

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ PANELİ ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ
ANALİZİ

Feyza ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Prof. Dr. Şaban Pusat

Mayıs, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ PANELİ ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ

Feyza ŞEN tarafından hazırlanan tez çalışması 29.05.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şaban PUSAT
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Şaban PUSAT, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP, Üye
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Şaban PUSAT sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Güneş Paneli Üretiminin Yaşam Döngüsü Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Feyza ŞEN

İmza



Biricik Kardeşim

Medine'ye

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince benden yardımlarını ve sabrını esirgemeyen, hoşgörüsü ve tecrübesiyle süreç boyunca destek olan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Şaban Pusat'a, çalışmama katkılarından, tezimde kullandığım programa erişmemi sağlamalarından ve gösterdikleri anlayışlı yaklaşımlarından dolayı Sagenit Yönetim Hizmetleri'ne, Sayın Ahmet Edepli'ye ve Sayın Sevil Aylin Özer Barkçın'a, yol göstericiliğiyle desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Coşkun Özalp ve Dr. Öğr.Üyesi Mustafa Murat Yavuz hocalarıma, yardımlarından ötürü sınıf arkadaşım Ertuğrul Çöplü'ye, her türlü destekleriyle, gösterdikleri anlayış ve sabırla her zaman yanımda olan başta kardeşim Medine olmak üzere, annem Ayşegül ve babam Ahmet Şen'e sonsuz teşekkür ederim.

Feyza ŞEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
2 GÜNEŞ ENERJİSİ	20
2.1 Güneş Enerjisi	20
2.2 Fotovoltaik Paneller (PV paneller).....	21
2.3 Güneş Panelinin Yapısı.....	22
2.3.1 Hücre	22
2.3.2 İnvvertör.....	23
2.3.3 Junction Box (Elektrik Tesisatı-Bağlantı Kutusu)	23
2.3.4 Enkapsulant Malzeme.....	23
2.3.5 Ön Cam	24
2.3.6 Arka Yüzey	24
2.3.7 Koruyucu Arka Kaplama	25
2.3.8 Anti-reflektif Kaplama (AR-Kaplama).....	25
3 YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (LCA)	27
3.1 LCA	27

3.2 LCA'nın Tarihi.....	30
3.2.1 Amaç ve Kapsam Tanımı.....	31
3.2.2 Envanter Analizi.....	31
3.2.3 Yaşam Döngüsü Etki Değerlemesi.....	32
3.2.4 Yorumlama.....	32
3.3 Yaşam Döngüsü Değerlemesinde (LCA) Kullanılan Bilgisayar Programları.....	33
3.4 CML Metodu Etki Değerlendirme Kategorileri.....	36
3.4.1 Abiyotik Tükenme.....	36
3.4.2 Küresel Isınma (GWP100a).....	37
3.4.3 Ozon Tabakası İncelmesi (ODP).....	37
3.4.4 İnsan Toksisitesi.....	38
3.4.5 Ekotoksisite.....	39
3.4.6 Fotokimyasal Oksidasyon.....	39
3.4.7 Asidifikasyon.....	39
3.4.8 Ötrofikasyon.....	40
3.5 Karbon Ayak İzi.....	41
3.6 Sera Gazı Emisyonu.....	41
3.7 Su Ayak İzi.....	42
3.7.1 Mavi Su Ayak İzi.....	43
3.7.2 Yeşil Su Ayak İzi.....	43
3.7.3 Gri Su Ayak İzi.....	43
4 SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME.....	45
4.1 Materyal Metot ve Panelin Karakteristik Özellikleri.....	45
4.2 Panelin LCA Analizi.....	49
4.2.1 Metalurjik silikon eritme sürecinin LCA analizi.....	49

4.2.2 Panel sınıfı multi-Si saflaştırma sürenin LCA analizi	52
4.2.3 İngot dökümü (kütük oluşumu) sürecinin LCA analizi	55
4.2.4 Wafer dilimleme sürecinin LCA analizi	57
4.2.5 Hücre sürecinin LCA analizi	60
4.2.6 Modül montajı sürecinin LCA analizi	63
4.2.7 Panelin Genel LCA Analizi Karakterizasyonu	66
4.2.8 Panelin Genel LCA Analizi Normalizasyonu	68
4.2.9 Panel Üretiminin Küresel Isınma Analizi (GWP100)	70
4.3 Değerlendirmeler	75
4.4 Sonuç	77
KAYNAKÇA	81
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	91

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
AR	Yansımaya Önleyici
CML	Centrum voor Milieukunde Leiden (Leiden Çevre Bilimleri Merkezi)
CdTe	Kadmiyum Tellürit
DC	Doğru Akım
EN	European Norm (Avrupa Standardı)
EPA	Environmental Protection Agency (Amerikan Çevre Koruma Ajansı)
GWP	Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
LCA	Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Analizi)
PV	Photovoltaic (Fotovoltaik)
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği)
TSR	Total Solar Reflectance (Toplam Güneş Yansıtma)
W _p	Pik Watt, en yüksek güç çıkışı
a-Si	Amorf Silikon
kW	Kilowatt
mono-Si	Tek kristal Silikon
multi-Si	Çok kristal Silikon

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Güneş paneli yapısı [71]	21
Şekil2.2 Örnek bir güneş santrali	22
Şekil 2.3 Güneş panelinin kısımları.....	26
Şekil 2.4 String yapı	26
Şekil 3.1 LCA aşamaları [75]......	28
Şekil 3.2 LCA analizleri yaklaşımları	29
Şekil 3.3 LCA metodolojisi [78].	31
Şekil 3.4 Yaşam döngüsü envanter oluşturma aşamaları [79].....	32
Şekil 3.5 Su ayak izi türleri [89].....	42
Şekil 4.1 GWP100 Fosil.....	73
Şekil 4.2 GWP100 Biyojenik.....	74
Şekil 4.3 GWP100 Toprak Dönüşümü.....	74
Şekil 4.4 Normalizasyon sonuçlarının grafikte gösterimi.....	75
Şekil 4.5 Panel üretim süreçlerinin etki faktörlerine etkisinin grafiği.....	76

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 LCA analizi programları [80]	33
Tablo 3.1 LCA analizi programları (devamı) [80].....	34
Tablo 4.1 LCA analizi yapılan PV panelin karakteristik özellikleri.....	45
Tablo 4.1 LCA analizi yapılan PV panelin karakteristik özellikleri (devamı).....	46
Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş çıkışları	46
Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş çıkışları (devamı).....	47
Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş çıkışları (devamı).....	48
Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş çıkışları (devamı).....	49
Tablo 4.3 Metalurjik silikon eritme işleminin normalizasyon LCA analizi	51
Tablo 4.4 Panel sınıfı multi-Si saflaştırma işleminin normalizasyon LCA analizi.....	53
Tablo 4.4 Panel sınıfı multi-Si saflaştırma işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı).....	54
Tablo 4.5 İngot dökümü (kütük oluşumu) işleminin normalizasyon LCA analizi.....	56
Tablo 4.6 Wafer dilimleme işleminin normalizasyon LCA analizi	58
Tablo 4.6 Wafer dilimleme işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı).....	58
Tablo 4.7 Hücre işleminin normalizasyon LCA analizi.....	61
Tablo 4.7 Hücre işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı).....	62
Tablo 4.8 Modül montajı işleminin normalizasyon LCA analizi	64
Tablo 4.8 Modül montajı işleminin normalizasyon LCA analizi(devamı)	64
Tablo 4.9 PV panelin LCA analizi karakterizasyon sonuçları	67
Tablo 4.10 PV panelin LCA analizi normalizasyon sonuçları.....	69
Tablo 4.11 Bazı sera gazlarının GWP100 değerleri [90].....	71
Tablo 4.12 GWP100 Analizi sonuçları.....	72

Güneş Paneli Üretiminin Yaşam Döngüsü Analizi

Feyza ŞEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Şaban PUSAT

Dünya genelinde artan nüfus ve sürekli gelişen teknoloji, kaynak tükenmesi, çevresel etkiler, küresel ısınma gibi konuları daha da dikkat çekeci hale getirmiştir. Bu sebeple son yıllarda, ülkeler, sanayiciler ve toplum bu konularda iyileşme ve gelişim yolları aramaktadırlar. Bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi yaşam döngüsü değerlendirmesi adı verilen LCA metodolojisidir. Enerjiye olan talebin artması, güneş paneli teknolojisini de önemli hale getirmiştir. Ancak, güneş panellerinin üretimi, kullanımı ve bertarafıyla ilişkili çevresel etkiler, yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini sağlamak için kapsamlı bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu çalışma, güneş paneli üretiminin çevresel etkilerini niceliksel olarak ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Çalışma, güneş panellerinin yaşam döngüsünün tüm aşamalarını kapsayan ISO 14040/44 çerçevesini temel almaktadır. Hammadde eldesi, bileşen üretimi, panel montaj süreçleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, SimaPro programı, Ecoinvent veritabanı ve CML yöntemi kullanılarak, küresel ısınma potansiyeli (GWP), kaynak tükenmesi, sucul ekotoksisite, karasal ekotoksisite gibi çevresel göstergeler analiz edilmiştir. Analiz

sonuçları, enerjinin ve kimyasalların yoğun olarak kullanıldığı, özellikle silikon saflaştırma ve wafer üretiminin, çevresel yük üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, çevre, güneş paneli, yaşam döngüsü analizi, LCA



Life Cycle Assessment of Solar Panel Production

Feyza ŞEN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Şaban PUSAT

The increasing global population and rapidly advancing technology have brought issues such as resource depletion, environmental impacts, and global warming into sharper focus. Consequently, in recent years, countries, industrialists, and societies have been seeking ways to improve and address these challenges. Various methods have been developed for this purpose, one of which is the Life Cycle Assessment (LCA) methodology.

The growing demand for energy has also highlighted the importance of solar panel technology. However, the environmental impacts associated with the production, use, and disposal of solar panels require a comprehensive assessment to ensure the adoption of sustainable practices throughout their life cycle.

This study was conducted to quantitatively reveal the environmental impacts of solar panel production. It is based on the ISO 14040/44 framework, which covers all stages of the solar panel life cycle, including raw material extraction, component production, and panel assembly processes. The study employs the SimaPro software, Ecoinvent database, and the CML method to analyze

environmental indicators such as Global Warming Potential (GWP), resource depletion, aquatic ecotoxicity, and terrestrial ecotoxicity.

The analysis results indicate that energy and chemicals are intensively used, particularly in silicon purification and wafer production, which significantly contribute to the overall environmental burden.

Keywords: Energy, environmental, solar panel, life cycle analysis, LCA



1.1 Literatür Özeti

Gelişen teknoloji ve modern yaşam kaynak tüketimini ve çevresel zararları artırmıştır. Önceleri çevresel etkiler göz ardı edilirken artık neredeyse ana başlıklardan birisi haline gelmiştir. Bu sebeple hemen her alanda çevresel etkilerin analiz edilip gözlemlendiği çalışmalar artmış ve çeşitli metodolojiler geliştirilmiştir. Bu metodolojilerden birisi de yaşam döngüsü değerlendirmesidir. Literatürdeki adıyla Life Cycle Assessment'dır (LCA). LCA analizi yeterli verilerin olduğu her ürün, sistem ve hizmet süreçleri için uygulanabilir. Bu tezde güneş paneli üretiminin LCA analizi çalışılacaktır. En önemli yenilenebilir enerji çeşitlerinden görülen ve günümüzde kullanımı gittikçe artan güneş panellerinin çevresel etkilerini sayısal verilerle ortaya koyarak niceliksel bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Yapılmış diğer akademik çalışmalarda genel olarak, SimaPro programının kullanıldığı gözlemlenmekle beraber veri tabanı yetersizliklerinden de bahsedilmiştir. Ayrıca güneş paneli üretiminde özellikle silikonun işlendiği ve kimyasal kullanımının fazla olduğu hücre üretim safhalarının, en fazla çevresel etkiye sebep olduğu sonucuna varmışlardır. Aşağıda hem genel olarak LCA hem de güneş panellerinin LCA analizi ile ilgili bazı literatür çalışmaları özetlenmiştir.

R. Yılmaz ve M. Arı teknolojinin hızla gelişmesinden kaynaklanan ürün yaşam döngüsündeki maliyetin artması ile ilgili literatürdeki kargaşanın açıklığa kavuşmasına katkı sağlamak için bir çalışma yürütmüşlerdir [1].

M. Çelik çalışmasında bir ürünün üretilirken çevreye verdiği olumsuz etkilerinin gün geçtikçe daha fazla fark edilir olması nedeniyle bu etkileri azaltmaya yönelik bazı teknikler geliştirildiğini bu tekniklerinden birinin de LCA analizi olduğunu belirtmiştir. Bu teknikte ürünün üretim aşamasında her bir maliyetine ek olarak çevresel maliyetlerini de göz önünde bulundurmak gerektiğini vurgulamıştır [2].

G. T. Taygun ve A. Balanlı çalışmalarında, LCA'yı yapı malzemeleri açısından incelemişler. Yapı malzemelerinin üretiminden bertarafına kadar olan sürecin çevre ile ilişkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır [3].

K. Jijakli ve ark. çalışmalarında su şebekesinden bağımsız lokasyonlar için suyun tuzdan arındırma yöntemlerinden üçünü karşılaştırmışlardır. Bu üç yöntem güneş enerjili su arıtma cihazı, fotovoltaik (PV) ile çalışan ters ozmoz ünitesi ve merkezi bir ozmoz tesisinden kamyon ile su teslimatı yöntemleridir ve bu yöntemleri kullanılarak LCA analizi yapmışlardır. Sonuç olarak fotovoltaik ile çalışan ters ozmoz ünitesinin en verimli olduğunu bulmuşlardır [4].

A. MarieTillman çalışmasında LCA metoduna karar vermenin önemini vurgulamıştır. LCA'nın yöntemlerinin uluslararası standartlaşma organizasyonu olan ISO tarafından 14040 ve 14044 standartlarında derlendiğini belirtmiştir[5].

O. Ortiz ve ark. çalışmalarında, inşaat ve yapı sektöründe LCA uygulanarak atık malzemelerin imhalarından hammadde elde etmeye kadar olan sürecin daha optimize bir bakış açısıyla sürdürülmesine olanak sağladığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak LCA'nın inşaat ve yapı sektöründe kullanımının sürdürülebilirlik, yeşil inşaat sektörlerinde üretkenlik ve rekabet gücünün artırılması gibi durumlar için de önemini ortaya koymuşlardır [6].

K. Nakano ve M. Hirao çalışmalarında, LCA'nın, ürünün ve üretim sürecinin daha ekonomik tasarımını meydana getirmek için önemli bir teknik olduğunu belirtmişlerdir. İş ortaklarıyla yapılacak iş birlikçi faaliyetlerin çevresel performansı iyileştireceğini ifade etmişlerdir. Ancak LCA ile ilgili verilerin tedarik zincirindeki çalışan veya firmalardan toplanmasının en önemli konu olduğunu belirtmişlerdir. Bu duruma öneri olarak, üreticiye özel LCA verilerinin iş ortaklarından toplanarak, ürünün çevresel etkilerinin iyileşmesine teşvik edilmesi Tedarik Zinciri İş birliği Modelini (SCCM) önermektedirler. Bu çalışmalarında da üç farklı vaka analizi yaparak SCCM yönteminin pratik ve uygulanabilir olduğunu göstermeyi hedeflemişlerdir. Her vaka çalışmasında iki veya üç partner şirket LCA, malzeme akışı ve maliyet muhasebesi gibi süreç analiz teknikleri kullanarak ürün iyileştirme projesi yapmışlardır. Sonuçta da ekonomik anlamda ortaya çıkan iyileşme, iş ortaklarından LCA verilerini toplama konusunda teşvik edici olduğunu belirtmişlerdir. K. Nakano ve M. Hirao da LCA

ve SCCM'nin üretim sürecinin daha ekonomik olması adına etkili yöntemler olduğunu bu vaka analizleri ile çalışmalarında göstermişlerdir [7].

C. Pieragostini ve ark. çalışmalarında süreç optimizasyonunu, LCA metodolojisini referans olarak incelemişlerdir. Bu çalışma da LCA' da ki süreç optimizasyon tekniklerini ve araçlarını baz alarak süreç mühendisliği ile ilgili çalışmışlardır. Yöntemler, görüşler, uygulamalar, LCA ile ilgili yazılım programları ve LCA'nın uygulanması sonucu elde edilen tecrübe ve sağlanan iyileşmeler, metodoloji ile ilişkilendirilmiş ve bu sayede LCA'daki trend ve kavramların belirlendiğini belirtmişlerdir. LCA'nın sistem sınırlarını belirlerken beşikten-mezara kavramı yerine beşikten-kapıya kavramının pratikte daha çok kullanılan bir kavram olduğunu savunmuşlardır. Genel olarak envanter verileri ile etkili kategorik belirteçler arasındaki ilişkinin karakterizasyon faktörleriyle doğrusal olarak ifade edildiğini daha sonrasında kirletici ve sinerjik etkilerin ihmal edildiğini ifade etmişlerdir. LCA yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemin ecoindicator 99 yöntemi olduğunu, en çok kullanılan bilgisayar programının da SimaPro olduğunu belirtmişlerdir. Çok hedefli optimizasyonun olabilecek problemleri çözebilmek için en çok kullanılan yaklaşım olduğunu ve bu yaklaşımda pareto seti oluşturmak için en çok uygulanan yöntemin ise ϵ -kısıtlama yöntemi olduğunu belirtmişlerdir [8].

B. Öktem ve H. Ayboğa Ürün ve Yaşam Seyrinde Geri Dönüşümünün Öneminin Teorik Çerçeve de İncelenmesi adlı çalışmalarında, LCA'yı, ürünü oluşturan hammaddelerinin kazanımının ilk aşamasından ürünün yaşamının son aşaması arasındaki süreçler olarak tanımlamışlardır. Ürünlerin yaşamlarını ise ürünün teknolojik yaşamı, ürünün faydalı yaşamı ve ürünün ekonomik yaşamı olmak üzere üç görüşe ayırmışlardır. Ayrıca üretimde geleneksel maliyet analizi ile LCA temelli maliyet analizini de kısaca karşılaştırdıkları çalışmalarında geleneksel maliyet analizinde ürünün sadece üretim maliyetinin hesaplandığını üretim öncesi maliyetlerden olan planlama, tasarım, ürün ile ilgili Ar-Ge çalışmaları, geri dönüşüm gibi maliyetlerin dönem gideri olarak kabul edildiğini oysa bunun gerçekçi bir maliyet analiz yöntemi olmadığını açıklamışlardır. Ayrıca günümüzde, hammadde sorunu, hızlı nüfus artışı ve hızlı tüketim nedeniyle geri dönüşümün de önemimin eski yıllara göre çok daha fazla arttığını ve geri dönüşümün sağlayacağı sürdürülebilirliğin de maliyet, hammadde ve pazar

rekabeti gibi kavramlara olumlu etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Tüm bunların sonucunun ise işletmeye ama özellikle toplum ve insanlığa sağlayacağı katkıyı vurgulamışlardır [9].

Z. Çalışkan ve H. Yüksel çalışmalarında, LCA'nın, ürünün tüm yaşamını kapsayan bir teknik olması ve veri akışının hızlı olması nedeniyle bir yazılım kullanılmasının gerekliliğine değinmişlerdir. Bunun içinde ürün ve işletme için en verimli yazılımı seçerken dikkate alınacak kriterlerin belirlenmesinde, Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinden olan Analitik Ağ Süreci yöntemini kullanmışlardır [10].

A. Ozdemir çalışmasında, çevresel, sosyal ve maliyet ayrılan LCA metodolojilerinden sosyal LCA ve çevresel LCA'yı karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Ancak sosyal LCA üzerinde durarak daha detaylı irdelemelerde bulunmuştur [11].

T. Eken ve İ.Aksu çalışmalarında LCA maliyet analizi üzerinde çalışmışlardır. İklim krizi, hızlı hammadde tüketimi ve küresel ısınma gibi global sorunların artması işletmeleri çevreci düşünmeye zorlamıştır verisi üzerinden yola çıkarak bir su parkının hizmet faaliyetleri sürecinin LCA maliyet analizini hesaplamışlar ve yorumlamışlardır [12].

A. Kök, LCA metodolojisinin, gıda sektöründeki pazarlama stratejilerine etkilerini göstermek amacıyla Y kuşağı üzerinde bir çalışma yapmıştır. Y kuşağının çocukluk döneminin meşhur yiyeceklerinin, 280 Y kuşağı kişisi üzerindeki etkisini yarı yapılandırma tekniği ile ölçmüştür. Çalışmasının sonucunda da gıda sektöründeki pazarlama stratejisine yönelik önemli bulgular elde ettiğini savunmuştur [13].

M. Z. Hauschild ve ark. çalışmalarını sundukları Life Cycle Assessment Theory and Practice adlı kitap beş bölümden oluşmaktadır. Birinci kısımda kitabın geri kalan kısmının daha iyi anlaşılması amacıyla LCA'yı tanımlamışlar, LCA'nın pozitif ve negatif yönlerine değinmişler ve 50 sene önceden günümüze kadar olan tarihsel gelişimini paylaşmışlardır. İkinci kısımda üniversite ve lisansüstü öğrencileri için ders niteliği seviyesinde bir bölüm hazırlamışlardır. Üniversiteler için müfredat oluşturabilecek bir içerik sunduklarını belirtmişlerdir. LCA kapsam ve sınırlarını belirten ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarını detaylı şekilde

inceleyerek metodoloji ve teknik kapsam kavramlarını açıklamışlardır. Üçüncü kısımda LCA'nın dünya politikasındaki yerini ve devletlerin uygulamalarını incelemişlerdir. Birçok uygulamayı derleyerek bu kısımda incelemişlerdir. Dördüncü kısım LCA el kitabı gibi hazırlanmıştır. Beşinci kısım ise destekleyici materyallerin kullanıldığı bir el kitabı gibi hazırlanmıştır. LCA çalışmasında kullanılabilir rapor ve bazı şablonları sunmuşlardır [14].

G. Finnveden makalesinde LCA'nın değerlendirilmesinde politik, ideolojik ve etik değerlerin incelemesini yapmıştır [15].

C. BassetMens ve ark. makalelerinde, Fransa'da LCA baz alınarak zorunlu olacak eko etiketlemenin ışığında yapılan bir çalışmayı incelemişlerdir. İncelenen çalışmada 5 kategorideki yaklaşık 70 gıda baz alınmıştır. Bunlar, meyve sebze, pirinç, enerji içecekleri, bitkisel yağ ve hayvansal gıdalardır. Çalışmadaki değerlendirmelerin çoğunun kısmi ya da detaydan yoksun olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle su kullanımı ve saha emisyonu gibi LCA'nın önemli etmenlerinin göz ardı edilmiş olmasının çalışmayı zayıf kılan en önemli sebepler olduğunu sonucuna varmışlardır [16].

H. A. Kutlu makalesinde LCA maliyetlemesi ile kalite maliyetleri arasındaki bağı incelemiştir. İlk olarak çalışmasında kaliteyi açıklamış, önemli bilim adamlarının ve önemli uluslararası kurumların kalite tanımlarına yer vermiştir. Hepsinin ortak bulunduğu noktanın kalitenin, ürün veya hizmetin sıfır hata ile sonuçlanması hedefi olduğunu belirtmiştir. Sıfır hata hedefiyle yapılan hizmet veya üretilen ürünün birçok maliyetin önüne geçtiğini açıklamıştır. Kalite ve önleme maliyetlerinin görünürde önemi az gibi görünse de etkin şekilde uygulanması ve yürütülmesinin LCA kaynaklı maliyetleri de minimize ettiğini belirterek LCA maliyeti ve kalite maliyetleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur [17].

S. Ötleş ve B. Üçok çalışmalarında daha çok ürün yaşam döngüsü üzerinde durmuşlardır. Ürünün ömür bilgisini bilmenin, LCA tekniklerini daha verimli şekilde yönetmek için uygun bir teknik olduğunu açıklamışlardır [18].

Z. Çokaygil tezinde LCA türlerini açıklayarak karşılaştırmalı bir yaklaşımda bulunmuştur. Teneke, cam, plastik, teneke plastik, karton plastik gıda ambalajlarının yaşam döngüsü analizlerini yapmıştır. Bu analizler arasından

çevreye etkisi daha az olanı belirleyerek en iyi atık tipini saptamıştır. Bu analizler ve karşılaştırma işlemlerinde SimaPro 6.0.4 yazılımını kullanmıştır [19].

S. Sayer ve A. Ülker makalelerinde LCA'nın yönetimini çalışmışlardır. Müşteri ve tedarikçi iletişiminin bilgisayar temelli olmasının ve çeşitli mühendislik branşlarının multidisipliner şekilde kullanılmasının LCA'nın uygulanabilirliğini artırdığını belirtmişlerdir [20].

H. H. Öztürk ve ark. çalışmalarında fosil yakıtların sonsuz olmaması ve çevreye verdikleri tahribata değinmişlerdir. Fosil yakıtların tükenmesine bağlı olarak fiyatındaki artış elektrik tarifesi fiyatlarında da artışı beraberinde getirmiştir ve bu artışın tarımsal üretimde kar marjını olumsuz etkilediğini tespit etmişlerdir. Buna çözüm olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin kullanımını önermişlerdir. Güneş enerjisi ile çalışan fotovoltaik (PV) sistemler yeşil enerji eldesi için oldukça önemlidir. Güneş enerji sistemlerinin ekolojik etkilerini tartışmışlardır ve karbon ayak izini LCA yöntemini kullanarak hesaplamışlardır [21].

