

**FOTOVOLTAYİK SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRMALI  
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ VE MALİYET  
ANALİZİ**

**COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT AND COST  
ANALYSIS PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

**ERMAN FENERCİ**

**Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR EKİCİ**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

*Üzerimdeki desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anne ve babam Ayfer & Ali Fenerci ile kardeşim Hasan Aytek Fenerci'ye ithafen.*

## ÖZET

### FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRMALI YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ VE MALİYET ANALİZİ

**Erman FENERCİ**

**Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR EKİCİ**

**Eylül 2019, 74 sayfa**

Günümüzde elektrik eldesi için giderek daha sık tercih edilen bir araç olan fotovoltaik sistemler, her ne kadar operasyonel oldukları süre boyunca karbon salımına neden olmasalar da yaşam döngülerinin kimi aşamalarında (örneğin; üretim, atık bertarafı gibi) malzeme ve enerji yoğun süreçlere ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden fotovoltaik sistemlerin çevresel etkilerinin bütüncül olarak değerlendirilebilmesi için ilgili sistemlerin yaşam döngüsü değerlendirmesine tabi tutulması şarttır. Bu sebeplerden, küresel ölçekte en çok tercih edilen iki fotovoltaik teknolojisi (monokristal ve multikrisal fotovoltaikler) Ankara konumu için yaşam döngüsü değerlendirmesine tabi tutulmuş ve bu yolla gerek akademik dünya gerekse de yatırımcılar gibi farklı paydaşlara hangi modül teknolojisinin ilgili konum için çevresel açıdan daha uygulanabilir olduğuyla ilgili karşılaştırmalı sonuçlarının sunulması istenmiştir. Monokristal

modül kullanan fotovoltaik sistemler silikonun saflaştırılması ve yonga üretimi aşamalarında oldukça enerji yoğun süreçler içerdiğinden gerek birincil enerji ihtiyacı gerekse de sera gazı salımları açısından multikristal modüllü sistemlerle karşılaştırıldıklarında daha az çevreci bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca bu bulgulara ek olarak multikristal fotovoltaik sistemler her ne kadar daha az verimliliğe sahip olsalar da Ankara konumu için daha kısa enerji geri dönüş süresine ve daha yüksek yatırılan enerjiye karşı geri dönen enerji miktarına sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Fotovoltaikler, Enerji Geri Dönüş Süresi, Sera Gazı Salımları, Yatırılan Enerjiye Karşın Geri Dönen Enerji

# **ABSTRACT**

## **COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT AND COST ANALYSIS PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

**Erman FENERCİ**

**Master of Science, Department of Clean Renewable Energies**

**Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR EKİCİ**

**September 2019, 74 pages**

There is a growing interest for photovoltaics in terms of electricity generation. Though they are considered as a carbon neutral way of energy generation, they do cause carbon emissions as they require material and energy intensive flows at most stages (e.g. production, waste disposal etc.) of their life cycle. Therefore, in order to evaluate environmental effects of photovoltaic systems properly in a holistic way, it is necessary to assess photovoltaic electricity generation considering a life cycle approach. To meet this particular need, two globally most demanded photovoltaic technologies (monocrystalline and multicrystalline photovoltaics) have been subjected to a life cycle assessment by an electricity generation scenario in Ankara. In doing so, different stakeholders (decision makers and investors) are targeted to be informed related to the comparative results of which module technology is more environmentally feasible for electricity generation in Ankara. Monocrystalline

photovoltaic systems inherit energy intensive processes particularly during the purification of silicon and production of wafers. That's why monocrystalline photovoltaic systems are less environmental compared to multicrystalline in terms of primary energy demand and greenhouse gas emissions. In addition to these findings, although multicrystalline photovoltaic systems have less efficiency, they have shorter energy payback time (EPBT) and higher amount of energy returned of energy invested (ERoEI).

**Keywords:**Life Cycle Assessment, Photovoltaics, Energy Payback Time, Greenhouse Gas Emissions, Energy Return on Energy Invested

## TEŞEKKÜR

Lisanüstü eğitimim boyunca engin bilgilerinden yararlandığım, sadece bilimsel anlamda değil sahip oldukları tecrübelerle de yoluma ışık tutan, sabırlarını esirgemeyerek her zaman samimi bir şekilde yanımda olduklarını hissettiren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Aynur ERAY ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür EKİCİ'ye,

Her koşulda bana destek veren, önceliklerimi her zaman kendi önceliklerinin önüne koyan ve bunun karşılığını hiçbir zaman tam olarak ödeyemeyeceğim, bugünlere gelmemde en büyük katkı sahibi aileme,

Sonsuz Teşekkürler...

Erman FENERCİ

Eylül 2019, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER .....	ix
ÇİZELGELER .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Motivasyon.....	1
1.2. Problem Tanımı .....	3
2. GENEL BİLGİLER .....	9
2.1. Genel Görünüm .....	9
2.1.1. Küresel Kurulu Güç.....	11
2.1.2. Fotovoltaiklerden Elektrik Eldesi .....	14
2.1.3. Fotovoltaiklerin Üretimi.....	16
2.1.4. Göze ve Modül Verimlilikleri .....	20
2.1.5. FV Sistem Maliyetleri .....	23
2.2. Fotovoltaik Teknolojileri.....	26
2.2.1. Kadmiyum Tellür (CdTe) Fotovoltaikler.....	27
2.2.2. Bakır İndiyum Galyum Selenid (CIGS) Fotovoltaikler.....	28
2.2.3. Amorf Silikon Fotovoltaikler.....	28
2.2.4. Organik Fotovoltaikler .....	29
2.2.5. Kristal Silikon Bazlı Fotovoltaikler .....	30
2.2.5.1. Monokristal Silikon Fotovoltaikler .....	31
2.2.5.2. Multikristal Silikon Fotovoltaikler.....	34
2.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD).....	39
2.3.1. Genel Bilgi.....	39



2.3.2. YDD: ISO Standardları Ve Metodoloji.....	40
2.3.2.1. Amaç ve Kapsam .....	41
2.3.2.2. Envanter Analizi .....	42
2.3.2.3. Etki Değerlendirmesi .....	44
2.3.2.4. Yorumlama.....	45
2.3.3. YDD Avantaj ve Kısıtları .....	46
3. MODELLEME.....	48
3.1. Fotovoltaiklerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi .....	48
3.2. Amaç ve Kapsam .....	49
3.2.1. Çalışmanın Amacı .....	49
3.2.2. Fonksiyonel Birim .....	50
3.2.3. Çalışmanın Kapsamı .....	50
3.2.4. Kabuller ve Kullanılan Araçlar.....	51
3.3. Göstergeler ve Değerlendirme.....	53
3.3.1. Birincil Enerji İhtiyacı.....	54
3.3.2. Enerji Geri Dönüş Süresi .....	54
3.3.3. Sera Gazı Salımları .....	55
3.3.4. Yatırılan Enerjiye Karşın Geri Dönen Enerji.....	55
4. SONUÇLAR .....	56
4.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları .....	56
4.2. Tartışma .....	58
4.2.1. Kümülatif Enerji İhtiyacı .....	58
4.2.2. Sera Gazı Salımları .....	60
4.2.3. Sistem Ömrü Boyunca Üretilen Elektrik Enerjisi .....	60
4.2.4. Birim Elektrik Başına Sera Gazı Salımları .....	61
4.2.5. Enerji Geri Dönüş Süreleri .....	63
4.2.6. Karşılaştırmalı Maliyet Analizi .....	63
5. TARTIŞMA VE YORUM.....	65
6. KAYNAKLAR.....	68
EKLER .....	76

Tez Çalışması Orjinallik Raporu.....	76
ÖZGEÇMİŞ .....	77

## ŞEKİLLER

Şekil 1.1.	Küresel yenilenebilir enerji tüketimi (1965 – 2016) (TWh).....	4
Şekil 1.2.	Elektrik eldesi, ısı ve ulaşım kaynaklı yenilenebilir enerji talep oranları (2017 – 2023) (%) .....	5
Şekil 1.3.	Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim miktar ve tahminleri (%).....	6
Şekil 1.4.	Fotovoltaik modül fiyatlarına karşın küresel kurulu güç (MW) (1976-2016).....	7
Şekil 2.1.	2017 yılı enerji teknolojisine göre kurulan güç miktarı (GW) .....	11
Şekil 2.2.	Fotovoltaik kurulu güç ve yıllık kapasite artışları (2007-2017).....	12
Şekil 2.3.	Fotovoltaik küresel kapasitesinin ülkelere göre dağılımı (2007-2017) .....	13
Şekil 2.4.	Kişi başına düşen FV kurulu güç (Watt) (2016).....	14
Şekil 2.5.	Uluslararası Enerji Ajansı Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu FV elektrik üretim projeksiyonları (TWh) (2018).....	16
Şekil 2.6.	Dünya fotovoltaik göze üretim kapasitesi (GW) (2005 – 2018) .....	17
Şekil 2.7.	Fotovoltaik yıllık üretim miktar ve oranları (2017).....	17
Şekil 2.8.	Evsel fotovoltaik sistem fiyatlarına karşın maliyetler (2018) .....	18
Şekil 2.9.	Fotovoltaik göze ve modül verimlilikleri (2018).....	22
Şekil 2.10.	Fotovoltaik göze verimlilik Trendi (2018) .....	22
Şekil 2.11.	Yıllık modül fiyat trendi ve çeşitli piyasalardaki fiyat değişimleri (USD/W) .....	24
Şekil 2.12.	Seçili ülkelerde seviyelendirilmiş FV elektrik maliyetlerinin değişimi (USD/kWh) (2010 – 2018) .....	25
Şekil 2.13.	Küresel FV kurulu güç, kapasite faktörü, seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri değişimi (2010-2018).....	26
Şekil 2.14.	Kadmiyum tellür paneller .....	27
Şekil 2.15.	Esnek CIGS güneş gözesi .....	28
Şekil 2.16.	Monokristal, multikristal ve amorf silikon yapılar .....	29
Şekil 2.17.	Organik fotovoltaik güneş gözesi .....	30
Şekil 2.18.	Tek kristal silikon külçe üretimi .....	32

Şekil 2.19.	Multikristal hammaddesi.....	35
Şekil 2.20.	Fotovoltaik teknolojileri üretim miktarları (2017).....	36
Şekil 2.21.	Multikristal modül deseni.....	37
Şekil 2.22.	Kristal yapılarda granüller ve granül sınırları.....	38
Şekil 2.23.	Yaşam döngüsü analizi çerçevesi.....	40
Şekil 2.24.	Yaşam döngüsü değerlendirmesi akış diyagramı.....	43
Şekil 2.25.	Çalışmaya konu olan fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü sınırları.....	49
Şekil 4.1.	Farklı aşamalar için enerji ihtiyaçları.....	59
Şekil 4.2.	Farklı aşamalar için sera gazı salımları.....	60

## ÇİZELGELER

Çizelge 2.1.	2040 yılına dek FV küresel kurulu güç projeksiyonları .....	9
Çizelge 2.2.	Fotovoltaik teknolojisi mevcut durum ve hedefleri .....	19
Çizelge 3.1.	Süreç bazlı YDD veri kaynakları.....	51
Çizelge 3.2.	Fotovoltaik elektrik üretimi sistem kabulleri .....	53
Çizelge 4.1.	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları.....	57
Çizelge 4.2.	Fosil yakıt kaynaklarından sera gazı salım miktarları .....	62
Çizelge 5.1.	Mono/ Multikristal fotovoltaikler YDD sonuçları .....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

°C	Derece Santigrat
AM	Hava Kütlesi
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
g	Gram
GWp	Gigawatt Pik
kWh	Kilowatt Saat
m <sup>2</sup>	Metrekare
MJ <sub>prim</sub>	Mega Joule Cinsinden Birincil Enerji
ppm	Milyonda Bir Birim
TW	Terawatt
TWh	Terawatt Saat
W/m <sup>2</sup>	Watt/Metrekare
Wp	Watt Pik

### Kısaltmalar

Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
a-Si	Amorf Silikon
CdTe	Kadmiyum Tellür
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenid
COP	Conference of the Parties
CSG	Crystalline Silicon on Glass

c-Si	Kristal Silikon
CSP	Concentrated Solar Power
ERoEI	Energy Return on Energy Invested
FV	Fotovoltaik
GES	Güneş Enerji Sistemi
HES	Hidroelektrik Santral
IEA	International Energy Agency
IPCC	Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
LCD	Liquid Crystal Display
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LCoE	Levelised Cost of Electricity
mc-Si	Multikristal Silikon
MPP	Maksimum Güç Noktası
poly-Si	Polikristal Silikon
sc-Si	Single crystalline silicon
STK	Standart Test Koşulları
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USD	Amerikan Doları
USEPA	United States Environmental Protection Agency
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi





# 1. GİRİŞ

## 1.1. Motivasyon

Günümüzün kârlılık odaklı ekonomik sistemleri azami çıktı hedefi ile aşırı kaynak tüketerek gezegenimizin sahip olduğu doğal kaynakların sınırlarını zorlamaktadır. Dünyamız her ne kadar tüm canlılığın serpilmesi adına cömert bir şekilde gerekli kaynakları kullanımımıza sunsa da, ilgili kaynakların aşırı tüketime dayalı yaşama alışkanlıklarının devamlılığı amacıyla bilinçsiz bir şekilde tüketilmesi sürdürülebilir değildir. Bundan ötürü çağımızın kalkınma ve insani gelişmişlik kavramlarının sürdürülebilirliği dikkate alan eleştirel bir bakış açısı ile yeniden yorumlanmasına ihtiyaç vardır. Gezegenin her yerinde insana yaraşan yaşam koşullarının herkes için eşit şekilde sağlanabilmesi ancak içinde bulunduğumuz ekosistemin sahibi değil de bir parçası olduğuna kavradığımız an gerçekleşebilir. Ve yine ancak bu anlayışla günümüz nesillerinin ihtiyaçlarını, gelecek kuşakların ihtiyaçlarını karşılayabilme olanaklarından ödün vermeden sağlayarak [1] sürdürülebilir kalkınma koşuluna ulaşabiliriz.

