gibi processes kısmımızı açtıktan sonra calculate kısmına giriş yapılmaktadır.

Impact category kısmına geldiğimizde ise çalışmamız için önemli olan abiyotik tükenme seçilmektedir. Abiyotik tükenme terimimizi açıklayacak olursak;

Abiyotik tükenme, bir ürünün veya sürecin üretiminde kullanılan doğal kaynakların sınırlı olan ve insan faaliyetleri sonucu tükenen bileşenlerin miktarını ifade eder. Bu terim genellikle çevresel etki değerlendirmeleri ve yaşam döngüsü analizlerinde kullanılır, doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve yenilenebilir kaynaklara geçişin önemini vurgulamaktadır.

Şekil 5.15’de güneş hücresi üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan abiyotik tükenme sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.15. Güneş hücresi üretimi abiyotik tükenme sonuçları

Transmission Network Construction, Electricity, Medium Voltage (İletim Ağı Kurulumu, Elektrik, Orta Gerilim) terimi, güneş hücresi üretimi aşamasında elde edilen çıktılardan biridir. Grafiğimize baktığımızda $5,94 \times 10^{-6}$ gibi bir değer çıkmıştır, bu değer pozitif çıktığından dolayı çevreye olumsuz yönde etki edecektir ve bu değer elektrik iletim ağlarının inşası sırasında ortaya çıkan çevresel etkileri temsil etmektedir. Elektrik iletim

ağlarının kurulması süreci, genellikle yüksek gerilimde elektrik taşıyan hatların döşenmesi, transformatör istasyonlarının kurulması ve iletim hatlarının bakımı gibi aşamaları içermektedir. Bu süreçlerde çeşitli malzemelerin kullanımı, enerji tüketimi ve atık üretimi gibi çevresel etkilere neden olabilir.

Güneş hücresi üretimi ile bu terim arasındaki bağlantı, güneş hücresi panellerinin genellikle bir elektrik iletim ağına bağlanarak elde edilen enerjiyi iletmek için kullanılması veya bu ağlarla bağlantılı olmasıdır. Örneğin, güneş hücreleri bir elektrik iletim ağına bağlanarak güneş enerjisini elektriğe dönüştürebilir veya bu ağlardan elektrik alarak işlev görebilir. Bu nedenle, güneş hücresi üretimi sürecinin çevresel etkilerini değerlendirirken elektrik iletim ağlarının inşası gibi faktörlerin de dikkate alınması önemlidir.

Bu veri, güneş hücresi üretimi sürecinin çevresel ayak izini belirlemeye ve bu sürecin sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirmeye yardımcı olabilir. Ayrıca, güneş enerjisi sistemlerinin daha geniş bir elektrik iletim altyapısıyla nasıl entegre edilebileceğini ve bu entegrasyonun çevresel etkilerini anlamak için de önemlidir.

RAW MAT PRE-PROC: Multi-Si Wafer, At Regional Storage – LCI (HAM MADDE ÖN-İŞLEM: Çok Kristalli Silikon Plaka, Bölgesel Depolamada-Yaşam Döngüsü Envanteri) terimi, güneş hücresi üretimi sürecindeki önemli bir aşamayı temsil etmektedir. Bu terim, güneş hücresi panellerinin yapımında kullanılan multi-Si (çoklu silikon) kütüklerin, bölgesel depolama aşamasındaki yaşam döngüsü etkilerini belirtmektedir. Bu, malzemenin kaynakların çıkarılmasından başlayarak üretim, taşıma, depolama ve işleme gibi adımlar boyunca çevresel etkilerini içermektedir.

Güneş hücresi üretimi sürecinde multi-Si wafer, panellerin temel yapısını oluşturan ve güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren bileşenlerdir. Dolayısıyla, multi-Si wafer'ın temini, işlenmesi ve depolanması, güneş hücresi teknolojisinin ekolojik ayak izini belirleyen kritik unsurlardır.

Bu terimin sonucu olan $4,75 \times 10^{-6}$ gibi bir değer çıktığından dolayı çevreye olumsuz olarak etkisi mevcuttur ve bize bu aşamada kullanılan multi-Si wafer'ın çevresel etkilerini ortaya koymaktadır. Bu etkiler, enerji tüketimi, atık üretimi, sera gazı emisyonları ve doğal kaynak kullanımı gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir.

Güneş hücresi üretimi sürecinin çevresel sürdürülebilirliğini artırmak için, multi-Si wafer'ın üretim aşamasındaki bu etkilerin azaltılması önemlidir. Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkili kullanımını sağlayabilir ve çevresel kaynakların korunmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, bu veriler, güneş hücresi teknolojisinin çevresel etkilerini anlamak ve gelecekteki iyileştirme fırsatlarını belirlemek için değerli bir kaynak olarak kullanılabilir.

Market Group For Electricity, High Voltage (Elektrik Pazar Grubu, Yüksek Gerilim) terimi, güneş hücresi üretimi sürecindeki elektrik tüketimini ve kaynaklarını temsil etmektedir. Bu terim, yüksek voltajda elektrik üretimi ve dağıtımının yaşam döngüsü etkilerini belirtmektedir. Güneş hücresi üretimi sürecinde, yüksek voltajda elektrik enerjisi genellikle farklı aşamalarda kullanılır, örneğin, fabrika işlemleri, ısıtma, aydınlatma ve diğer enerji gereksinimleri için.