Y. E Demirel ve ark. makalelerinde yaşam döngüsü analizi, yaşam döngüsü envanter analizi, yaşam döngüsü etki analizi gibi konuları işlemişlerdir. LCA metodolojisinin ISO 14040-14044 standartlarına göre belirlendiğini ve günümüzde neden bu kadar önemli olduğuna değinmişlerdir. LCA'nın sırasıyla hammadde eldesi, üretim, montaj, nakliye, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve bertarafına kadar tüm aşamaları kapsayan bir teknik olduğunu belirtmişlerdir. Her bir aşamadaki çevresel etkileri belirlemek, raporlamak ve yönetmek için kullanılan LCA'da havaya, suya ve toprağa salınan tüm emisyonlar ile kullanılan enerji ve su miktarlarının ele alındığını açıklamışlardır. LCA'nın tekniğinin amacının insanlığa, doğaya ve çevreye en az zararlı olacak şekilde ürün veya hizmet seçimi sağlamak olduğunun üzerinde durarak amaç ve kapsam belirlemenin önemini belirtmişlerdir. Ayrıca bu sayede ürün, ürün tasarım veya hizmet gelişimine katkıda bulunduğunu da eklemişlerdir. Yaşam döngüsü etki analizinin de LCA da belirlenen bilgilerle olası salınımlarında insan ile çevre üzerine etkilerinin değerlendirilmesi ve doğal kaynak kullanımı olduğunu açıklamışlardır. Yaşam döngüsü etki analizinin karşılaştırmalı çalışmalarda kullanıldığını eklemişlerdir. Örneğin prosese uygun olan iki gazdan hangisinin kullanılacağı gerektiğinin yaşam döngüsü etki analizi ile karar verilebileceğini

belirtmişlerdir. Birkaç yaşam döngüsü etki analizinin uygulama örnekleri ile makalelerini tamamlamışlardır [22].

R. Kannan, K. C. Leong, R. Osman, H. K. Ho, C. P. Tso makalelerinde Singapur'da bulunan 2.7 kW'lık bir PV sistemin tasarımını ele alarak PV sistemlerin LCA'sı üzerinde çalışmışlar ve bu santralin LCA ve hayat döngüsü maliyet analizini yapmışlardır. Enerji geri ödeme süresinin, bir PV sisteminin ne kadar sürede kendi üretim ve kurulum aşamalarında harcadığı enerji miktarını karşılayacak kadar elektrik üreteceğini belirten bir gösterge olduğunu belirterek PV sistemlerin kullanımının haklı çıkması için kullanılan en yaygın gösterge olduğunu da eklemişlerdir. Ancak PV sistemlerin ürettiği elektrik miktarının, yerel güneş ışınımı ve çevre koşullarına bağlı olması nedeniyle, enerji geri ödeme süresi hesabının PV panellerin kurulduğu alana özel olarak yapılmasının daha doğru olduğunu ifade etmişlerdir. Ek olarak çalışmalarında PV sistemlerin enerji geri ödeme sürelerini, fuel oil ile çalışan buhar türbinli santral ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma da sera gazı emisyonu ve maliyetlerini de dikkate almışlardır. Çalışmalarının sonucunda, PV sistemin elektrik üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının, fuel oil ile çalışan bir buhar türbinli santrale göre dörtte birinden az, gazla çalışan kombinasyonlu bir santrale göre ise yarısından az olduğunu ortaya koymuşlardır. Ancak, PV sistemiyle üretilen elektriğin maliyeti, fuel oil veya gazla çalışan santrallerden ortalama 5 kat daha yüksek olduğunu da belirtmişlerdir. Ayrıca, PV sisteminin çevresel belirsizlikleri olduğunu da eklemişlerdir [23].

M. Bravi, M. L. Parisi, E. Tiezzi, R. Bosasi çalışmalarında PV panellerinin LCA'sının her aşamasında ortaya çıkan risklerin doğasını ve kapsamını daha iyi açıklamayı amaçlamışlardır. Bu makalede Kadmiyum Tellür (CdTe) üzerinde durmuşlardır. CdTe'nin enerji ve ekonomik olarak umut verici olsa da çok tehlikeli ağır metallerin varlığına bağlı olarak bazı riskler içerdiğini belirtmişlerdir. Daha önceleri yapılmış çalışmalarda, CdTe modüllerinin diğer fotovoltaik teknolojilere kıyasla üretim aşamasında daha az enerji tüketimi gerektirdiğini ama bu çalışmaların yalnızca enerji geri dönüşümü ve enerji geri ödeme süresi (EPBT) temelinde yapıldığını ancak ağır metallerin kirlilikle ilgili etkilerinin göz ardı edildiğini belirtmişlerdir. Buna karşın, bakır indiyum galyum diy-selenid (CIGS) ve amorf/mikromorf MCPH ince film silikon teknolojilerinin

CdTe teknolojisi ile benzer veya bazı durumlarda daha az çevresel etkiye sahip olabileceğini eklemiştir. Bu panellerin üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarının riskleri ile ilgili verilerin azlığı ve PV teknolojisindeki hızlı ilerlemeler nedeniyle risklerin ve faydaların belirlenmekte zorluğa neden olduğu bu yüzden geri kazanım stratejileri alanında daha fazla çalışma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir [24].

M. U. Nawaz, S. Umar, M. S. Qureshi makalelerinde güneş enerjisi teknolojisinin elektrikli araçlara (EVs) entegrasyonunun, sera gazı emisyonlarını azaltma ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma konusunda iyi bir gelişme olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında güneş enerjili elektrikli araçların (SEVs) çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendirmek için LCA analizi yapmışlar ve geleneksel elektrikli araçlarla karşılaştırmışlardır. Çevresel analiz ile, üretim, işletme ve kullanım ömürlerini incelemişler ayrıca enerji tüketimi, sera gazı emisyonları ve kaynak tüketimi gibi faktörleri göz önünde bulundurmışlardır. Ekonomik analizle ise SEV'lerin sahip olma maliyeti üzerine çalışmışlar ve sermaye yatırımları, işletme maliyetleri ile yakıt tüketimi ve bakım maliyetlerindeki potansiyel tasarruflarını göz önünde tutmuşlardır. Çevresel analizin sonuçları sonucunda, SEV'lerin, yenilenebilir güneş enerjisinin araç şarjı için entegrasyonu sayesinde geleneksel EV'lerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde sera gazı emisyonlarını azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca LCA analizi ile, sürdürülebilir malzemeler ve üretim yöntemlerinin kullanılması durumunda imalat süreçlerinde kaynak tüketimi ve çevresel etkilerde potansiyel azalmalar olduğunu göstermişlerdir. Ekonomik açıdan bakıldığında ise TCO analizi, SEV'lerin başlangıçta geleneksel EV'lerle karşılaştırıldığında daha yüksek maliyetlere sahip olabileceğini ancak uzun vadeli yakıt tüketimi ve bakım maliyetlerinden sağlanan tasarrufların bu maliyetleri dengeleyebileceğini ortaya koymuşlardır [25].

M.M. Lunardi, J.P.A. Gaitan, J.I. Bilbao ve R. Corkish yazdıkları makalede, PV sektörünün atık miktarının gün geçtikçe arttığını ve bu artışın devam edeceğinin üstünde durmuşlardır. Bu nedenle PV panellerinin kullanım ömrünün geliştirilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Çünkü hala PV geri dönüşüm süreçlerinin ekonomik olmadığını ve birçok ülkede uygun düzenlemeler bulunmadığını belirtmişlerdir. LCA'nın PV modüllerinin kullanım ömrü yönetimi senaryolarını (düzenli depolama, yakma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm,

mekanik, termal ve kimyasal yöntemler), gerçek süreç verileri ve gerçek varsayımlarla inceleyen bir metodoloji olduğunu eklemiştir [26].

D.B.S. Pierre, I. Blanc, J. Payet, p. Jacquin, N. Adra, D. Mayer makalelerinde, PV endüstrisinin dünya genelinde gelişmesiyle, herhangi bir ülkede üretilen güneş enerjisi elektriği nedeniyle ortaya çıkan CO₂ emisyonunun dolaylı olarak başka yerleri de etkileyebileceği konusunu işlemişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar Fransa'daki PV santrallerinin küresel ısınmaya olan potansiyel etkilerini de incelemiştir [27].

M.S. Khan, S. Soomro, W. Asif, A. Mehmood, S. Ahmed çalışmalarında, Hyderabad pazarlarında bulunan iki farklı güneş paneli türünün LCA'sını analiz etmişlerdir. Güneş panellerinin ömrünün sonunda geri dönüşümün önemini vurgulayarak ham maddelerin yeniden kullanımını dikkate almışlardır. Mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm süreçlerinin birleşimi dikkate alınmış ve güneş PV panellerinin %90 oranında geri dönüşümü olduğunu kabul etmişlerdir. Geri dönüşümün, ham madde arıtma sürecinde atık ısı emisyonlarını azaltırken maliyeti düşürdüğünü ve çevresel açıdan faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak PV panelinin depolama alanından daha fazla çevresel ve ekonomik fayda sağlaması açısından geri dönüşümünün önemi sonucunu ortaya koymuşlardır [28].

P. Gupta, A. Anand, H. Gandotra birlikte hazırladıkları derleme makalelerinde, PV panellerin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesini incelemiştir. Mevcut PV güneş pili bertaraf uygulamalarının detaylı bir incelemesini yapmışlar ve bu incelemeler sayesinde elde edilen verilerin alternatif enerji sektöründe nasıl uygulanabileceği üzerinde çalışmışlardır. Ayrıca, mevcut bertaraf tekniklerini göz önünde bulundurularak teorik bir LCA çalışması yapmışlardır [29].

V. Muteri, M. Cellura, D. Curto, V. Franzitta, S. Longo, M. Mistretta, M.L. Parisi yaptıkları inceleme çalışmasında PV panellerinin yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu enerji ve çevresel etkilerle ilgili verileri eleştirel bir şekilde analiz etmişlerdir. Bu analizi yaparken daha çok enerji geri ödeme süresi, toplam enerji talebi ve birincil enerji talebi ölçütleri dikkate almışlardır. Ayrıca çalışmalarında otuz dokuz LCA çalışmasını da karşılaştırarak incelemiştir [30].

I. Papamichael, I. Voukkali, M. Jeguirim, N. Argirusis, S. Jellali, G. Sourkouni, C. Argirusis ve A.A. A. Zorpas makalelerinde her PV panelin ömrünün ortalama 30 yıl olduğunu ve gerekli önlemler alınmazsa yakın gelecekte tıpkı plastik atıklar gibi ekosisteme büyük çevresel yükler getireceğini belirtmişlerdir. Bu sebeple kimya, enerji, süreç, çevre, malzeme mühendisliği gibi branşların multidisipliner yaklaşım ile çalışmalar yapmaları gerektiğini vurgulamışlardır [31].

R. Zahadi, S.F Moosavian, A. Aslani yaptıkları çalışmada insan sağlığına en fazla zarar veren PV çeşitlerini incelemişlerdir. Yazılım desteği olarak yaptıkları çalışmada birinci (polikristalin) ve üçüncü (şeffaf Perovskit) nesil panellerin sırasıyla insan sağlığına en fazla ($1.43 \times E-6$ Daly) ve en az ($4.56 \times E-7$ Daly) zarar veren paneller olduğunu belirtmişlerdir. Deniz ekotoksitesitesi açısından da en olumsuz etkinin, ikinci nesil panellerin 0.101 kg 1,4-DCB ile ilişkilendirilen sonuçlar olduğunu belirtmişlerdir. Küresel ısınmanın ise en önemli sonuç olarak tüm üç nesil panellerin küresel ısınmada ciddi etkilere yol açmakta olup, sırasıyla 399, 164 ve 134 (gCO₂ eşdeğer) artışa sebep olduğu sonucuna varmışlardır [32].

J. Fisher tezinde güneş santrallerinin ömrünün uzun olmasından kaynaklı olarak bertarafı ve geri dönüşümü ile ilgili çevresel sorunların tam olarak ele alınamadığını bunun büyük bir eksiklik olduğunu belirtmiştir. LCA metodolojisini kullanarak rüzgar ve güneş santrallerini karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda rüzgar türbinlerinin güneş santrallerine göre daha az çevresel etkiye neden olduğunu tespit etmiştir. Arazi işgalinden salınan emisyonlara kadar rüzgar türbinlerinin daha çevre dostu olduğu sonucuna varmıştır. Ancak LCA tekniği kullanılarak güneş santrallerinin de daha çevre dostu olmasının sağlanabileceği ve buna uygun atık yönetimi ile maliyetten de tasarruf yapılabileceğini belirtmiştir [33].

G. Ekinci hazırladığı tezinde güneş panellerinin, tüm üretim süreçleri ile malzeme giriş çıkışı dahil olmak üzere LCA'sı üzerine çalışmıştır. Monokristal, polikristal ve ince film güneş panellerini LCA metodolojisine göre karşılaştırmıştır [34].

R. Sianipar, M.S Boedoyo ve N.A Sasongko çalışmalarında ülkeleri olan Endonezya için LCA'nın önemini, nasıl çalıştığını ve hükümete bu anlamda düşen görevleri belirtmişler ve yorumlamışlardır [35].

A.J. Aristizabal, D.C Sierra ve J.A Hernandez çalışmalarında, PV sistemler ile bazı yenilenemeyen enerji sistemlerini LCA açısından karşılaştırmıştır. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarını referans alarak yaptıkları karşılaştırmaların sonucunda 1 m² güneş paneli üretimi için en yaygın ham maddelerden biri olan monokristal silikon (mc-Si) için, 1 m² fotovoltaiik panel üretimi için gereken 5150 MJ'ün %75.8'inin gerekli olduğunu göstermişlerdir. Çevresel açıdan yalnızca 0.7 g/GWh sera gazı emisyonu üretirken, petrol ve kömürden sırasıyla 3.7 g/GWh ve 44.3 g/GWh emisyon üretildiğini belirtmişlerdir. Bir diğer güneş paneli hammaddesi olan Kadmiyum-Telürün (CdTe) daha düşük sera gazı emisyonu ürettiğini ve bunun 0.3 g/kWh olduğunu belirtmişlerdir. Panellerin üretimi sırasında CO₂ eşdeğer emisyon katkısının büyük ölçüde silikon mikro granüllerinin dönüşümü ile ilişkili olduğunu ve bu emisyonların GWP başına %47.61'ine karşılık geldiği tespit etmişlerdir. İkinci olarak, emisyonlar panellerin montajı ile (%18.39) ve üçüncü olarak, wafer'ların dökümü ve üretimi ile (%16.54 GWP emisyonları) bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir [36].

G. Marciano çalışmasında, güneş panellerinde cam ve alüminyum yerine çevresel etkilerin daha az olduğu polimerlerin kullanılmasının önemini anlatmıştır. Polimerler, biyopolimerler ve geri dönüştürülmüş plastiklerden üretilen polimerler gibi petrol bazlı polimerlerin alternatiflerinin kullanılmasına olanak tanıdığı için çevresel etkilerinin düşük olduğunu açıklamıştır. Ancak hala gelişim aşamasında olduğundan söz ederek değerlendirilmesi için olası LCA etkilerinin üzerinde çalışılması gerektiğini vurgulamışlardır [37].

R.Dones ve R. Frischknecht çalışmalarında ülkeleri olan İsviçre'nin iklim koşullarında eğimli çatılardaki güneş panelleri ve büyük tesislerde envanterlerini sunarak mevcudiyetteki sera gazı emisyonunu ve gelecekteki olası sera gazı emisyonunu karşılaştırmışlardır. PV sistemlerin üretim aşamasındaki yüksek elektrik ihtiyacının büyük bir çevresel yük oluşturduğunu belirtmişlerdir. Üretim süreçlerindeki ve panellerdeki verimliliğin artırılması sayesinde bu çevresel yükün azaltılabileceğini belirtmişlerdir [38].

Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti ve A. Corrado çalışmalarında analizini yaptıkları sistemin enerji ve çevresel değerlendirmesini yapmak için LCA metodolojisini uygulamışlardır. Çalışmayı SimaPro 5.1 yazılımını kullanarak gerçekleştirmişler ve ısı geri kazanımının yararlarını göstermeyi

hedeflemişlerdir. Enerji verimi, ekonomik değerlendirmeler ve suyla soğutulan hibrit PV sistemlerinin LCA sonuçları üzerine yapılan bu çalışmanın sonucunda hibrit PV sistemlerinin standart PV sistemlerine kıyasla daha iyi çevresel etkiye sahip olduğu ve daha az maliyetli olduğu sonucuna varmışlardır [39].

V. Fthenakis, H. Chul Kim, R. Frischknecht, M. Raugei, P. Sinha ve M. Stucki çalışmalarında LCA verileri arasında en önemlilerinin enerji geri ödeme süresi, sera gazı emisyonu, kirletici emisyonları ve ağır metal emisyonları olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarındaki verileri wafer, modül, yapısal ve elektriksel bileşenlerden oluşan sistem dengesindeki tahmini ve gerçek üretimlerden almışlardır. Çalışmalarında, çatı üstü ve yere monte PV panelleri arasındaki çevresel farkı da incelemişlerdir [40].

C.A. Grant, A L. Hicks çalışmalarında, PV sistemlerin elektrik üretiminde çevresel etkileri aza indirmede en önemli teknolojilerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Ülkeleri olan ABD'nin güneş enerjisi potansiyelini de inceleyerek birçok ABD şehrinde kurulabilecek çok kristalli silikon PV sistemlerin çevresel etki geri ödeme sürelerini incelemişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında Çin, ABD ve Avrupa için çeşitli elektrik enerjisi üretim senaryolarını karşılaştırarak analiz etmişlerdir. Çin üretim senaryosunun, ABD ve Avrupa üretimine kıyasla bazı etki kriterlerinde çevresel etki geri ödeme süresini artırdığı sonucuna varmışlardır [41].

A. Rashedi ve T. Khanam makalelerinde, yaygın PV teknolojilerinden olan mono-kristal silikon (mono-Si), çoklu-kristal silikon (multi-Si), amorf silikon (a-Si) ve kadmiyum tellür (CdTe) enerji teknolojilerinin LCA'sını incelemişlerdir. LCA'nın en gelişmiş araçlarından olan ReCiPe en geniş orta nokta etki kategorisine sahip bir metodoloji olduğunu belirtmişlerdir. İklim değişikliği, ozon tabakasının incilmesi, karasal asitleşme, tatlı su ötrofikasyonu, deniz ötrofikasyonu, insan toksisitesi, fotokimyasal oksidan oluşumu, partikül madde oluşumu, karasal ekotoksisite, tatlı su ekotoksisitesi, deniz ekotoksisitesi, iyonlaştırıcı radyasyon, tarımsal arazi işgali, kentsel arazi işgali, doğal arazi dönüşümü, su tükenmesi, metal tükenmesi ve fosil tükenmesi olarak 18 kategorileride yukarıda belirtilen 4 PV sisteminin LCA'sını kıyaslamışlardır. Çalışmaları sonucunda çevresel etkisi az olandan çok olana doğru CdTe, multi-Si, a-Si ve mono-Si teknolojisi sonucuna varmışlardır [42].

R. J. Bonilla, A. Fu ve K. Fu çalışmalarında PV sistemlerin sosyal LCA'sını incelemişlerdir. Yaptıkları vaka analizlerinde çatı üstüne monte edilen PV sistemlerin çevresel etkilerinin daha az olduğu sonucuna varmışlardır [43].

M. Milousi, M. Souliotis, G. Arampatzis ve S. Papaefthimiou ekibi PV panellerinin kombine LCA'sı ve maliyet analizi başlıklı makalelerinde, yenilenebilir enerji teknolojilerinden olan PV sistemleri ve güneş kolektörlerini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarını yaparken izledikleri yöntem iki adımdan oluşmaktadır. Bunlar; LCA ve belirsizlik analizi ile tekno ekonomik değerlendirmelerdir. LCA ve belirsizlik analizinde SimaPro yazılımını kullanmışlar, tekno ekonomik değerlendirmelerde ise RETScreen programını kullanmışlardır. Tüm yaşam döngüsü boyunca olan karbon ayak izi analizi yapmışlar ve diğer hem yenilenebilir hem fosil kaynaklı enerji üretim yöntemleri ile kıyaslama yapmışlardır [44].

J.K.D. Singh, G. Molinari, J. Bui, B. Soltani, G.P. Rajarathnam ve A. Abbas Avustralya'daki bertarafa verilen ve geri dönüştürülen ömrünü tamamlamış PV panellerin LCA'sını çalışmışlardır. Ortalama 30 sene ömrü olan PV panellerin 1kW elektrik üretimi için üç ömrünü tamamlama senaryosu üzerine çalışmışlardır. Bunlar; çöpe atma, lamine cam geri dönüşümü ile geri dönüşüm ve ömrü bitmiş PV panellerin tam geri kazanımı senaryoları olarak belirlenmiştir. LCA ReCiPe son nokta tek puanı kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda genel etki puanının en çok ömrü bitmiş PV panellerin tam geri kazanımı tesislerinde sonra ise lamine cam geri dönüşümü ile geri dönüşüm tesislerinde olduğunu belirlemişlerdir. PV panellerinin ömrünün ise arttığı varsayılan senaryoda ise genel etki puanının yükseldiği ancak karbon emisyonlarının düştüğünü belirtmişlerdir. PV sistem üretmeden veya kullanmadan önce LCA analizini yapmanın önemine vurgu yaparak çalışmalarını tamamlamışlardır [45].

N. Palanov tezinde ISO 14040 ve 14044 standartları ile uluslararası enerji ajansı fotovoltaik güç sistemleri programlarını (IEA PVPS) referans almıştır. PV sistemlerin enerji geri ödeme süresini güneşlenme süresi çok yüksek olmayan ülkeler için ortalama 2,5 sene olarak belirtmiştir. Güneş panellerinin parçalarının LCA'sını ele alan araştırmacı güneş hücresinin en fazla çevresel etkiye sebep olduğunu belirterek iyileştirme çalışmalarında hücre denen bu parçaya ağırlık verilmesi gerektiğini belirtmiştir [46].

R. ContrerasLisperguer, E. M. Cerón, J. de la Casa Higuera, R. D. Martín makalelerinde açık döngü malzeme senaryosu ile kapalı döngü malzeme senaryosunu LCA metodolojisini kullanarak karşılaştırmışlardır. Çevresel etkileri açısından kapalı döngü malzeme senaryosunda PV malzemelerinin geri kazanımının, açık döngü malzeme senaryosuna göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca iklim değişikliğine etkinin de %74 iyileşeceğini belirtmişlerdir. Sürdürülebilir bir PV teknolojisi için, özellikle geri dönüştürülmesinde kullanılan kimyasallar nedeniyle çevresel etkilerin fazla olduğu polisilikon ve diğer malzemeler için beşikten beşiğe metodolojisine dikkat çekmişlerdir [47].

H. Lopez, D. Abigail, R. Tariq, A.E. Mekaoui, A. Bassam, M.V Lille, L. Ricalde, I. Riech çalışmalarında ülkeleri Meksika’da bir bölge olan Yucatan PV panellerini baz almışlardır. Yaptıkları LCA analizi ile PV geri dönüşümü sayesinde insan toksisitesi ve tatlı su eko toksisitesinde yaklaşık %78 iyileşme olabileceğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca elektrik maliyeninin de PV dönüşümü olmayan duruma göre %2 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak PV geri dönüşümü için PV santralının bulunduğu ya da PV panel kullanımı olan bölge halkına geri dönüşüm eğitimleri vererek geri dönüşüme destek olunabileceğini de vurgulamışlardır [48].

P. Wu, X. Ma, J. Ji, Y. Ma çalışmalarında ülkeleri Çin’de bulunan 1 MW’lık bir güneş santralının LCA analizini yapmışlardır. Yaptıkları analiz sonucunda ilgili tesisin enerji geri ödeme süresini 2,3 sene olarak hesaplamışlardır. İlgili santralin ortalama 30 sene ömrü olduğunu göz önünde bulundurarak yaklaşık 27 sene kadar doğaya temiz enerji konusunda fayda sağlayacağını belirtmişlerdir [49].

N. A. Ludin, N. I. Mustafa, M. M. Hanafiah, M. A. Ibrahim, M. A. M. Teridi, S. Sepeai, A. Zaharim, K. Sopian kaleme aldıkları makalelerinde ince film, boya duyarlı güneş pili, perovskit güneş pili ve kuantum nokta duyarlı güneş pili, polisilikon gibi PV teknolojisinin öğelerinin LCA’sı üzerine yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Literatürdeki, sera gazı emisyonu, toplam enerji talebi ve enerji geri ödeme süresi gibi LCA’daki önemli üç etki değerlendirme yöntemini gözden geçirmişler ve bu gözden geçirme sonucunda PV sistemlerdeki, mono-kristal silikon teknolojisinin diğer güneş PV teknolojilerine kıyasla en yüksek enerji tüketimine, en uzun enerji geri ödeme süresine ve en yüksek sera gazı emisyon oranına sahip olduğunu belirtmişlerdir [50].

C. Lamnatou ve D. Chemisana konsantre PV panelleri hakkında literatür incelemesi yapmışlardır. Mevcut yöntemlerin enerji geri ödeme süresi, kümülatif enerji, karbon emisyonu üzerinde faydalı olduğunu ancak orta ve uç nokta yaklaşımlarına dayalı tekniklerinde kullanımına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak PV LCA'sı ile ilgili daha fazla çalışmaya ve araştırmacıya ihtiyaç olduğu üzerinde durmuşlardır [51].

J. Peng, L. Lu, H. Yang, yaygın PV sistemleri olan; mono-kristalin (mono-Si), çoklu-kristalin (multi-Si), amorf silikon (a-Si), CdTe ince film (CdTe) ve CIS ince film (CIS) teknolojilerinin LCA 'sını incelemişlerdir. Bunlar arasından CdTe PV sisteminin, düşük yaşam döngüsü enerji ihtiyacı, diğerlerine kıyasla yüksek dönüşüm verimliliğinden dolayı enerji geri ödeme süresi ve sera gazları salınım oranı açısından en iyi çevresel performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir. Mono-Si PV'nin ise tersi nedenlerle en kötü çevresel etkiye neden olan PV teknolojisi olduğunu belirtmişlerdir. Buna rağmen fosil yakıtlı enerji üretim teknolojilerine göre daha düşük sera gazı emisyonuna neden olduğunu da eklemişlerdir [52].