Sürdürülebilir kalkınmanın önündeki engellerin üstesinden gelebilmenin en etkin yollarından biri farklı sektörlerde bulunan organizasyonların çevresel inovasyona odaklanmasından geçmektedir. Çevresel inovasyon kurumların çevresel faydayı amaçlayarak ürün, hizmet ve süreçlerini farklı seviyelerde iyileştirmesi ve geliştirmesi olarak tanımlanabilir [2]. Bu tür yenilikler mevcutta tanımlı olan ürün, hizmet ya da süreçlerin kimi iyileştirmelerle geliştirilmesi şeklinde olabileceği gibi sektörleri dönüştüren, tamamıyla yeni, çığır açıcı pratiklerin [3] ortaya konması formunda da karşımıza çıkmaktadır. Böylesine yeniliklerin hayat bulabilmesi için kolektif şekilde değişmesi gereken zihniyete paralel olarak temiz teknolojiler şeklinde de adlandırılan ve çevresel faydayı gözeten teknolojik çözümlerin ortaya çıkarılıp yaygınlaştırılması şarttır.

Bu noktada bir teknolojinin temiz olarak kabul edilebilmesi için bulunduğu ekosisteme öncülünden ya da mevcut durumdaki muadillerinden daha yüksek

bir çevresel fayda sunması gereklidir. Bu fayda veya faydaların tam anlamıyla kavranabilmesi adına ilgili teknolojilerin çevresel performanslarının sistem bakış açısı ile bütüncül göstergeler kullanılarak değerlendirilmeye tabi tutulması önemlidir [4]. Bu tip değerlendirmelerde sistemik bakış açısı, hiçbir teknolojik çözümün etkileşim içerisinde olduğu komşu sistemler olmadan var olamayacağı kabulünden hareketle uygulanmalıdır. İlgili teknolojilerin beşikten mezara (üretimden kullanıma, bakım ve tamirinden atığa dönüşmesine) dek tüm yaşam döngüsünde arz ve talebin oluşturduğu nedensellikler vardır. Günümüzde bu nedensellikler sebebiyle oluşan çevresel etkilerin hesaplanarak ortaya konabilmesi için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) metodolojisi sıklıkla kullanılmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi bir teknolojinin çevresel performansını tüm yaşam döngüsü boyunca sebep olduğu toplu girdi (su, malzemeler, arazi kullanımı, enerji) ve çıktıları (ürünler, atık ve salımlar) hesaba katarak ortaya koymaktadır. YDD, ele alınan teknolojik çözümün (ürün, hizmet ya da süreç) sistemik olarak herhangi bir aşamasına (hammadde eldesi, üretim, ambalajlama, dağıtım, kullanım, ömür sonu) odaklanarak, ilgili aşama için çevresel etkileri nicel olarak görebilmemize olanak sağlamaktadır.

Temiz teknolojilerin her zamankinden daha büyük bir ivmeyle hayatımıza girdiği günümüzde piyasadaki mevcut teknolojilerin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü bakış açısı ile ortaya konması yanında yeni teknolojilerin laboratuvar aşamasından test aşamalarına kadar bu anlayışla tasarlanması araştırma geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin bu perspektif ile önceliklendirilmesi ve uzun vadede çevreye fayda sağlayacak ürün, hizmet ya da süreçlerin ortaya çıkabilmesi için önemlidir. Bu bağlamda yaşam döngüsü metodolojisi, temiz teknolojilerin çevresel faydalarının azami seviyeye çekilebilmesi için karar verme mekanizması olarak da kullanılmaktadır [5].

Yaşam döngüsü değerlendirilmesi bir ürün, hizmet ya da sürecin çevresel etkilerinin nicel olarak saptanması ve bu sonuçların karar verme mekanizmalarında içgörü olarak kullanılabilmesi gibi kuvvetli yönleri ile öne çıksa da halen çeşitli kısıtlarla karşı karşıyadır. YDD ile gerçekleştirilen çevresel

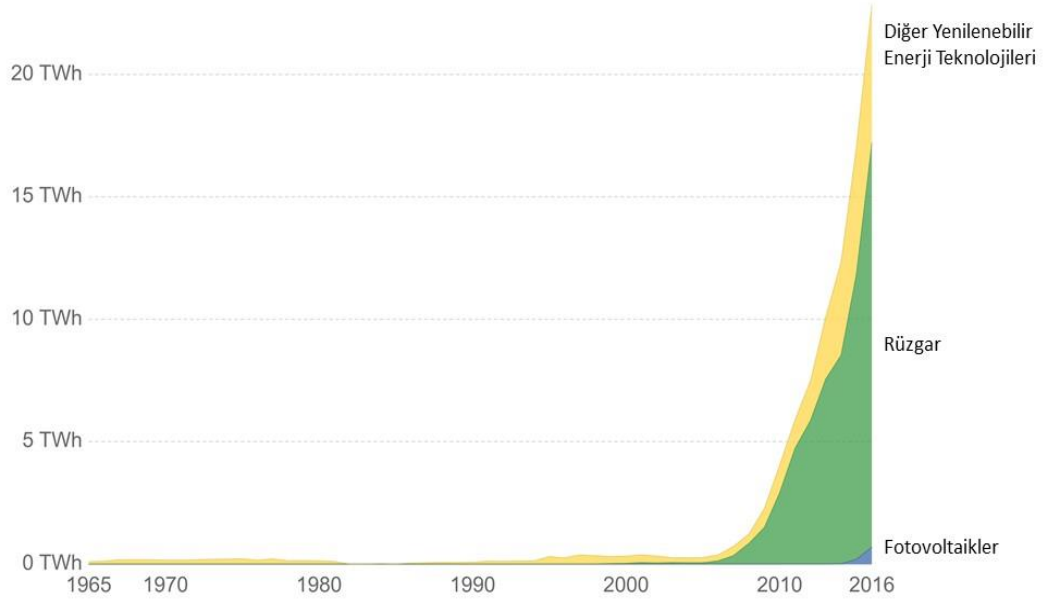
etki değerlendirmelerinin sonuçları ağırlıklı olarak başlangıç koşullarına bağlı olarak farklılaşmaktadır. Sistem sınırlarından fonksiyonel birimin nasıl tanımlandığına, modelleme tercihlerinden, çevresel etkilerin bölüştürülmesine kadar, YDD uygulaması sırasında alınan bir çok karar çevresel etki sonuçlarını farklı oranlarda etkileyebilmektedir [6], [7]. Buna ek olarak çevresel etki sonuçlarının, YDD çalışmasının tüm paydaşlarıyla sağlıklı bir biçimde paylaşılabilmesi için muhattapların yaşam döngüsünün teknik terminolojisine hakim olması gerekmektedir. YDD uygulamalarında sonuçların kesinliğini etkileyen bir diğer kriter ise yerel etkilerin hesaba katıldığı verilerin kolaylıkla bulunamamasıdır. Bunun nedeni çevresel etki değerlendirmesi yapılacak ürün, hizmet ya da süreçlerin değer zincirlerinin beşikten mezara farklı düzeylerde birden çok veri noktasından beslenmesidir.

Bu yüksek lisans tezinde YDD'nin yukarıda bahsi geçen kuvvetli ve zayıf yönleri dikkate alınarak sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunan temiz tükenmez enerji teknolojilerinden fotovoltaiklerin (FV) elektrik üretiminin yaşam döngüsü ele alınacaktır. Bu bağlamda monokristal ve multikristal silikon fotovoltaiklerden elde edilen elektrik enerjisinin karşılaştırmalı çevresel etki sonuçları ve bunun yanında enerji yatırım getirisi (ERoEI) odağından maliyet analizi Ankara, Türkiye için ortaya konacak ve elde edilen sonuçlar yorumlanacaktır.

## **1.2. Problem Tanımı**

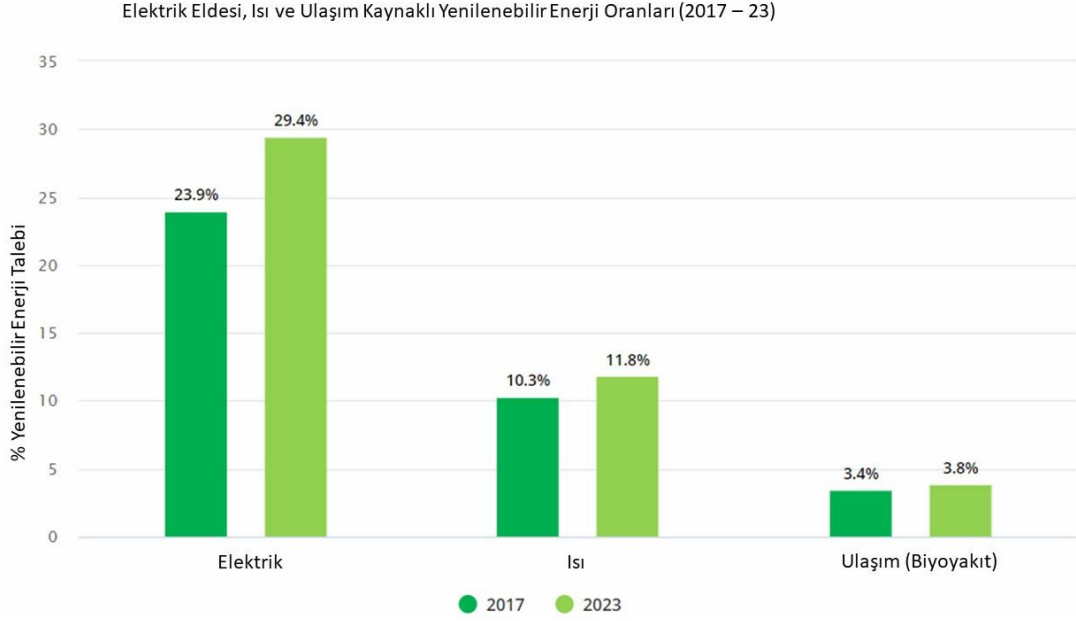
Günümüz enerji ihtiyacına paralel olarak fosil yakıtlar hızla tükenmekte ve küresel sera gazı salımları artmaktadır. Bu durum enerji güvenliği, çevre ve sürdürülebilirlik gibi birbiri ile ilintili ve karmaşık problemleri beraberinde getirmektedir. Bu sebeple yaşam döngüleri boyunca daha düşük salıma sebep olan, temiz, tükenmez ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan talep günden güne artmaktadır (şekil 1.1.) [8].

## Küresel Yenilenebilir Enerji Tüketimi (TWh)



Şekil 1.1. Küresel yenilenebilir enerji tüketimi (1965 – 2016) (TWh), [9]

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebin bu denli artmasının nedenlerine baktığımızda ilk sırayı yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin aldığı görülmektedir. 2017 yılı itibarıyla yenilenebilir kaynaklara olan talebin yaklaşık %24'ünün elektrik eldesi için olduğu görülmekte ve bu oranın önümüzdeki sadece birkaç yıl içerisinde, 2023 senesinde Uluslararası Enerji Ajansı (IRENA) tarafından %30 civarlarına çıkması beklenmektedir (Şekil 1.2.). Bu talebi, %11,8 ile yenilenebilir kaynaklardan ısı eldesi, %3,8 ile de biyoyakıtların ulaşım amaçlı kullanılması faaliyetleri takip edecektir.