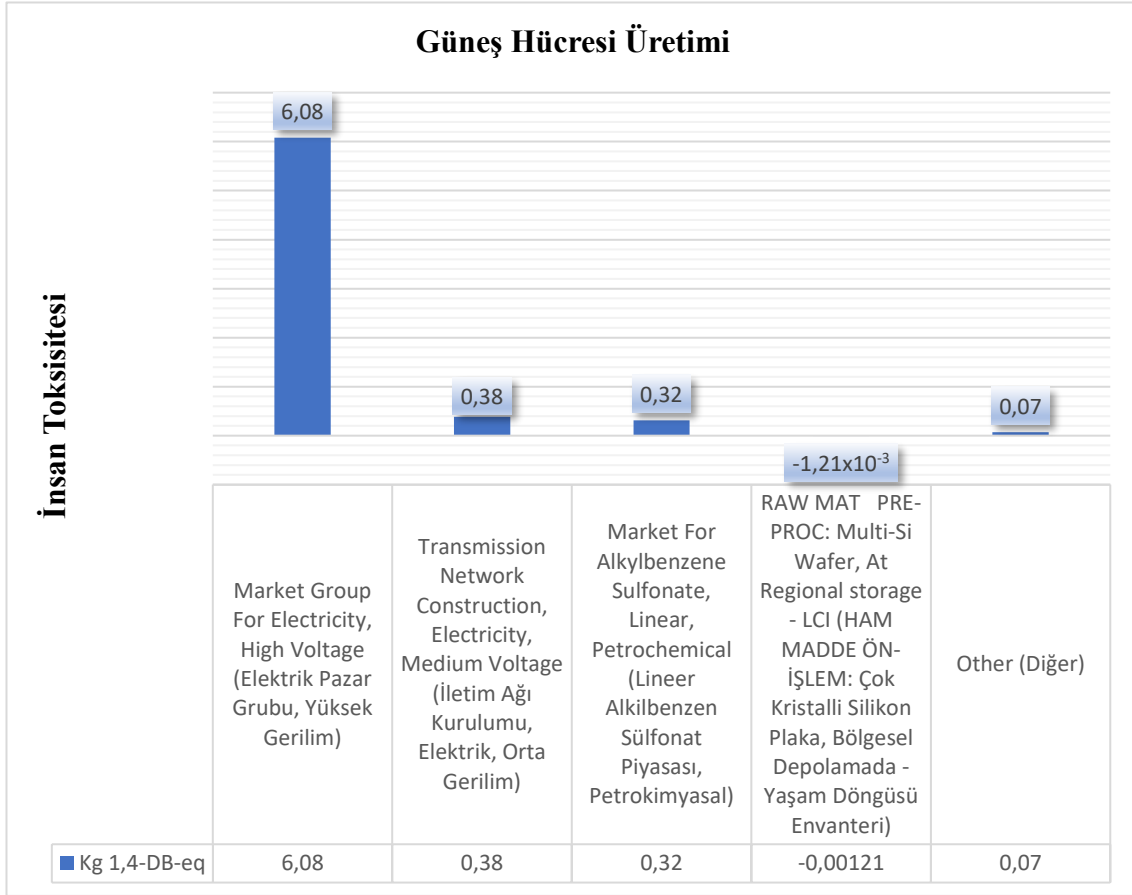
Grafiğe baktığımızda sayısal olarak $2,95 \times 10^{-6}$ değeri çıkmıştır, pozitif ancak küçük bir değer çıktığından dolayı çevreye olumsuz etkisi azdır ve bu aşamada kullanılan yüksek voltajlı elektriğin çevresel etkilerini anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu etkiler, elektrik üretimi için kullanılan kaynakların türüne, enerji dönüşüm verimliliğine, emisyonlara ve diğer faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

Güneş hücresi üretimi sürecinde yüksek voltajlı elektrik kullanımının önemi, sürecin genel çevresel sürdürülebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek voltajlı elektrik kullanımının çevresel etkileri, karbon emisyonları, hava ve su kirliliği gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir.

Bu nedenle, güneş hücresi üretimi sürecindeki elektrik tüketiminin azaltılması veya yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş gibi önlemler, çevresel etkilerin azaltılmasına ve sürecin daha sürdürülebilir hale getirilmesine yardımcı olabilir. Bu veriler, güneş hücresi teknolojisinin çevresel performansını değerlendirmek ve iyileştirme fırsatlarını belirlemek için önemli bir kaynak sağlamaktadır.

Other (Diğer) bu terim ise belirtilmemiş diğer çevresel etkileri temsil eder. Grafikte de görüldüğü gibi Market Group For Electricity, High Voltage (Elektrik Pazar Grubu, Yüksek Gerilim) teriminden yüksek çıktığı için Other (Diğer) terimimizin çevresel etkileri olumsuz olarak daha çoktur.

Şekil 5.16'da güneş hücresi üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan insan toksisitesi sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.16. Güneş hücresi üretimi insan toksisitesi sonuçları

Terimlerimizin tanımlarını ayrıntılı olarak bir önceki etki kategorisinde yaptığımız için, şimdi sayısal sonuçları yorumlamak için doğrudan ilerleyebiliriz. Market Group for Electricity (Elektrik Pazar Grubu, Yüksek Gerilim), Transmission Network Construction (İletim Ağı Kurulumu), ve Other (Diğer) terimlerinden elde edilen sonuçlar neredeyse sıfıra yakın değerlerdir. Bu durum, bu terimlerin çevreye neredeyse hiçbir olumsuz etkisi olmadığını göstermektedir. Ancak, RAW MAT PRE-PROC: Multi-Si Wafer, At Regional storage – LCI (HAM MADDE ÖN-İŞLEM: Çok Kristalli Silikon Plaka, Bölgesel Depolamada -Yaşam Döngüsü Envanteri) terimi için elde edilen sonuç sıfırdan daha düşüktür, bu da çevreye olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Aksine, güneş hücresi üretimi sürecinin çevreye olumlu katkı sağladığını belirtmek mümkündür. Bu durum, güneş hücresi teknolojisinin çevre dostu bir enerji üretim yöntemi olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, güneş hücresi teknolojisinin çevreye olumlu katkı sağlaması, fosil yakıtlara bağımlılığın ve karbon salınımının azaltılmasına olanak