A. Sumper, M. Robledo-García, R. Villafañila-Robles, J. Bergas-Janéc, J. Andrés-Peiróa çalışmalarında, polikristalin silikon modüllere sahip 200 kW gücündeki çatı-PV sisteminin LCA'sını analiz edip enerji geri kazanım süresini ve sera gazı salınım oranını değerlendirmişlerdir. İspanya, Katalonya da bulunan bu PV sisteminin enerji geri kazanım süresini yaklaşık 4,5 sene olarak hesaplamışlardır [53].

R. Laleman, J. Albrecht, J. Dewulf, çalışmalarında nispeten düşük güneş ışınımına sahip yerlerdeki konut PV sistemlerinin LCA incelemesini yapmışlardır. Ecoinvent LCA veritabanını baz alarak altı farklı PV teknolojisi için yaşam döngüsü etki değerlendirmesi tekniğini kullanmışlardır. Düşük ışınım alan bölgelerdeki PV sistemleri için enerji geri ödeme süresini yaklaşık 5 sene olarak ve kömürle çalışan santrale kıyasla 10 kat daha düşük iklim değişikliği etkisi potansiyeline sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak, rüzgar santralleri ve nükleer santraller ile kıyas yaptıklarında ise küresel ısınmaya etki potansiyelinin 4 kat daha fazla olduğunu sonucuna varmışlardır [54].

Varun, I.K. Bhat, R. Prakash genel olarak yenilenebilir enerji sistemleri için LCA'nın ne demek olduğunu ve önemini açıklayan derleme makale yazmışlardır.

Yenilenebilir enerji kaynakları ve PV sistemler için karbon kredisi ve karbon emisyonlarını fosil yakıtlı teknolojiler ile karşılaştırmışlardır [55].

M. Krebs-Moberg, M. Pitz, T.L. Dorsette, S.H. Gheewala çalışmalarında LCA'nın multidisipliner bir yaklaşım olup, amacı, sistem sınırları, SimaPro yazılımı, LCA envanteri, LCA analizi gibi kavramları açıklamışlardır. Çok kristalli silikon (m-Si), organik ince film (OPV) ve perovskit ince film (PSC) panellerinin LCA'sını da incelemişlerdir. Bu iki PV teknolojisinin son kullanım senaryoları, atık yönetimi ve geri dönüşüm senaryolarını değerlendirerek yaşam sonu ve çevresel etkileri LCA etki değerlemesi ile belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda çok kristalli silikon (m-Si) PV panellerin en kötü çevresel etkiye neden olduğunu göstermişlerdir. Geri dönüşüm senaryosunun ise tüm çevresel etkileri azalttığını ancak en büyük azaltmayı çok kristalli silikon PV panellerde gösterdiğini belirtmişlerdir [56].

M. Pehnt yaptığı çalışmada enerji dönüştürücülerin teknik gelişmelerinin yenilenebilir enerji deki çevresel etkileri daha da azaltacağını belirtmiştir. Bu sayede emisyon miktarları, enerji geri ödeme süresindeki düşüş ve artan ömür gibi LCA parametrelerinin gelişeceğinden bahsetmiştir [57].

A. Salvi, V. Arosio, L. Monzio Compagnoni, I. Cubina, G. Scaccabozzi, G. Dotelli çalışmalarında PV sistemlerine son yıllarda olan rağbetin güzel bir gelişme olduğunu ancak ileride son ömrü doğru şekilde yönetilmediğinde önemli çevresel sorunlara yol açacağını bildirerek başlamışlardır. Çevresellik göstergesi (kullanım oranı, UOR) ile etki göstergesi (Küresel Isınma Etkisi, GWI) arasında çok kriterli karar analizi (MCDA) yöntemiyle bir bağlantı kurmuşlardır. Verimliliği ve ömrünü ilk parametre, sera gazı emisyonlarını ise ikinci parametre olarak belirlemişlerdir. PV panellerin üretim ve bertarafına yönelik dokuz senaryo karşılaştırması yapmışlardır [58].

M.T. Tsang, G.W. Sonnemann, D.M Bassani, çalışmalarında organik PV sistemlerle geleneksel PV sistemleri yaşam döngüsü etki değerlendirmesini karşılaştırmışlardır. Organik PV sistem olarak mobil güneş şarj cihazı ve çatıya monte edilen PV panel seçmişlerdir. LCA analizi sonucunda sırasıyla ortalama %55 ve %70 daha düşük sonuçlar bulmuşlardır. Ayrıca silikona kıyasla LCA

analiz sonuçlarını %39-89 daha düşük, enerji ile karbon geri ödeme sürelerini ise 220 ve 118 gün daha kısa bulmuşlardır [59].

C.E.L Latunussa, F. Ardente, G. Andrea Blengini, L. Mancini çalışmalarında öncelikli olarak PV sistemlerin henüz çok az bir kısmının bertaraf edilmesinden dolayı PV panellerin son kullanımı konusunda literatürde çok az çalışma olduğunu bunun da büyük bir veri eksikliğine sebep olduğunu ve ileride büyük çevresel sorunlar yaratacağını vurgulamışlardır. Bir PV panelinin geri dönüşüm sürecinin aşamalarını çalışmışlardır. Fiziksel (mekanik ve termal), asidik çözelti ve elektroliz yöntemlerini açıklamışlardır. Tüm bu süreçlerin çevresel etkileri için LCA analiz tekniğini kullanmışlardır. Analiz sonucunda küresel ısınma potansiyelinin yaklaşık %20'sinin sandviç denem katmanların yakılmasından %30'una yakınının ise yanma sonrası süreçlerden kaynaklanabileceğine varmışlardır [60].

J. Yuan, X. Xiaozhen Xu, B. Huang, Z. Li, Y. Wang çalışmalarında Elektrik Tedarik Maliyetini (ESC) ve çevresel etkileri baz alarak bir PV teknolojisi bölgesel planlama optimizasyon modeli kurmak için LCA ve Çok Amaçlı Optimizasyon (MOO) metodolojilerini kullanılmışlardır. NSGA-II genetik algoritmasını kullanarak yaşam döngüsü boyunca en düşük ekonomik maliyet ve çevresel kirlilik çözümüne ulaşmışlardır. Kristalize silikon PV panellerinin potansiyel çevresel etkisinin daha çok toksik etkiler olduğunu ve monokristal silikon PV teknolojisinin çevresel etki ve elektrik tedarik maliyeti göz önüne alındığında daha avantajlı bir seçim olacağı sonucuna varmışlardır [61].

E. Carnevale, L. Lombardi, L. Zanchi makalelerinde silikon bazlı panellerini, ince film panellerini ve termal güneş kolektörlü sistemleri LCA açısından karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda termal güneş kolektörlü tabanlı sistemin daha uygun göstergelere sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Kullanım ömrü bitip geri dönüşümü yapılmadığında on göstergeden sekizinde, geri dönüşümü yapıldığında ise altısında daha uygun göstergelere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ince film panelleri ve güneş termal kolektörlerinin daha düşük enerji geri ödeme süresini sağladıklarını da ortaya koymuşlardır [62].

A. Stoppato çalışmasında PV panellerinin çevreye etkisinin en fazla silikonun metal halden güneş panel hücresine dönüştüğü üretim aşaması ve panelin montaj aşaması olduğunu belirtmiştir [63].

T. Hassan Mehedi, E. Gemechu, A. Kumar, büyük ölçekli PV sistemlerinin çevresel değerlendirmesi hakkında literatürde çok az bilgi olmasından dolayı fosil yakıtlı enerji bölgesi olan Kanada'da bir bölge için bir vaka analizi yapmışlardır. Lityum iyon batarya depolamalı büyük ölçekli PV sistemlerinin yaşam döngüsü, sera gazı (GHG) emisyonları ve enerji profillerini değerlendirmek amacıyla bir LCA yöntemi oluşturmuşlardır. Panellerin ham maddesinin çıkarılması, üretimi ve montajının toplam enerji tüketiminin %53 olduğunu belirtmişlerdir. Batarya üretiminde ise bu değer %28 olduğunu eklemiştirler. Sera gazı emisyonunun ise yaklaşık %55'i batarya üretimi kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. PV panellerin enerji geri ödeme süresini en çok etkileyen faktörün pik watt değeri olduğunu eklemiştirler [64].

G. Ansanelli, G. Fiorentino, M. Tammaro ve A. Zucaro'un yayınladıkları makale ve çalıştıkları proje Avrupa'daki 8 şirketin bir araya gelerek PV panellerdeki silikon ve diğer malzemelerin geri kazanımını hedefleyen ReSiELP oluşumu kapsamındadır. Kristalin silikon (c-Si) PV panellerinin çevreye etkilerini değerlendirmek için LCA'sını incelemiştirler. Kullanım ömrü sonunda (EoL) kristalin silikon (c-Si) PV panellerin bazı materyallerini geri dönüştürmeyi, dönüştürdükleri materyallerinde başka alanlarda kullanıma rahat erişilebilirliğini hedeflemiştirler [65].

S. Gerbinet, S. Belboom, A. Léonard PV panellerin LCA'sı üzerine yapılmış çalışmalara genel bir değerlendirme yapmıştır. Çalışmaları gruplandırmış ve neler üzerine çalışıldığını belirterek literatürde hangi alanda eksikler olduğunu göstermeyi hedeflemiştirler. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, silikon panellerin en çok çalışılan alan olduğunu ince plakalı ve organik panel gibi alanlarda çok az çalışma yapıldığını belirtmişlerdir. Çalışmaların büyük kısmında enerji geri kazanım süresi, karbon emisyonları gibi iklim değişikliği alanındaki parametrelerin dikkate alındığını, sistem dengesinin (BOS) ise göz ardı edildiğini ifade etmişlerdir. Genel olarak çalışmalarda Eco-Indicator 99 ve Centrum voor Milieukunde Leiden (CML) metodolojilerinin kullanıldığını eklemiştirler [66].

M. Souliotis, N. Arnaoutakis, G. Panaras, A. Kavga, S. Papaefthimiou çalışmalarında hibrit Fotovoltaik/Termal PV panellerinin LCA'sını değerlendirmişlerdir. Bu sistemlerin geleneksel sistemlere göre daha verimli olduğu ancak üretim ve montaj aşamalarının daha fazla çevresel etkiye sebep olması nedeniyle çevreye daha zararlı sistemler olduklarını belirtmişlerdir [67].

H. Wang, E. Oğuz, B. Jeong ve P. Zhou bir feribotun itme gücü ihtiyacı için konveksiyonel dizel motor sistemi yerine kullanılabilir PV panelin potansiyel çevresel etkisini ve maliyet analizini LCA metodolojisini kullanarak incelemişlerdir. PV panellerin kurulumu, işletimi ve geri dönüşümü, yakıt kazancı ve geri ödeme süresi gibi parametreleri değerlendirme kriteri olarak kullanmışlardır. İnceleme sonunda geri ödeme süresini yaklaşık 3 sene olarak, feribotun ömrü sonunda da yaklaşık 300.000\$'lık yakıt maliyet kazancı hesaplamışlardır [68].

F. Guarinoa, S. Longo, C. HachemVermette, M Cellura ve V La Rocca Kanada da ki iki sistemin LCA'sını karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Konveksiyonel ısı pompalı ısıtma, soğutma ve sıcak su sağlayabilen bir sistem ile termal depolama yapabilen PV sistemini karşılaştırmışlardır. LCA metodolojisi olan ILCD 2011 Orta Nokta Etki Değerlendirme yöntemlerini kullanmışlardır. İncelemeleri sonucunda PV sistemin çevresel etkilerinin daha az olduğunu, ozon tabakası incelmesini %80 civarı azaltabileceğini, arazi kullanımını da yaklaşık %25 azaltabileceğini ortaya koymuşlardır [69].

2

GÜNEŞ ENERJİSİ

2.1 Güneş Enerjisi

Dünyamızdan 150 milyon kilometre uzaklıkta bulunan Güneş'in sıcaklığı çekirdek bölgesinde ortalama 15 milyon santigrat derecedir. Güneşteki hidrojen atomlarının daha büyük atom olan helyumu meydana getirmek için birleşmesine termonükleer füzyon denilmektedir ve bu birleşme ile çok büyük miktarda enerji ortaya çıkmaktadır. Çekirdekte oluşan bu enerji sayesinde de ısı ve ışık oluşmaktadır [70].

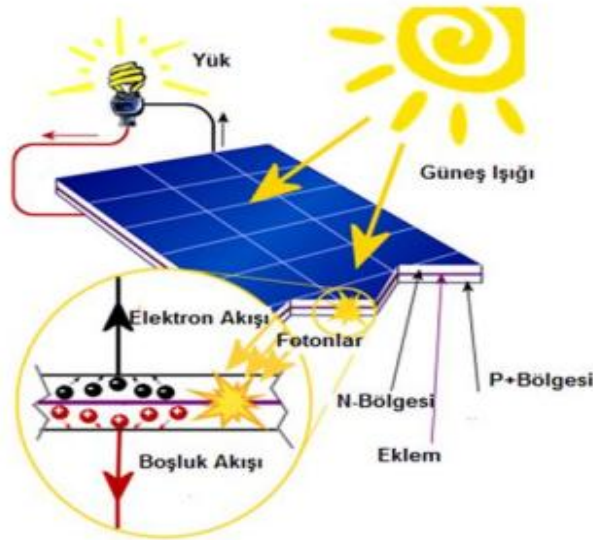
Dünya genelinde büyüyen nüfus, iklim ve çevre sorunları, kaynakların azalması, tüketimin artması, artan enerji ihtiyacı gibi sebepler temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi artırmıştır. Güneş enerjisi de bunlardan biridir. Tükenmemesi, katı ve sıvı atık oluşturmaması, dışa bağımlı olmaması, atıl arazilere kurulabilmesi, düşük sera gazı emisyonu, çevreye, diğer canlılara ve insan sağlığına olumsuz etkisi olmaması gibi avantajları yanında henüz verimliliğinin düşük olması, ilk yatırım maliyetinin ve amortisman süresinin diğer seçeneklere göre yüksek olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ancak teknolojiye ve güneş enerjisi sektöründeki hızlı ilerleme ile yakın gelecekte bu dezavantajların çözülebileceği düşünülmekte ve hedeflenmektedir.

Gelişmiş ülkelerde yaşayan insanların, çevreye duyarlılığının, farkındalığının artması ve bilinçlenmesi ile yenilenebilir enerji kaynaklarına özellikle de güneş enerjisine olan talep artmış bu da son yıllardaki çevresel ve iklimsel çalışmaların artmasını sağlamıştır. Güneş enerjisinden faydalanmanın, dışa bağımlılığı azaltması ve yukarıda belirtilen diğer avantajları sebebiyle başta gelişmiş ülkeler olmak üzere Dünya genelinde ülkelerin, yatırımlarında ve politikalarında yer almasıyla, bu alandaki çalışmalar sürekli olarak artmakta ve gelişmektedir. Tüm bunların etkisiyle hem maliyeti azaltmak hemde çevre, iklim ve insan sağlığına

etkileri en aza indirmek için çeşitli metodolojiler ve teknikler geliştirilmektedir. LCA' da bunlardan biridir.

2.2 Fotovoltaik Paneller (PV paneller)

PV paneller, Şekil2.1'de gösterildiği gibi P-N enlemlili yarı iletken hücrelerden oluşan fotovoltaik yapılarıdır. Üzerine güneşten gelen fotonları, hücre adı verilen yapılar sayesinde enerjiye çevirirler. Bu hücreler güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürebilen, hareketli mekanik parçaları olmayan, bakımı kolay elektronik yapılarıdır. Yüzeyleri genellikle kare, dikdörtgen ve daire biçiminde olabilir. Alanları da 60–160 cm² arasında değişmekte olup, ortalama 100 cm²'dir. Kalınlıkları ise 0,2–0,4 mm arasındadır. Yarı iletken bir diyot olarak çalışan hücreler güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektriğe dönüştürürler. Bu hücrelerin ürettiği gerilim ve akım değerleri çok küçüktür. Bu nedenle güç çıkışını dolayısıyla üretilen elektrik miktarını artırmak için PV hücreler birbirine paralel yada seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya PV modül adı verilir.



Şekil 2.1 Güneş paneli yapısı [71]

Paneller kullanım yerine ve amacına göre farklı güçte tasarlanabilirler. Üretimde, laminasyon tekniği kullanılarak güneş paneli katmanlarının yapıştırıp daha sonra panel hermetik tekniği kullanılır ve paketlenmesi yapıp panel tasarımı ortaya konmuş olur. Güneş enerjisi, PV hücre yapısına bağlı olarak %5 ile %25 arasında

bir verimle elektriğe dönüştürülebilir. PV panellerinin günümüz teknolojisiyle ortalama 25-30 sene ömrü vardır. Doğru bakım ve onarımla bu süre birkaç yıl daha uzayabilir. Buna örnek olarak 1976 yılında kurulmuş en eski kurumlu PV panellerinden olan Almanya'daki Oldenburg Üniversitesi binasında bulunan deneysel güneş panellerinin hala enerji üretmesi gösterilebilir [72].

Güneş panelinin türüne göre değişmekle birlikte bir panelin kendini amorti etme süresi ortalama 5 senedir.25-30 sene ömrü olduğunu düşündüğümüzde geri kalan 20 sene boyunca elektrik elde edilip gelire dönüştürülebilir [72].



Şekil 2.2 Örnek bir güneş santrali

2.3 Güneş Panelinin Yapısı

2.3.1 Hücre

Güneş hücreleri, güneş panelinin en önemli parçasıdır çünkü gelen güneş enerjisini elektriğe dönüştürür. Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Güneş ışığını emerek elektrik akımı üretirler ve bu sayede güneş panellerinde enerji üretimini sağlarlar [73].

2.3.2 İnvvertör

İnvvertör, güneş panellerinden gelen doğru akımı (DC) evlerde ve şebekede yaygın olarak kullanılan alternatif akıma (AC) dönüştürmektir. Buna ek olarak voltajı senkronize ederek evlerde kullanılan 230 V gibi uygun bir seviyeye dönüşmesini sağlamaktadır. Daha gelişmiş invvertörlerde bunlara ek olarak güneş panelinden maksimum güç miktarının elde edilmesi ve kullanılabilmesi de sağlanmaktadır. Bu, voltaj ve akım girişini zamana göre ayarlayarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede güç çıkışı optimal seviyede olur. İnvvertörlerin boyutu da yük ile orantılıdır; yani 3000 Wp'lik bir güneş kurulumuna sahip invvertör, 50.000 Wp'lik bir kurulumdan daha küçük olacaktır. Ayrıca, her bir PV paneline bağlanan mikro-invvertörler bulunmaktadır. Bu, tüm dizi bağlı PV panellerinden bağımsızlık sağlar. Bu, çünkü genellikle seri bağlı panellerin merkezi bir invertöre bağlı olduğu durumlarda, kısmi gölgelenme veya diğer dış nedenlerle tüm seri bağlı dizinin devre dışı kalmasına neden olabilmektedir [46].

2.3.3 Junction Box (Elektrik Tesisatı-Bağlantı Kutusu)

Elektrik tesisatı, dönüştürülmüş elektriğin kullanılmasını ve şebekeye dağıtılmasını sağlamaktadır. Panellerin arka tarafında kolay bağlantı imkanı sağlayan bir bağlantı kutusu (junction box) şeklinde panellere dahil edilmiştir ve bir hücre dizisini bağlamak için gerekli kabloları içerir. Bu junction box ayrıca, PV sisteminin farklı elektronik parçalarına giden sayaçlar ve kabloları da içerir. Hem işlevsel hem de estetik özelliklere sahiptir; örneğin, farklı panellerden/panel dizilerinden gelen giriş kablolarını düzenler, daha kolay bir PV panel değişimi veya bağlantısı sağlar. Ayrıca içerisinde PV sistemini yıldırımdan koruyan bir yıldırımdan koruyucu da bulunur. Tüm bunlara ek olarak karanlık koşullarda ters akımı engeller ve bu sayede güneş panellerini korur [46].

2.3.4 Enkapsulant Malzeme

Enkapsulant malzeme hücreleri kaplayarak akım kaybını önlemektedir ve ön cam ile hücreler arasında bir tampon görevi görerek ve cam kapaktan hücrelere gelen stresi azaltmaktadır. Hücrelerin ön ve arka kapak arasında sabit kalmasını ve hücrelerinde birbirinden ayrılmasını sağlamaktadır. Normal şartlarda hücreler ile gelen ışınım arasında bir tabakanın varlığı verimin düşmesine sebep olur ama,

ince kapsül malzemelerin özellikleri bu etkinin minimize edilmesini sağlar. Eva ve POE en çok kullanılan enkapsulant malzemelerdendir.

2.3.5 Ön Cam

Cam, hücreler ve çerçeve için yapısal ve koruyucu özellikler sağlamaktadır. Hücreler ile gelen güneş ışınımı arasında yer aldığından, mümkün olan en fazla ışığın cam kapaktan geçmesini sağlamak üzere tasarlanarak üretilmektedirler Dünya genelinde farklı cam kapak türleri bulunmaktadır. Bunlar elektrik üretimini artırmak, farklı müşterilere ve çeşitli PV teknolojilerine uyum sağlamak amacıyla optimize edilmiştir. Cam kapakların önemli özellikleri arasında yüksek güneş enerjisi geçirgenliği, camda düşük demir içeriği, anti-reflektif kaplama (AR-kaplama) ve yansımanın azaltılması, tutarlılığın ve dayanıklılığın artırılması yer almaktadır. Yüksek demir içeriği camda yeşillenme yaptığı için ışık geçirgenliğini azaltmaktadır. Bu sebeple düşük demir içeriğine sahip yüksek şeffaflıkta ön cam, yansımanın azaltılması amacıyla işlenir ve kaplanır [46].

2.3.6 Arka Yüzey

PV panellerde arka yüzey olarak genelde cam veya alüminyum çerçeve kullanılmaktadır. Cam, panelin arka yüzeyinde iyi bir ısı dağıtımını sağladığı için panelin sıcaklık dengesini korur ve verimliliği artırmaktadır. Yüzeyinde bulunan havalandırma delikleri veya ızgaralar, panelin yeterli soğumasını sağlamaktadır. Cam kullanılan panellerde genellikle temperli cam, lamine cam veya float cam kullanılmaktadır. Ancak float cam düşük maliyetli olmasına rağmen dayanıksız olduğu için çok tercih edilmemektedir. Temperli cam, ısı ve kimyasal işleme güçlendirilmiş bir cam türü olduğu için çatlamaya ve kırılmaya karşı daha dayanıklıdır. Panellerin arka yüzeyinde kullanıldığında, panelin yapısal bütünlüğünü sağlamaktadır. Lamine cam, iki veya daha fazla cam tabakasının arasında bir plastik tabaka (PVB) ile birleştirilmiş bir oluşumdur. Bu yapı, camın kırılması durumunda cam parçalarının dağılmasını engellediği için yüksek riskli bölgelerde tercih edilmektedir.

Alüminyum iyi bir ısı iletkenidir, bu nedenle çerçeve, panelin ısını yaymaya yardımcı olabilmektedir. Bu, panellerin daha iyi soğutulmasını ve verimliliğinin korunmasını sağlamaktadır. Ayrıca korozyona ve hava koşullarına karşı

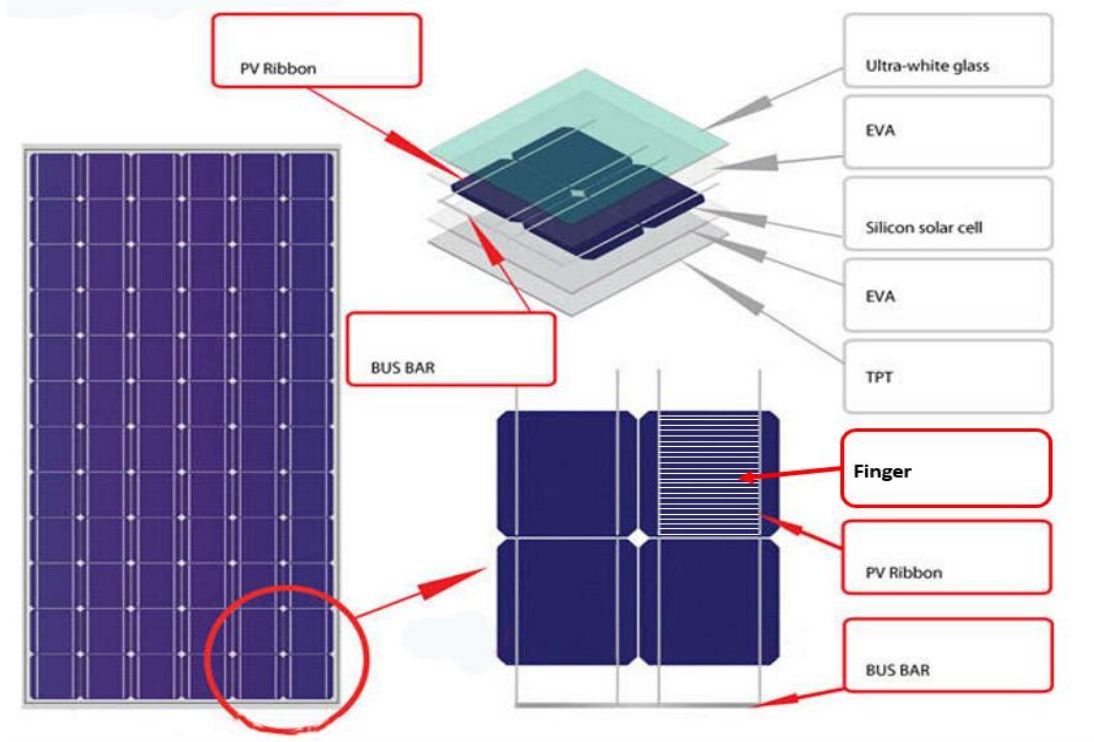
dayanıklıdır, bu da panelin ömrünü uzatmaya yardımcı olmaktadır. Alüminyum çerçeve, güneş panelinin arka yüzeyini desteklemektedir ve panelin tüm bileşenlerini bir arada tutmaktadır. Böylece panelin dış etkenlerden ve fiziksel darbelerden korunmasını sağlamaktadır. Ayrıca panelin düzgün bir formda kalmasını ve zamanla deforme olmamasını sağlamaktadır. Ek olarak hafif ve taşınması kolay bir metal olduğundan panelin ağırlığını çok arttırmaktadır. Bu da montaj ve taşıma işlemlerini kolaylaştırmaktadır.