Şekil 1.2. Elektrik eldesi, ısı ve ulaşım kaynaklı yenilenebilir enerji talep oranları (2017 – 2023) (%), [10]

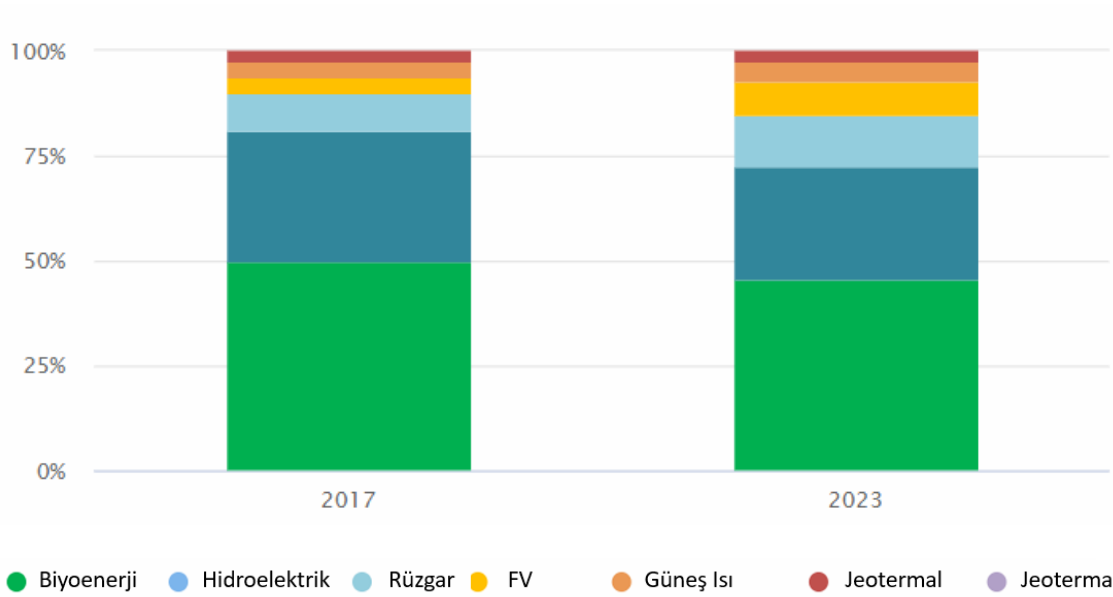
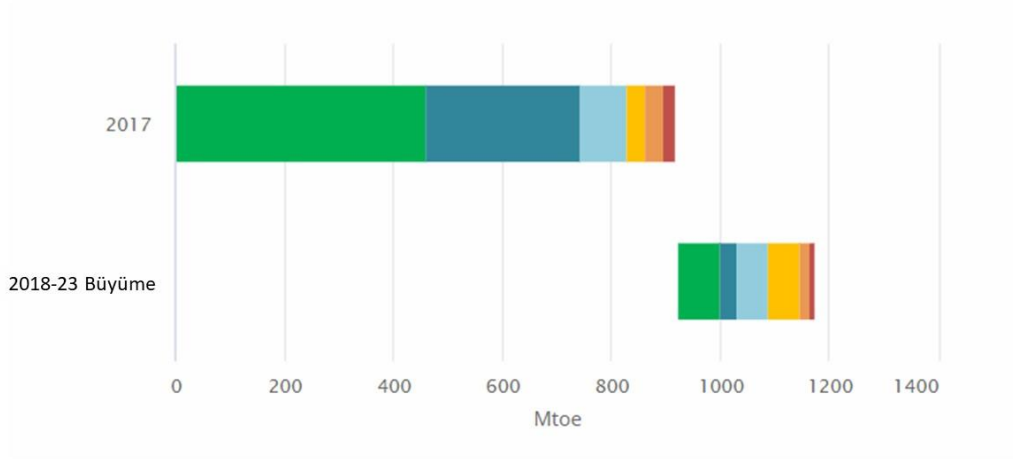
Aynı zaman aralığı içerisinde küresel enerji arzındaki artışın %70'inin yenilenebilir kaynaklar tarafından sağlanması öngörülmektedir. Bu artışın içerisindeki en büyük pay fotovoltaiklerden elektrik eldesi yoluyla olacaktır.

Bilindiği üzere tüm enerji kaynakları arasında güneş enerjisi dünyamızda en bol bulunan enerji türüdür ve diğer tüm yenilenebilir kaynakların temelini oluşturmaktadır. Gezegenimize bir saat içerisinde ulaşan güneş enerjisi aynı saat içerisinde dünyamız üzerindeki tüm insani faaliyetlerin ihtiyaç duyduğu enerjinin oldukça üzerindedir [11].

Günümüzde güneşten enerji eldesi için üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar güneş ısıtma/soğutma sistemleri, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri (CSP) ve fotovoltaiklerdir [12].

Fotovoltaikler güneşten dünyamıza ulaşan fotonların yarıiletken malzemeler vasıtasıyla elektrik akımına dönüştürülmesi esasına göre elektrik üretmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim miktarlarına bakıldığında

fotovoltaiklerin 2017 yılı itibarıyla hidroelektrik santraller (HES), karasal rüzgar santralleri ve biyokütle kaynaklarının ardından 4. sırayı aldığı görülmektedir (Şekil 1.3.).

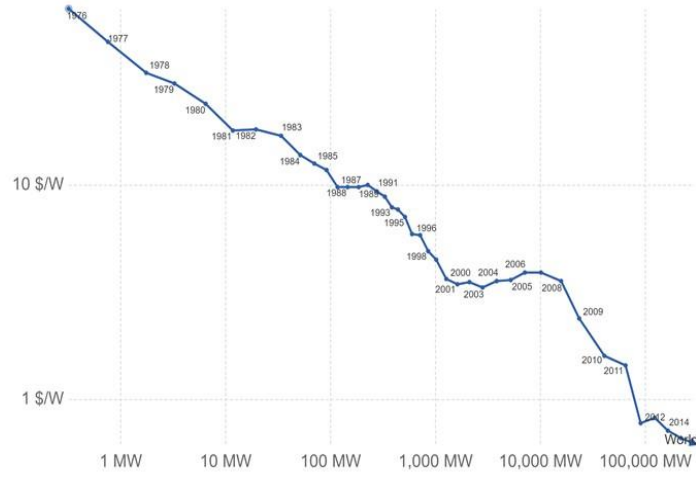


Şekil 1.3. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim miktar ve tahminleri (%), [10]

Fotovoltaiklerden elektrik eldesinin gitgide daha sık bir şekilde tercih edilmesinin nedenleri arasında düşen fotovoltaik sistem üretim maliyetlerinin etkisi büyüktür.

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan modül maliyetlerinin küresel kurulu güce etkisine baktığımızda modüllerin 40 yıl öncesine göre neredeyse %1'i kadar bir maliyetle ulaşılabılır olması, küresel FV kurulu gücünü 40 yıl öncesi ile karşılaştırıldığında bir milyon kat kadar artırmıştır (Şekil 1.4.) [13].

Fotovoltaik Modül Fiyatları – Küresel Kurulu Güç (1976 – 2016)



Şekil 1.4. Fotovoltaik modül fiyatlarına karşın küresel kurulu güç (MW) (1976-2016), [13]

Buna bağlı olarak evsel bazlı kullanılan fotovoltaik sistem maliyetleri, dünyanın birçok yerinde perakende elektrik fiyatlarının altına kadar gerilemiştir. Orta-uzun vadede ise ticari fotovoltaik sistemler özel teşvik ve politikalar olmadan dahi erişilebilirlik ve enerji eldesi açısından yeterince rekabetçi bir konumda yer alacaktır [14].

Fotovoltaik teknolojileri içerisinde kristal silikon (c-Si) bazlı teknolojiler (monokristal ve multikristal) küresel kurulu gücün %90'ını oluşturmaktadır [15]. Bu kurulu güç içerisinde monokristal silikon (single crystal silicon) (sc-Si)

teknolojiler %35, multikristal silikon (multi crystal silicon) (mc-Si) teknolojiler ise %55'lik payla yer almaktadır. Bu oranlara bakıldığında kristal silikon bazlı FV teknolojilerin fotovoltaik piyasasına hükmettiğini ve bu üstünlüğün herhangi bir teknolojik gelişme olmasa dahi kristal silikon bazlı FV kurulu güç değerlerini 2050'li yıllarda TW'lar seviyesine çıkarması beklenmektedir [16].

Tüm bu sebeplerden ötürü kristal silikon bazlı FV teknolojilerini kullanan güneş enerji sistemlerinin (GES) yaşam döngüsü değerlendirmesine tabi tutulması, ilgili teknolojilerin sürdürülebilirliğini çevresel açıdan ölçümleyip karşılaştırabilmemiz açısından elzemdir.

YDD yöntemleri ile odaklanılacak temiz teknoloji için malzeme, enerji girdi ve çıktıları yerelden küresele uzanan bir perdede analiz edilebilmektedir. Bu analiz hammadde eldesinden ömür sonuna dek odaklanılan sistemin dolaylı girdilerinin de (örneğin gömülü enerji) hesaba katılmasıyla gerçekleşmektedir. Bu noktada odaklandığımız enerji kaynağının çevresel etkilerinin yaşam döngüsü bakış açısı ile sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için yerel etkilerin hesaba katılması önem taşımaktadır. Zira yerelde değişen coğrafi, çevresel, ekonomik ve sosyal koşullar enerji üretimi için seçilecek kaynağın lokasyon bazlı farklılık göstermesine neden olmaktadır.

Bu yüksek lisans tezinde YDD'nin yukarıda bahsi geçen kuvvetli ve zayıf yönleri dikkate alınarak sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunan temiz tükenmez enerji teknolojilerinden fotovoltaiklerin (FV) elektrik üretiminin yaşam döngüsü ele alınacaktır. Bu bağlamda monokristal ve multikristal silikon fotovoltaiklerden elektrik üretiminin karşılaştırmalı çevresel etki sonuçları ve enerji yatırım getirisi (ERoEI) odağından maliyet analizi Ankara, Türkiye için ortaya konacak ve sonuçları yorumlanacaktır.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Genel Görünüm

Her sene Birleşmiş Milletler Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) tarafından düzenlenen Taraflar Konferanslarının (COP) en önemli gündemlerinden birinin enerji sektörü kaynaklı karbon salımlarının azaltılması olduğu görülmektedir [17]. 2016 yılı istatistiklerine göre küresel düzeyde üretilen elektrik enerjisinin kWh'ı başına 490 g'lık bir karbon salımı açığa çıkmıştır [18]. Her ne kadar bu miktar bir önceki sene ile karşılaştırıldığında [19] %8 oranında bir düşüşe işaret ediyorsa da Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) Yeni Politika Senaryosuna göre karbon salımlarının 2040 yılına dek üretilen birim elektrik enerjisi (kWh) başına 325 g altında bir seviyeye düşmesi gereklidir [20]. Güneş enerjisinin sürdürülebilir kalkınma modellerindeki karbon salım hedeflerine ulaşabilmemiz için sağlayabileceği katkılar benzer birçok senaryoda vurgulanmaktadır (Çizelge 2.1.) [21].

Çizelge 2.1. 2040 yılına dek FV küresel kurulu güç projeksiyonları

Yıl	2018 (GW)	2020 (GW)	2025 (GW)	2030 (GW)	2040 (GW)
Kurulu Güç	516	-	-	-	-
Greenpeace (baz senaryo)	-	332	413	494	635
Greenpeace (devrim senaryosu)	-	844	2000	3725	6678
LUT %100 Yenilebilir Senaryosu	-	1168	3513	6980	13805
BNEF NEO 2018	-	759	1353	2144	4527

Yıl	2018 (GW)	2020 (GW)	2025 (GW)	2030 (GW)	2040 (GW)
IEA Yeni Politika Senaryosu 2016	-	481	715	949	1405
IEA 450 ppm senaryosu	-	517	814	1278	2108
IEA Yeni Politika Senaryosu 2018	-	665	1109	1589	2540
IEA Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu 2018	-	750	1472	2346	4240

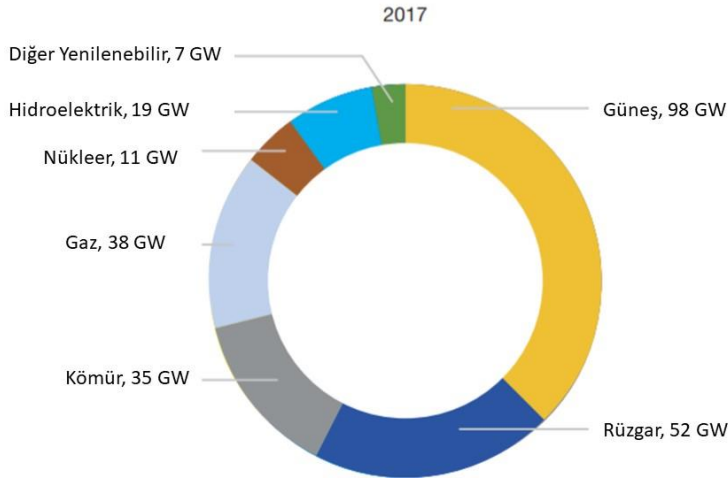
Güneşten elektrik eldesi noktasında küresel düzeyde en büyük pay fotovoltaiklere aittir. Fotovoltaiklerden elektrik eldesinin 2025 yılında küresel elektrik üretim miktarının %22'sine tekabül ederek senelik 6300 TWh'e, 2050 yılında ise yıllık 40000 TWh'lik bir miktar ile küresel üretimin %70'ine yükselmesi beklenmektedir [22]. Bunun için 2025 yılındaki FV kurulu güç miktarının 4 TW, 2050 yılındaki kurulu gücün ise 21,9 TW kadar olması gereklidir. Bu projeksiyonun yakalanması için 2018 yılı itibarıyla senelik kurulum miktarı ilk defa üç haneli değerler üzerine çıkan [23] fotovoltaiklerin yıllık kapasite artışlarının benzer bir trend ile artmaya devam etmesi gereklidir.

Yakın geçmişe dek küresel fotovoltaik kurulumlarına hız katan en büyük etken kamu politika ve teşvikleri olduysa da bu durum günümüzde piyasa aktörlerinin artan ilgisine paralel yatırım kararları alması ile de perçinlenmeye başlamıştır. [24] Bu ivmeye ileri malzeme araştırmaları ve FV sistem bileşenlerinin üretim yöntemlerindeki gelişmeler hız katmaktadır.