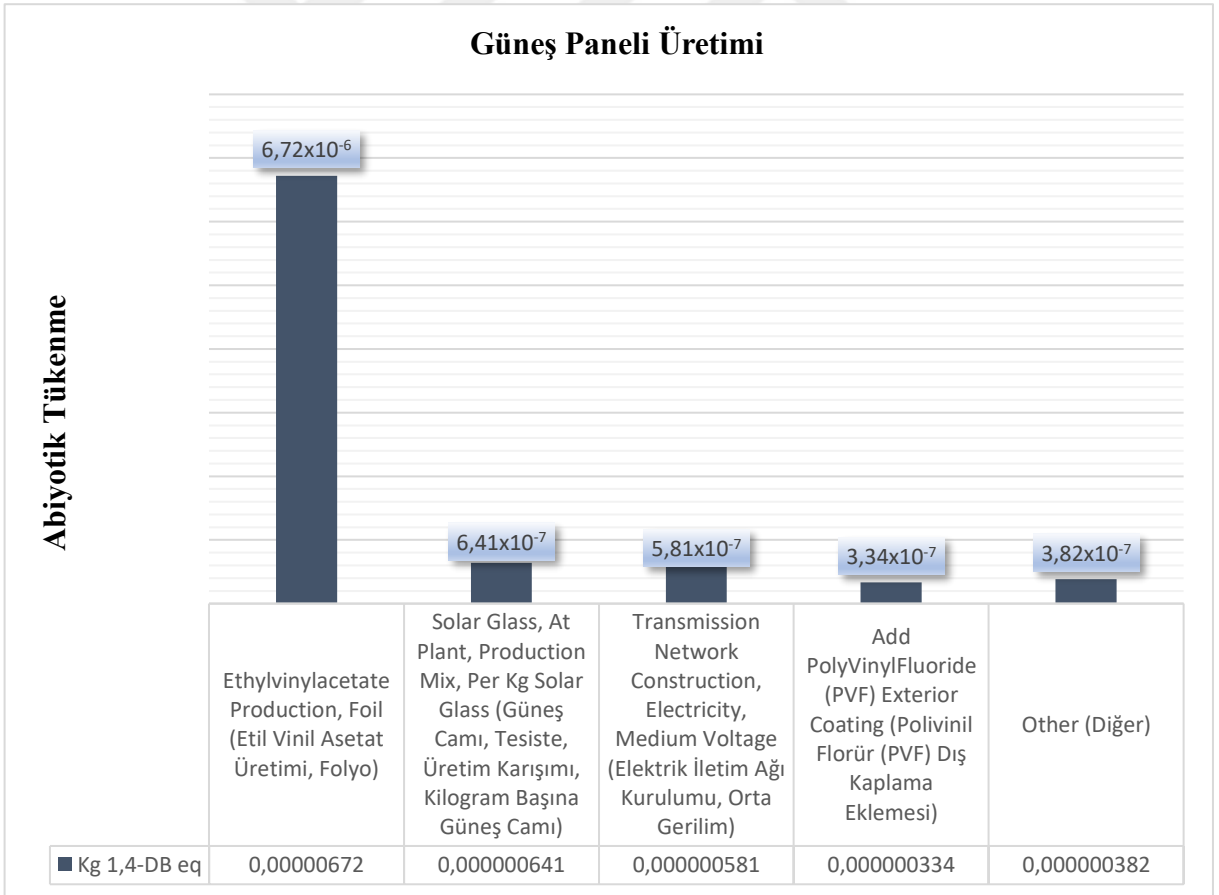
tanılmaktadır. Bu değerlendirme güneş hücresi üretiminin çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji üretim yöntemi olduğunu doğrulamaktadır.

5.5.4. Güneş paneli üretimi veri sonuçları

Çizelge 5.4'den aldığımız veriler yardımıyla güneş paneli üretimi için OpenLCA uygulamasına veri girişi yapıldıktan sonra şimdi veri sonuçlarımızı almak için diğer aşamalarımızda yaptığımız gibi processes kısmımızı açtıktan sonra calculate kısmına giriş yapılmaktadır.

Impact category kısmına geldiğimizde ise çalışmamız için önemli olan abiyotik tükenmeyi seçiyoruz. Abiyotik tükenme terimimizi wafer üretimi aşamamızda açıkladığımız için grafiğimize geçebiliriz.

Şekil 5.17'de güneş paneli üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan abiyotik tükenme sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.17. Güneş paneli üretimi abiyotik tükenme sonuçları

Sırasıyla grafiğimizde yer alan terimlerimizi açıklayıp, sayısal sonuçlarını yorumlayacak olursak;

Ethylvinylacetate Production, Foil (Etil Vinil Asetat Üretimi, Folyo) terimi, güneş paneli üretimi sürecinde kullanılan malzemenin üretim aşamasını ifade eder. Ethylvinylacetate (Etil Vinil Asetat) (EVA), güneş panellerinin arka yüzeyini kaplamak için kullanılan bir malzemedir. Bu malzeme, güneş hücrelerini korur, yalıtır ve mekanik dayanıklılık sağlar. Foil (Folyo) ise metalik bir tabakayı ifade etmektedir genellikle ince bir levha veya film şeklinde olabilir dolayısıyla bu terim, güneş paneli üretiminde kullanılan malzemelerin üretim süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Sayısal olarak elde ettiğimiz değer, $6,72 \times 10^{-6}$ 'dır. Bu değer yorumlanması, güneş paneli üretimindeki etkisini anlamamıza yardımcı olabilir. Bu sonuca dayanarak, Ethylvinylacetate (Etil Vinil Asetat) üretiminin güneş paneli üretimi üzerindeki çevresel etkisi oldukça düşüktür. Bu, üretim sürecinde kullanılan malzemenin veya aşamanın çevreye neredeyse hiç zarar vermediğini göstermektedir.

Elde ettiğimiz düşük sayısal değer, bu malzemenin abiyotik tükenme potansiyelinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Yani, bu malzemenin üretimi sırasında doğal kaynakların tükenmesine az katkıda bulunmaktadır.

Solar Glass, At Plant, Production Mix, Per Kg Solar Glass (Güneş Camı, Tesiste, Üretim Karışımı, Kilogram Başına Güneş Camı) terimi, güneş paneli camının fabrika ortamında üretim karışımını ve bu üretimin bir kilogramlık güneş paneli camına olan etkisini ifade etmektedir. Bu terim, güneş paneli camının üretim sürecinin çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Güneş paneli camı, güneş panellerinin üst yüzeyini kaplayarak güneş ışığını toplar ve güneş hücrelerini korur. Bu nedenle, güneş paneli camının üretim sürecinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, güneş paneli üretiminin sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

Bu terimimiz için sayısal sonuç olan $6,41 \times 10^{-7}$, bir kilogram güneş paneli camının üretimi sırasında ortaya çıkan çevresel etkiyi temsil etmektedir. Bu değer, genellikle çevresel etkinin küçük olduğunu ve güneş paneli camının üretiminin sürdürülebilirlik açısından olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir ve elde ettiğimiz düşük değer, güneş paneli camının üretim sürecinin doğal kaynak tükenmesine az katkıda bulunduğunu ve bu değer camın abiyotik tükenme etkisinin düşük olduğunu ve güneş paneli üretim

sürecinin çevresel açıdan sürdürülebilirlik açısından olumlu bir adım olduğunu göstermektedir.