2.3.7 Koruyucu Arka Kaplama

Panelin arka kaplaması, güneş panelinin uzun vadeli performansında büyük bir rol oynamaktadır. Bu kaplama, güneş panelini sert çevre koşullarından, nemden korur ve elektronik izolasyon sağlamaktadır. Dayanıklılığı, hafifliği ve ince olması panelin verimliliğini artırmaktadır.

2.3.8 Anti-reflektif Kaplama (AR-Kaplama)

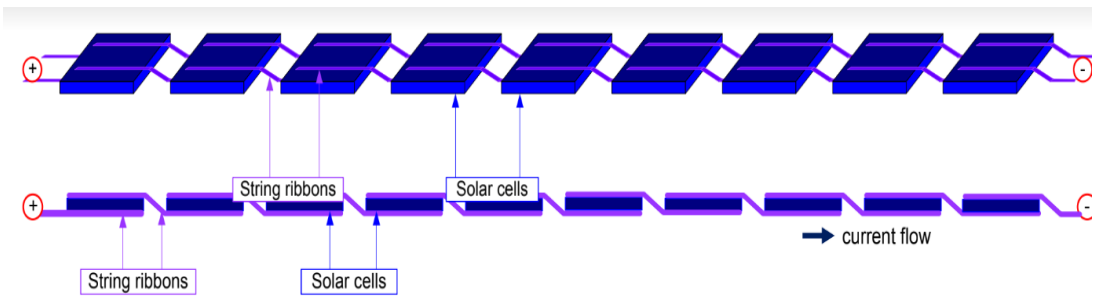
Bu kaplama, güneş ışığının yansımalarını azaltmaktadır ve ışığın geçişine izin vermektedir. Böylece güneş panelinin enerji çıkışını artırır. NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) tarafından yapılan bir AR-kaplama çalışması, PV modüllerinin genel performansında STC (standart test koşulları) altında %3,5-5 oranında bir artış sağladığını göstermiştir. Ayrıca, AR-kaplama, ön cam için koruyucu bir tabaka görevi görmektedir; çünkü özellikleri sayesinde sert hava koşullarına dayanıklıdır ve PV panelinin dayanıklılığını korumaktadır [46].



Şekil 2.3 Güneş panelinin kısımları

Şekil 2.3'te standart bir PV panelin kısımları gösterilmiştir. PV panelin, şekildedeki gibi dıştan içe doğru ana kısımları şunlardır;

- Cam
- Enkapsulant Malzeme
- Hücre
- Enkapsulant Malzeme
- TPT malzemeye veya Cam



Şekil 2.4 String yapısı

Şekil 2.4'te bir string kesiti gösterilmiştir. Bu yapı sayesinde elektriğin panel içinde akması sağlanır.

3

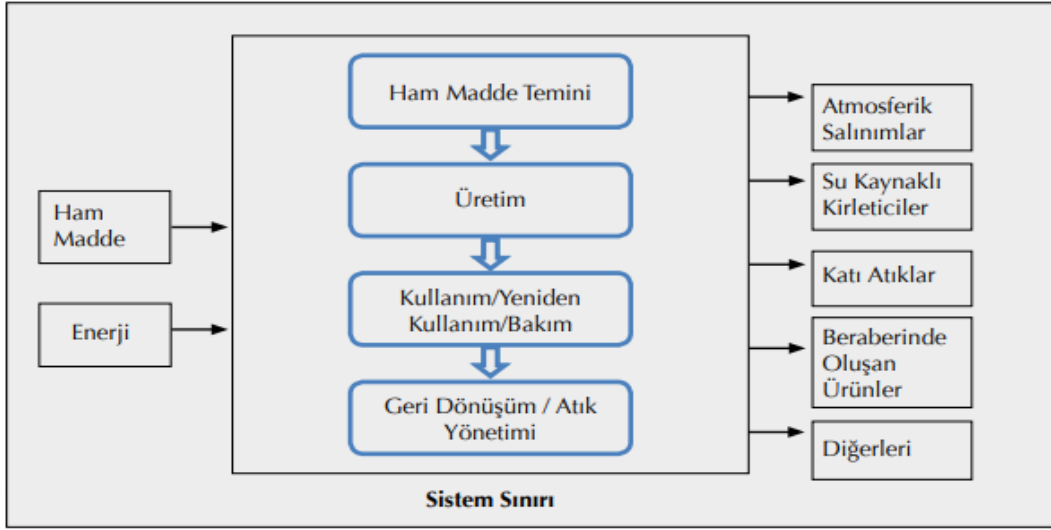
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (LCA)

3.1 LCA

Son yıllarda toplumsal duyarlılığın ve kaynak sorununun artması ile birlikte, üretim veya hizmet süreçlerinin, öncesinin ve sonrasında çevresel boyutları daha da önem kazanmıştır. Projelerin, maliyeti, karı ve performansının yanında yaratabileceği olası çevre sorunları ve doğal kaynak kullanımı gibi etkenler de önemli olmaya başlamıştır. LCA (Life Cycle Assessment) bu amaçla oluşturulan, 90'lı yıllarda popüler olan ve içinde bulunulan dönemin ilerleyen teknoloji ve değişen ihtiyaçlarına göre sürekli geliştirilen bir yöntemdir [74].

LCA yani Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, bir ürün yada hizmetin hammadde eldesinden başlayarak, üretim, sevkiyat, kullanım ve kullanım sonrası bertarafını kapsayan yaşam döngüsü boyunca kaynak verimliliğini, çevresel etkilerini ve atık oluşum miktarını ölçen değerlendirme ve derleme yöntemidir. Ürün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca girdilerinin, çıktılarının, potansiyel çevresel etkilerinin ve çevreye etkilerinin derlenmesi ve değerlendirilmesidir. Yani sistemin yaşam döngüsünün her aşamasındaki malzeme ve enerji akışını ölçerek çevresel etkiyi değerlendiren analitik bir yöntem bilimidir. Kullanılan ve atmosfere salınan madde ve enerjiyi bileşenleriyle birlikte ölçer ve sonra bu madde ve çevreye salınan enerjinin etkilerini değerlendirir. Yani genel olarak bir ürün veya hizmetin yaşam döngüsünün çevresel etkilerini ele alır. Alışılmış çevresel etki değerlendirmesinden farklı olarak, hammadde eldesi, sevkiyat, geri dönüşüm ve bertaraf gibi aşamalarda LCA kapsamında değerlendirmeye alınır. Hizmet veya ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkabilecek çevresel etkilerinin tüm boyutlarını değerlendirdiğinden çevreye olan etkileri çok kapsamlı ve açık olarak belirtilir. Ekonomik ve sosyal boyutlar ise her zaman olmasa da genellikle

LCA'nın kapsamı dışındadır. Şekil 3.1'de LCA'nın ne olduğunu özetleyen bir şemagösterimi verilmiştir.



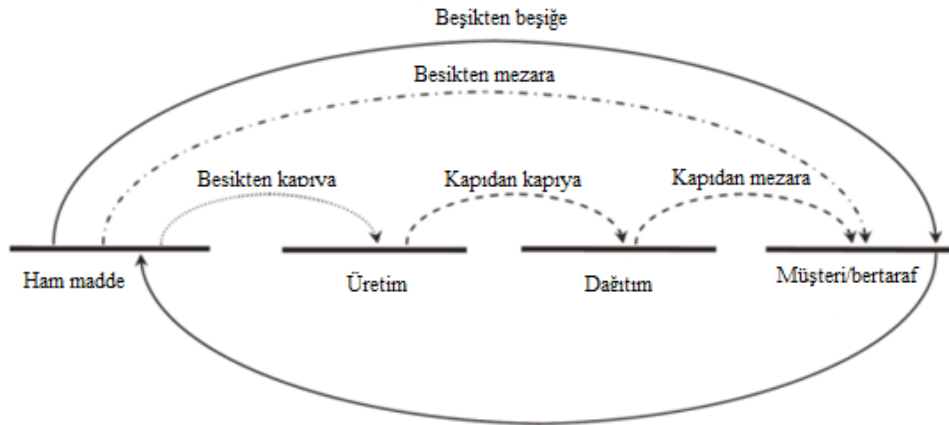
Şekil 3.1 LCA aşamaları [75]

Aslında LCA, Life Cycle Analysis kelimelerinin kısaltmasıdır. Ancak Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA), Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC) ve ISO şu anda LCA'yı, Assessment (değerlendirme) kelimesinin daha nicel bir anlam taşımasından dolayı "Life Cycle Assessment" olarak kullanmaktadır.

1990 yılında, SETAC LCA'yı, ürünün, sürecin veya faaliyetin çevreyle ilgili sorumluluklarını tanımlayarak ve nicelleştirerek, enerji, kullanılan materyal, çevreye salınan atıklar ve bu enerjinin, kullanılan maddelerin ve çevreye salınımların etkisinin değerlendirilmesi ve çevreye etkilerin iyileştirilmesini amaçlayan bir süreç olarak değerlendirmiştir. Bu değerlendirme, ham maddelerin çıkarılması, işlenmesi, üretimi, dağıtımı, kullan/tekrar kullan/bakım, geri dönüşüm ve bertarafını kapsayan ürünün, sürecin yada faaliyetin bütün yaşam döngüsünü içerir' olarak tanımlanmıştır. Ayrıca 1993 yılında LCA'nın amaçları, kapsam tanımı, envanter, yaşam döngüsü etki analizi ve yaşam döngüsünün iyileştirme analizleri eklenerek metodolojik çerçeveleri belirlenmiştir. Bu çerçeve LCA'nın ana methodudur ve hala süreç tabanlı LCA yönteminde kullanılmaktadır [76].

LCA'nın metodları, 1997 yılında ISO tarafından 14040 serileri ile standartlaştırılmıştır. Bu standarda göre LCA genel tanımıyla, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca, girdilerin, çıktılarının ve çevresel etkilerin derlenmesi ve değerlendirilmesidir. Yani ham maddelerin tedarik süreci, işlenmesi, geri

dönüşümü ve en son bertarafına kadar olan tüm süreci çevresel boyutlarda ve potansiyel çevresel boyutlarda inceler [46]. Tüm bu döngü, ISO tarafından 'beşikten mezara' olarak benzetilmiştir ve bu yaklaşım terim olarak ISO 14040 standardı metninde doğrudan kullanılmıştır. Bu benzetmeden yola çıkarak ele alınan aşamalara göre 'beşikten kapıya', 'kapıdan kapıya' ve 'beşikten beşiğe' yaklaşımları ortaya çıkmış ve literatüre girmiştir. 'Beşikten kapıya' yaklaşımı hammadde eldesinden üretim sonuna yani müşteriye gönderilecek duruma gelmesine kadar ki olan süreci ele alır. 'Kapıdan kapıya' yaklaşımı bir ürünün yaşam döngüsündeki tek bir aşamanın ya da sürecin incelenmesidir [22]. Yani, sadece belirli bir üretim süreci, bir tesis ya da üretim hattındaki işlemler değerlendirilir. Kısaca üretimin başlangıcındaki ham madde tedarikinden veya sonrasındaki atık yönetimi gibi aşamalardan bağımsız olarak, yalnızca o belirli aşama incelenir. 'Beşikten beşiğe' yaklaşımı ise hammadde eldesinden yeniden kullanım veya geri dönüşüm sürecinin ele alınmasıdır. Yani bu yaklaşım atık sürecini ele almaz ve daha çok dögüsel ekonomi bakış açısında ele alınır. Bu benzetmeler bilimsel makale ve çalışmalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. LCA analizi yaklaşımlarınının şematik bir gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 LCA analizleri yaklaşımları

ISO14040 standardı dönemin gelişen ve değişen teknoloji ve ihtiyaçların göre ISO tarafından 14040:1997, ISO 14041:1998, 14042:2000, 14043:2000 adlarıyla revize edilmiştir. Şuan LCA ile ilgili yürürlükte olan güncel standartlar ISO 14040:2006 ve ISO 14044:2006'dır [14]. Ülkemizde de bu standartlar Türk Standartları Enstitüsü tarafından TS EN ISO 14040 ve TS EN ISO 14044 olarak uyarlanmıştır. Ayrıca, ISO 14000 standart serileri de doğal kaynak kullanımının

azaltılması, toprağa, suya, havaya verilen zararların minimum düzeye indirilmesini amaçlayan çevre yönetim sistemleri standartları olarak LCA ile ilişkilendirilebilir.

Bazı kurumlarda kendi LCA'larını tanımlamışlardır. Örneğin; Amerika Çevre Koruma Ajansı'na göre (EPA) LCA, ürün, süreç veya hizmetle ilgili potansiyel etkileri ve çevresel boyutları, ilgili enerji, girdi maddeleri ve çevresel salınımların envanterlerini, tanımlı girdiler ve salınımlarla ilgili potansiyel çevresel etkileri derleyerek sonuçları daha bilinçli karar vermeye yardımcı olarak yorumlayan bir tekniktir [76]. Tüm bu tanımlamalardan ISO, EPA ve SETAC'ın dikkat çektiği şeyin LCA'nın doğru hesaplanabilmesi için sürecin girdi ve çıktılarının net olarak bilinmesi gerektiği olduğu sonucunu çıkarabiliriz.

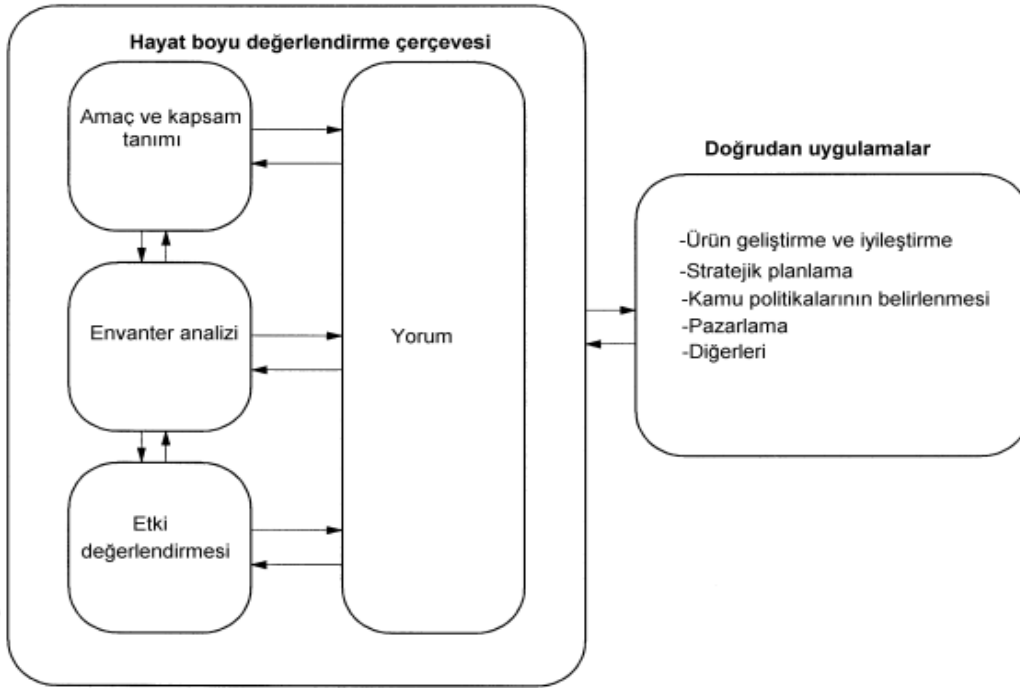
3.2 LCA'nın Tarihi

LCA, ilk kez, 60'lı yılların sonunda Coca-Cola firması tarafından, kaynakların tüketimi ve içecek kutularının emisyonlarının ölçülmesi amacıyla uygulanmıştır. Coca-Cola, sadece içecek kutularının çevreye etkileriyle değil hammaddelerin, üretimin, ürünün ve bunların nakliyesinin etkileriyle de ilgilenmiştir. Bu bakış açısı çevre etkileri ile ilgili ilki teşkil etmiş ve LCA'yı ortaya çıkarmıştır [70].

LCA'nın 60'lı yıllarda ortaya çıkmasının sebebinin, bu yıllarda, yaşanan petrol krizi ve hızlı nüfus artışının ülkelerde yarattığı endişe olduğunu belirtebiliriz. Çünkü petrol krizi ve hızlı artan nüfus, ülkelerde kaynak endişesini meydana getirerek çevre hareketlerine yol açmıştır.

LCA aşağıdaki dört adımdan oluşur (Şekil 3.3) [77];

- Amaç ve kapsam tanımlama
- Yaşam döngüsü envanter analizi
- Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi
- Yorumlama



Şekil 3.3 LCA metodolojisi [78]

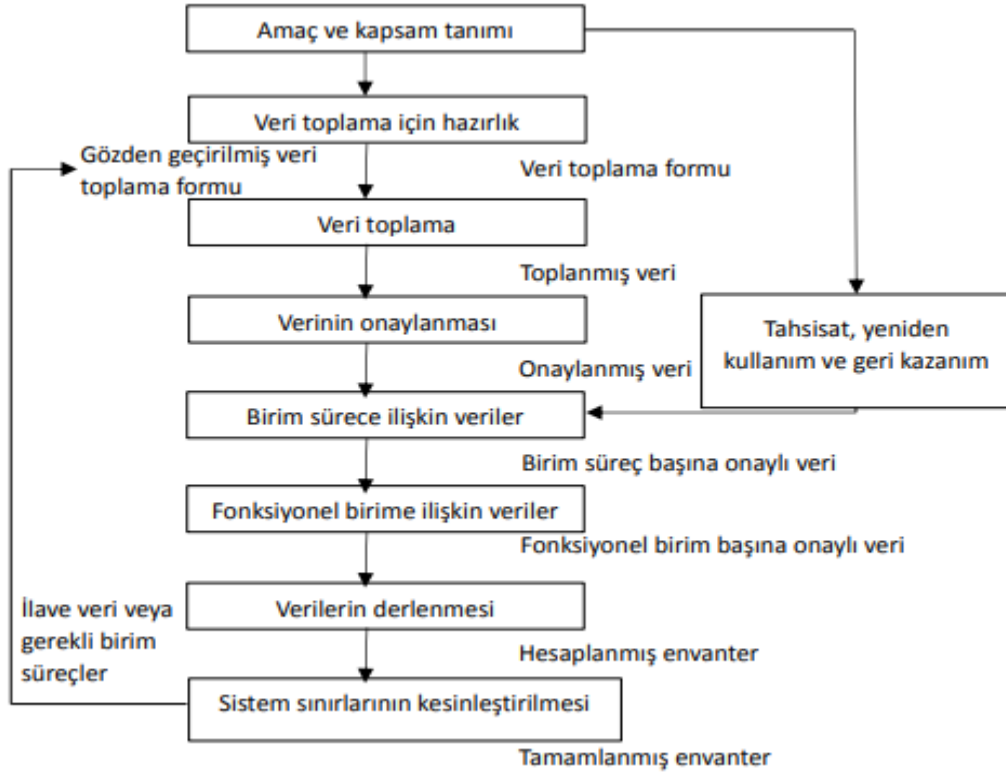
LCA'nın Şekil3.3'te görülen her aşaması diğer aşamalarının sonuçlarını kullanır. Aşamaların arasındaki yaklaşım, sonuçların kapsamlı ve tutarlı olmasını sağlar.

3.2.1 Amaç ve Kapsam Tanımı

Çalışmanın, amacını, sistemin sınırını ve detaylandırma düzeyini niteliksel ve niceliksel olarak tanımlamaktır. Üzerinde çalışılacak ürün veya hizmetin işlevi, ilgili çalışmanın nedeni, ihtiyaç duyulan veriler, sistem sınırları ve hedef kitle belirlenir. Ayrıca coğrafi referans ve zaman da oluşturulur [75].

3.2.2 Envanter Analizi

Sistemde kullanılan hammadde, enerji, su kullanımı ve bunların çevre salınımları belirlenir [75]. Envanter oluşturma aşamaları Şekil 3.4' de akış şeması halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Yaşam döngüsü envanter oluşturma aşamaları [79]

3.2.3 Yaşam Döngüsü Etki Değerlemesi

Envanter analizi belirlendikten sonra envanterdeki değerlerin göstergelerini kullanarak insan sağlığı ve çevre üzerindeki olası etkileri değerlendirilir [75]. Bu değerlendirmeleri yapmak için birçok LCA analiz metodu mevcuttur. İhtiyaca ve eldeki verilere yönelik olarak seçilen en uygun metoda göre etki değerlendirmeleri analiz edilir.

3.2.4 Yorumlama

Otoriteler ve LCA üzerinde çalışanlar tarafından en önemli adım olarak belirtilir. Üç aşama boyunca elde edilen sonuçlar, projenin amacı bağlamında değerlendirilir. Sonuçların üçüncü taraf gözetim firması tarafından eleştirel bir yaklaşımla değerlendirilip karşılaştırma yapılanlar arasında ürün, süreç ya da hizmet seçimi yapılır. Bu seçim yapılırken potansiyel ve var olan belirsizlikler de LCA kapsamında belirtilir [75].

3.3 Yaşam Döngüsü Değerlemede (LCA) Kullanılan Bilgisayar Programları

LCA analizleri için Dünya genelinde çok sayıda program geliştirilmiştir. Bunlardan en bilinen ve kullanılanları Tablo 3.1'de web sayfaları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 3.1 LCA analizi programları [80]

Program İsmi	Üretici Firma	İnternet Sitesi
SimaPro	PréConsultants	https://simapro.com/
GaBi	Sphera	https://sphera.com/solutions/product-stewardship/life-cycle-assessment-software-and-data/
OpenLCA	GreenDelta	https://www.openlca.org/
Umberto	İfu Hamburg	https://www.ifu.com/umberto/
Idemat	Delft University of Technology	https://idematapp.com/
Quantis Suite	Quantis	https://quantis.com/news/use-life-cycle-assessment-map-organizations-future/
BImpact	British Standards Institution	https://www.bsigroup.com/globalassets/localfiles/en-us/whitepapers/consulting/bsi-product-carbon-footprints--life-cycle-assessments.pdf
SustainableMinds	SustainableMinds	http://www.sustainableminds.com/software

Tablo 3.1 LCA analizi programları (devamı) [80]

PRéSustainability	PréConsultants	https://pre-sustainability.com/solutions/consulting/sustainable-products/life-cycle-assessment-lca/
REGIS	Sinum AG	https://sinum.com/en/regis-corporate-ecoperformance
TEAM	EcobilanPricewaterhouseCoopers	http://ecobilan.pwc.fr/en/team/index.jhtml

Ülkeler, kendi ulusal verilerini oluşturmaktadır. Ülkemizde de bu amaçla geliştirilmekte olan iki LCA veri tabanı mevcuttur. Bunlardan biri Türkiye Yapı Malzemeleri Çevresel Performans Veri Tabanı (TurCoMDat), diğeri ise Türkiye Yaşam Döngüsü Veri Tabanı'dır (TLCID). TurCoMDat, en yaygın kullanılan veri kaynakları arasında yer alan Çevresel Ürün Beyanları (EPD)'ndan oluşmaktadır. EPD verileri, her ne kadar birçok çevrimiçi kaynakta bulunsa da henüz okunabilir bir formatta değildir. Bu nedenle, TurCoMDat veri tabanının herhangi bir LCA yazılım aracı içinde kullanımı şu aşamada mümkün değildir. TLCID ise, SimaPro yazılımı ile uyumludur ama sadece 400 ürün için veri tabanı mevcuttur. Bu sebeple yapılacak LCA çalışmasının kapsamını sınırlandırdığından tercih edilmemektedir.

Tüm bu programlar arasından, System for Integrated Environmental Assessment of Products adlı (SimaPro) program, 1990 senesinde PreConsultant adlı Hollandalı bir yazılım firması tarafından oluşturulmuştur ve günümüzde LCA analizlerinde en yaygın kullanılan programdır. Karbon ayak izi, sera gazı emisyonu, ozon tabakasına etkisellik, ürün eko-tasarım, çevresel ürün beyanları ve ürün çevre performans göstergelerinin belirlenmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Program, birçok etki kategorilerini ve veri tabanlarını kullanır ve daime güncel tutulan ve en çok bu alanda en çok kullanılan veritabanı olan Ecoinvent veritabanına sahip olmanın yanında ISO 14044-4, PAS2050 ve GHG protokolü ile uyumludur ayrıca karbon envanterini de hesaplayabilmektedir. Ayrıca Avrupa Yaşam Döngüsü Veritabanı (ELCD), Amerika Yaşam Döngüsü

Veritabanı (US.LCI), Breeze, Karbon ve Enerji Envanterleri (ICE) gibi veritabanlarını da sahiptir.

SimaPro'daki LCA analizleri, bütün yaşam döngüsüne ek olarak, ürün ömrünün sona ermesinden sonraki bertaraf ve geri dönüşüm aşamalarını kapsayan senaryoları da içerebilmektedir. Program analiz sonuçlarını hem metin hem de grafik olarak ortaya koymaktadır. Analiz kısmı; sera gazı etkisi, enerji, hava, ozon tüketimi, katı atık gibi etki kategorilerini içerirken süreç kısmında; zaman ve tedarik zinciriyle birbirine bağlanarak akış şemaları oluşturulmaktadır. Yazılım; kullanıcılara bu akıştaki zayıf noktaları göstermektedir.