### 2.1.1. Küresel Kurulu Güç

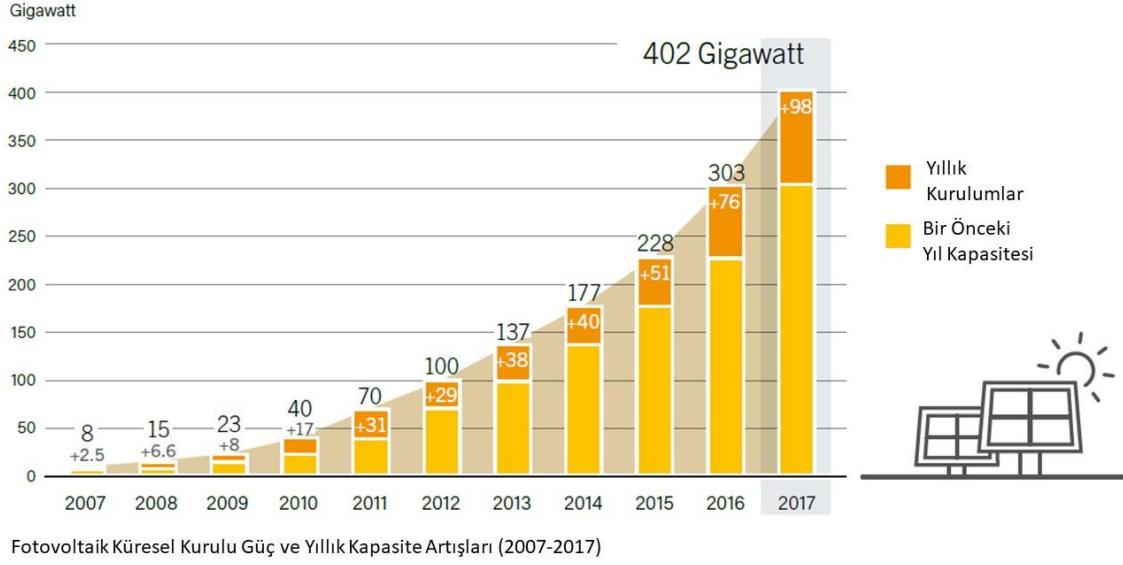
2017 senesi fotovoltaik teknolojisi için çığır açan bir yıl olmuştur. Fotovoltaikler, elektrik eldesi için tüm enerji kaynaklarından daha fazla senelik kapasite artış değerine ulaşmıştır. 2017 yılında fosil yakıt ve nükleer enerji kapasite artış değeri toplamda 84 GW düzeylerinde kalırken, başlı başına fotovoltaik teknolojilerdeki kapasite artışı 98 GW seviyesine ulaşmıştır (Şekil 2.1.) [25].

2017 Yılı Enerji Teknolojisine Göre Kurulan Güç Miktarı (GW)



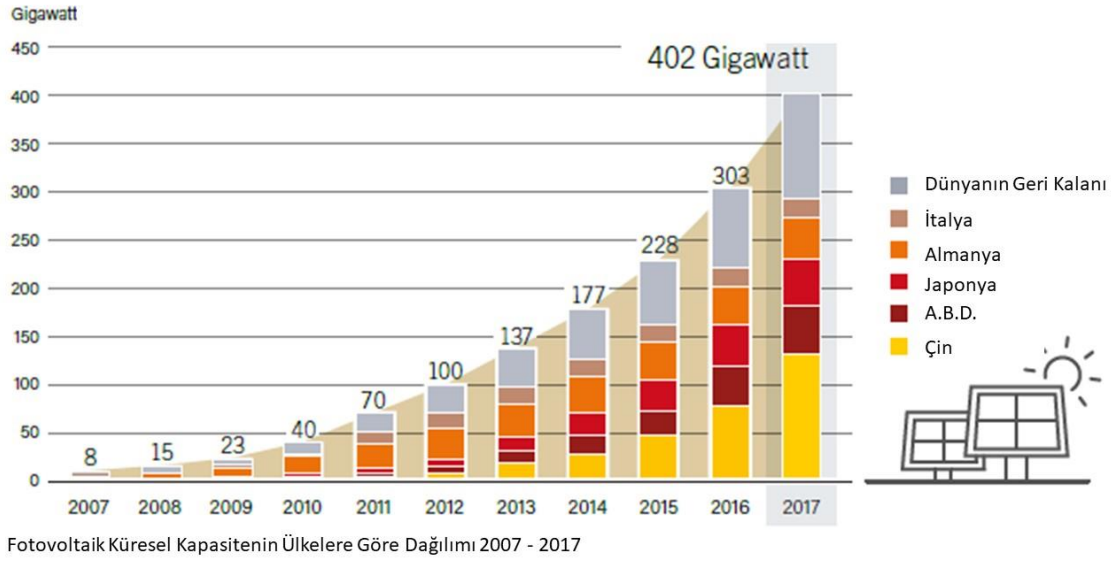
Şekil 2.1. 2017 yılı enerji teknolojisine göre kurulan güç miktarı (GW), [26]

Fotovoltaikler 2017 yılında Çin Halk Cumhuriyeti, Hindistan, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde senelik kurulu güç kapasite artışlarında en çok katkıyı veren enerji teknolojisi olmuştur. Bu trend ile birlikte 2007-17 yılları arasında küresel FV kapasitesi 50 kattan fazla artmıştır (Şekil 2.2.). Böylesine bir artış dünyada saat başına yaklaşık olarak 40000 fotovoltaik panelin kurulması anlamına gelmektedir.



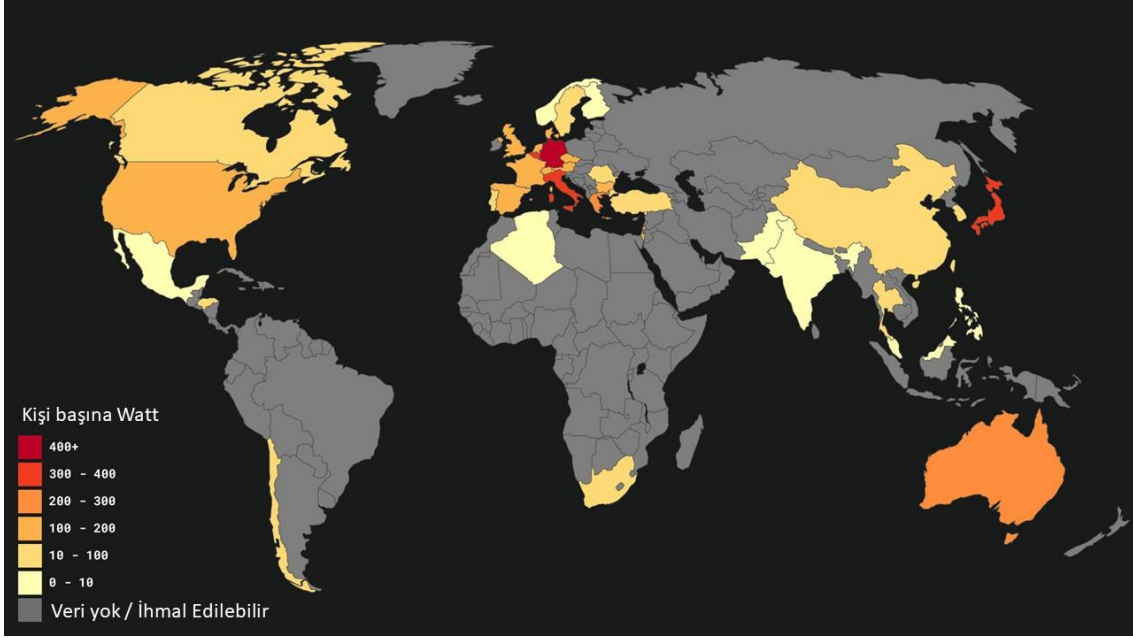
Şekil 2.2. Fotovoltaik kurulu güç ve yıllık kapasite artışları (2007-2017), [27]

Dünya geneline baktığımızda 2017 yılında tüm kurulumların %84'ünden sırasıyla Çin Halk Cumhuriyeti, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Japonya ve ülkemiz Türkiye sorumludur. Bu tablo küresel kurulumların büyük bir kısmının (%75) Asya kıtası kaynaklı olduğunu göstermektedir. 2017 yılı için yukarıda bahsi geçen ilk beş ülkeyi sırasıyla Almanya, Avustralya, Güney Kore Cumhuriyeti, Birleşik Krallık ve Brezilya takip etmektedir. Küresel kurulu güçte Çin Halk Cumhuriyeti'nin ardından Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Almanya ve İtalya gelmektedir (Şekil 2.3.) [27].



Şekil 2.3. Fotovoltaik küresel kapasitesinin ülkelere göre dağılımı (2007-2017), [28]

Her ne kadar son yıllarda belli başlı ülkelerin fotovoltaik kapasite artışı konusunda başı çektığı gözlemlense de tüm kıtalardan ülkeler artan bu trende katkıda bulunmaya başlamıştır. 2017 yıl sonu itibarıyla her kıtada asgari 1 GW FV kapasite artışı yaşanmış ve 29 ülke 1 GW'ın üzerinde kurulu güçle küresel kapasiteye katkıda bulunmuştur. Kişi başına kurulu güçte en yüksek değerler sırasıyla Almanya, Japonya, Belçika, İtalya ve Avustralya'da görülmektedir (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Kişi başına düşen FV kurulu güç (Watt) (2016), [29]

Fotovoltaiklerin piyasa payının bu denli artmasında gelişmekte olan ülkelerdeki enerji ihtiyacının hızla yükselmesi, güneş enerjisinin enerjide dışa bağımlılığı azaltıcı bir araç olması ve düşen fiyatlar nedeniyle ilgili teknolojinin giderek daha erişilebilir hale gelmesi önde gelen nedenlerdendir. Tüm bu sebeplerden ötürü güneş enerjisi ile birlikte bir çok yenilenebilir kaynaktan elde edilen elektrik enerjisi için hükümet politikaları ve regülasyonlar destekleyici rol üstlenmektedir [30].

Tüm bu olumlu gelişmelere rağmen fotovoltaiklerin küresel ölçekte elektrik eldesinde lokomotif görevi üstlenebilmesi için halen aşılması gereken bazı engeller bulunmaktadır [31].

### 2.1.2. Fotovoltaiklerden Elektrik Eldesi

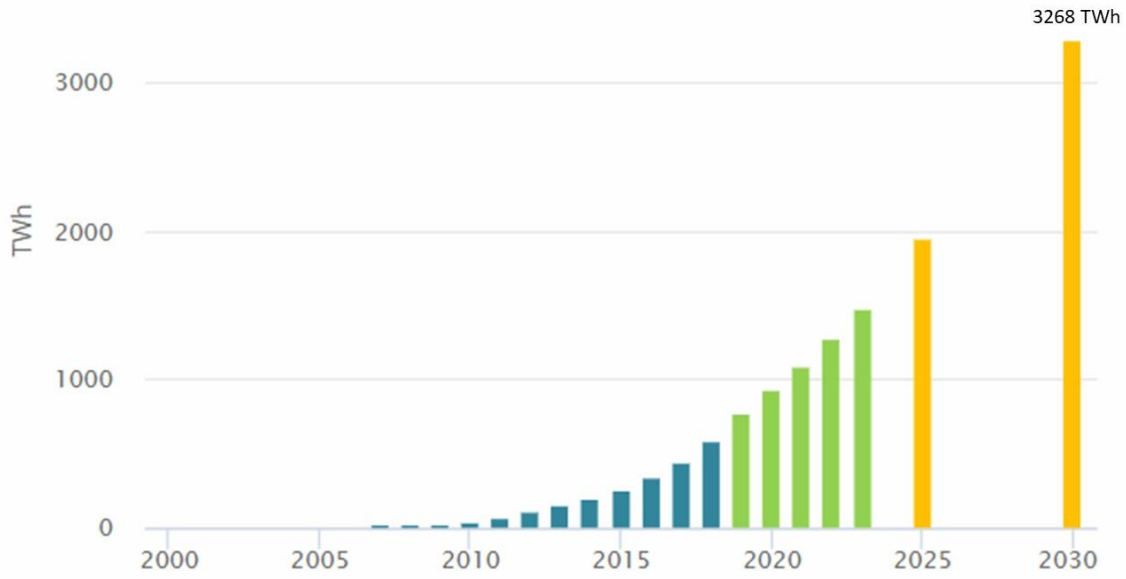
2018 yılında yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik miktarı bir önceki sene ile karşılaştırıldığında %7'lik bir artışa tanıklık etmiştir. Fotovoltaikler ile rüzgar enerjisi bu artışın %60'ından sorumludur. Her ne kadar günümüzde küresel elektrik arzının %26'sı yenilenebilir kaynak bazlı olsa da yenilenebilir enerji,

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) gibi önde gelen kuruluşların iyimser gelecek senaryoları [32] ile örtüşmek için artan bir ivme ile gelişmeye devam etmek durumundadır.

2018 yılında yenilenebilir kaynakları kullanan enerji sistemlerinin küresel kurulu güç değerleri önceki senelerle karşılaştırıldığında aynı hızla artmamış olmasına rağmen fotovoltaiklerden elde edilen elektrik enerjisi miktarı 136 TWh'lık bir değer ile %31 oranında yükselmiş ve yenilenebilir elektrik içerisindeki en büyük paya sahip olmuştur [32]. Bu miktarı rüzgar elektriği ve hidroelektrik takip etmektedir. Küresel ölçekte yaşanan belirsizliklere rağmen fotovoltaiklerden elektrik eldesi cazibesini koruyarak artırmaktadır.

2018 yılında fotovoltaiklerden elde edilen elektrik enerjisi %30'a yakın bir oranda artarak 570 TWh'a ulaşmıştır. Bu artış ile fotovoltaik kaynaklı elektrik üretiminin yıllık küresel elektrik arzındaki payı ilk defa %2'nin üzerine çıkmıştır. Bu haliyle fotovoltaik elektriği dünyadaki yenilenebilir kaynaklardan elektrik eldesi noktasında 4. büyük kaynak haline gelmiştir. Sırasıyla hidroelektrik, karasal rüzgar santralleri ve biyoenerji ise ilk üçte yer almaktadır.