Bu terim, güneş paneli camının üretim sürecinin detaylı analizini sağlayarak, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından iyileştirmeler yapılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle enerji verimliliği artırma, yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etme ve atık yönetimini geliştirme gibi stratejiler, güneş paneli camı üretiminin çevresel etkilerini azaltmak da önemli bir rol oynamaktadır.

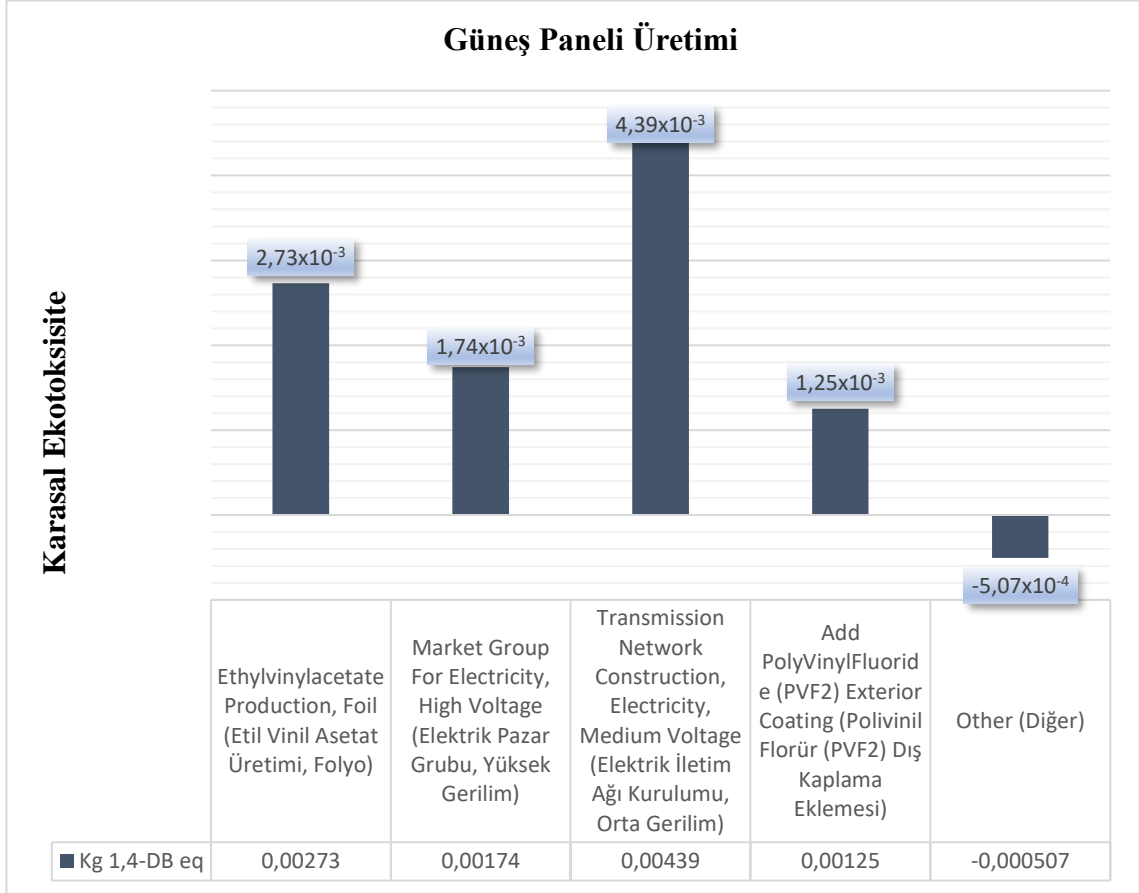
Transmission Network Construction, Electricity, Medium Voltage (Elektrik Ağı Kurulumu, Orta Gerilim) terimi, güneş paneli üretimi sürecinde elde edilen çıktılardan biridir. Grafikteki değerimiz $5,81 \times 10^{-7}$ gibi bir değerdir. Bu değer, pozitif bir çıktıdır ve dolayısıyla çevreye olumsuz yönde etki edebilir. Bu terim, elektrik iletim ağlarının inşası sırasında ortaya çıkan çevresel etkileri temsil etmektedir. Elektrik iletim ağı inşası, genellikle yüksek gerilimde elektrik taşıyan hatların döşenmesi, transformatör istasyonlarının kurulması ve iletim hatlarının bakımını içermektedir. Bu süreçlerde, çeşitli malzemelerin kullanımı, enerji tüketimi ve atık üretimi gibi çevresel etkilere neden olabilir. Dolayısıyla, güneş paneli üretimi sürecinde bu terimin yüksek olması, çevresel etkilerin göz önünde bulundurulmasını ve sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini gerektirebilir.

Polivinil Florür (PVF), güneş panellerinin dış yüzeylerine uygulanan bir kaplama malzemesidir. Bu kaplama, güneş panelinin dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmakta ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, PVF kaplaması, güneş panelinin performansını artırmak için güneş ışığını daha iyi yansıtabilir veya absorbe edebilir. Bu nedenle, güneş panelinin verimliliğini artırmak ve korumak için önemli bir bileşen olarak kullanılmaktadır.

Sayısal olarak sonucu $3,34 \times 10^{-7}$ olan PVF kaplaması, güneş paneli üretimi sırasında çevresel etki kategorilerinden abiyotik tükenmeyi temsil etmektedir. Elde edilen düşük sayısal değer, abiyotik tükenme potansiyelinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Yani, bu kaplamanın üretimi sırasında doğal kaynakların tükenmesine az katkıda bulunmaktadır.

Şekil 5.17'deki grafiğimizde terimlerimizi ayrıntılı bir şekilde açıkladığımız için şekil 5.18'de yer alan grafiğimizde direk sayısal sonuçları yorumlayabiliriz.

Şekil 5.18’de güneş paneli üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan karasal ekotoksosite sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.18. Güneş paneli üretimi karasal ekotoksosite sonuçları

Sırasıyla grafiğimizde yer alan terimlerin sayısal sonuçlarını yorumlayacak olursak;

Sayısal olarak sonucu $2,73 \times 10^{-3}$ olan Ethylvinylacetate Production, Foil (Etil Vinil Asetat Üretimi, Folyo) terimi, karasal ekotoksosite etki kategorisindeki etkileri temsil etmektedir. Bu değer, Ethylvinylacetate (Etil Vinil Asetat) üretiminin kara ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerinin ölçüsünü göstermektedir. Yüksek bir değer, üretim sürecinin kara ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerinin de yüksek olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, güneş paneli üretimi sürecinde terimimizin yüksek bir çevresel etkiye sahip olduğunu ve özellikle kara ekosistemler için potansiyel bir tehdit oluşturabileceğini söyleyebiliriz. Bu nedenle, güneş paneli üretiminde bu malzemenin kullanımının çevresel etkilerinin azaltılması için alternatif çözümler araştırılabilir veya üretim süreci daha sürdürülebilir hale getirilebilir.