Monte Carlo analizi adını Monte Carlo şehrinde alan karmaşık sistemlerin veya süreçlerin belirsizliklerini ve risklerini değerlendirmek için kullanılan bir simülasyon tekniğidir. Bu yöntem, rastgele örnekleme ve istatistiksel analiz kullanarak belirsiz durumların sonucunu tahmin eder. SimaPro da Monte Carlo analizi yapabilme özelliğine sahiptir [34].

SimaPro kullanıcılar tarafından kendi halinde öğrenilebilmesi ve ISO 14040 Standardını izleyebilmesi gibi özellikleri nedeniyle çevresel etkilerin anlaşılması ve sürdürülebilirlik hedefleri için bu alanda kullanılan en yaygın yazılımdır [79]. Bu tezdeki analizler de SimaPro yazılımının SimaPro9.6.0.1 sürümü kullanılarak yapılmıştır.

SimaPro birçok etki değerlendirme metoduna sahip bir programdır. Bunlar; Centrum voor Milieukunde Leiden (CML), Eco-indicator 99, IMPACT 2002+, EDIP, ReCiPe, IPCC, World Steel LCA Method, AWARE, TRACI, Usetox, ILCD, LIME ve EU Environmental Footprint vb. metodlarıdır. Yapılacak çalışmanın amacına, eldeki verilere, etki değerlendirme düzeyine, yapılacak analizde lokasyon etkisi varsa lokasyona ve çevresel etkilerden hangisinin üzerinde yoğunlaşılacağına göre hangi metodun kullanılacağı seçilmektedir [81]. Bu tez çalışmasında yapılan analizde CML metodu kullanılmıştır. Bu metodun CML-IA baseline V3.10 / EU25 versiyonu kullanılmıştır. Bu metod Hollanda'da bulunan Lieden Üniversitesi Çevre Bilimleri Merkezi tarafından oluşturulmuştur. Midpoint denilen seviyede etki değerlendirme sunmaktadır. Endüstriyel alanlarda sürdürülebilirlik raporları sağlayarak ürün geliştirme ve çevre izlemeye yardımcı olabildiği için tercih edildiği gözlenmiştir. Çevresel etkenlerin sonuçlarından

ziyade göstergelere odaklandığı için ve Avrupa’da geniş yelpazede kabul gördüğü için de akademik çalışmalarda diğer metotlara göre daha fazla tercih edildiği gözlenmiştir. Genellikle Ecoinvent veritabanından beslenir [81]. Bu tez çalışmasında da Ecoinvent veri tabanı kullanılmıştır.

3.4 CML Metodu Etki Değerlendirme Kategorileri

LCA analizlerinde kullanılan yöntemlere göre birçok etki değerlendirme kategorisi vardır. Bu tez de kullanılan CML metodunun kapsadığı etki değerlendirmeleri aşağıdaki gibidir.

- Abiyotik tükenme
- Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)
- Küresel ısınma (GWP100a)
- Ozon tabakası incilmesi (ODP)
- İnsan toksisitesi
- Tatlı su sucul ekotoksosite
- Deniz sucul ekotoksosite
- Karasal ekotoksosite
- Fotokimyasal oksidasyon
- Asidifikasyon
- Ötrofikasyon

3.4.1 Abiyotik Tükenme

Abiyotik kaynaklar, en genel tanımıyla canlı olmayan doğal varlıkları tanımlamak için kullanılmaktadır. Yani modern dünyanın devamı için en etkili faktörlerin başında gelmektedir. Bu nedenle abiyotik kaynak tükenimi en önemli çevresel faktörlerden birisidir. LCA analizlerinde, doğal kaynakların (petrol, demir cevheri vb.) tüketimini ifade eden etki kategorilerinden biridir. Küresel, bölgesel ve yerel etki boyutuna sahiptir ve kullanılan mineral miktarını ve kullanılan fosil yakıt miktarını ifade eder. Birim olarak kg Antimon (Sb) cinsinden ifade edilmektedir. Abiyotik tükenme fosil yakıt olarak ise LCA analizlerinde MJ birimi ile ifade edilmektedir.

3.4.2 Küresel Isınma (GWP100a)

Küresel Isınma, Atmosferde sera gazları tarafından oluşturulan ve ısının tutulmasına neden olan yalıtım tabakası nedeniyle Dünyanın ısınması olarak tanımlanmaktadır. Dünya'ya düşen güneş ışınımının yaklaşık %30'u atmosferdeki parçacıklar, hava içindeki su buharı, yer yüzeyi ve su yüzeyleri aracılığıyla uzaya geri yansımaktadır. Geri kalan enerji, gezegeni yaşam için gerekli sıcaklıkta tutmaktadır ve Dünya'nın yüzeyi ısınmayı dengelemek için ısı enerjisini uzaya, genellikle infrared dalgalar şeklinde yaymaktadır. Bu ısı radyasyonu, Karbondioksit, Metan (CH₄), Azot Oksitleri, Su buharı, kloroflorokarbonlar (CFC) ve diğer sera gazları tarafından emilmektedir [74].

1988'de İsviçre Cenevre'de iklim değişikliği ile ilgili bilimsel çalışmaları yapmak, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)'ne iklim değişikliği ve politikalarıyla ilgili konularda amaçlarına uygun bilgi vermek ve belirli konularda özel rapor ya da teknik değerlendirmeler hazırlamak amacıyla kurulan Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin 2022'de yayınladığı raporda, sera gazlarındaki artışın 2100 yılına kadar yüzey ortalama sıcaklığında 3,2 °C küresel ısınmaya neden olacağını beklendiği açıklanmıştır. Yapılan tüm bilimsel çalışmalar sonunda sürdürülebilir kalkınma ve kuraklığı dolayısıyla yoksulluğu önlemek için kritik sınır ise 1,5 °C olarak kabul edilmektedir. Bu sınırı geçmemek için küresel emisyonları 2030 yılında 2010 yılına göre %45 azaltmak ve 2050 yılında net sıfır emisyona ulaşılması gerekmektedir. Ancak şu anda ülkelerin verdiği taahhütler 1,5 °C sınırını sağlamamaktadır. Bu sebeple politikacıların ve ülke yöneticilerinin yeni düzenlemeler yapması gerekmektedir [82]. LCA analizlerinde kg CO₂eq birimi ile ifade edilmektedir.

3.4.3 Ozon Tabakası İncelmesi (ODP)

Ozon tükenimi en genel anlamıyla Stratosfer katmanında bulunan ozon tabakasının incelmesidir. Ozon tabakası, Güneşten gelen ultraviyole (UV) ışınlarını emerek bu ışınların Dünya'ya ulaşma miktarını azaltır. Yani Dünyayı UV ışınlarından koruyan bir tabaka görevindedir. Ozon tabakasının incelmesi doğal olarak bu korumayı azaltır. Bu tabakanın incelmeye sebep olan en önemli maddeler şunlardır; Kloroflorokarbonlar (CFC'ler), halonlar, klorlu metanlar,

Hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler), Hidroflorokarbonlar (HFC'ler), metil bromür ve nitrat oksitler. Bu maddeler, Stratosfere ulaştıklarında çeşitli kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ozon moleküllerini yok eder böylece bu koruyucu katmana zarar verirler [83].

PV sistemlerin Ozon tüketim potansiyeli endüstriyel faaliyetlere göre çok daha düşüktür. PV panellerin başlıca hammaddelerinden olan Silisyum (Si), Galyum (Ga), İndiyum (In), Kadmiyum (Cd) gibi maddelerin eldesi ve işlenmesi yüksek enerji gerektiren süreçlerdir ve ozon tabakasını inceltici bazı bileşiklerin salınımına neden olmaktadır ayrıca bertaraf, geri dönüşüm, lojistik süreçleri de ozon tabakası tüketimine neden olmaktadır. Ancak tüm bunlar diğer endüstriyel işlemlere kıyasla çok az miktardadır. Hatta PV sistemler enerji üretirken güneş ışığını doğrudan enerjiye çevirdiklerinden ozon tabakası tüketimini azaltma konusunda avantaj sağlamaktadırlar [47]. LCA analizlerinde kg CFC-11 birimi cinsinden ifade edilmektedir.

3.4.4 İnsan Toksisitesi

İnsan toksisitesi potansiyeli (HTP), insan sağlığını etkileyen bileşenleri temsil eder. Bu kategori, çok sayıda madde ve bunların belirli bir konsantrasyondaki etkilerini incelediği için karmaşıktır. HTP, bir toksik bileşen, etki alanı açısından ele alınır ve bu etki sonsuz bir zaman dilimi boyunca değerlendirilir. Bu etki kategorisindeki tüm bileşenler, kg 1,4-DB-eq (kg 1,4-diklorobenzen eşdeğeri) olarak hesaplanır ve sunulur. İnsan toksisite potansiyeli, LCA analizi değerlendirme endeksleri arasında en belirsiz ve tartışmalı olanıdır.

PV sistemler insan toksisite potansiyeli için baskın bir kaynak değildir. Ancak PV sistemlerin tüm yaşam döngüsü ele alındığında çatı montajı, inverter, elektrik tesisatı üretimi, geri dönüşüm ve bertaraf insan toksisite potansiyeline daha fazla katkıda bulunur. İnverter ve çatı montajı kaynak kullanımını açısından baskın süreçlerdir. Alüminyum, kadmiyum ve silikonun hammadde eldesinden işlenmesine kadar olan kullanıldığı süreçlerde bu metallerin kazılması ve işlenmesi, çevreye sızıntılara yol açabilir ve bu da insan toksisite potansiyeli daha yüksek sonuçlara neden olmaktadır. Ayrıca, metaller işleme aşamalarında çalışanların metallerle yakın teması sırasında insan toksisitesine doğrudan katkıda bulunmaktadır [46].

3.4.5 Ekotoksosite

Ekosistemin kalitesi, tatlı su, deniz ve kara alanlarında kaybolan türlerin yüzdesiyle ifade edilmektedir. Bu yüzde değeri ekotoksositeyi ifade etmek için kullanılan bir parametredir [84]. Bu çalışmada kullanılan CML metonunda tatlı su sucul ekotoksosite, deniz sucul ekotoksosite ve karasal ekotoksosite etki değerlendirmeleri analiz edilmiştir.

3.4.5.1 Tatlı Su Sucul Ekotoksosite

Tatlısu Ekotoksitesisi, toksik maddelerin havaya, suya veya toprağa karışımı sonucu Tatlısu ekosistemine olan etkileri ifade eder. LCA analizlerinde kg 1,4-DB eşdeğeri birimiyle ifade edilmektedir [85].

3.4.5.2 Deniz Sucul Ekotoksosite

Deniz ekotoksitesisi, toksik maddelerin deniz ekosisteminde yarattığı etkileri ifade etmektedir. LCA analiz çalışmalarında, kg 1,4-DB eşdeğeri birimi ile ifade edilmektedir [85].

3.4.5.3 Karasal Ekotoksosite

Karasal ekotoksosite, çevreye salınan toksik maddelerin karasal ekosistem üzerinde yarattığı etkileri ifade etmektedir. LCA analizlerinde karasal ekotoksosite kg 1,4-DB eşdeğeri cinsinden ifade edilmektedir [85].

3.4.6 Fotokimyasal Oksidasyon

Fotokimyasal ozon oluşum potansiyeli (POCP) değerleri, havada bulunan maddelerin atmosferik oksidan oluşturma potansiyelini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Belirli bir uçucu organik bileşenden üretilen ozon miktarı, eşit büyüklükteki etilen emisyonundan üretilen ozon miktarına bölünerek tahmin edilen bir büyüklüktür. LCA analizlerinde kg C₂H₄ eşdeğericinsinden ifade edilmektedir [84].

3.4.7 Asidifikasyon

Asidifikasyon potansiyeli, genellikle SO₂, NO_x, CO₂, NH₃ ve CFC gibi asidik bileşenlerin atmosfere salınımını ifade etmektedir. Atmosferde asidik yağışlara

neden olarak ekosistemlerde asidifikasyon etki yaratırlar. Bu bileşenlerden SO₂ ve NO_x etkileri diğer bileşenlere göre daha belirgindir. Bu sebeple atmosferdeki kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) asidifikasyonun değerlendirilmesinde kullanılır[86]. Asidifikasyon, çevrenin pH seviyesinin düşmesi ve asidik koşulların ortaya çıkmasını ifade etmektedir. Yani asidifikasyon potansiyeli, bir üretim sürecinin ya da bir maddenin, çevrede asidik etkilere yol açma kapasitesini göstermektedir. Kilogram cinsinden kükürt dioksit eşdeğeri (SO₂-e) veya azot dioksit eşdeğeri (NO₂-e) olarak ifade edilir.

PV sistemlerde silikon üretiminde ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklıklar ve enerji, fosil yakıtların kullanımını gerektirir. Bu, kükürt dioksit (SO₂) ve azot oksitler (NO_x) gibi asidifikasyon potansiyeline sahip gazların salınımı anlamına gelmektedir. Bu gazlar, atmosferde birikir ve asidik yağışlara yol açar, bu da toprak ve su kaynaklarını asidize eder. Ayrıca PV bileşenlerinin ve panellerinin nakliyesinde kullanılan taşıtlarda genellikle dizel veya benzinle çalışır bunlarda SO₂, NO_x emisyonlarına yol açar. Ama bu emisyonlar üretim aşaması göre daha az miktarlardadır. Ek olarak PV sistemin kurulumu, montajı, bakımı ve bakımı esnasında kullanılan makineler ve ekipmanlar da az miktarda da olsa asidifikasyona sebep olan emisyonlar üretmektedirler. Yani en fazla asidifikasyon potansiyeline neden olan kısım üretim malzeme üretimi ve panel üretim aşamasıdır. Bu nedenle üretim hattındaki iyileştirmeler asidifikasyon potansiyelini büyük oranda düşürecektir [75].

3.4.8 Ötrofikasyon

Ötrofikasyon potansiyeli, çevrenin özellikle azot (N) ve fosfor (P) gibi besin maddeleri ile aşırı derecede zenginleşmeyi ifade etmektedir. Bu durum, su ekosistemlerinde aşırı alg büyümesine (alg patlaması) ve diğer ekosistem sorunlarına sebep olmaktadır. Ötrofikasyonun en önemli etkisi su ortamındaki canlı yaşamını sona erdiren oksijen azalmasıdır. Oksijen, ölmeye başlayan fitoplankton kütlelerini tüketen bakteriler nedeniyle de azalabilmektedir. Ötrofikasyonun bir diğer önemli etkisi su ortamına güneş ışığının penetrasyonunun engellenmesidir. Güneş ışığı fotosentezin önemli bir parçası olduğu için derinlerde yaşayan su canlılarının aktivitelerini ve dolaylı olarak su ekosistemini tehlikeye sokacaktır. Ötrofikasyon süresince yayılan toksik

bileşikler, başta kabuklu su canlıları olmak üzere diğer birçok su canlısı, insan ve hatta hayvan sağlığı için zararlı etkiye sahiptir. Bu sebeple LCA analizlerinde incelenen bir endekstir ve su kalitesi yönetimi ve ekosistem sağlığının korunması açısından önemli bir kavramdır.

PV sistemlerde doğrudan ötrofikasyon potansiyeli yoktur ancak hücre üretim aşamasında kullanılan kimyasallar, bakım ve temizlik aşamasında kullanılan kimyasallar ve geri dönüşüm ile bertaraf aşamasında ortaya çıkan bazı işlemler nedeniyle dolaylı olarak çok az miktarda ötrofikasyon potansiyeli olabilmektedir. LCA analizlerinde kg PO₄ birimi cinsinden ifade edilmektedir [87]. Tüm bu etki faktörlerine ek olarak günümüzde çevresel etkilere duyarlılığın artmasıyla aşağıdaki konular da önem arz eder hale gelmiştir.

3.5 Karbon Ayak İzi

Karbon ayak izinin azaltılması iklim değişikliği ile mücadeledeki önemli adımlardan biridir. Karbon ayak izi yani karbon emisyonu doğrudan yada dolaylı olarak doğaya salınan toplam karbondioksit miktarını ölçmek demektir.

PV sistemlerde karbon ayak izi oldukça azdır PV sistemin kullanım ömrü boyunca kilovat-saat başına salınan karbondioksit miktarı ve diğer sera gazlarına eşdeğerleri ile tanımlanmaktadır.

$$\text{Karbon Ayak İzi (gCO}_2\text{-eş/kWh)} = \frac{\text{Toplam salım (g/CO}_2\text{-eş)}}{\text{Ömür boyu üretilen toplam elektrik miktarı (kWh)}}$$

Gelişen teknoloji ve üretim sürecinde yapılan hammadde tasarrufu sayesinde PV panelin karbon ayak izi son 10 yıla göre yaklaşık %50 azalmıştır. PV sistemler çalışmaları süresince herhangi bir sera gazı emisyonu yaymazlar dolayısıyla da bu aşamada karbon ayak izi oluşturmazlar. Tüm salınımlar üretim aşamasında ve kullanım ömrü sonundaki geri dönüşüm ve bertaraf süreçlerinde açığa çıkmaktadır. Bu alanlardaki gelişmeler arttıkça karbon ayak izinin daha da azalacağı öngörülmektedir [79].

3.6 Sera Gazı Emisyonu

Sera Gazı, atmosfere yayılan, küresel ısınmayı ve iklim değişikliğini olumsuz olarak etkileyen tüm gazlardır. En yaygın sera gazları; Karbondioksit (CO₂),

Metan (CH₄), Azot Oksitler (NO_x), Kloroflorokarbonlar (CFC'ler) ve diğer Halojenli gazlardır. Aşağıda bir PV sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya doğrudan sera gazları aşama aşama verilmiştir.

- Karbon Dioksit (CO₂): Malzeme üretiminden taşıma, kurulum, işletme ve bertarafa kadar birçok aşamada salınır.
- Metan (CH₄): Özellikle atık yönetimi ve üretim sürecinin bazı aşamalarında ortaya çıkmaktadır.
- Azot Oksitler (NO_x): Enerji üretimi, inşaat ve üretim aşamasının bazı süreçlerinde açığa çıkmaktadır.
- Hidroflorokarbonlar (HFC'ler): Soğutma ve bazı kimyasal işlemlerde açığa çıkmaktadır.
- Kloroflorokarbonlar (CFC'ler): Eski süreçlerde ve bazı üretim aşamalarında salınmaktadır.
- Perflorokarbonlar (PFC'ler): Batarya üretimi sırasında ortaya çıkmaktadır.
- Karbon Monoksit (CO): Taşıma araçlarından salınmaktadır.
- Volatilit Organik Bileşenler (VOCs): Taşıma ve üretimin bazı kısımlarında bulunur [88].

3.7 Su Ayak İzi

Su ayak izi, PV sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca olan süreçlerindeki kullanılan toplam su miktarını ifade etmektedir. Kullanılan suyun çeşidine göre Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yeşil, mavi ve gri su ayak izi olarak ayrılmaktadır



Şekil 3.5 Su ayak izi türleri [89]

Bunlara ek olarak bazı kaynaklarda siyah su ayak izi de vardır genel olarak gri su ayak izi ile birleştirilmektedir.

3.7.1 Mavi Su Ayak İzi

Genel anlamda yeryüzündeki ve yeraltındaki su kaynaklarından tüketilen su miktarını ifade etmektedir. Yani suyun doğrudan çekilmesi ve tüketilmesi demektir.

PV sistemlerin yaşam döngüsü boyunca kullanılan toplam sudan;

- Silikonun yüksek saflıkta üretilmesi, soğutulması ve temizlenmesi işlemleri gereken büyük miktardaki su
- Camın eritilmesi ve işlenmesi sırasında kullanılan su ile soğutma ve temizlik işlemleri için kullanılan su
- Metal bileşenlerin işlenmesi, soğutulması ve temizlenmesi amacıyla kullanılan su
- Geri dönüşüm süreçlerindeki, özellikle malzemelerin temizlenmesi ve ayrıştırılması sırasında kullanılan su
- Taşıma, kurulum ve bakım aşamalarında kullanılan diğer süreçlere göre daha minimal miktarda kullanılan suların toplamı mavi su ayak izini oluşturmaktadır [87].

3.7.2 Yeşil Su Ayak İzi

Yeşil su ayak izi, tarımda kullanılan doğal yağış suyunu ifade etmektedir ve PV sistemlerle doğrudan yeşil su ayak izi oluşmaz ama PV sistemlerinin üretim aşamasında kullanılan malzemelerin tarımsal ürünlerle (örneğin, bazı özel kaplamalar veya malzemeler) ilişkili olması durumunda dolaylı etkiler olabilir.

3.7.3 Gri Su Ayak İzi

Kirli suyun, özellikle bir ürünün üretim sürecinde kirlenmiş suyun temizlenmesi için gerekli olan su miktarını ifade etmektedir. Yani kirli suyun arıtılması için gereken su miktarı demektir. Atık suyun yönetimi ve dönüşümü için gereken su miktarı ise bazı kaynaklarda siyah su ayak izi olarak ayrılabilir da genel olarak gri su ayak izi içerisinde tanımlanmaktadır. PV sistemlerde, geri dönüşüm sırasındaki atık suyun arıtılması ve temizlenmesi sürecine ek olarak silikon ve cam üretiminde kullanılan suyun belli miktarı da süreç sırasında kirlenmektedir bu

suyun temizlenmesi için gereken su miktarı dahil bunların hepsi gri su ayak izini oluşturmaktadır [87].



4.1 Materyal Metot ve Panelin Karakteristik Özellikleri

Bu çalışmada, aşağıdaki Tablo 4.1'de özellikleri verilen güneş panelinin üretim aşamalarının LCA analizi yapılmıştır. LCA analizi ise SimaPro programının SimaPro9.6.0.1 sürümü, Ecoinvent veritabanı ve CML metodunun CML-IA baseline V3.10 / EU25 versiyonu kullanılarak 'beşikten kapıya' yaklaşımı ile yapılmıştır.

Program analizlerin sonuçlarını karakterizasyon ve normalizasyon olarak verebilmektedir. Karakterizasyon, her bir etki değerlendirmesinin sonunucunu kendi biriminde verdiği için karşılaştırma yapılmasına ve dolayısıyla sağlıklı bir değerlendirme yapmaya olanak tanımaz. Ancak normalizasyon ile tüm etki değerlendirme kategorileri birimsizleştirilir ve boyutsuz sayılar olarak sonuçları sunar. Bu sayede etki değerlendirme kategorileri birbiriyle karşılaştırılabilir ve sağlıklı çıkarımlar yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada panelin her bir üretim sürecine ait sonuçlar normalizasyon tablosu ile gösterilmiştir.

Tablo 4.1 LCA analizi yapılan PV panelin karakteristik özellikleri

Özellik	Tanım
Modül Boyutu	1482 x 992 x 35 mm
Kütle	16,8 kg
Çerçeve	Alüminyum alaşım
Ön Cam	3,2 mm kalınlığında temperli cam

Tablo 2.1 LCA analizi yapılan PV panelin karakteristik özellikleri (devamı)

EVA Tabaka Kalınlığı	0,5 mm
Wafer Kalınlığı	200 µm ± 20 µm
Modüldeki Hücre Sayısı	54 (6x9)
Hücre Alanı	156 x 156 mm ²
Hücre Verimliliği	16%
Ortalama panel ömrü	25 sene
N.Ş.A'da Maksimum Güç (P _{max})	200 Wp

Aşağıda Tablo 4.2'de güneş panelinin üretim aşamalarının ana girdileri, ürünlerinin ve miktarlarının olduğu tablo verilmiştir. Analiz bu tablodaki verilere göre hesaplanmıştır.

Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş-çıkışları

Aşama	Materyal	Miktar	Birim
Metalurjik silikon eritme	Girdiler		
	Kuvars Kumu	20,48	kg
	Endüstriyel kömür(standart)	45,40	kg
	Ürünler		
	Metalurjik Silikon (99%)	6,08	kg
	Karbon dioksit (CO ₂) salınımı (havaya)	132,91	kg
	Karbonmonoksit (CO) salınımı (havaya)	1,70	kg
	Metalurjik kalitede silikon atığı (bertaraf)	4,38	kg
	Azot oksitleri salınımı (havaya)	279,55	g
Silikon dioksit(SiO ₂) salınımı (havaya)	1,70	kg	
Sülfür dioksit (SO ₂) salınımı (havaya)	0,79	kg	
Panel sınıfı multi-Si saflaştırma	Girdiler		
	Metalurjik Silikon (>99%)	6,08	kg
	Kalsiyum oksit (CaO)	6,52	kg
	Hidroklorik asit (HCl) (30%)	2,93	kg
	Hidroflorik asit (HF) (20%)	0,06	kg
Hidrojen (H) (>99,8%)	0,50	kg	

Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş-çıkışları(devamı)

	Nitrik asit (HNO ₃)(35%)	0,22	kg
	Azot gazı (N)	71,16	kg
	Silikon tetraklorür (SiCl ₄) (>99%)	8,29	kg
	Sodyum Hidroksit (NaOH)(20%)	4,81	kg
	Su	10396,87	kg
	Elektrik	636,46	kW
	Buhar	385,02	kg
	Ürünler		
	Panel sınıfı multi-Si	5,52	kg
	COD salınımı (suya)	82,21	g
	Klorosilan salınımı (havaya)	28,56	g
	Hidrojen klorür salınımı (havaya)	36,24	g
	Hidrojen florür salınımı (havaya)	0,22	g
	Azotdioksit (NO ₂) salınımı (havaya)	3,15	g
	Silikon elekaltı (toz) salınımı (havaya)	8,29	g
	Silikon elekaltı (99%) (geri dönüştürülebilir)	0,83	kg
	Silikon tetraklorür salınımı (havaya)	9,23	g
	Su içinde biriken katı, taneli maddeler	54,81	g
	Triklorosilan (SiHCl ₃) salınımı (havaya)	31,33	g
	Su(buharlaşmayla) havaya	5991,76	kg
İngot Döküm (Kütük oluşumu)	Girdiler		
	Panel sınıfı multi-Si	5,52	kg
	Silisyum karbür (SiC)	61,92	g
	Kuvars potası	15,37	kg
	Argon (Ar)	10,50	kg
	Hidroflorik asit (HF) (49%)	254,03	g
	Basınçlı hava	18,76	m ³
	Sodyum hidroksit (NaOH)(20%)	46,88	g
	Su	492,47	kg
	Elektrik	0,04	kW
	Buhar	7,60	kg
	Ürünler		
	Multi-Si ingot	5,47	kg
	Hidrojen florür (HF) salınımı (havaya)	0,60	g
	Silisyum karbür (SiC)	61,43	g
	Atık asit	348,72	g
Atık kuvars potası (geri kazanım)	15,37	kg	
Su(buharlaşmayla) havaya	375,08	kg	
Wafer Dilimleme	Girdiler		
	Multi-Si ingot	5,47	kg

Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş-çıkışları (devamı)

	Cam	2,47	kg
	Silisyum karbür (SiC)	175,78	g
	Çelik tel	17,11	kg
	Asetik asit (CH ₃ COOH)	0,60	kg
	Deterjan temizleyiciler	2,23	kg
	Basınçlı hava	29,05	m ³
	Su	528,63	kg
	Elektrik	0,01	kW
	Ürünler		
	Multi-Si Wafer	3,34	kg
	Asetik asit (CH ₃ COOH)	0,60	kg
	Cam	2,47	kg
	Tutkal kalıntıları (bertaraf)	243,28	g
	Hurda silikon (geri kazanım)	2,07	kg
	Atık Su	336,94	kg
	Girdiler		
	Multi-Si Wafer	3,34	kg
	Amonyak (NH ₃)	88,10	g
	Etanol (C ₂ H ₅ OH)(99,7%)	0,23	kg
	Hidroklorik asit (37%)	2,57	kg
	Hidroflorik asit (HF)	0,78	kg
	Nitrik asit (HNO ₃)(70%)	1,43	kg
	Azot (N)	7,62	kg
	Fosforik asit(H ₃ PO ₄) (85%)	9,31	g
	Potasyum Hidroksit (KOH) (21%)	2,76	kg
	Gümüş (Ag)	67,90	g
	Alüminyum (Al)	0,38	kg
	Su	866,04	kg
	Doğal gaz	0,59	kg
	Elektrik	0,19	kW
	Buhar	26,15	kg
	Ürünler		
	Multi-Si hücre	1,09	kW
	Amonyak salınımı (havaya)	7,86	g
	Hidrojen klorür (HCl) salınımı (havaya)	4,92	g
	Hidrojen florür (HF) salınımı (havaya)	3,93	g
	Azot oksitleri salınımı (havaya)	61,00	g
	Hava kirleticileri (NMVOC)	34,64	g
	Su	888,13	kg
	Girdiler		
Modül Montajı	Multi-Si hücre	1,09	kW
	Tamperli Cam (düz cam)	63,26	kg

Tablo 4.2 Panelin üretim aşamaları ve ana malzeme giriş-çıkışları (devamı)

	Alüminyum (Al)	11,77	kg
	Polietilen tereftalatpart (PET)	3,27	kg
	Polivinil florür film (PVF)	3,27	kg
	Etanol (C ₂ H ₅ OH)	56,97	g
	Etilen vinil asetat kopolimer (EVA)	7,52	kg
	İzopropanol (C ₃ H ₇ OH)	17,67	g
	Su	118,04	kg
	Buhar	16,22	kg
	Elektrik	0,02	kW
	<i>Ürünler</i>		
	Güneş Paneli	1,00	kW

4.2 Panelin LCA Analizi

Aşağıda panel üretiminin her bir sahfasının LCA analiz sonuçları verilmiştir. Daha sonra ise panel üretiminin genel LCA analizi yapılmış ve sonuçları hem normalizasyon hem karakterizasyon tabloları ile verilmiştir. Karakterizasyon tabloları, Bölüm 3'te de açıklandığı gibi her bir etki değerlendirme faktörünün kendi birimiyle hesaplanmış halidir. Her bir faktörün birimi farklı olduğu için karakterizasyon tabloları bizlere sağlıklı değerlendirme olanağı vermez. Bu sebeple SimaPro, analiz sonuçlarını normalizasyon tablosu ile de elde etmemizi sağlar. Normalizasyon tablosunda tüm sayılar boyutsuzlaştırılmıştır, böylece etki değerlendirme faktörlerini daha sağlıklı yorumlayıp, kıyaslayıp, çıkarımlar yapmamız sağlanmıştır. SimaPro üzerinden yapılan bu analizlerde Ecoinvent veritabanında olmayan girdiler ve çıktılar ihmal edilmiş ayrıca lokasyon ve nakliye etkileri gibi etmenler göz ardı edilmiştir.

4.2.1 Metalurjik silikon eritme sürecinin LCA analizi

Panel üretiminin ilk süreci olan metalurjik silikon eritme işleminin LCA analizinin normalizasyon sonuçları Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Ecoinvent veritabanı içinde yer alan girdi ve çıktılar analiz edilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi toplamda en fazladan en düşüğe doğru etki değerlendirmelerini şu şekilde sıralayabiliriz; deniz sucul ekotoksosite, fotokimyasal oksidasyon, asidifikasyon, küresel ısınma, karasal ekotoksosite, tatlı

su sucul ekotoksisite, ötrifikasyon, insan toksisitesi, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), abiyotik tükenme ve ozon tabakası incelmesidir. En yüksek etki değerlendirme faktörü olan deniz sucul ekotoksisiteye endüstriyel kömür kullanımının neden olduğu görülmektedir. Fosil yakıt olan kömür panel üretiminde gereken elektriği sağlamak için kullanılan dolaylı bir girdidir. Yerine kullanılacak daha çevreci kaynaklar (biyogaz gibi) daha az bu çevresel etkiye sebep olacaktır.



Tablo 4.3 Metalurjik silikon eritme işleminin normalizasyon LCA analizi

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Silikon (99%)	Kuvars Kumu	Endüstriyel Kömür (standart)	Metalurjik kalitede silikon atığı
Abiyotik tükenme		3,53211E-13	0	1,4107E-14	3,36699E-13	2,40458E-15
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		4,88518E-12	0	2,30027E-13	4,61117E-12	4,39837E-14
Küresel ısınma (GWP100a)		4,08365E-11	2,64491E-11	1,437E-13	1,42282E-11	1,55337E-14
Ozon tabakası incilmesi(ODP)		1,12214E-15	0	4,13908E-17	1,06617E-15	1,4575E-17
İnsan toksisitesi		4,90284E-12	5,30577E-14	2,63302E-13	4,55173E-12	3,4754E-14
Tatlı su sucul ekotoksisite		1,22062E-11	0	6,3597E-13	1,15045E-11	6,56898E-14
Deniz sucul ekotoksisite		1,78355E-10	0	9,8743E-12	1,67562E-10	9,19188E-13
Karasal ekotoksisite		3,21926E-11	0	2,76805E-13	3,18792E-11	3,65236E-14
Fotokimyasal oksidasyon		5,8383E-11	1,08144E-11	2,66611E-14	4,754E-11	1,9627E-15
Asidifikasyon		4,11568E-11	3,8616E-11	1,63679E-13	2,36585E-12	1,12617E-14
Ötrofikasyon		5,5945E-12	2,75469E-12	8,01777E-14	2,75332E-12	6,3189E-15

4.2.2 Panel sınıfı multi-Si saflaştırma sürenin LCA analizi

İkinci safha olan panel sınıfı Multi-Si saflaştırma işleminin LCA analizi sonuçlarını gösteren karakterizasyon tablosu Tablo 4.4' de verilmiştir. Ecoinvent veritabanı içinde yer alan girdi ve çıktılar baz alınmıştır. Tablodan görülebileceği en fazladan en aza doğru etki değerlendirmeleri; deniz sucul ekotoksisite, tatlı su sucul ekotoksisite, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), küresel ısınma, karasal ekotoksisite, insan toksisitesi, asidifikasyon, ötrifikasyon, abiyotik tükenme, fotokimyasal oksidasyon ve ozon tabakası incelmesidir. En fazla çevresel etkiye sebep olan deniz sucul ekotoksisiteye buhar tüketimi neden olmaktadır. Bunu nitrojen, sodyum hidroksit ve hidroklorik asit sırayla izlemektedir. Diğer maddelerin ise denizi sucul ekotoksisiteye etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Tablo 4.4 Panel sınıfı multi-Si saflaştırma işleminin normalizasyon LCA analizi

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Panel sınıfı Multi-Si	Hidroklorik asit	Hidrojen	Nitrik Asit	Nitrojen	Silikon tetraklorür	Sodyum Hidroksit	Buhar	Elektrik (avrupa akımı)	Silikon elekaltı (%99 ve toz)
Abiyotik tükenme		4,4E-13	0	1,1E-13	1,6E-14	5,6E-16	6,1E-14	5,18E-14	1,3E-13	7,3E-14	5,4E-16	8,3E-17
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		1,3E-11	0	3,5E-13	5E-13	1,6E-15	1,9E-12	1,98E-13	4,5E-13	9,7E-12	5,8E-15	1,5E-15
Küresel ısınma (GWP100a)		6,7E-12	0	1,9E-13	1,9E-13	1,8E-15	1,1E-12	7,69E-14	2,6E-13	4,9E-12	4,5E-15	5,3E-16
Ozon tabakası incilmesi(ODP)		5,6E-15	0	6,4E-16	2,1E-16	4,6E-19	3,1E-16	2,69E-16	1,4E-15	2,7E-15	2,9E-18	5E-19
İnsan toksisitesi		4,1E-12	1,5E-14	3E-13	1,1E-13	1,4E-15	7,6E-13	1,42E-13	4,1E-13	2,3E-12	3,4E-14	1,2E-15
Tatlı su sucul ekotoksosite		1,8E-11	3,6E-16	1,4E-12	2,6E-13	5,5E-15	5,3E-12	5,98E-13	1,9E-12	8E-12	2E-13	2,3E-15
Deniz sucul ekotoksosite		2,7E-10	1,4E-11	1,6E-11	3E-12	5E-14	8,4E-11	6,32E-12	2,3E-11	1,3E-10	2,2E-12	3,2E-14
Karasal ekotoksosite		4,5E-12	2,4E-18	3,4E-13	1,3E-13	1,6E-15	7,4E-13	1,61E-13	4,4E-13	2,7E-12	1,8E-14	1,3E-15
Fotokimyasal oksidasyon		6,3E-13	1,9E-15	1,8E-14	6,3E-15	7E-17	1,1E-13	9,25E-15	2,9E-14	4,5E-13	4,8E-16	6,7E-17

Tablo 4.4 Panel sınıfı multi-Si saflaştırma işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı)

Asidifikasyon		3,8E-12	1E-14	1,3E-13	2E-14	1,1E-15	8,2E-13	5,5E-14	2,1E-13	2,5E-12	4,5E-15	3,9E-16
Ötrofikasyon		2,5E-12	3E-14	1,3E-13	9,8E-15	1,1E-15	8,7E-13	4,77E-14	2E-13	1,2E-12	1,6E-14	2,2E-16

4.2.3 İngot dökümü (kütük oluşumu) sürecinin LCA analizi

Multi-Si saflaştırma işleminden sonra olan ingot döküm işleminin LCA analizi Tablo 4.5' de aşağıda verilmiştir. En yüksek etki değerlendirmesinin deniz sucul ekotoksiste olduğu görülmektedir. Bunu; tatlı su sucul ekotoksiste, insan toksisitesi, karasal ekotoksiste, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), abiyotik tükenme, asidifikasyon, küresel ısınma, ötrifikasyon, fotokimyasal oksidasyon ve ozon tabakasının incilmesi sırayla takip etmektedir. Bunlardan deniz sucul ekotoksiste ve tatlı sucul ekotoksiste dışındaki eki değerlendirme faktörlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Deniz sucul ekotoksiste etki eden girdi ve çıktıları ise şu şekilde sıralayabiliriz; kuvars potası, basınçlı hava, argon ve ingot dökümüdür. Diğer etkenler ihmal edilebilecek düzeydedir.

Tablo 4.5 İngot dökümü (kütük oluşumu) işleminin normalizasyon LCA analizi

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	İngot dökümü	Silisyum karbür	Kuvars potası	Argon	Basınçlı hava	Sodyum hidroksit	Su	Buhar	Elektrik (Avrupa akımı)
Abiyotik tükenme		4,3E-12	0	9,1E-16	2,9E-12	5,9E-14	1,3E-12	1,3E-15	4,3E-15	1,5E-15	3,4E-20
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		4,4E-12	0	4,1E-14	2E-12	1,7E-12	4,9E-13	4,4E-15	2,7E-14	1,9E-13	3,7E-19
Küresel ısınma (GWP100a)		2,5E-12	0	2,1E-14	1,1E-12	9,6E-13	2,9E-13	2,5E-15	1,6E-14	9,7E-14	2,9E-19
Ozon tabakası incilmesi(ODP)		1,3E-15	0	9,1E-18	6,6E-16	3,1E-16	1,2E-16	1,4E-17	1,5E-16	5,4E-17	1,9E-22
İnsan toksisitesi		7,2E-12	4E-14	1,4E-14	4,1E-12	6,9E-13	2,2E-12	4E-15	1,2E-13	4,7E-14	2,1E-18
Tatlı su sucul ekotoksisite		3,3E-11	9,8E-16	8E-14	1,7E-11	4,7E-12	1E-11	1,9E-14	2,1E-13	1,6E-13	1,3E-17
Deniz sucul ekotoksisite		3,3E-10	3,8E-11	1,2E-12	1,4E-10	7,1E-11	7,7E-11	2,2E-13	3,3E-12	2,5E-12	1,4E-16
Karasal ekotoksisite		6,8E-12	6,7E-18	1,4E-14	3,8E-12	6,7E-13	2,1E-12	4,4E-15	1,3E-13	5,3E-14	1,2E-18
Fotokimyasal oksidasyon		4,3E-13	0	2,6E-15	2,7E-13	9,1E-14	5,9E-14	2,8E-16	2,1E-15	9E-15	3,1E-20
Asidifikasyon		3,1E-12	0	1,6E-14	1,9E-12	6,9E-13	4,2E-13	2E-15	1,2E-14	5E-14	2,9E-19
Ötrofikasyon		1,9E-12	0	1,3E-14	7,5E-13	7,6E-13	3,6E-13	2E-15	1,2E-14	2,4E-14	9,9E-19

4.2.4 Wafer dilimleme sürecinin LCA analizi

Bir sonraki süreç olan wafer dilimleme aşamasının LCA analizi Tablo 4.6'da verilmiştir. Veritabanında bulunan giren ve çıkan malzemelerle yapılan analiz çalışmasına göre çevresel etki değerlendirme faktörü sıralaması şu şekildedir; deniz sucul ekotoksiste, tatlı su sucul ekotoksiste, karasal ekotoksiste, insan toksisitesi, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), abiyotik tükenme, küresel ısınma, ötrifikasyon, asidifikasyon, fotokimyasal oksidasyon ve ozon tabakası incelmesidir. Bunlardan deniz sucul ekotoksiste, tatlı su sucul ekotoksiste, karasal ekotoksiste ve insan toksisitesi dışındaki etki kategorileri ihmal edilebilir düzeydedir. Deniz sucul ekotoksisteye etki eden malzemeleri sıraladığımızda da en fazla etkiyi çelik telin en az etkiyi ise silisyum karbürün yaptığını görebiliriz.

Tablo 4.6 Wafer dilimleme işleminin normalizasyon LCA analizi

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Wafer dilimleme	Cam	Silisyum karbür	Çelik tel	Asetik asit	Deterjan temizleyiciler	Basınçlı hava	Su(çeşme)	Elektrik (avrupa akımı)
Abiyotik tükenme		4,10284E-12	0	3,97484E-13	4,24613E-15	2,8409E-13	1,53225E-14	6,74914E-14	3,32666E-12	7,54658E-15	1,3917E-20
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		6,07468E-12	0	9,03994E-13	1,91342E-13	2,37587E-12	1,5522E-13	1,15E-12	1,25087E-12	4,7385E-14	1,5131E-19
Küresel ısınma (GWP100a)		2,99012E-12	0	4,45499E-13	9,92692E-14	1,47882E-12	5,27E-14	1,51756E-13	7,34525E-13	2,75495E-14	1,1733E-19
Ozon tabakası incelmeleri(ODP)		3,89754E-15	0	6,66784E-16	4,21545E-17	3,90777E-16	4,41075E-17	2,18941E-15	2,93449E-16	2,70853E-16	7,6152E-23
İnsan toksisitesi		2,88887E-11	0	1,27208E-12	6,38242E-14	2,12942E-11	6,31541E-14	3,81912E-13	5,60539E-12	2,08138E-13	8,7441E-19
Tatlı su sucul ekotoksisite		7,08452E-11	0	3,25138E-12	3,7098E-13	3,88757E-11	4,31143E-13	9,3758E-13	2,66169E-11	3,61508E-13	5,3023E-18
Deniz sucul ekotoksisite		8,19804E-10	0	4,70552E-11	5,69461E-12	5,51141E-10	2,80068E-12	1,10745E-11	1,96155E-10	5,88346E-12	5,7013E-17
Karasal ekotoksisite		3,14076E-11	0	1,40804E-12	6,43166E-14	2,37587E-11	1,32435E-13	4,46081E-13	5,37453E-12	2,23408E-13	4,7746E-19

Tablo 4.6 Wafer dilimleme işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı)

Fotokimyasal oksidasyon	6,52422E-13	0	7,33469E-14	1,20675E-14	2,09059E-13	3,85914E-14	1,66528E-13	1,49208E-13	3,62088E-15	1,2491E-20
Asidifikasyon	2,62052E-12	0	3,77371E-13	7,54419E-14	9,6078E-13	2,74322E-14	9,98764E-14	1,05822E-12	2,13962E-14	1,1692E-19
Ötrofikasyon	2,74273E-12	0	3,45076E-13	6,03385E-14	1,33452E-12	2,31371E-14	5,48094E-14	9,03509E-13	2,13463E-14	4,072E-19

4.2.5 Hücree sürecinin LCA analizi

Hücree üretim aşaması panel üretimindeki en fazla kimyasal işlemin gerçekleştiği safhadır. Bu sebeple tüm etki kategorilerinde etkilerin en yüksek olduğu süreçtir. Analiz sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Etki değerlendirme kategorilerini şu şekilde sıralayabiliriz; asidifikasyon, abiyotik tükenme, deniz sucul ekotoksisite, tatlı su sucul ekotoksisite, insan ekotoksisitesi, ötrifikasyon, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), karasal ekotoksisite, küresel ısınma, fotokimyasal oksidasyon ve ozon tabakası incelmesidir. Asidifikasyon oranını en çok artıran malzemelerin sırasıyla; gümüş, buhar, aliminyum, hidroklorik asit, nitrojen, nitrik asit, çeşme suyu, etanol, fosforik asit, potasyum hidroksit olduğu görölmektedir.

Tablo 4.7 Hücre işleminin normalizasyon LCA analizi

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Multi-Si hücre	Amonyak	Etanol	Hidroklorik asit	Nitrik Asit	Nitrojen	Fosforik asit	Potasyum Hidroksit	Gümüş	Alüminyum	Su(çeşme)	Buhar
Abiyotik tükenme		1,61039E-10	0	0	1,10386E-14	1,35606E-13	4,30167E-14	9,41677E-15	2,63712E-15	2,47448E-16	1,60778E-10	4,1175E-14	1,05233E-14	6,97526E-15
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		5,27091E-12	0	0	8,70847E-14	4,33495E-13	1,22059E-13	2,93566E-13	1,09495E-15	7,12932E-16	2,9738E-12	3,62472E-13	6,60761E-14	9,30553E-13
Küresel ısınma (GWP100a)		2,92753E-12	0	0	2,10264E-14	2,34407E-13	1,42274E-13	1,72506E-13	6,64919E-16	3,9657E-16	1,62448E-12	2,28515E-13	3,84165E-14	4,64847E-13
Ozon tabakası incilmesi(ODP)		2,42433E-15	0	0	2,72059E-17	7,84027E-16	3,53418E-17	4,73459E-17	4,37796E-19	1,56339E-19	8,16559E-16	7,82301E-17	3,77691E-16	2,57337E-16
İnsan toksisitesi		1,40744E-11	3,70644E-13	0	4,19357E-14	3,70202E-13	1,05516E-13	1,2028E-13	3,84799E-15	7,46884E-16	1,22101E-11	3,36406E-13	2,90239E-13	2,24459E-13
Tatlı su sucul ekotoksisite		1,90279E-11	8,96889E-15	0	1,34844E-13	1,74306E-12	4,27095E-13	8,10853E-13	2,86558E-14	3,14871E-15	1,82841E-10	3,01555E-12	5,04105E-13	7,61789E-13
Deniz sucul ekotoksisite		1,48048E-11	3,49332E-10	0	1,44729E-12	1,95667E-11	3,88061E-12	1,27222E-11	2,53106E-13	3,59897E-14	1,03951E-09	3,34981E-11	8,20421E-12	1,20223E-11
Karasal ekotoksisite		4,69564E-12	6,08629E-17	0	4,84002E-14	4,13859E-13	1,25661E-13	1,16272E-13	3,10196E-15	8,35005E-16	3,13994E-12	2,79938E-13	3,11531E-13	2,5604E-13

Tablo 4.7 Hücre işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı)

Fotokimyasal oksidasyon		3,9806E-13	0	0	1,1256E-14	2,28185E-14	5,39035E-15	1,63108E-14	3,47879E-16	4,69557E-17	2,46385E-13	4,72216E-14	5,04915E-15	4,32334E-14
Asidifikasyon		3,70305E-09	3,89704E-13	0	1,16114E-14	1,59573E-13	8,38431E-14	1,24788E-13	2,51225E-15	3,22682E-16	2,43072E-12	2,28525E-13	2,9836E-14	2,41617E-13
Ötrofikasyon		7,09805E-12	2,06325E-13	0	1,33573E-14	1,61092E-13	8,23463E-14	1,31772E-13	1,61317E-15	2,76579E-16	6,1969E-12	1,60494E-13	2,97664E-14	1,14107E-13

4.2.6 Modül montajı sürecinin LCA analizi

Panel üretiminin son süreci olan modül montajının LCA analizi sonuçları aşağıdaki Tablo 4.8'de gösterilmiştir. Veritabanında mevcut malzeme bilgisi ile yapılan analiz sonucunda sırasıyla etki değerlendirmeleri; karasal ekotoksiste, insan toksisitesi, abiyotik tükenme (fosil kaynaklar), küresel ısınma, asidifikasyon, abiyotik tükenme, ötrifikasyon, tatlı su sucul ekotoksiste, fotokimyasal oksidasyon, deniz sucul ekotoksiste ve ozon tabakası incelmeleridir. Karasal ekotoksisteye sırasıyla; alüminyum alaşımı, etilen vinil asetat kopolimer, polivinil florür film, polietilen tereftalatpart ve tamperli Cam (düz cam) neden olmuştur. Diğer malzemeler ihmal edilecek kadar düşük oranda etki etmişlerdir.



Tablo 4.8 Modül montajı işleminin normalizasyon LCA analizi

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Modül Montajı	Tamperli Cam (düz cam)	Alüminyum (alaşım)	Polietilen tereftalatpart	Polivinil florür film	Etanol	Etilen vinil asetat kopolimer	İzopropanol	Su(çeşme)	Buhar	Elektrik (avrupa akımı)
Abiyotik tükenme		5,7E-12	0	1,93351E-13	3,08285E-12	3,69105E-13	1,46319E-12	2,9803E-15	5,96314E-13	1,75329E-15	1,5634E-15	4,71592E-15	2,58243E-20
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		1,9E-11	0	1,14015E-12	7,66282E-12	2,21938E-12	1,68674E-12	2,35119E-14	5,32787E-12	1,04652E-14	9,81663E-15	6,29139E-13	2,80763E-19
Küresel ısınma (GWP100a)		9,7E-12	0	6,08012E-13	5,00532E-12	7,10061E-13	1,68256E-12	5,67688E-15	1,41467E-12	3,20198E-15	5,70736E-15	3,14279E-13	2,17706E-19
Ozon tabakası incilmesi(ODP)		1,1E-13	0	3,40408E-16	1,60844E-15	1,0262E-13	6,28587E-16	7,34528E-18	1,64278E-15	3,04176E-18	5,61119E-17	1,73983E-16	1,41304E-22
İnsan toksisitesi		2,5E-11	0	5,17814E-13	1,89996E-11	1,16634E-12	2,34635E-12	1,13221E-14	2,21511E-12	4,81073E-15	4,31195E-14	1,51755E-13	1,62251E-18
Tatlı su sucül ekotoksisite		2,1E-12	0	1,54902E-12	1,86544E-10	4,24264E-12	1,11464E-11	3,64062E-14	8,19287E-12	1,9123E-14	7,48926E-14	5,15039E-13	9,83865E-18
Deniz sucül ekotoksisite		1,3E-12	0	3,29074E-11	9,88571E-10	4,64022E-11	1,36553E-10	3,9075E-13	8,95381E-11	1,93845E-13	1,21886E-12	8,12819E-12	1,05791E-16
Karasal ekotoksisite		2,5E-11	0	5,58288E-13	1,84288E-11	1,49469E-12	2,15825E-12	1,30675E-14	2,5832E-12	5,21903E-15	4,62828E-14	1,73107E-13	8,8596E-19

Tablo 4.8 Modül montajı işleminin normalizasyon LCA analizi (devamı)

Fotokimyasal oksidasyon	1,5E-12	0	8,25077E-14	8,66615E-13	1,02521E-13	2,13974E-13	3,03899E-15	2,33495E-13	1,33714E-15	7,50129E-16	2,92297E-14	2,31771E-20
Asidifikasyon	7,8E-12	0	6,58064E-13	4,46674E-12	4,68587E-13	1,27402E-12	3,13494E-15	7,39844E-13	1,90871E-15	4,4326E-15	1,63355E-13	2,1696E-19
Ötrofikasyon	5,6E-12	0	1,92007E-13	3,49569E-12	3,25588E-13	7,8203E-13	3,6063E-15	6,76389E-13	1,51736E-15	4,42226E-15	7,71466E-14	7,55589E-19

4.2.7 Panelin Genel LCA Analizi Karakterizasyonu

Tablo 4.9'da çalışmada incelenen güneş panelinin genel LCA analizinin karakterizasyon tablosu verilmiştir. Görüldüğü gibi her etki değerlendirmesinin birimi neredeyse farklıdır. Bu sebeple başlık 4.2'de de bahsedildiği gibi sağlıklı karşılaştırma yapmamıza olanak vermemektedir. Bu sebeple yine SimaPro'dan bu etki değerlendirmelerinin birimlerinin boyutsuzlaştırıldığı aşağıdaki normalizasyon tablosu olan Tablo 4.10 elde edilebilir. Bu sayede daha sağlıklı değerlendirmeler ve yorumlamalar yapılarak çalışmanın yapıldığı üretim süreci, hizmet veya malzeme seçimi gibi konularda iyileştirmelere gidilebilir.