2018 yılı FV kurulu güç kapasite artışı, 2016 – 2017 dönemindeki %100'lük artışın ardından göreceli olarak yavaşlamıştır. Bunun nedeni Çin Halk Cumhuriyeti ve Amerika Birleşik Devletleri gibi anahtar pazarlarda süregelen politika değişikliklerine bağlı belirsizliklerdir. Buna rağmen küresel ölçekte fotovoltaik modül fiyatları %10 civarında düşmüştür. Bu gelişmelere bakıldığında 2018 yılında anahtar pazarlarda sınırlı büyümeye rağmen fotovoltaikler mevcut durumdaki gelişim trendlerini korudukları takdirde Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosuna (SDS) 2030 yılı itibarıyla ulaşabilecektir (Şekil 2.5.).



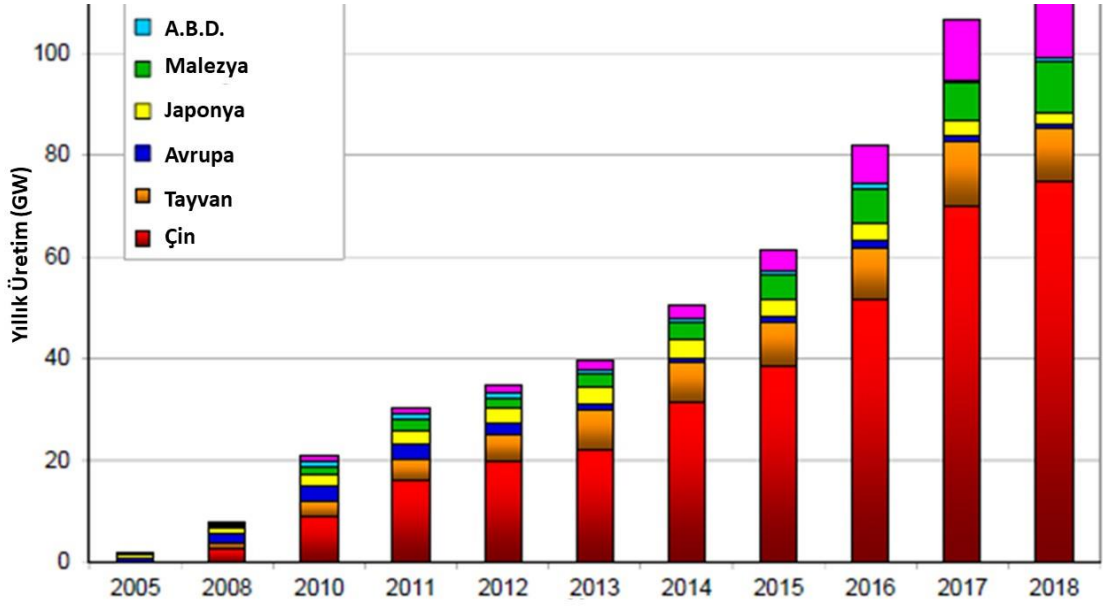
Şekil 2.5. Uluslararası Enerji Ajansı Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu FV elektrik üretim projeksiyonları (TWh) (2018), [32]

Maliyetlerin hızla düşmesi ve istikrarlı politika ve regülasyon destekleri sayesinde fotovoltaik teknolojinin önümüzdeki 5 yıl içerisinde Çin gibi aktörlerin başı çekeceği bir büyüme ile ön plana çıkması beklenmektedir [33].

### 2.1.3. Fotovoltaiklerin Üretimi

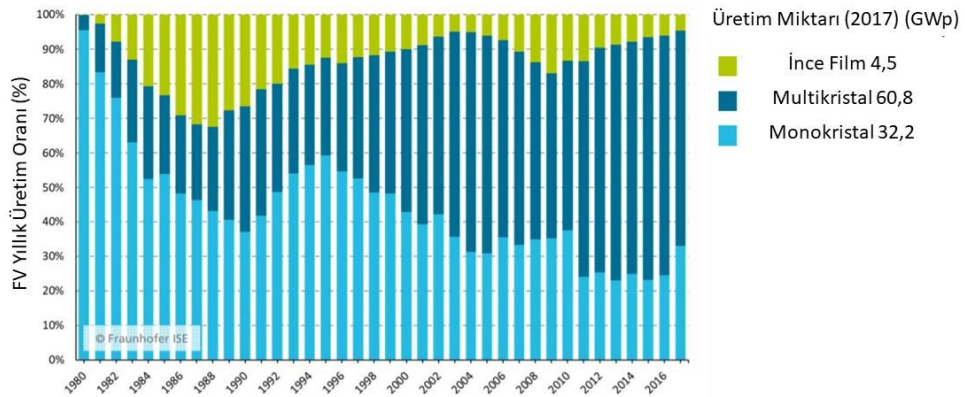
2017 yılı itibarıyla 100 GWp dolaylarında olan küresel güneş gözesi üretim miktarının 2018 yılında 110 – 120 GWp dolaylarına çıktığı tahmin edilmektedir (Şekil 2.6.) [19]. Küresel üretim tahminlerinin net olmamasının nedeni sektörde faaliyet gösteren kuruluşların bir çoğunun üretim verisini doğrudan paylaşmaması ve üretim tahminlerinin sadece satış ve ihracat rakamları üzerinden çıkarılıyor olmasıdır.





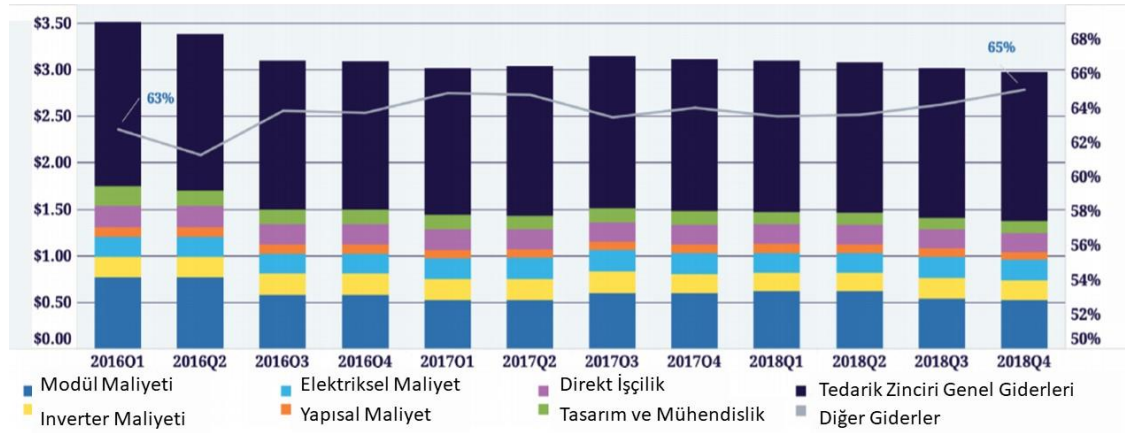
Şekil 2.6. Dünya fotovoltaik göze üretim kapasitesi (GW) (2005 – 2018), [34]

2017 yılı ile karşılaştırıldığında fotovoltaik göze üretimi %7 oranında artmıştır. Kümülatif göze üretiminde en büyük pay multikristal gözelerden sonra monokristal gözelerle aittir.



Şekil 2.7. Fotovoltaik yıllık üretim miktar ve oranları (2017), [34]

Fotovoltaiklerin üretiminde son yıllarda gördüğümüz bu artış trendi geçtiğimiz 20 yıl içerisinde fotovoltaik sistem bileşen fiyatlarının % 80 oranında düşmesinin bir sonucudur. Özellikle evsel bazlı kullanılan fotovoltaik sistemlerin donanımsal bileşenleri, işçilik, satış, pazarlama gibi faaliyetlerden kaynaklanan maliyetlerdeki değişimle karşılaştırıldığında daha hızlı bir düşüş göstermiştir (Şekil 2.8.) [35].



Şekil 2.8. Evsel fotovoltaik sistem fiyatlarına karşın maliyetler (2018), [35]

Geçtiğimiz 10 yıl içerisinde küresel ölçekte seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri (LCoE) %75 oranında düşmüştür. Bu gelişme güneş enerjisinin dünya genelinde birçok ülke tarafından daha sıklıkla tercih edilir hale gelmesinden ötürüdür. Bir diğer neden ise 2005 yılı sonrası FV üretim sektörünün Çin Halk Cumhuriyeti kaynaklı yükselişidir. Bu gelişmeler her ne kadar pazarın büyümesine neden olsa da beraberinde fiyatların aşağıya inmesi ile artan rekabete karşı sektörde birçok paydaş ve kurumun konsolidasyonuna neden olmuştur [36]. Artan rekabet beraberinde birçok iflas ve FV üretiminde düşen kârlılığı getirirse de sektör halen yeni yatırımcı ve girişimci tarafından cazibesini korumaktadır.

Özetle dünya genelinde fotovoltaik göze ve modüllerin üretiminde yeni gelişmeler olmaktadır. Önümüzdeki yıllarda Çin Halk Cumhuriyeti pazarının 40 – 50 GWp üretim bantlarına gelmesi ve bu gelişmeyi Hindistanın üretimdeki pazar payının büyümesi ve Afrika, Ortadoğu ve Güney Amerika’da yeni pazarların oluşması takip edecektir. Bu noktada üretim pratiklerinin giderek daha sık bir şekilde Sanayi 4.0 pratiklerinden beslenmesi maliyetleri düşürecektir. Ayrıca göze ve modül verimliliklerinin istikrarlı bir şekilde artıyor olması ve özellikle kristal silikon bazlı fotovoltaiklerin üretim yaşam döngüleri boyunca giderek daha az malzeme kullanıyor hale gelmeleri küresel fotovoltaik üretim kapasitesini artıracak etmenlerden önde gelenleridir (Çizelge 2.2.).

Çizelge 2.2. Fotovoltaik teknolojisi mevcut durum ve hedefleri, [37]

<b>Kristal Silikon Teknolojiler</b>	<b>2010 – 2015</b>	<b>2015 – 2020</b>	<b>2020-2030 / 2050</b>
<b>Verimlilik Hedefleri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monokristal: %21</li> <li>• Multikristal: %17</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monokristal: %23</li> <li>• Multikristal: %19</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monokristal: %25</li> <li>• Multikristal: %21</li> </ul>
<b>Endüstriyel Hedefler</b>	Silikon tüketimi < 5 gr /Watt	Silikon tüketimi < 3 gr /Watt	Silikon tüketimi < 3 gr /Watt

Eski teknolojiyi kullanan üreticiler, yeni üretim tekniklerini kullanan piyasa aktörlerine karşı rekabet etmekte zorlanmaktadır. Zira fotovoltaiklerdeki yeni üretim teknikleri daha düşük yatırım harcamalarını ve daha yüksek verimliliğe sahip ürünleri beraberinde getirmektedir. Bu duruma örnek verecek olursak yıllık 10000 tona yakın üretim kapasitesi olan bir multikristal göze fabrikasının 2007 senesi itibarıyla yatırım harcamaları 1,5 milyar USD iken, bu miktar 2018 yılında %90 oranında düşmüştür. Üretimdeki en büyük maliyet kalemi %20 ila %40 oranında değişmekle beraber silikon yonga üretiminde kullanılan elektrik tüketimidir [38]. Bu yüzden üreticiler yatırım harcamalarını azaltmak adına düşük enerji maliyetine sahip bölgelerde konumlanmaya çalışmaktadır. Çin Halk

Cumhuriyeti'nde gözlenen üretim artışlarında bu durumun etkisi görülmektedir. Çin Halk Cumhuriyeti'nin enerji maliyetleri Avrupa ile karşılaştırıldığında neredeyse %90 oranında daha düşük olan kuzeybatı ve güneybatı bölgelerinde multikristal silikon ve silikon yonga üretim tesislerinde geçtiğimiz yıllarda büyük bir artış görülmüştür [39].

Fotovoltaiklerin pazar payında son yıllarda gözlenen bu artış beraberinde gerek fotovoltaik sistem bileşenlerinin üretimi gerekse de fotovoltaiklerden elektrik eldesi noktasında ihtiyaç duyulan iş kollarına olan ihtiyacın artmasına neden olacaktır. Fakat bu artış, yakın gelecekte Sanayi 4.0 pratiklerinin gitgide daha sık bir şekilde üretim pratiklerinde uygulanır hale gelmesi sebebiyle daha çok fotovoltaik sistem bileşenlerinin üretimi noktasında değil de ilgili sistemlerin operasyonel hale getirilerek elektrik eldesi için kullanılması noktasında olacaktır. Zira Sanayi 4.0 pratiklerinin fotovoltaiklerin üretimindeki işçilik maliyetlerini düşürmesi beklenmektedir.