Market Group For Electricity, High Voltage (Elektrik Pazar Grubu, Yüksek Gerilim) terimimiz için yüksek bir değer olan $1,74 \times 10^{-3}$ yüksek gerilim seviyesindeki elektrik enerjisinin kara ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerinin göstergesidir. Bu değer, elektrik üretim sürecinde kullanılan yüksek gerilimli ekipmanların, iletim hatlarının ve transformatörlerin çevresel etkilerini yansıtmaktadır. Bu süreçler sırasında çevreye zarar verebilecek atık üretimi, enerji tüketimi ve kaynak kullanımı gibi faktörler göz önüne alınmaktadır.

Sonuç olarak, güneş paneli üretiminde kullanılan yüksek gerilimli elektrik enerjisinin kara ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerinin farkında olunmalı ve bu etkilerin azaltılması için sürdürülebilir enerji kaynaklarına ve verimli enerji kullanımı tekniklerine yönelik stratejiler benimsenmelidir. Bu şekilde, güneş paneli üretimi sürecinin çevresel sürdürülebilirliği artırılır.

Transmission Network Construction, Electricity, Medium Voltage (Elektrik İletim Ağı Kurulumu, Orta Gerilim) terimi için $4,39 \times 10^{-3}$ gibi yüksek bir sayısal sonuç, bu terimin kara ekotoksiste etki kategorisindeki etkilerini göstermektedir.

Bu değer, elektrik iletim ağlarının kurulumu ve bakımı sırasında çevresel etkilerin önemli olduğunu işaret etmektedir. Yüksek gerilim hatlarının döşenmesi ve transformatör istasyonlarının kurulumu gibi süreçler, kara ekosistemlerde olumsuz etkilere neden olabilir. Bu süreçlerin sonucunda çeşitli atıkların üretilmesi, enerji tüketimi ve doğal kaynakların kullanımı gibi faktörler de göz önüne alınmalıdır.

Bu sonuçlar, elektrik iletim ağlarının inşası sürecinde çevresel etkilerin azaltılması ve kara ekosistemlere olan olumsuz etkilerin minimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Daha çevre dostu uygulamaların benimsenmesi ve sürdürülebilir iletim altyapısı teknolojilerinin kullanılmasıyla, bu etkilerin azaltılması ve güneş paneli üretimi sürecinin çevresel sürdürülebilirliğinin artırılması mümkündür.

PolyVinylFluoride (Polivinil Florür) için sayısal sonuç olan $1,25 \times 10^{-3}$ dış kaplamanın çevresel etkilerini temsil etmektedir. Bu değer, güneş paneli üretimi sürecinde çevresel etkilerinin göreceli olarak diğer terimlere oranla düşük olduğunu göstermektedir. Ancak, herhangi bir endüstriyel üretim sürecinde olduğu gibi, PVF kaplamanın da çevreye bazı etkileri olabilir. Bu etkiler arasında atık yönetimi, kimyasal madde kullanımı ve enerji tüketimi gibi faktörler bulunabilir.

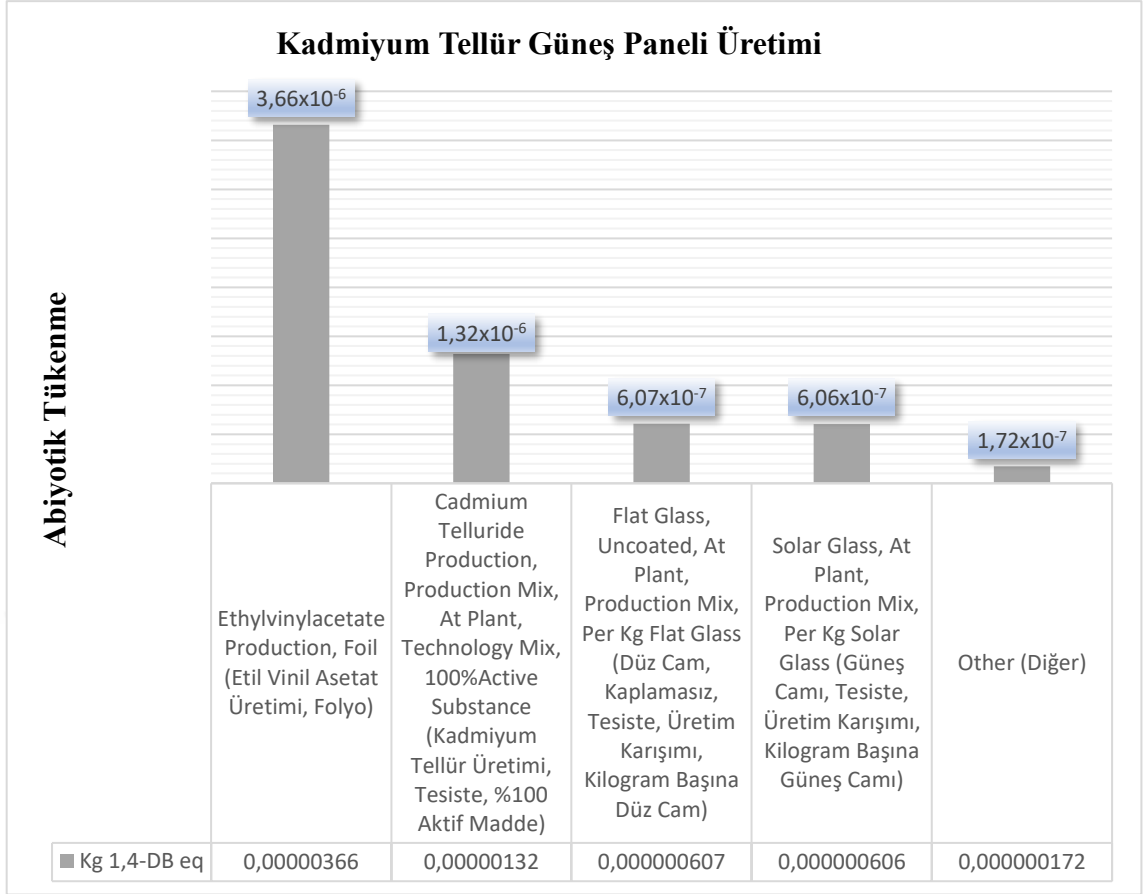
Polivinil Florür dış kaplamamın çevresel etkilerini azaltmak için, daha sürdürülebilir alternatif malzemelerin araştırılması ve kullanılması önemlidir. Ayrıca, üretim sürecinde atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi adımlar da çevresel sürdürülebilirliği iyileştirebilir. Bu tür çabalar, güneş paneli endüstrisinin çevresel ayak izini azaltmaya yardımcı olmaktadır ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkıda bulunmaktadır.