Tablo 4.9 PV panelin LCA analizi karakterizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Metalurjik silikon eritme	Panel sınıfı multi-Si saflaştırma	İngot Döküm (Kütük oluşumu)	Wafer Dilimleme	Hücre	Modül Montajı
Abiyotik tükenme	kgSbeq	0,05867	2,99E-05	0,00021	0,00197	0,0011613	0,05355	0,00174
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)	MJ	6603,32	153,6219	2286,76	756,398	638,03284	650,41	2118,1
Küresel ısınma (GWP100a)	kg CO ₂ eq	745,692	205,2086	186,551	69,6465	50,185974	57,7268	176,373
Ozon tabakası incilmesi(ODP)	kg CFC-11 eq	4E-05	1E-07	2,7E-06	6,4E-07	1,162E-06	8,5E-07	3,4E-05
İnsan toksisitesi	kg 1,4-DB eq	2743,56	373,1311	176,582	307,341	747,97204	428,122	710,407
Tatlı su sucul ekotoksosite	kg 1,4-DB eq	1055,77	6,32445	50,6349	93,297	122,60262	386,868	396,038
Deniz sucul ekotoksosite	kg 1,4-DB eq	1952012	20811,58	176377	209714	319503,47	677874	547731
Karasal ekotoksosite	kg 1,4-DB eq	15,0207	1,562746	1,20664	1,81511	5,0922931	0,89445	4,44948
Fotokimyasal oksidasyon	kg C ₂ H ₄ eq	0,61467	0,486944	0,02924	0,02	0,0184669	0,01324	0,04678
Asidifikasyon	kg SO ₂ eq	143,306	140,7946	0,58777	0,47868	0,2465499	0,40932	0,78897
Ötrofikasyon	kg PO ₄ --- eq	37,4523	36,37896	0,18227	0,1388	0,1208539	0,36745	0,26399

4.2.8 Panelin Genel LCA Analizi Normalizasyonu

Tablo 4.10'da ki sonuçlara göre genel olarak güneş paneli üretiminde en büyük etki değerlendirmesine sahip faktörler sıralandığında deniz sucul ekotoksosite, asidifikasyon, ötrifikasyon, tatlı su sucul ekotoksiste, abiyotik tükenme, insan toksisitesi, karasal ekotoksosite, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), küresel ısınma, fotokimyasal oksidasyon ve ozon tabakası incilmesi olarak sıralanmaktadır.



Tablo 4.10 PV panelin LCA analizi normalizasyon sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Panel sınıfı multi-Si saflaştırma	İngot Döküm (Kütük oluşumu)	Wafer Dilimleme	Hücre	Modül Montajı	Metalurjik silikon eritme
Abiyotik tükenme		6,9E-10	2,4E-12	2,3E-11	1,37E-11	6,3E-10	2,1E-11	3,5E-13
Abiyotik tükenme (fosil yakıtlar)		2,1E-10	7,3E-11	2,4E-11	2,03E-11	2,1E-11	6,7E-11	4,9E-12
Küresel ısınma (GWP100a)		1,5E-10	3,7E-11	1,4E-11	9,99E-12	1,1E-11	3,5E-11	4,1E-11
Ozon tabakası incilmesi(ODP)		4,5E-13	3,1E-14	7,2E-15	1,3E-14	9,5E-15	3,9E-13	1,1E-15
İnsan toksisitesi		3,5E-10	2,3E-11	4E-11	9,65E-11	5,5E-11	9,2E-11	4,8E-11
Tatlı su sucul ekotoksisite		2E-09	9,8E-11	1,8E-10	2,37E-10	7,5E-10	7,6E-10	1,2E-11
Deniz sucul ekotoksisite		1,7E-08	1,5E-09	1,8E-09	2,74E-09	5,8E-09	4,7E-09	1,8E-10
Karasal ekotoksisite		3,1E-10	2,5E-11	3,7E-11	1,05E-10	1,8E-11	9,2E-11	3,2E-11
Fotokimyasal oksidasyon		7,3E-11	3,5E-12	2,4E-12	2,18E-12	1,6E-12	5,5E-12	5,7E-11
Asidifikasyon		5,1E-09	2,1E-11	1,7E-11	8,75E-12	1,5E-11	2,8E-11	5E-09
Ötrofikasyon		2,8E-09	1,4E-11	1,1E-11	9,16E-12	2,8E-11	2E-11	2,8E-09

4.2.9 Panel Üretiminin Küresel Isınma Analizi (GWP100)

GWP (Global WarmingPotantial) yani küresel ısınma potansiyeli bir gazın küresel ısınmaya katkısının karbondioksite göre kıyaslanmasıdır. Referans olarak karbondioksitin alınma nedenleri aşağıda maddelerle verilmiştir.

- Endüstri ve fosil yakıt gibi faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının çoğunluğunun karbondioksit olması onu en yaygın sera gazı yapmaktadır.
- Atmosferde çok süre kalması, bu karbondioksiti iklim değişikliğinde uzun vadeli, kalıcı ve önemli bir etken yapmaktadır.
- Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC/ Intergovernmental Panel on Climate), Kyoto Protokolü, Paris Anlaşması gibi uluslararası iklim düzenlemelerinde tüm gazların karbondioksit üzerinden raporlanması onu bilimsel çalışmalarda ve politikada bilinir ve standart bir hale getirmiştir. Böylece farklı gazlar ortak bir dilden karşılaştırılabilir.
- Diğer gazlara göre miktar olarak daha iyi ölçülebilmesi onu güvenli bir referans noktası yapmaktadır.

Bu sebeplerle LCA analizlerinde GWP analizlerinin birimi karbondioksit cinsindedir. (kg CO₂-eq)

GWP100 (Global WarmingPotantialover 100 year) ise yüz yıllık küresel ısınma potansiyelini ifade etmektedir. GWP20 gibi 20 senelik daha kısa dönemlerde bazı analizler için kullanılmaktadır. Ancak çoğunlukla GWP100 kullanılmaktadır. Bunun sebepleri aşağıda belirtildiği gibidir;

- CO₂ gibi bazı gazlar çok uzun süre atmosferde kalırken CH₄ gibi bazı gazlar da kısa süreli kalır ancak çok yüksek etkiye sahiptir. 100 senelik dilim bu farkları dengeleyen orta vadeli bir değerlendirme sağlamaktadır.
- Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC/ Intergovernmental Panel on Climate), Kyoto Protokolü, Paris Anlaşması ve ISO 14040/14044 gibi uluslararası iklim politikalarında 100 sene referans alınmaktadır.
- Karbon nötr hedefler, sera gazı bütçeleri, iklim senaryoları gibi hesaplar genellikle 2100 yılına kadar olan etkileri değerlendirmektedir.

Yani, aslında, GWP20 GWP500 ifadeleri ve hesaplamaları da teknik olarak doğrudur ancak kıyaslamayı zorlaştırıldığı için çalışmalarda tercih edilmemektedir.

Referans sera gazı karbondioksit kabul edildiği için GWP100 CO₂ =1'dir. Bu değer referans alınarak tüm sera gazları için, CO₂ ile karşılaştırıldığında ne kadar ısı tutma etkisine neden olduğunu gösteren hesaplanmış GWP100 değerleri vardır. Hesaplamalar karmaşık iklim modelleri ile hesaplanmaktadır ve yeni gazlar, model güncellemeleri, bilimsel ilerlemeler, uluslararası anlaşmalar nedeniyle zaman içinde değişebilmektedir. En güncel hali IPCC'nin 6. Değerlendirme Raporu (AR6)'da 2021 yılında yayımlanmıştır ve Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11 Bazı sera gazlarının GWP100 değerleri [90]

Gaz	Kimyasal Adı	GWP100	Atmosferde Kalış Süresi (yıl)
CO ₂	Karbon dioksit	1	100+
CH ₄	Metan	28–30	~12
N ₂ O	Diazot monoksit	265–298	~114
HFC-134a	Hidroflorokarbon-134a	1300	~14
HFC-152a	Hidroflorokarbon-152a	138	~1.4
SF ₆	Sülfür hekzaflorür	23,5	3200
NF ₃	Azot triflorür	16,1	740
PFC-14	Tetraflorometan (CF ₄)	6,63	50
PFC-116	Hekzafloroetan (C ₂ F ₆)	11,1	10

Bu tablodaki GWP100 değerlerinin kullanılarak üzerinde çalıştığımız panelin üretilirken oluşturduğu sera gazlarının meydana getirdiği GWP100 değerleri, her bir üretim aşaması için ve toplam olarak analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.12 GWP100 Analizi sonuçları

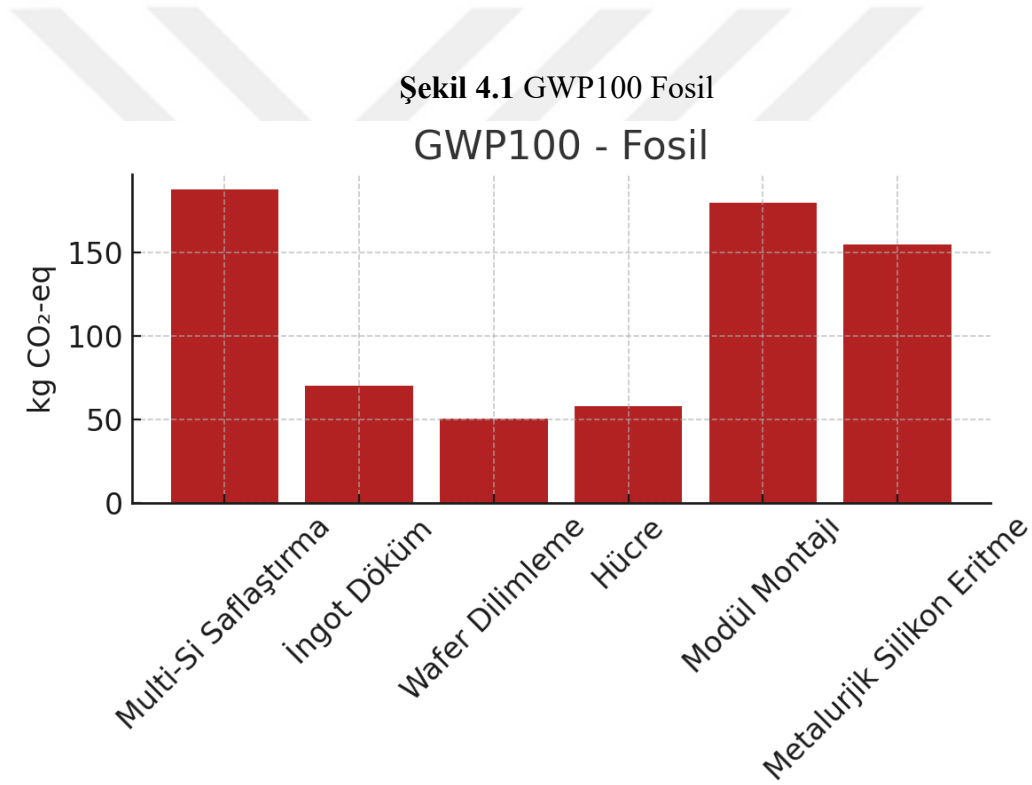
Etki Kategorisi	Birim	Toplam	Panel sınıfı multi-Si saflaştırma	İngot Döküm (Kütük oluşumu)	Wafer Dilimleme	Hücre	Modül Montajı	Metalurjik silikon eritme
GWP100 - fosil	kg CO ₂ -eq	700,353	187,5688	69,9181	50,4084	58,021	179,882	154,555
GWP100 -biojenik	kg CO ₂ -eq	49,9535	0,037578	0,09263	0,09407	0,06743	0,20973	49,45204
GWP100 - toprak dönüşümü	kg CO ₂ -eq	0,29546	0,062726	0,064	0,04185	0,06283	0,24257	-0,17851

- GWP100-fosil: Güneş paneli üretim sürecinde kullanılan enerji ve hammadde temininde fosil yakıtların yakılması sonucu açığa çıkan sera gazlarını ifade etmektedir.
- GWP100-biojenik: Biojenik emisyonlar, biyokütle, organik atıklar ve diğer biyolojik kaynakların doğal süreçler yoluyla atmosfere saldığı sera gazlarını kapsamaktadır. Güneş paneli üretiminde bu kaynaklardan gelen emisyonlar genellikle sınırlı olmakla birlikte, lojistik süreçlerde biyokütle bazlı yakıtların kullanımı veya üretim sırasında organik atıkların biyolojik dönüşümü sonucu açığa çıkan metan gibi gazlar biojenik emisyonlar olarak değerlendirilmektedir. Bu tür emisyonlar karbon döngüsünün doğal bir parçası olarak görülmektedir ve karbon nötrlüğü bağlamında farklı bir değerlendirmeye tabi olmaktadır.
- GWP 100-toprak dönüşümü: Toprak dönüşümü kaynaklı emisyonlar, arazi kullanım değişiklikleri (land-usechange) sonucunda toprak karbon havuzundan atmosfere salınan sera gazlarını ifade etmektedir. Güneş paneli üretiminde doğrudan toprak dönüşümü kaynaklı emisyonlar genellikle sınırlı olmakla birlikte, hammadde temin süreçlerinde (örneğin mineral çıkarımı) veya üretim tesislerinin kurulumu için gerçekleştirilen arazi değişikliklerinde bu emisyonlar ortaya çıkabilir. Bu kategorideki emisyonlar, toprak organik karbonunun kaybı ve arazi kullanımı değişikliklerinin iklim üzerindeki dolaylı etkilerini içermektedir.

Tablo 4.12'de görülen analiz sonucunda, fosil kaynaklı emisyonların güneş paneli üretiminde en baskın etki kategorisini oluşturduğu açıkça

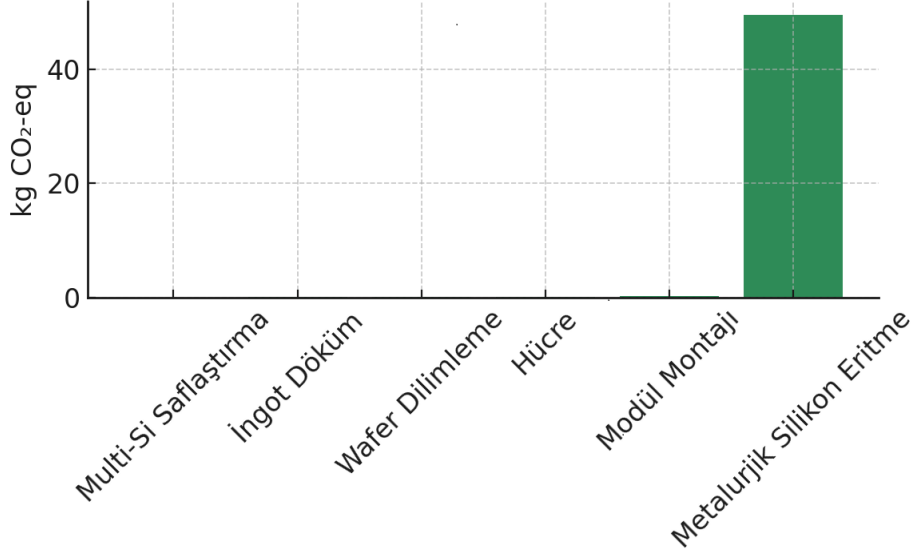
görülmektedir. Özellikle multi-Si saflaştırma ve metalurjik silikon eritme süreçleri, karbon ayak izinin azaltılması için öncelikli iyileştirme alanlarıdır. Bu aşamalarda yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş ve proses verimliliğinin artırılması, çevresel performansı önemli ölçüde iyileştirebilir.

Biyojenik ve toprak dönüşümüne dayalı emisyonlar daha düşük düzeydedir ve çevresel etki açısından daha az kritik olarak değerlendirilebilir. Ancak negatif değerlerin bulunduğu durumlar (örneğin, toprak dönüşümünde negatif emisyon) yaşam döngüsü modellemesinde dikkatle ele alınmalı ve veri kaynakları sorgulanmalıdır. Daha net görülmesi açısından aşağıda grafiksel gösterimler verilmiştir.



Şekil 4.1'de görüldüğü gibi Multi-Si saflaştırma ve modül montaj aşamaları hemen hemen yakın GWP100-fosil etkisine sahiptir. Üretim zincirinde fosil yakıt kaynaklı emisyonların azaltılması için, özellikle silikon saflaştırma ve eritme süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılması ve/veya yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu önemli bir sürdürülebilirlik stratejisi olarak değerlendirilebilir.

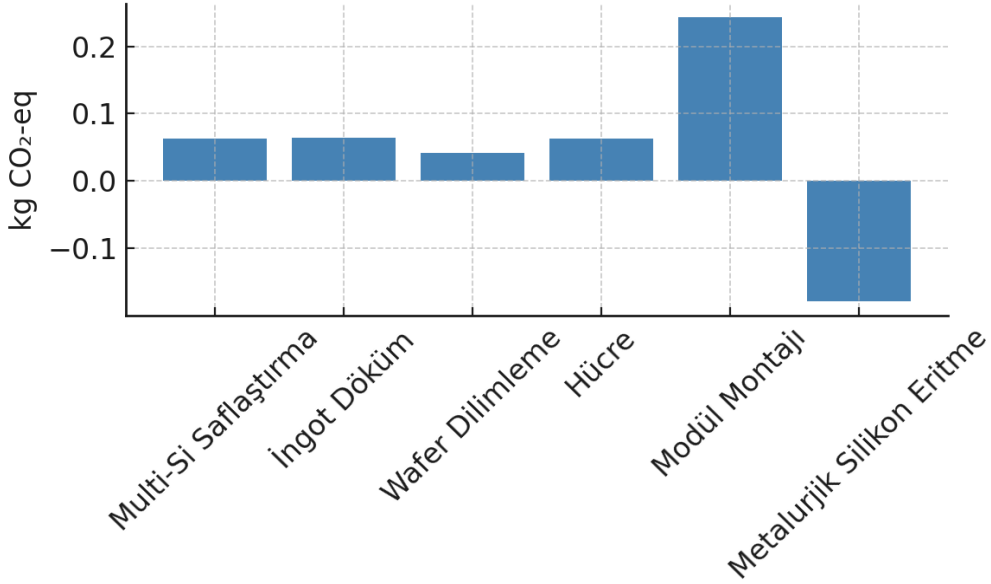
Şekil 4.2 GWP100 Biyojenik
GWP100 - Biyojenik



Şekil 4.2'yi incelediğimizde metalurjik silikon eritme sürecinde kullanılan malzemeler veya enerji girdilerinde biyojenik kaynakların varlığı, bu aşamada biyojenik emisyonların baskın olmasına neden olmaktadır. Bu durum, proseslerin çevresel analizinde biyojenik karbon akışlarının detaylı incelenmesini ve biyojenik kaynakların yönetimini gerektirmektedir.

Şekil 4.3 GWP100 Toprak Dönüşümü

GWP100 - Toprak Dönüşümü



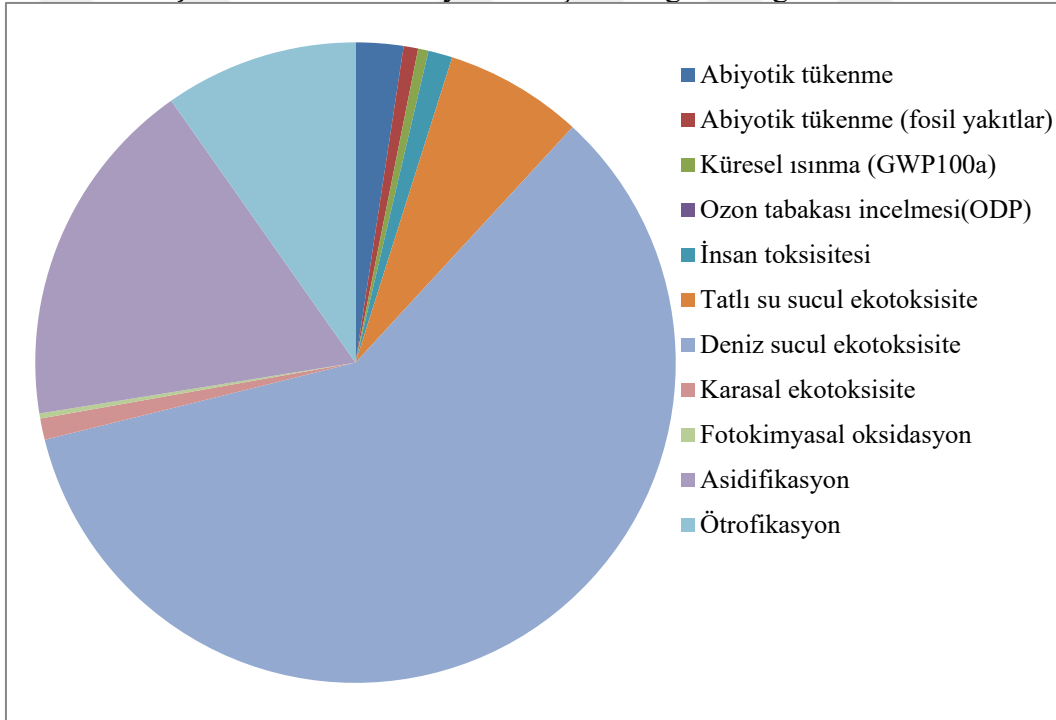
Şekil 4.3'ten görülebileceği gibi toprak dönüşümü etkileri genel olarak düşük seviyede olmakla birlikte, negatif emisyon değerleri ilgili üretim aşamasında

karbon tutulumuna yönelik potansiyel faydaların bulunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, toprak kullanımı ve karbon döngüsü süreçlerinin daha detaylı modellenmesi ve değerlendirilmesi gerektiği sonucu çıkarılmaktadır.

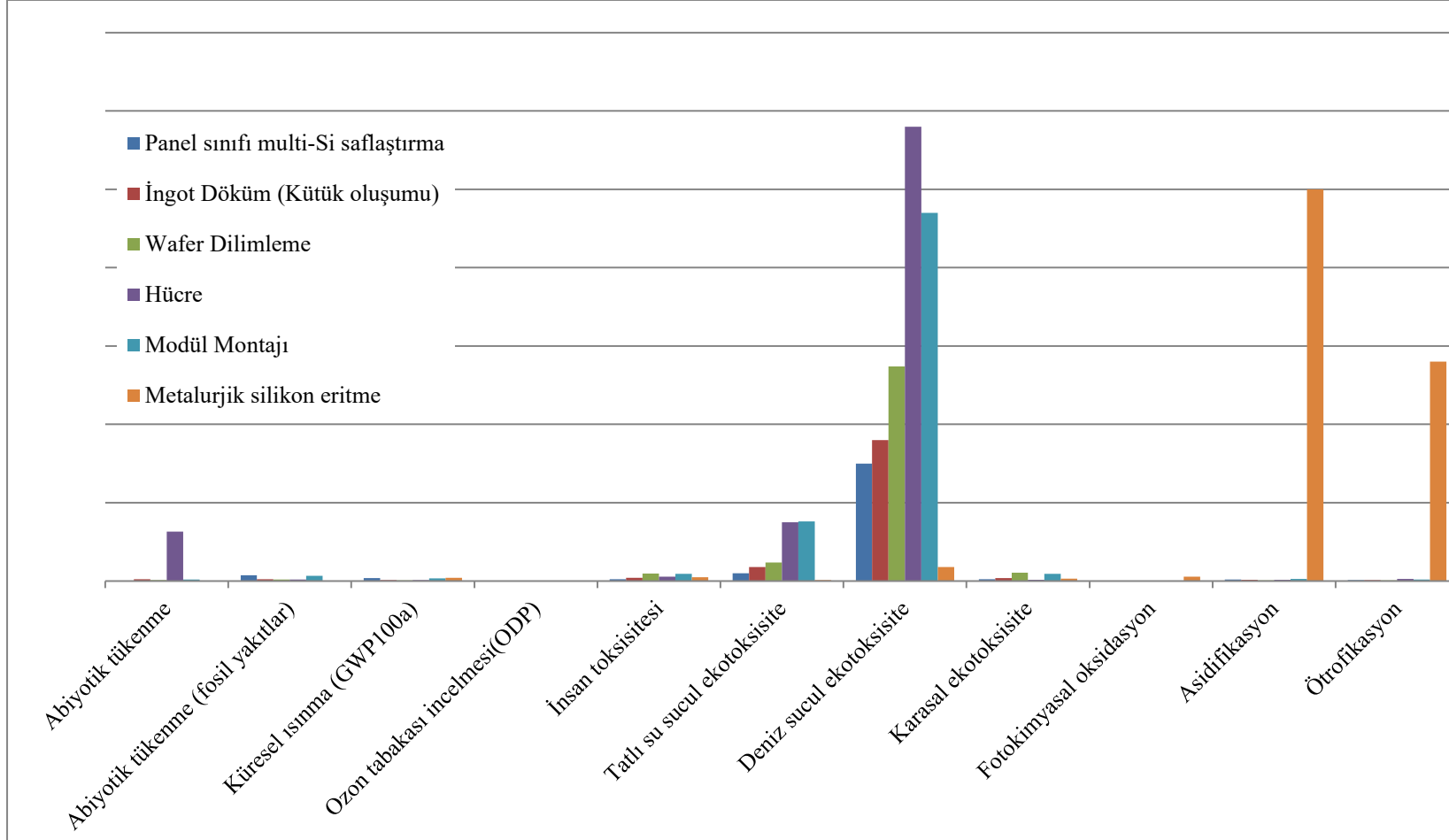
4.3 Değerlendirmeler

Şekil 4.4'den görülebileceği gibi incelenen panelin üretim sürecinin deniz sucul ekotoksosite üzerinde %50'den fazla etkisi olmuştur. Deniz ekosistem sistem dengesinin bozulduğunda meydana gelebilecek etkilerden dolayı bu etki değerlendirme faktörünü azaltmaya yönelik iyileştirme çalışmaları yapılması gerektiği ortadadır.