#### **2.1.4. Göze ve Modül Verimlilikleri**

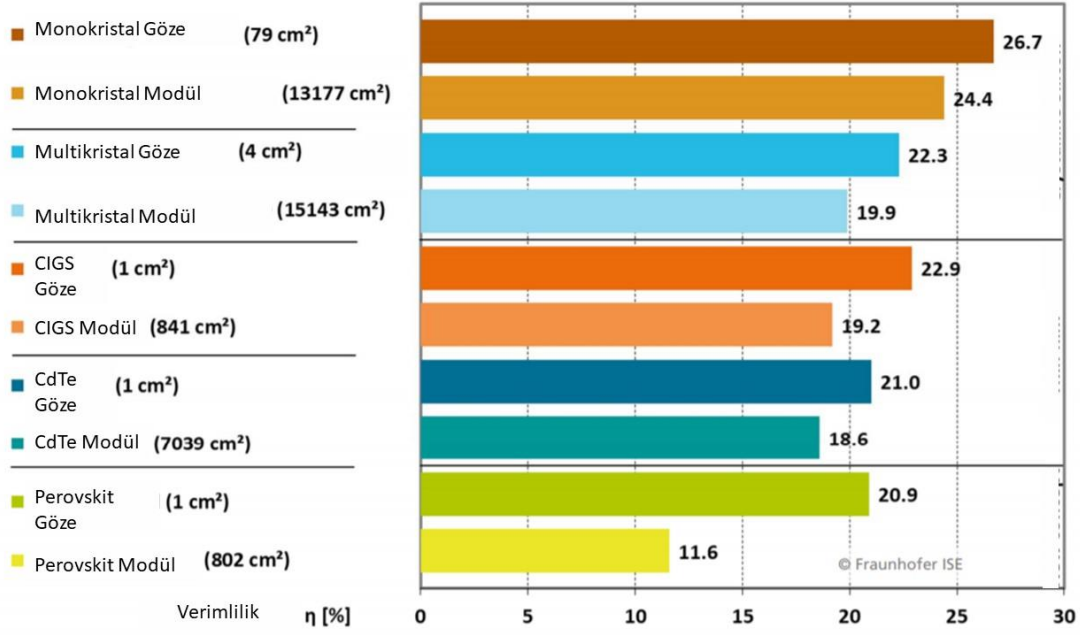
Fotovoltaikler (göze veya modül) için verimlilik ifadesi, güneşten gelen ışığın hangi oranda enerjiye dönüştürülebildiğini ifade eden bir kavramdır.

Bir güneş gözesinin verimliliği elde edilen elektriksel çıktının gelen ışık gücüne bölünmesi ile bulunur. IEC 61215 standardı, standart test koşulları (STK) (1000 W/m<sup>2</sup> ışınım, 25°C sıcaklık, AM 1,5) altında güneş gözelerinin performanslarını karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır [40]. Bu karşılaştırma değişken bir direnç yük yardımı ile güneş gözesinin Maksimum Güç Noktası (MPP) saptanarak gerçekleştirilir. Güneş gözesinin STK altında üretebileceği maksimum güç Watt Pik (Wp) cinsinden adlandırılır ve farklı gözelerin Wp değerleri verimliliklerinin saptanması için karşılaştırılır. Aynı yolla IEC 61215 standardı, fotovoltaik modüllerin verimlilik ölçümü ve karşılaştırması için de kullanılır.

Ele alınan bir fotovoltaik sistemden elde edilebilecek yıllık elektrik miktarı, kullanılan güneş gözelerinin verimliliği haricinde sistemin kurulu olduğu bölgenin bulunduğu enlem ve diğer iklimsel ölçütlerden etkilenmektedir. Örnek verecek olursak %15 verimliliğe sahip 1m<sup>2</sup>'lik alana sahip bir fotovoltaik panel standart test koşulları altında (1000 W/m<sup>2</sup> ışınım, 25 °C sıcaklık, 1,5 G hava kütlesi) anlık olarak 150 Watt üretecektir. Bu değer hava koşullarına göre değişebilir. Örneğin, aynı sistem aynı verimlilik değeri ile bulutlu günlerde daha düşük değerde bir elektrik eldesi sağlayacaktır.

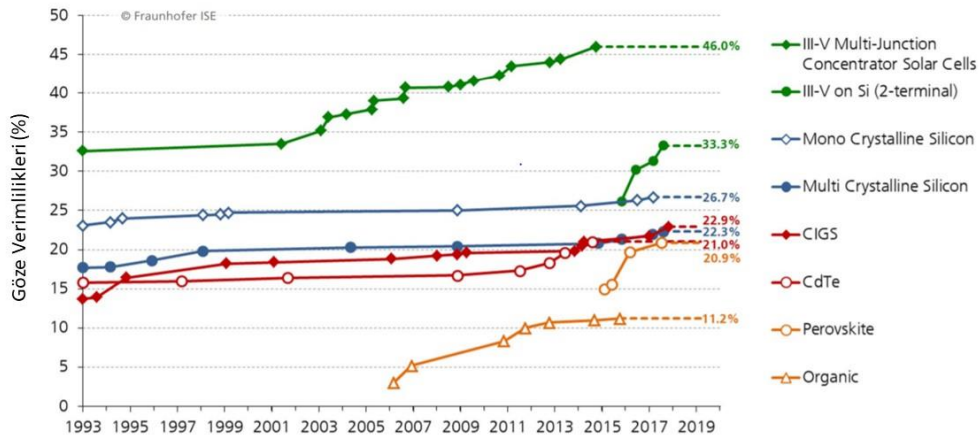
Bir güneş gözesinin verimliliğine etki eden birden fazla faktör vardır. Yansıma verimliliği, yük taşıma verimliliği, termodinamik verimlilik ve iletim verimliliği bunlardan bazılarıdır [41] [42]. Bahsi geçen kavramların ölçülmesi kolay olmadığından açık devre gerilimi, doluluk oranı gibi kavramlar güneş gözelerinin verimlilik değerlerinin gözlenmesi için kullanılır.

Günümüzde güneş gözelerinin verimlilik değerleri amorf silikon gözeler için %6'lardan başlayarak çok eklemli güneş gözeleri için %46'lara kadar çıkmaktadır [43]. Gözelerin verimliliğinde ölçeklenme ile düşüş görülmektedir. Multikristal gözeler içeren ticarileşmiş fotovoltaik modüller günümüz itibarıyla %20 civarlarında bir verimliliğe sahiptir. Bu değer monokristal gözelerden oluşan bir modül için %25'e yakındır (Şekil 2.9.). Fotovoltaik göze ve modüllerin verimlilik değerlerini ilgili göze ve modüllerin ekonomik analizi yapılmadan tek başına bir performans göstergesi olarak değerlendirmemek gereklidir. Öyle ki yüksek üretim hacmi ile imal edilen amorf silikon bir göze, düşük hacimde üretilen çok eklemli bir göze ile karşılaştırıldığında yaşam döngüsü boyunca daha ekonomik bir konumda olabilir.



Şekil 2.9. Fotovoltaik göze ve modül verimlilikleri (2018), [34]

Tüm güneş gözeleri arasında verimlilik rekoru Aralık 2014 tarihi itibarıyla Soitec, CEA-Leti ve Fraunhofer Enstitüsünün ortak olarak geliştirdiği çok eklemlili güneş gözesi sayesinde %46 değeri ile kırılmıştır (Şekil 2.10.). Bu değer multikristal ya da ince film güneş göze verimlilik değerlerinin oldukça üzerindedir.



Şekil 2.10. Fotovoltaik göze verimlilik Trendi (2018), [44]

### 2.1.5. FV Sistem Maliyetleri

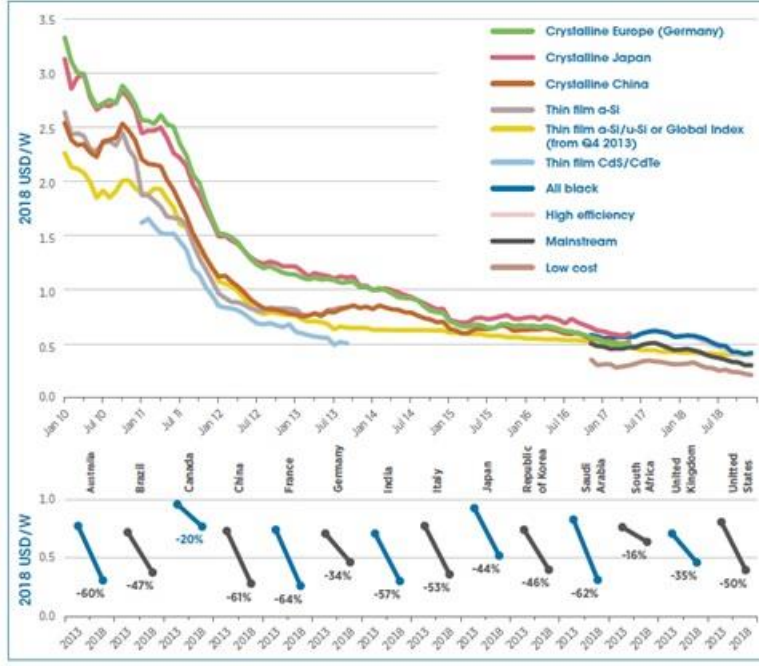
Enerji teknolojilerinin ve ilgili teknolojilerin ürettiği elektrik enerjisi maliyetlerinin zaman içerisindeki değişimini gözlemleyip yorumlamak, gerek teknolojiyi geliştiren gerekse de ilgili enerji teknolojisine yatırım yapan aktörler açısından önemlidir. Bu bağlamda seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti (Levelized Cost of Electricity – LCoE) ve öğrenme eğrisi (learning curve) kavramlarından yararlanılmaktadır [45].

Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, bir enerji santralının yaşam döngüsü boyunca neden olduğu tüm masrafların (yatırım, işletme, bakım vb.) üreteceği birim elektrik maliyeti için hesaba katılması ile ortaya çıkan birim elektrik maliyetidir.

Enerji teknolojileri için öğrenme eğrisi kavramı ise ilgili enerji teknolojisinin küresel üretim miktarının her ikiye katlandığı durumda ilgili teknolojinin fiyatındaki düşüş miktarının (%) bir ifadesidir [46].

2018 yılında fotovoltaiklerden elde edilen küresel seviyelendirilmiş ortalama elektrik üretim maliyeti 2017 yılı ile karşılaştırıldığında %13 kadar daha düşerek kWh başına 0,085 USD seviyelerine kadar gerilemiştir. Günümüzde fotovoltaiklerden elektrik eldesinin kWh başına maliyeti 2010 yılına göre %77 oranında azalmış durumdadır [47].

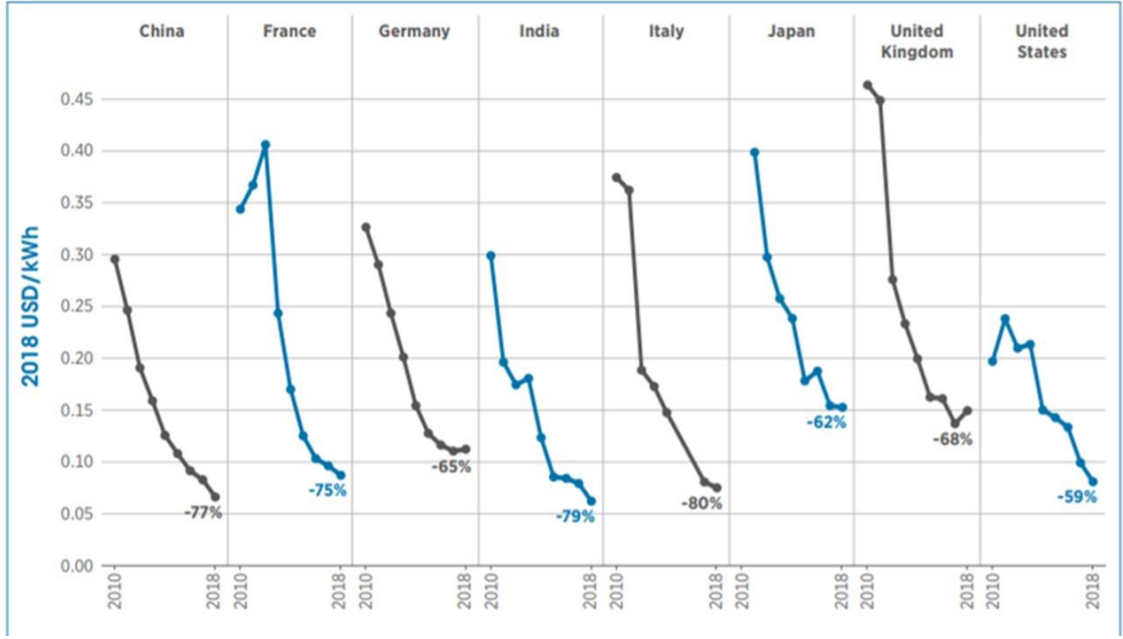
Fotovoltaikler için birim elektrik enerjisi (kWh) üretimi başına maliyetlerin bu denli düşmesinde 2017-18 yılları arasındaki 12 aylık dönemi kapsayan zaman aralığında kristal silikon bazlı fotovoltaik modül fiyatlarının dünyanın çeşitli yerlerinde %26 ila %32 arasında azalması ve diğer fotovoltaik sistem bileşenleri fiyatlarının düşmesinin etkisi vardır (Şekil 2.11.).



Şekil 2.11. Yıllık modül fiyat trendi ve çeşitli piyasalardaki fiyat değişimleri (USD/W), [47]

Ülke bazlı ağırlıklandırılmış ortalama LCoE değerlerine baktığımızda Çin Halk Cumhuriyeti'nde maliyetlerin 2018 yılında bir önceki yıla göre %20 kadar düşüp 0,067 USD/kW seviyelerine geldiği, Hindistan'da ise %21 kadar düşerek 0,063 USD/kW seviyelerine indiği görülmektedir. Benzer düşüş Amerika Birleşik Devletleri'nde de görülmüş ve LCoE %18 kadar düşerek 0,082 USD/kW olmuştur. Bu düşüşlerin aksine seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyetlerinin arttığı ülkeler de olmuştur. Örneğin Almanya 2018 yılında güneş enerjisi teşviklerinde kesintiye gittiğinden ötürü toplam kurulum maliyetlerinin senelik bazlı yükselişi dolayısıyla LCoE'de %2'lik bir artış yaşamıştır (Şekil 2.12.) [47].