5.5.5. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi veri sonuçları

Çizelge 5.5'den aldığımız veriler yardımıyla kadmiyum tellür güneş paneli üretimi için OpenLCA uygulamasına veri girişi yapıldıktan sonra şimdi veri sonuçlarını almak için diğer aşamalarımızda yaptığımız gibi processes kısmımızı açtıktan sonra calculate kısmına giriş yapılmaktadır.

Impact category kısmına geldiğimizde ise abiyotik tükenmeyi seçiyoruz. Abiyotik tükenme terimimizi diğer aşamalarımızda açıkladığımız için grafiğimize geçebiliriz.

Şekil 5.19'da kadmiyum tellür güneş paneli üretimi aşamamız için impact category kısmında yer alan abiyotik tükenme sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.19. Kadmiyum tellür güneş paneli üretimi abiyotik tükenme sonuçları

Sırasıyla grafiğimizde yer alan terimlerimizi açıklayıp, sayısal sonuçlarını yorumlayacak olursak;

Ethylvinylacetate Production, Foil terimi (Etil Vinil Asetat Üretimi, Folyo) güneş paneli üretimi sürecinde önemli bir girdiyi temsil etmektedir. Etil vinil asetat, güneş panellerinin çeşitli katmanlarının oluşturulmasında kullanılan polimerik bir malzemedir. Özellikle, ince film güneş panelleri üretiminde, etil vinil asetat folyoları genellikle panelin alt tabakalarında bulunur.

Bu terimin açıklaması, güneş paneli üretiminde kullanılan hammaddelerin ve işlemlerin detaylı bir şekilde izlenmesini sağlar. Etil vinil asetat folyoları, güneş panellerinin yapısını destekleyen ve elektrik üretimine katkı sağlayan önemli bileşenlerdir. Dolayısıyla, bu terim güneş paneli üretim sürecinin önemli bir parçasını temsil etmektedir ve çevresel etkilerin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken bir unsurdur.

Güneş panellerinin imalatında yaygın olarak kullanılan EVA (Etil Vinil Asetat), üretim süreci doğal kaynakların tükenmesine katkıda bulunsa da, abiyotik tükenme etkisini

gösteren $3,66 \times 10^{-6}$ değeriyle nispeten düşük bir etkiye sahiptir. Bu değer, EVA üretiminin doğal kaynaklara sınırlı bir katkıda bulunduğunu gösterir.

Cadmium Telluride Production, Production Mix, At Plant, Technology Mix, 100% Active Substance (Kadmiyum Tellür Üretimi, Tesiste, Teknoloji Karması, %100 Aktif Madde) terimi, güneş paneli üretimi sırasında kullanılan malzemelerin ve teknolojilerin kombinasyonunu ifade etmektedir. Bu terim, güneş paneli üretim tesisinde, belirli bir teknoloji ve malzeme karışımının kullanıldığı kadmiyum tellurid üretim sürecini temsil etmektedir.

Production Mix (Üretim Karışımı) ifadesi, üretim sürecinde kullanılan farklı malzemelerin veya bileşenlerin bir araya getirilmesini ifade etmektedir. At Plant (Tesiste) ifadesi, üretim tesisinde gerçekleştirilen işlemleri gösterirken, Technology Mix (Teknoloji Karması) ifadesi ise kullanılan teknolojilerin çeşitliliğini belirtmektedir.

Bu terimde 100% Active Substance (100% Aktif Madde) ifadesi ise üretimde kullanılan malzemelerin tamamının etken madde olduğunu belirtmektedir. Yani, kullanılan malzemelerin tamamı ürünün aktif bileşenini oluşturmaktadır.

$1,32 \times 10^{-6}$ değeri, abiyotik tükenme etkisi açısından düşük bir değerdir. Bu, kadmiyum tellurid üretiminin doğal kaynak tükenmesi üzerindeki etkisinin düşük olduğunu göstermektedir. Ancak, bu değer düşük olması, sürecin hiçbir etkisinin olmadığı anlamına gelmez. Bu nedenle, çevresel etkileri azaltmak için sürecin daha sürdürülebilir hale getirilmesi ve daha az kaynak tüketen alternatiflerin değerlendirilmesi önemlidir.

Güneş panellerinde kullanılan düz cam, Flat Glass, Uncoated, At Plant, Production Mix, Per Kg Flat Glass (Düz Cam, Kaplamasız, Tesiste, Üretim Karışımı, Kilogram Başına Düz Cam) olarak adlandırılır. Bu terim, camın üretildiği tesisin kullandığı hammadde karışımını ve her kilogram cam için gerekli üretim miktarını göstermektedir. Güneş panellerinin substratını oluşturan bu camın üretimi, belirli oranlarda kum, soda külü ve kireç taşı gibi hammaddelerin eritilmesi ve soğutulmasıyla gerçekleşmektedir. Her kilogram camın üretimi için gereken enerji ve kaynak miktarı, üretim tesisi ve kullanılan teknolojiye göre değişiklik gösterebilir.

Düz cam üretimi, doğal kaynakların tüketimi üzerinde $6,07 \times 10^{-7}$ gibi oldukça düşük bir etkiye sahiptir. Bu değer, abiyotik tükenme kategorisindeki etkiyi göstermektedir ve cam üretiminin doğal kaynaklara olan katkısının nispeten az olduğunu belirtmektedir. Ancak

bu düşük rakam, cam üretiminin çevresel etkilerinin ihmal edilebileceği anlamına gelmez. Hammadde kullanımı, enerji tüketimi ve atık üretimi gibi faktörler, cam üretiminin çevresel etkilerini oluşturur ve bu etkenleri göz ardı etmemek gerekir.