Şekil 4.4 Normalizasyon sonuçlarının grafikte gösterimi



Şekil 4.5 Panel üretim süreçlerinin etki faktörlerine etkisinin grafiği



Panel üretim süreçlerinin etki değerlendirmeleri ile arasındaki ilişki ise Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.4'de belirtilen en yüksek etki değerlendirme faktörü olan deniz sucul ekotoksisisteye en fazla etki eden sürecin hücre üretim süreci olduğu görülmektedir. Bunun sebebi en yoğun kimyasal kullanımının bu süreçte olmasıdır. Bunu sırasıyla modül montajı, wafer dilimleme, ingot dökümü, panel sınıfı multi-Si saflaştırma ve metalurjik silikon eritme takip etmektedir. Bu sonuç yukarıda tek tek her süreci için analizini yaptığımız sonuçlarla karşılaştırdığımızda beklediğimiz bir sonuçtur. Deniz sucul ekotoksisiteden sonra gelen asidifikasyon, ötrofikasyon tatlı sucul ekotoksisite ve abiyotik tükenme dışındaki diğer çevresel faktörlerin, panel üretiminde ihmal edilecek kadar az ortaya çıktığı bu çalışma sonucunda ortaya konmaktadır. Panel üretiminin ozon tabakası incelenmesi üzerinde yok denecek kadar az bir etkisi olduğuda yine bu çalışmada ortaya konmaktadır.

Analiz edilen güneş paneli üretim süreçlerinde fosil kaynaklı karbon emisyonları, çevresel etki açısından en belirgin paya sahiptir. Enerji yoğun proseslerin sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönlendirilmesi, karbon ayak izinin azaltılmasında kritik öneme sahiptir. Biojenik ve toprak dönüşümü kaynaklı etkiler, toplam sera gazı emisyonları içinde görece önemsiz kalmakla birlikte, ilgili süreçlerin spesifik çevresel dinamiklerini anlamak için bu etkilerin ayrıntılı incelenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, yaşam döngüsü analizi kapsamında bu kategorilerin bütünsel olarak değerlendirilmesi, güneş paneli üretiminin çevresel performansının optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

4.4 Sonuç

Bu çalışma kapsamında, güneş paneli üretiminin beşikten-kapıya yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

- Polikristalin veya monokristalin silikon üretimi sırasında enerji tüketimi oldukça yüksektir. Bu nedenle düşük sıcaklıkta çalışan alternatif saflaştırma teknikleri araştırılmalı ve süreç verimliliği artırılmalıdır.

- Silikon üretiminde kullanılan enerji kaynağı mümkün olduğunca yenilenebilir kaynaklara kaydırılmalı; karbon yoğunluğu düşük enerji altyapısı tesis edilmelidir.
- Silikon geri dönüşümünden elde edilen ikincil hammaddelerin kullanımı artırılarak hem enerji hem de kaynak verimliliği sağlanabilir.
- İnce wafer üretimi desteklenmeli, böylece her bir panel için daha az hammadde kullanılarak çevresel etki azaltılabilir.
- Kesme işlemlerinde oluşan silikon tozu miktarı azaltılmalı, bu atıklar geri kazanılarak tekrar üretime kazandırılmalıdır.
- Tel kesme teknolojilerinde daha az soğutucu ve su tüketen yöntemler geliştirilmelidir.
- Hücre üretimi sırasında kullanılan kimyasalların toksisite düzeyi düşürülmeli ve proses kimyasalları için geri kazanım sistemleri kurulmalıdır.
- EVA ve arka levha gibi plastik bazlı bileşenlerin çevreye duyarlı versiyonları (örneğin biyoplastik veya düşük VOC içeren ürünler) kullanılmalıdır.
- Alternatif malzeme ve teknoloji arayışları teşvik edilmelidir. Güneş paneli üretiminde kullanılan bazı hammadde ve ara ürünlerin yüksek enerji gereksinimi ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, bu malzemelerin yerine daha düşük çevresel etkili, geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak daha az zararlı alternatiflerin kullanımı araştırılmalıdır. Özellikle silikon üretimi gibi enerji yoğun aşamalar için daha az enerji tüketen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.
- Yerel ve bölgesel tedarik zincirlerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Lojistik süreçlerin yaşam döngüsü üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, hammaddelerin ve yarı mamullerin yerel kaynaklardan temin edilmesi hem enerji tüketimini hem de karbon salımını azaltacaktır. Bu nedenle, yerli üretim olanaklarının artırılması ve tedarik zincirlerinin bölgeselleştirilmesi, sürdürülebilir üretim hedefleri açısından önemlidir.

- Silikon saflaştırma süreçlerinde enerji tüketimi azaltılmalıdır. Kristal silikon bazlı güneş panellerinde, silikonun yüksek saflığa ulaşması için uygulanan işlemler ciddi miktarda enerji tüketmektedir. Bu bağlamda, düşük enerji tüketimli alternatif saflaştırma yöntemleri veya plazma temelli yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması gerekmektedir.
- Panel üretiminde kullanılan malzemelerin kaynağı yerelleştirilmelidir. Panel bileşenleri (cam, alüminyum çerçeve, EVA tabakası, arka levha vb.) çoğunlukla ithal edilmekte ve bu durum taşıma kaynaklı çevresel yükleri artırmaktadır. Türkiye’de bu tür malzemelerin üretiminin teşvik edilmesi, hem maliyet hem de çevresel etki açısından avantaj sağlayacaktır.
- Panel üretim süreçlerinde su tüketimi ve atık su yönetimi gözden geçirilmelidir. Özellikle hücre temizleme ve cam işleme gibi aşamalarda yüksek miktarda su kullanılmakta olup, bu durum su ayak izini artırmaktadır. Kapalı devre su sistemleri, filtreleme teknolojileri ve düşük debili ekipmanlarla su tüketimi minimize edilmelidir.
- Fotovoltaik panel geri dönüşüm altyapısı ülkemizde geliştirilmelidir. Panel atıklarının artacağı öngörülmektedir. Türkiye’de henüz yeterli ölçekte bir geri dönüşüm tesisi bulunmamaktadır. PV modül geri dönüşüm altyapısının kurulması, ekonomik geri kazanım ve çevre koruma açısından önemlidir.
- Literatürde kullanılan LCA veri tabanları Avrupa ülkelerine aittir ve Türkiye’nin enerji karışımı, endüstriyel altyapısı ile örtüşmediği noktalar mevcuttur. Bu nedenle Türkiye’ye özgü güncel ve sektörel LCA veri tabanlarının geliştirilmesi gerekmektedir.
- Çevresel etiketleme ve bilinçlendirme uygulamaları geliştirilmelidir. Güneş paneli üreticilerinin çevresel performanslarını şeffaf şekilde paylaşımları sağlanmalı; çevre dostu üretim yapan firmalar için “LCA destekli çevresel etiketleme” sistemleri oluşturulmalıdır. Bu, kullanıcı tercihlerini de etkileyebilir.
- Ülkemizde henüz gelişmemiş olan PV modül geri dönüşüm altyapısı kurulmalı ve bu konuda mevzuat desteği sağlanmalıdır.

- Geri dönüşümden elde edilen malzemeler için ikincil hammadde pazarı oluşturulmalıdır.
- Paketleme malzemeleri yeniden kullanılabilir veya biyobozunur malzemelerden seçilmelidir.

Bu öneriler doğrultusunda, güneş paneli üretiminin çevresel etkileri azaltılabilir ve sektörün daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşması sağlanabilir. Ayrıca, LCA'nın yalnızca akademik çalışmalarla sınırlı kalmayıp, uygulamalı sanayi politikalarının ve çevresel regülasyonların temelini oluşturması, uzun vadede çevre dostu teknolojilerin yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır.



KAYNAKÇA

- [1] Y. Doç, R. Yılmaz, M. Ari, and B. Üniversitesi, “Ürün Yaşam Seyri Maliyet Analizi ve Ürün Yaşam Seyri Maliyetleme Yaklaşımları İçin Durum Değerlendirmesi ve Kavramsal Çözümleme Önerisi.”
- [2] Muhsin Çelik, “Çelik, M. (2006). Ürünlerin yaşam döngüsü maliyetlerinin işletme kararlarına etkilerinin çevresel yaklaşım ile değerlendirilmesi. Muhasebe Ve Denetime Bakış (18), 129-142.”.
- [3] G. Tuna Taygun, A. B. Ytö, M. Fakültesi, and M. Bölümü, “Yaşam döngüsü süreçlerinde yapı ürünü çevre etkileşimi,” 2005.
- [4] K. Jijakli, H. Arafat, S. Kennedy, P. Mande, and V. V. Theeyattuparampil, “How green solar desalination really is? Environmental assessment using life cycle analysis (LCA) approach,” *Desalination*, vol. 287, pp. 123–131, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.desal.2011.09.038.
- [5] A.-M. Tillman, “Significance of decision-making for LCA methodology,” 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/eiarEIAprocedure
- [6] O. Ortiz, F. Castells, and G. Sonnemann, “Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA,” Jan. 2009. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.
- [7] K. Nakano and M. Hirao, “Collaborative activity with business partners for improvement of product environmental performance using LCA,” *J Clean Prod*, vol. 19, no. 11, pp. 1189–1197, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.03.007.
- [8] C. Pieragostini, M. C. Mussati, and P. Aguirre, “On process optimization considering LCA methodology,” 2012, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.014.

- [9] H. Ayboğa and B. Öktem, “Ürün yaşam seyrinde geri dönüşümün öneminin teorik çerçevede incelenmesi,” *Öneri Dergisi*, vol. 11, no. 44, p. 173, Jul. 2015, doi: 10.14783/od.v11i44.5000080009.
- [10] Z. Çalışkan and H. Yüksel, “Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) yazılımlarının seçiminde kullanılan kriterlerin ANP yöntemi ile sıralanması sorting the criteria used in selection of product life cycle management (PLM) Software By Using ANP Method,” 2021.
- [11] A. Özdemir, “Yaşam döngüsü değerlendirmesi ve sürdürülebilirlik ilişkisi bağlamında sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesinin (s-lca) yeri,” *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, vol. 7, no. 2, pp. 166–183, Aug. 2019, doi: 10.20290/estubtdb.517254.
- [12] T. Eken and İ. Aksu, “Yeşil Yıldızlı Otellerin Yeşil Maliyetlerinin Ürün Yaşam Seyri Maliyetleme Açısından Değerlendirilmesi,” *Alanya Akademik Bakış*, vol. 8, no. 1, pp. 130–144, Jan. 2024, doi: 10.29023/alanyaakademik.1287540.
- [13] A. KÖK, “Ürün yaşam döngüsü teorisi: nostaljik yiyeceklerin lezzet hafızasındaki yeri,” *Gastroia: Journal of Gastronomy And Travel Research*, vol. 7, no. 2, pp. 392–406, Oct. 2023, doi: 10.32958/gastoria.1255417.
- [14] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, “Life Cycle Assessment.”
- [15] G. Finnveden, “LCA Methodology Where are the Values? LCA Methodology Valuation Methods Within LCA-Where are the Values?”
- [16] C. Basset-Menset *et al.*, “Is LCA-based ecolabelling reasonable The issue of tropical food products.”
- [17] A. Kelimeler *et al.*, “Muhasebe ve denetime bakış kalite maliyetleri ve yaşam boyu maliyetleme yöntemi.”
- [18] Ü. Yaşam and D. Yönetimi, “Kapalı döngü ürün yaşam döngüsü yönetimi Özet,” 2018.

- [19] Z. Çokaygil, Y. Lisans, T. Fen, B. Enstitüsü, Ç. Mühendisliği, and A. Dali, ““Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Arastırma Fonu tarafından desteklenmiştir.”
- [20] S. Sayer Doç, E. Üniversitesi, E. Meslek Yüksekokulu, and A. Ülker, “Makale product lifecycle management (plm) ürün yaşam döngüsü yönetimi.”
- [21] *Proceeding book euroasia summit 4th international applied sciences congress. 2021.*
- [22] Y. E. Demirel, P. Hasanoğlu Öztürk, E. Öztürk, and M. Kitiş, “Yaşam döngüsü analizi ve endüstriyel uygulama örnekleri.”
- [23] R. Kannan, K. C. Leong, R. Osman, H. K. Ho, and C. P. Tso, “Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 5, pp. 555–563, May 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.04.008.
- [24] M. Bravi, M. L. Parisi, and R. Basosi, “Life cycle assessment of advanced technologies for photovoltaic panel production,” 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/244485998>
- [25] M. Usman Nawaz, S. Umar, and M. S. Qureshi, “Life cycle analysis of solar powered electric vehicles: environmental and economic Perspectives,” 2024.
- [26] M. M. Lunardi, J. P. Alvarez-Gaitan, J. I. Bilbao, and R. Corkish, “Comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.3390/app8081396.
- [27] A. De Laborde *et al.*, “Renewable Energy Congress 2011-Sweden Climate Change Issues (CC) 8-11,” 2011, doi: 10.3384/ecp110573678i.
- [28] M. SaadKhan *et al.*, “Life Cycle Analysis Of Solar Pv Panels For Their Efficiency, Cost And Environmental Performance: A Case Study Of Hyderabad,” *International Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, vol. 03, 2020.

- [29] P. Gupta, S. Mata Vaishno, and A. Anand, “A Review On Life Cycle Assessment Of Solar PV Panel”, doi: 10.22214/ijraset.2021.35132.
- [30] V. Mutteriet *al.*, “Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels,” Jan. 03, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en13010252.
- [31] I. Papamichaelet *al.*, “End-of-Life Management and Recycling on PV Solar Energy Production,” Sep. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15176430.
- [32] R. Zahedi, S. F. Moosavian, and A. Aslani, “Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generation using the LCA approach,” *Energy Sci Eng*, vol. 10, no. 12, pp. 4640–4661, Dec. 2022, doi: 10.1002/ese3.1294.
- [33] B. Jamie Fischer Advisor, D. McNally editorial reviewer, and J. Visch, “Comparing Wind and Solar Energy Impacts on the Environment: A LCA Approach Using openLCA Platform,” 2021.
- [34] G. Ekinici, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [35] R. Sianipar, M. Sidik Boedoyo, and N. A. Sasongko, “Application of LCA (Life Cycle Assessment) to Solar Energy Development in Indonesia,” 2022. [Online]. Available: www.ijisrt.com128
- [36] A. J. Aristizábal, D. C. Sierra, and J. A. Hernández, “Life-cycle assessment applied to photovoltaic energy: A Review,” *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, no. 05, pp. 06–13, May 2016, doi: 10.9790/1676-1105010613.
- [37] M. de Graeve, “Future LCA on the Solar panels of Solar ge for comparison with conventional solar panels and finding possible improvements”
- [38] R. Dones and R. Frischknecht, “Life cycle assessment of photovoltaic systems: Results of Swiss studies on energy chains,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 117–125, 1998, doi: 10.1002/(sici)1099-159x(199803/04)6:2<117:aid-pip209>3.0.co;2-m.
- [39] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti, and A. Corrado, “Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, no. 3, pp. 235–250, May 2005, doi: 10.1002/pip.590.

- [40] V. Fthenakis and M. Raugei, “*Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/268212394>
- [41] C. A. Grant and A. L. Hicks, “*Effect of manufacturing and installation location on environmental impact pay back time of solar power*,” *Clean Technol Environ Policy*, vol. 22, no. 1, pp. 187–196, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10098-019-01776-z.
- [42] A. Rashedi and T. Khanam, “*Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by midpoint and end point indicators of ReCiPe method*,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 23, pp. 29075–29090, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09194-1.
- [43] R. J. Bonilla-Alicea and K. Fu, “*Social life-cycle assessment (S-LCA) of residential rooftop solar panels using challenge derived framework*,” *Energy Sustain Soc*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s13705-022-00332-w.
- [44] M. Milousi, M. Souliotis, G. Arampatzis, and S. Papaefthimiou, “*Evaluating the environmental performance of solar energy systems through a combined life cycle assessment and cost analysis*,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, May 2019, doi: 10.3390/su11092539.
- [45] J. K. Daljit Singh, G. Molinari, J. Bui, B. Soltani, G. P. Rajarathnam, and A. Abbas, “*Life cycle analysis of disposed and recycled end of life photovoltaic panels in Australia*,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/su131911025.
- [46] N. Palanov, “*Life-cycle assessment of photovoltaic systems - Analysis of environmental impact from the production of PV system including solar panels produced by Gaia Solar*.”
- [47] R. Contreras Lisperguer, E. Muñoz Cerón, J. de la Casa Higuera, and R. D. Martín, “*Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels’ End-of-Life phase: Open and closed loop material flow scenarios*,” *Sustain Prod Consum*, vol. 23, pp. 157–173, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.spc.2020.05.008.

- [48] H. L. Daniela-Abigail *et al.*, “Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions,” *SustainCitiesSoc*, vol. 77, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103539.
- [49] P. Wu, X. Ma, J. Ji, and Y. Ma, “Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study,” in *EnergyProcedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 68–74. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.281.
- [50] N. A. Ludinet *al.*, “Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review,” Nov. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.048.
- [51] C. Lamnatou and D. Chemisana, “Concentrating solar systems: Life Cycle Assessment (LCA) and environmental issues,” 2017, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.065.
- [52] J. Peng, L. Lu, and H. Yang, “Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems,” 2013, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.035.
- [53] A. Sumper, M. Robledo-García, R. Villafañila-Robles, J. Bergas-Jané, and J. Andrés-Peiró, “Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain),” 2011, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.023.
- [54] R. Laleman, J. Albrecht, and J. Dewulf, “Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation,” 2011, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.025.
- [55] Varun, I. K. Bhat, and R. Prakash, “LCA of renewable energy for electricity generation systems - A review,” Jun. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2008.08.004.
- [56] M. Krebs-Moberg, M. Pitz, T. L. Dorsette, and S. H. Gheewala, “Third generation of photovoltaicpanels: A life cycle assessment,” *RenewEnergy*, vol. 164, pp. 556–565, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.054.

- [57] M. Pehnt, “Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies,” *RenewEnergy*, vol. 31, no. 1, pp. 55–71, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.03.002.
- [58] A. Salvi, V. Arosio, L. Monzio Compagnoni, I. Cubiña, G. Scaccabarozzi, and G. Dotelli, “Considering the environmental impact of circular strategies: A dynamic combination of material efficiency and LCA,” *J Clean Prod*, vol. 387, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.135850.
- [59] M. P. Tsang, G. W. Sonnemann, and D. M. Bassani, “Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 37–48, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.04.024.
- [60] C. E. L. Latunussa, F. Ardente, G. A. Blengini, and L. Mancini, “Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 101–111, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.03.020.
- [61] J. Yuan, X. Xu, B. Huang, Z. Li, and Y. Wang, “Regional planning of solar photovoltaic technology based on LCA and multi-objective optimization,” *ResourConservRecycl*, vol. 195, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.106977.
- [62] E. Carnevale, L. Lombardi, and L. Zanchi, “Life cycle assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale,” *Energy*, vol. 77, pp. 434–446, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.028.
- [63] A. Stoppato, “Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation,” *Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 224–232, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2007.11.012.
- [64] T. H. Mehedi, E. Gemechu, and A. Kumar, “Life cycle greenhouse gas emissions and energy footprints of utility-scale solar energy systems,” *Appl Energy*, vol. 314, May 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118918.

- [65] G. Ansanelli, G. Fiorentino, M. Tammaro, and A. Zucaro, “A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels,” *ApplEnergy*, vol. 290, May 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116727.
- [66] S. Gerbinet, S. Belboom, and A. Léonard, “Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review,” 2014, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2014.07.043.
- [67] M. Souliotis, N. Arnaoutakis, G. Panaras, A. Kavga, and S. Papaefthimiou, “Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications,” *RenewEnergy*, vol. 126, pp. 708–723, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.011.
- [68] H. Wang, E. Oguz, B. Jeong, and P. Zhou, “Life cycle and economic assessment of a solar panel array applied to a short route ferry,” *J Clean Prod*, vol. 219, pp. 471–484, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.124.
- [69] F. Guarino, S. Longo, C. Hachem Vermette, M. Cellura, and V. La Rocca, “Life cycle assessment of solar communities,” *Solar Energy*, vol. 207, pp. 209–217, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.089.
- [70] D. L. Reed, “Life-Cycle Assessment in Government Policy in the United States,” 2012. [Online]. Available: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss
- [71] N. F. Voudoukis, “Photovoltaic Technology and Innovative Solar Cells,” *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 2, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.24018/ejece.2018.2.1.13.
- [72] E. Doğan and Y. Karakilçik, “Türkiye’de güneş panellerinden enerji üretimi: Konya ili üzerine bir değerlendirme.”
- [73] A. Sharma, P. Mahajan, and R. Garg, “End-of-life solar photovoltaic panel waste management in India: forecasting and environmental impact assessment,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 1961–1980, Jan. 2024, doi: 10.1007/s13762-023-04953-2.

- [74] J. Tariq, "Incorporating LCA in Solar PV Design and Planning for Sustainability Optimization", doi: 10.13140/RG.2.2.30139.77600.
- [75] "Yaşam döngüsü analizi nedir?", Çevre ve Şehircilik Bakanlığı [Online], 2023. Available: www.rec.org.tr
- [76] J. Fan, S. Glick, and K. Paustian, "Thesis life cycle assessment and life cycle cost of photovoltaic panels on lake street parking garage" 2014.
- [77] "Türk standardı çevre yönetimi-Hayat boyu değerlendirme-İlkeler ve çerçeve (ISO 14040:2006)", TSE, 2007.
- [78] G. Şirin, D. Aydemir, and G. Gündüz, "Sürdürülebilirlik ve Ahşap Malzemede Yaşam Döngüsü Analizi Kullanımı," *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, Jun. 2024, doi: 10.24011/barofd.1345241.
- [79] Y. L. Tezi, "Pirinanın hidrotermal karbonizasyon yöntemi ile kömürleştirilmesi" Enstitü Anabilim Dalı Çevre Mühendisliği.
- [80] Ötleş, S., Üçok, B. (2018), Kapalı Döngü - Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi, *Plastik & Ambalaj Dergisi*, 2018(2), 45-54.
- [81] U. De Lleida, K. Ali, I. Menoufi, A. Castell, and L. F. Cabeza, "An overview on life cycle impact assessment (LCIA) methodologies: State of the art life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies", 2011.
- [82] "Hükümetlerarası iklim değişikliği paneli (IPCC)." [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch>
- [83] J. F. Bornman, P. W. Barnes, S. A. Robinson, C. L. Ballaré, S. D. Flint, and M. M. Caldwell, "Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: Effects on terrestrial ecosystems," Jan. 01, 2015, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c4pp90034k.
- [84] M. S. Khan, S. Soomro, W. Asif, A. Mehmood, S. Ahmed "Life Cycle Analysis Of Solar Pv Panels For Their Eficiency, Cost And Environmental Performance: A Case Study Of Hyderabad" 2020
- [85] E. C. Sabir, "Yenilikçi Soya Lifi İçeren Mamul Denim ve Spor Giyim Kumaşların Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)," 2023.

- [86] Ö. Eren, “Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çukurova Bölgesinde tatlı sorgum (*sorghum bicolor (l.) moench*) üretiminde yaşam döngüsü enerji ve çevresel etki analizi” Doktora Tezi Tarım Makinaları Anabilim Dalı
- [87] D. Lindholm, J. Selj, T. Kjeldstad, H. Fjær, and V. Nysted, “CFD modelling to derive U-values for floating PV technologies with large water footprint,” *Solar Energy*, vol. 238, pp. 238–247, May 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.04.028.
- [88] D. J. Erickson, B. Sulzberger, R. G. Zepp, and A. T. Austin, “Effects of stratospheric ozone depletion, solar UV radiation, and climate change on biogeochemical cycling: Interactions and feedbacks,” Jan. 01, 2015, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c4pp90036g.
- [89] O. Tatar, “Ayak İzleri ve Yeşil Uygulamalar”, Uluslararası 3. Su Kongresi, Fuar İzmir, 2015

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. SEN, Feyza. & PUSAT, S. (2024). LIFE CYCLEASSESSMENT(LCA) ANALYSIS FOR PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELMANUFACTURING: A CASE STUDY. 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICALENGINEERING ISTANBUL 2024 (ICAME 2024)

2. SEN, Feyza. & PUSAT, S. (2025), ENVIROMENTAL IMPACT ANALYSIS OF SOLAR PANEL MANUFACTURING: A SimaPro- BASED LCA APPROACH. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS ISTANBUL 2025 (ICES2025)