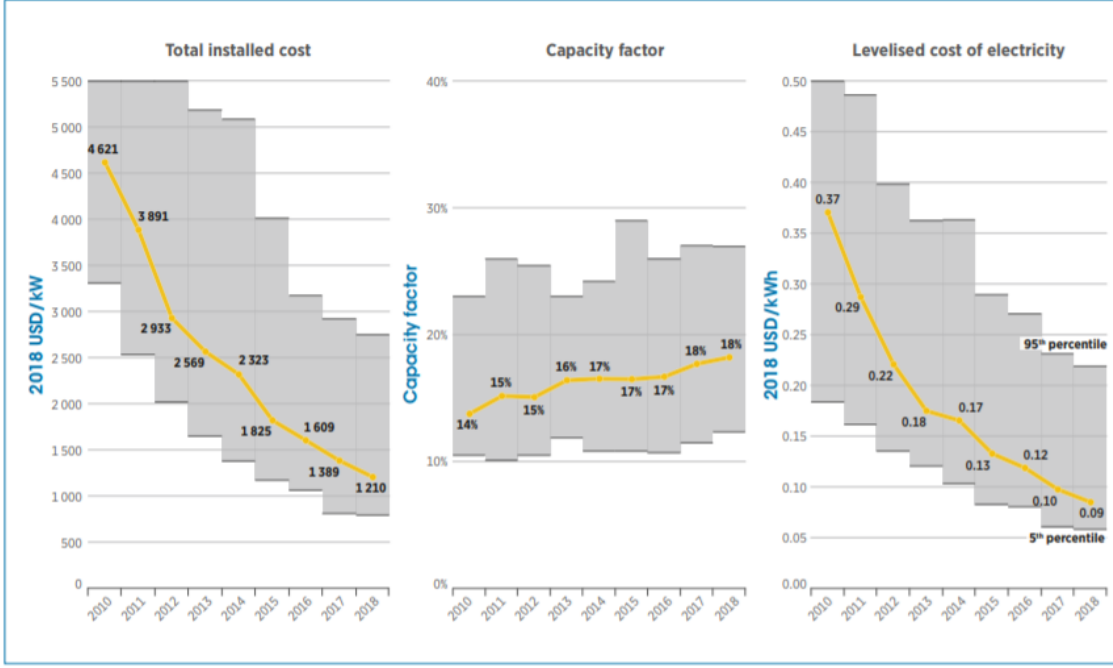




Şekil 2.12. Seçili ülkelerde seviyelendirilmiş FV elektrik maliyetlerinin değişimi (USD/kWh) (2010 – 2018), [47]

Fotovoltaiklerin seviyelendirilmiş elektrik maliyetlerinin bu denli azalmasında fotovoltaiklerin öğrenme eğrisinin tüm yenilenebilir kaynaklar arasında en yüksek orana sahip olması büyük bir etkidir.

Fotovoltaiklerden elektrik eldesinin seviyelendirilmiş maliyetlerini doğru yorumlayabilmek için ilgili maliyetlerin ana kalemlerinden biri olan fotovoltaik sistem kurulum maliyetlerini de göz önünde bulundurmak gereklidir. 2018 yılında fotovoltaik sistemlerin küresel ağırlıklandırılmış ortalama kurulum maliyetleri 2017 yılına göre %13 kadar düşüş göstermiş ve 1210 USD/kW kadar olmuştur. 2018 yılında kurulum maliyetlerinin en düşük olduğu ülke Hindistandır. Hindistan'ı 870 USD/kW ile İtalya ve 879 USD/kW ile Çin Halk Cumhuriyeti takip etmektedir Amerika Birleşik Devletleri ve Avustralya'da da sistem kurulum maliyetleri sırasıyla %16 ve %20 oranlarında düşüş göstermiş olsa da ilgili maliyetler dünya ortalamasının üzerinde kalmış ve kW başına 1500 USD kadar olmuştur. 2018 yılı için kW kurulu güç başına sistem maliyetlerinin en yüksek olduğu ülke ise 2101 USD ile Japonya olmuştur (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. Küresel FV kurulu güç, kapasite faktörü, seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri değişimi (2010-2018), [47]

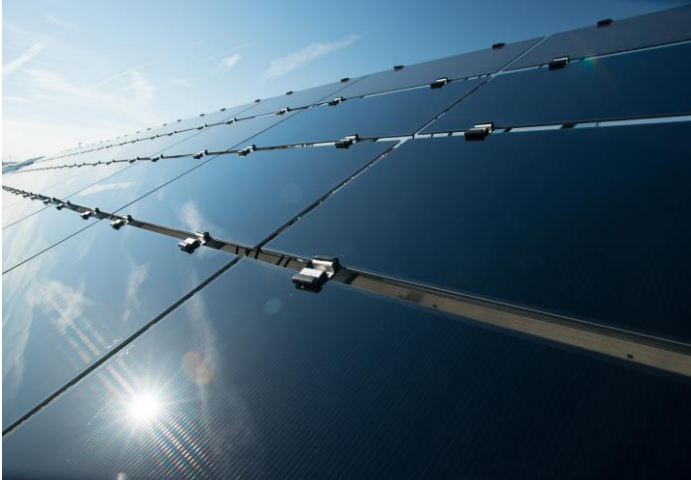
Günümüz verileri göz önüne alındığında fotovoltaiklerden elektrik eldesinin Uluslararası Enerji Ajansı tarafından 2020 yılında 0,048 USD/kWh seviyelerine kadar düşmesi öngörülmektedir [47]. 2019 ve 2020 yıllarında sırasıyla 100 GW ve 105 GW'lık senelik kapasite artış tahminleri de göz önüne alındığında fotovoltaikler 2010-2020 yılları arasında %37'lik bir öğrenme eğrisine sahip olacaktır. Bu noktada 2010-2020 yılları arasında kurulan/kurulacak olan fotovoltaik kapasitesinin 2010 yılı seviyesine göre %94'ünün tamamen yeni kurulumlar olduğunu belirtmekte fayda vardır.

## 2.2. Fotovoltaik Teknolojileri

Günümüzde elektrik eldesi için çeşitli fotovoltaik teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Bu tez kapsamında sıklıkla kullanılan fotovoltaik teknolojilerine değinilecek ve karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesine tabi tutulacak fotovoltaik teknolojilerinden monokristal ve multikristal silikon fotovoltaiklere ışık tutulacaktır.

### 2.2.1. Kadmiyum Tellür (CdTe) Fotovoltaikler

Kadmiyum Tellür güneş gözeleri (Şekil 2.14.) ince bir yarı iletken tabakanın (CdTe) güneş ışığını soğurup elektrik enerjisine dönüştürmesi esasına göre çalışan ve kristal silikon bazlı fotovoltaikleri kullanan sistemlere göre daha düşük maliyete sahip olan bir fotovoltaik teknolojisidir.



Şekil 2.14. Kadmiyum tellür paneller

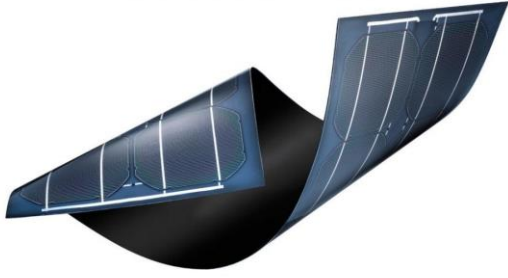
CdTe fotovoltaik sistemler ince film teknolojisi ile üretilmiş sistemlerdir ve geleneksel kristal silikon teknolojilerini kullanan sistemlere göre kW başına daha düşük kurulum maliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan CdTe modül verimlilikleri %16 civarındadır [48]. CdTe güneş gözelerinin kristal silikon bazlı gözelerle karşılaştırıldıklarında bir avantajları da güneş ışığının daha düşük dalga boylarını soğurabilmeleridir.

Günümüzde CdTe teknolojisi ile ilgili kuşklar Telluryum metalinin sınırlı tedariki [49] ve Kadmiyum elementinin, modüllerin atık haline gelmesi durumunda ortaya çıkarabileceği toksik etkiler kaynaklıdır [50]. Kapalı döngü, döngüsel ekonomi prensipleri gözetilerek tasarlanacak üretim süreçlerinin CdTe göze teknolojisini daha rekabetçi bir konuma taşıması beklenmektedir [51] [52].

### 2.2.2. Bakır İndiyum Galyum Selenid (CIGS) Fotovoltaikler

Bakır İndiyum Galyum Selenid (CIGS) güneş gözesi teknolojisi ince film teknolojisini kullanan ve içerisinde Kadmiyum gibi toksik elementleri barındırmadığından CdTe ince film güneş gözelerine alternatif olarak tercih edilen bir teknolojidir [53]. Günümüzde ince film güneş gözeleri arasında en yüksek verime sahip teknolojidir [54].

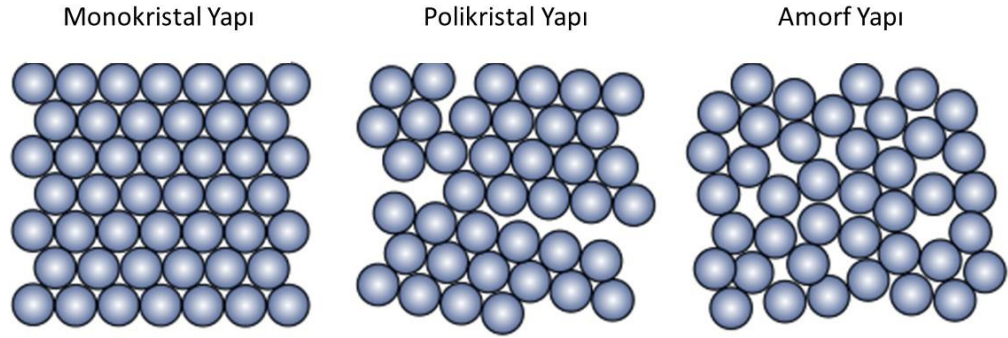
CIGS modüllerin verimliliğinin 2020 yılında %20 civarına çıkması beklenmektedir [55]. CIGS gözeler, substrat üzerine ince film biriktirme yöntemi ile üretilmekte ve kristal silikon gözelerin aksine esnek bir malzeme üzerine de imal edilebilmektedir (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. Esnek CIGS güneş gözesi, [56]

### 2.2.3. Amorf Silikon Fotovoltaikler

İnce film güneş göze teknolojilerinden CdTe ve CIGS'in haricinde üçüncü teknoloji de amorf silikondur. Amorf silikon (a-Si) silikonun kristal olmayan bir formudur (Şekil 2.16.).



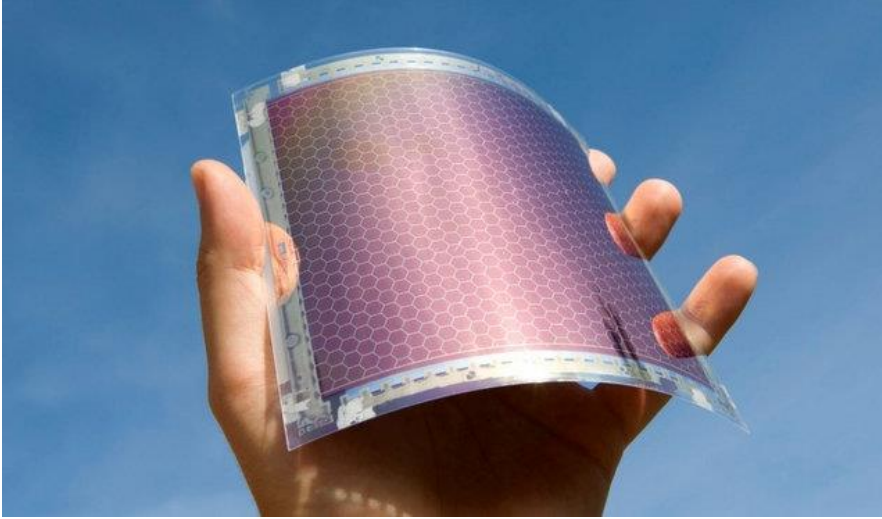
Şekil 2.16. Monokristal, multikristal ve amorf silikon yapılar

Ağırlıklı olarak güneş gözeleri ve LCD'lerin ince film transistörlerinde kullanılan amorf silikonlar cam ve metal gibi substratlar üzerine ince film yapısı ile biriktirilerek oluşturulur.

Amorf silikon gözeler birçok fotovoltaik teknolojisine göre daha düşük verimliliğe sahiptir. Günümüzde ticarileşmiş amorf silikon modüllerin ulaştığı en yüksek verim %14 kadardır [57]. Düşük verimlilik değerlerine rağmen amorf silikon modüller kadmiyum ve kurşun gibi ağır metaller içermediklerinden en çevreci fotovoltaik teknolojilerindendir.

#### 2.2.4. Organik Fotovoltaikler

Fotovoltaik teknolojilerinde organik bazlı malzemelerin kullanılması giderek daha cazip hale gelmektedir. Organik malzemeler yüksek hacimde hızlı bir şekilde, dilenen kalınlık ve şekilde üretilebilmektedir (Şekil. 2.17.).



Şekil 2.17. Organik fotovoltaik güneş gözesi, [58]

Bu tip gözeler sıklıkla kullanılan kristal silikon gözelerle karşılaştırıldıklarında hafiflikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Ayrıca esneklik ve düşük üretim maliyetleri de cazipliklerini artırmaktadır. Günümüzde organik güneş gözeleri laboratuvar ortamında %15,6'lık bir verime ulaşmıştır [59].

Bahsi geçen avantajları ve rekabetçi sayılabilecek verimlilik değerine rağmen organik gözelerden üretilen modüller geleneksel kristal silikon bazlı sistemlere göre daha hızlı bozulmaktadır [60].