Solar Glass, At Plant, Production Mix, Per Kg Solar Glass (Güneş Camı, Tesiste, Üretim Karışımı, Kilogram Başına Güneş Camı) terimi ise güneş panellerinde kullanılan özel camın üretim sürecini tanımlamaktadır. Güneş ışığının emilimini ve dönüşümünü optimize etmek için özel olarak tasarlanmış bu cam, yüksek kalite ve belirli optik özelliklere sahip olmalıdır. Üretim sürecinde, camın kimyasal bileşimi, üretim teknikleri ve enerji kullanımı gibi faktörler hassasiyetle ele alınmaktadır. Güneş camı genellikle, daha yüksek performans ve dayanıklılık sağlamak için temperleme ve kaplama gibi ek işlemlerden geçirilmektedir.

Sayısal sonuç olan $6,06 \times 10^{-7}$ abiyotik tükenme etki kategorisine katkıyı belirtmektedir. Bu değer, güneş camının üretiminin doğal kaynakların tükenmesine olan etkisini değerlendirmektedir. Düşük bir değer olması, güneş camı üretiminin doğal kaynak tükenmesi üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Ancak bu durum, üretim sürecinin çevresel açıdan tamamen zararsız olduğunu ifade etmez. Güneş camı üretimi genellikle yüksek enerji gereksinimi olan bir süreçtir ve ham madde çıkarımı, işlenmesi ve taşınması gibi işlemler de doğal kaynakların tükenmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu sonuçlar, güneş enerjisi endüstrisinde kullanılan malzemelerin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu bilgiler, endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için stratejiler geliştirmeye ve kaynak kullanımını optimize etmeye yönelik karar alma süreçlerine rehberlik etmektedir.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Multi-kristal ve kadmiyum tellür ince film güneş panelleri üretim süreçlerinin çevresel etkileri arasındaki belirgin farklılıklar, LCA sonuçlarına dayanmaktadır. Bu analizler, her iki teknolojinin üretim süreçlerinin farklı aşamalarında çevresel etkilerin nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır.

Öncelikle, multi-kristal güneş panellerinin üretim sürecinde kullanılan ham maddelerin tedarik zinciri incelendiğinde, genellikle silisyum gibi çeşitli minerallerin çıkarılması gerektiği görülmektedir. Bu ham maddelerin madenciliği ve işlenmesi aşamalarında doğal kaynakların kullanımı ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, multi-kristal panellerin üretim sürecinin başlangıcından itibaren önemli bir çevresel ayak izine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Üretim aşamasında, multi-kristal güneş panelleri için geleneksel olarak kullanılan işleme ve üretim teknikleri, genellikle yüksek enerji tüketimi gerektirir. Silisyum kristallerinin kesilmesi, temizlenmesi ve panellerin montajı gibi adımlar, enerji yoğun işlemlerdir ve bu da üretim sürecinin toplam enerji tüketimini artırır. Bu durum, multi-kristal panellerin üretimindeki enerji yoğunluğunun neden yüksek olduğunu açıklamaktadır.

Öte yandan, kadmiyum tellür ince film güneş panellerinin üretim süreci farklı bir yaklaşım gerektirir. Bu teknoloji, ince film tabakalarının bir substrata (taşıyıcı tabaka) biriktirilmesini içerir. Kadmiyum tellür panellerinin üretiminde kullanılan malzemelerin işlenmesi ve biriktirilmesi sürecinde, multi-kristal panellere göre daha az enerji tüketimi gerekebilir. Ayrıca, kadmiyum tellür tabakalarının ince film olarak biriktirilmesi, daha az ham madde kullanımını ve dolayısıyla çevresel etkilerin azalmasını sağlayabilir.

Bu nedenle, multi-kristal ve kadmiyum tellür ince film güneş panelleri üretim süreçlerinin çevresel etkileri arasındaki farklılıkların temel nedenleri, kullanılan malzemelerin özellikleri, üretim teknikleri ve enerji tüketimi ile ilişkilidir. Bu farklılıklar, her iki teknolojinin çevresel sürdürülebilirliği üzerinde derinlemesine bir etkiye sahip olup, güneş enerjisi sektöründe tercih edilen teknolojilerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Sonuçların Genel Değerlendirilmesi ve Önemi

Çalışmanın sonuçları, güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin birçok faktörden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, ham madde çıkarma aşamasında kullanılan kaynakların türü ve kaynakların işlenme süreci, üretim sürecinin genel çevresel

etkilerini önemli ölçüde etkileyebilir. Benzer şekilde, üretimde kullanılan enerji kaynaklarının kökeni ve enerji verimliliği, güneş panellerinin çevresel ayak izini büyük ölçüde etkileyebilir.

Çalışmanın sonuçlarına dayanarak, sektörde potansiyel iyileştirme alanlarını belirlemek mümkündür. Örneğin, enerji yoğunluğunu azaltmaya yönelik çaba, güneş paneli üretim sürecinin çevresel etkilerini azaltmada kritik bir rol oynayabilir. Bu, daha verimli üretim yöntemlerinin benimsenmesini içerebilir veya yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasını hedefleyebilir.

Ayrıca, atık yönetiminin iyileştirilmesi de önemli bir alan olarak öne çıkmaktadır. Güneş paneli üretim süreci, çeşitli atıkların ortaya çıkmasına neden olabilir ve bu atıkların yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, geri dönüşüm ve atık azaltma stratejilerinin uygulanması, sektörde önemli iyileştirmeler sağlayabilir.

Gelecekteki araştırmaların yönlendirilmesi noktasında, yeni malzemelerin ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük bir öneme sahiptir. Özellikle, güneş paneli teknolojilerinde kullanılan malzemelerin çevresel etkilerini azaltacak ve üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirecek yenilikçi yaklaşımların keşfedilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, endüstriyel iş birliklerinin ve akademik araştırma projelerinin teşvik edilmesi, bu yeniliklerin hızla ticarileştirilmesine ve endüstriyel ölçekte uygulanmasına olanak tanıyabilir.

Sonuç olarak, polikristal güneş paneli üretiminde kullanılan etil vinil asetat (EVA) için abiyotik tükenme değeri $6,72 \times 10^{-6}$ Kg 1,4-DB eq iken, kadmiyum tellür panellerde bu değer $3,66 \times 10^{-6}$ Kg 1,4-DB eq olarak hesaplanmıştır. Solar cam üretiminde ise polikristal panellerde $6,41 \times 10^{-7}$ Kg 1,4-DB eq, kadmiyum tellür panellerde $6,06 \times 10^{-7}$ Kg 1,4-DB eq abiyotik tükenme değeri ölçülmüştür. Bu sonuçlar, kadmiyum tellür panellerin hem daha düşük enerji tüketimi sağladığını hem de daha sürdürülebilir bir seçenek olduğunu göstermektedir. Bu bulguların endüstriyel uygulamalara ve politika oluşturma süreçlerine entegrasyonu, güneş enerjisi sektörünün çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle, güneş paneli üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılması ve yönetilmesi için bu tür araştırmalara daha fazla yatırım yapılması gerekmektedir. Bu, sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru adım atmamızı sağlayabilir.

7. KAYNAKLAR

Alam, E., Xu, X., 2023, "Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Production by Mono-Crystalline Solar Systems: A Case Study In Canada", *Environmental science and pollution research*, 30, 27422-27440.

Ardente, F., Latunussa C.E.L., Blengini, G.A., 2019, "Resource Efficient Recovery of Critical and Precious Metals From Waste Silicon PV Panel Recycling", *Waste Management*, 91, 156-167.

Atalay, Ö., Yorgun, B., Erdem, R., 2019, "Fotovoltaik (PV) Güneş Enerjisi Sistemleri ve Çatı Uygulamaları", Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Denizli.

Bilen, K., Işık, B., Gezer, S., Kıyık, F., 2022, "Hava Soğutmalı Fotovoltaik Panellerde Kanaçık Tipinin Soğutmaya Etkisinin Teorik Olarak İncelenmesi", *Journal of Polytechnic*, 25 (2), 711-722.

Castelazo, E.S., Olivares, K.S., Martinez, E., Garcia, E.O., Santoyo, E., 2021, "Life Cycle Assessment For A Grid-Connected Multi-Crystalline Silicon Photovoltaic Systems of 3 Kwp: A Case Study For Mexico", *Journal of cleaner production*, 316.

Ciroth, A., Noi, C.D., Lohse, T., Srocka, M., 2020, "OpenLCA 1.10 Comprehensive User Manual", Greendelta, Germany.

Çalış, B., 2021, "Fotovoltaik Panellerin Çevresel Etki Potansiyelinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Demirer, G.N., 2011, "Yaşam Döngü Analizi", Yeşim Çağlayan, Sürdürülebilir üretim ve tüketim yayımları-I, Türkiye- Ankara.

Dubey, S., Jadhav, N.Y., Zakirova, B., 2013, "Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies", *Energy Procedia*, 33, 322–334.

Ekinci, G., 2019, "PV Sistemlerin Yaşam Döngüsü, Enerjisi ve Ekserji Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Fenerci, E., 2019, "Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılmalı Yaşam Döngü Değerlendirmesi ve Maliyet Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 27.

Fthenakis, V., Kim, H.C., Frischknecht, R., Raugei, M., Sinha, P., G. Heath, M.S., 2015, "Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems", IEA, T12-04, New York.

Gerbinet, S., Belboom, S., Leonard, A., 2014, "Life Cycle Analysis (LCA) of Photovoltaic Panels: A Review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 38, 747–753.

Girgin, M.H., 2011, "Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralının Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW'lık Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Biçen, Y., 2020, "Assessment of Machine Learning, Time Series, Response Surface Methodology and Empirical Models In Prediction of Global Solar Radiation", Journal of Cleaner Production, 122353, 277.

Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., Ceylan, İ., 2020, "Environmental and Economic Assessment of A Low Energy Consumption Household Refrigerator", Engineering Science and Technology, an International Journal, 23 (2), 365–372.

Gülşen, H.E, Türkay, G.K., Arıkan, E.B., 2014, "Yaşam Döngü Değerlendirmesi Uygulamalarının Çevre Kalitesi Yönetimine Etkileri" ISEM2014, 1100-1107.

Karamanav, M., 2007, "Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kılıç, F.Ç., 2015, "Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri", Mühendis ve Makine, 56 (671), 28-40.

Liang, H., You, F., 2023, "Reshoring Silicon Photovoltaics Manufacturing Contributes To Decarbonization and Climate Change Mitigation", Nature Communications, 14.

Muteri, V., Cellura, M., Domenico, C., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., Parisi, M.L., 2020, "Review On Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels", Energies, 13 (252).

Oğuz, Y., Karakan, A., Uslu, B., 2015, "Afyonkarahisar'da Kurulu Olan Monokristal, Polikristal ve İnce Film Güneş Panelleri'nin Verimliliğinin İncelenmesi", Tesisat Mühendisliği, 149, 47-58.

Pamuk, E.K., 2022, "Güneş Pilleri", Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Balıkesir.

Rabaia, M.K.H., Abdelkareem, M.A., Sayed, E.T., Elsaid, K., Wilberforce, T., Olabi, A.G., 2021, "Environmental Impacts of Solar Energy Systems: A Review", Science of total environment, 754.

Rix, A., Steyl, J., Rudman, J., Terblanche, U., Niekerk, V., 2015, "First Solar's Cdte Module Technology –Performance, Life Cycle, Health and Safety Impact Assessment", Stellenbosch University, CRSES 2015/06, Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies.

Shah, H.H., Bareschino, P., Mancusi, E., Pepe, F., 2023, "Environmental Life Cycle Analysis and Energy Payback Period Evaluation of Solar PV Systems: The Case of Pakistan", Energies, 16 (6400).

Soares, W.M., Athayde, D.D., Nunes, E.H.M., 2018, "LCA Study of Photovoltaic Systems Based On Different Technologies", *International journal of green energy*, 15 (10), 577-583.

Ün, Ü.T., 2003, "Çevre Kalitesini Artırmada Fotovoltaiklerin Kullanımı", *Osmangazi üniversitesi müh. mim. fak.*, 18 (2).

Yu, Z., Ma, W., Xie, K., Lv, G., Chen, Z., Wu, J., Yu, J., 2017, "Life Cycle Assessment of Grid-Connected Power Generation From Metallurgical Route Multi-Crystalline Silicon Photovoltaic System In China", *Applied Energy*, 185, 68–81.

Zengin, E., 2015, "Güneş Pillerinin Enerji Dönüşüm Kalitesini Etkileyen Önemli Faktörler", [PowerPoint Slaytı].