### **2.2.5. Kristal Silikon Bazlı Fotovoltaikler**

Küresel ölçekte fotovoltaiklerden elektrik eldesine en büyük katkıyı veren teknoloji kristal silikon bazlı teknolojilerdir. Yakın gelecekte de bu trendin benzer şekilde devam etmesi beklenmektedir.

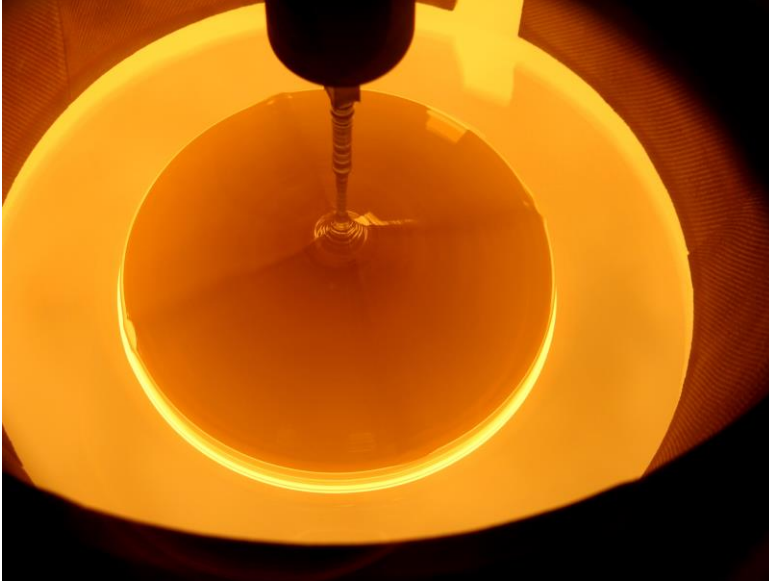
Silikon günümüz itibarıyla fotovoltaiklerin küresel kurulu gücünü TW'lar seviyesine çıkarabilecek tek yarı iletken malzeme olarak kabul edilmektedir. Her ne kadar yeni teknolojiler geliştirilmeye devam etse de silikonu etkin ve daha az maliyetle üretebilmenin yolları aranmaktadır. Bu sayede diğer fotovoltaik teknolojilerin malzeme kısıtları (CIGS gözeler için İndiyum'un, CdTe gözeler için

Kadmiyum'un sınırlı kaynaklar olması) ve kimi teknolojiler için toksik malzemelerin geri dönüştürülmesinin (CdTe gözeler için Kadmiyum) yüksek maliyeti gibi etkiler düşünülduğünde kristal silikon bazlı fotovoltaik teknolojileri daha da ön plana çıkacaktır.

### **2.2.5.1. Monokristal Silikon Fotovoltaikler**

Monokristal silikon, yüksek saflıktaki (sadece birkaç ppm safsızlık içeren) yarı iletken grad (semiconductor-grade) silikonun (SGS) eritilmesi ve tek kristal külçe formasyonunun oluşturulabilmesi için bir çekirdek yardımı ile çekilmesi gibi birden fazla süreç sonucunda elde edilir. Bu süreçler saflığın maksimum düzeye çıkarılabilmesi için Argon gibi bir soygazın bulunduğu, kuvarz tüpler içerisinde gerçekleştirilir ve bu sayede kristal yapının tekdüzeliği bozulmadan yüksek saflıkta kristal silikon elde edilmiş olur.

Monokristal silikonun eldesi için en sık kullanılan yöntemlerden biri Czochralski metodudur. Czochralski metodunda eriyik haldeki silikonun içerisine bir çekirdek çubuk batırılır. Sonrasında bu çekirdek çubuk yukarıya doğru yavaş yavaş çekilirken aynı anda da döndürülür. Bu sayede eriyik haldeki silikon çubuk üzerinde soğuyarak katılaşır ve monokristal formunda, birkaç yüz kilogram ağırlığında ve yaklaşık olarak 2 metre boyunda tek kristal silindirik külçenin oluşmasına neden olur. Bu süreç boyunca akışkanın düzenini daha sağlıklı bir biçimde kontrol edebilmek ve kristalizasyonun tekdüzeliğini sağlamak adına dışarıdan manyetik alan da uygulanabilir.



Şekil 2.18. Tek kristal silikon külçe üretimi, [61]

Monokristal silikonun eldesi için kullanılan bir diğer yöntem ise düz alan büyütme (float-zone growth) yöntemidir. Düz alan büyütme yönteminde multikristal silikon bir çubuk radyo frekansı yardımı ile ısı yayan bir bobin içerisinde geçilir ve bu sayede bölgesel eriyik alanlar oluşur. Bunun sonucunda ise çekirdek bir kristal külçe elde edilmiş olur.

Bunun haricinde monokristal silikon, Bridgman metotları yardımı ile eriyik silikonun bulunduğu tüpün bir sıcaklık gradyantına tabi tutularak soğutulması ile elde edilebilir. İlgili metotlar ile üretilen silikon külçeler silikon yonga eldesi için ince ince kesilir. Silikon yonga elde süreci sonrası yongalar fabrikasyon sürecine hazırlanır.

Polikristal külçelerin elde edilme süreçleri ile karşılaştırıldığında monokristal silikonun üretimi daha yavaş ve maliyetli olduğundan zahmetli süreçler içerir. Tüm bu zorluklara rağmen monokristale olan talep, üstün elektronik özellikleri sebebi ile artmaya devam etmektedir. Monokristal silikonda granül sınırlarının polikristal yapısına göre çok daha az olması yük taşıyıcıların daha rahat akmasına ve elektron rekombinasyonunun daha az olmasına neden olmaktadır.



Tüm bu nedenlerden ötürü entegre devreler ve fotovoltaikler için monokristal yarı iletkenler eşsiz özellikler sunmaktadır.

Monokristal silikon fotovoltaikler, multikristal silikon fotovoltaik teknolojisinin ardından en sık tercih edilen ikinci teknoloji konumundadır. Küresel ölçekte multikristal silikon gözelerin artan üretim hacmi ve gittikçe düşen maliyetleri nedeni ile monokristal silikon fotovoltaiklerin pazar payı multikristallere karşı düşmektedir. 2013 yılında monokristal gözelerin pazar payı 12,6 GW'lık senelik üretim ile %36 kadar olmuşken bu oran üç sene içerisinde 2016 yılında %25'e düşmüştür. Düşen bu pazar payına rağmen 2016 yılında üretilen monokristal göze kapasitesi 20,2 GW kadardır [34]. Bu kapasite fotovoltaik teknolojilerin günden güne artan sıklıkla tercih edildiğinin bir göstergesidir.

Monokristal silikon gözeler tek eklemlili güneş gözeleri arasında %26,7 ile en yüksek laboratuvar verimliliğine sahiptir. Verimlilik açısından monokristal silikon gözeleri %22,3 ile multikristal silikon gözeler, ince film güneş gözelerinden %21,7 ile CIGS gözeler ve %21 ile CdTe gözeler ve %10,2 ile amorf silikon gözeler takip etmektedir [62].

Monokristal silikon fotovoltaikler daha yüksek maliyetleri nedeni ile çoğunlukla ağırlık ve alan gibi sınır koşulların düşünölmek zorunda olduğu (uydular ve uzay araçları gibi) durumlarda, ve de verimliliklerinin çok katmanlı fotovoltaik teknolojileri gibi diğer teknolojiler ile harmanlanması vasıtasıyla kullanılmaktadır.

Tüm bu avantajlarının yanı sıra monokristal silikon fotovoltaik teknolojileri için göze ve modül üretim süreçlerinde atık olarak açığa çıkan malzemeler noktasında endişeler bulunmaktadır. Bu duruma modüllerdeki birim alanın etkin kullanılarak üretilebilmesi için dairesel olan yongaların (Czochralski metodu ile üretilen silindirik yapıdaki silikon külçelerin bir sonucu olarak) fabrikasyon aşamasında oktagonol olarak kesilmesi örnek olarak verilebilir. Monokristal silikon fotovoltaik gözelerin üretilmesi esnasında bunun gibi süreçler sonucu

ortaya çıkan atıklar direkt olarak göze üretimi için kullanılmadıklarından ya tamamıyla atık haline gelmekte ya da en baştan silikon külçe üretimi için eritme aşamasına gönderilmektedir. Bu da monokristal göze üretiminin yaşam döngüsünde fazladan enerji tüketimi anlamına gelmektedir.

Üretim aşamasındaki bir diğer konu da, monokristal gözelerde fiziksel ve maliyet açısından etkin yonga kalınlığını elde etme sorunudur. Öyle ki, monokristal gözelerle ulaşan fotonların büyük bir çoğunluğu 20 µm'lik bir bölgede soğurulurken, ticarileşmiş silikon yongaları üretmek için yararlanılan silikon külçe kesim tekniklerindeki limitlerden dolayı yonga kalınlıkları 200 µm civarlarında takılmıştır. Bu konuda gerçekleştirilen araştırma geliştirme çalışmaları sonucunda yonga kalınlığının 2026 yılında 140 µm'ye kadar düşürülebilmesi gündemdedir [63]. Bu yüzdesel olarak oldukça büyük bir orandır ve birim silikon külçeden çıkarılabilecek yonga sayısını ciddi miktarda artıracaktır.

Daha etkin multikristal silikon gözelerin elde edilebilmesi için bilim dünyası yenilikçi üretim yöntemleri üzerinde çalışmaktadır. Bunlardan bir tanesi epitaksiyel büyütme yöntemidir [64]. Yeni üretim süreçleri ile birlikte kare kristallerin üretilmesi ve bu sayede silindirik silikon külçelerin kesim süreçlerinde açığa çıkan gereksiz atıkların minimuma indirilmesine çalışılmaktadır.

### **2.2.5.2. Multikristal Silikon Fotovoltaikler**

Multikristal silikon (polisilikon ya da poly-Si olarak da adlandırılmaktadır) silikonun fotovoltaik ve elektronik endüstrilerinde hammadde olarak kullanılan yüksek saflığa sahip bir formudur.

Multikristaller, metalurjik grad (metallurgical grade) silikondan (MG-Si) kimyasal saflaştırma yöntemi olan "Siemens" metodu ile üretilmektedir [65].

Fotovoltaik endüstrisi kimyasal saflaştırma yöntemleri yerine kimi metalurjik süreçleri kullanarak artırılmış metalurjik grad silikon (UMG-Si) da üretebilmektedir. Bu süreçlerle elde edilen multikristaller elektronik endüstrisi için üretildiklerinde milyarda bir (ppb) safsızlıkta olurken, fotovoltaikler için üretildiklerinde (solar grade silicon, SoG-Si) düşük saflığa sahip olmaları yeterli olmaktadır. Çin Halk Cumhuriyeti, Almanya, Japonya, Kore ve Amerika Birleşik Devletlerinde bulunan kimi şirketler 2013 yılı itibarıyla yıllık 230000 tonluk bir miktar ile dünya SoG-Si üretim kapasitesinin büyük bir kısmına sahiptir.

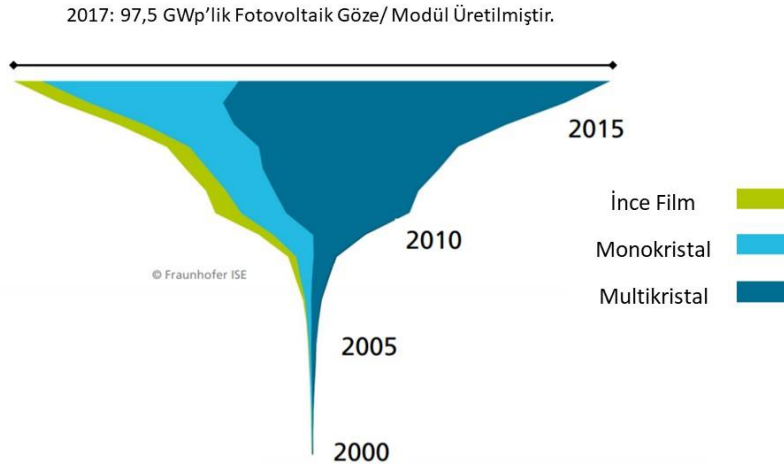
Multikristal hammaddesi, farklı boyutlarda parçalanmış çubuklardan oluşur ve direkt olarak multikristal külçelere dönüştürülmekte veya monokristal külçelerin eldesi için tekrardan kristalleştirme sürecinde kullanılmaktadır (Şekil 2.19.)



Şekil 2.19. Multikristal hammaddesi, [66]

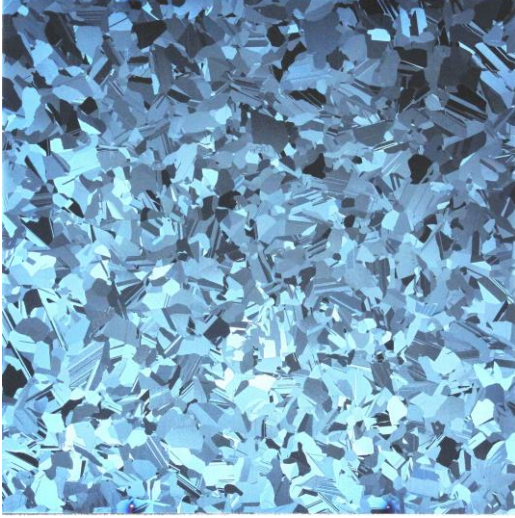
Multikristal külçeler daha sonrasında ince silikon yongalar elde edilmek için kesilir fotovoltaik göze, entegre devre ya da diğer yarı iletken aygıtların üretiminde kullanılır.

Multikristal güneş gözeleri hızla büyüyen fotovoltaik piyasasında en çok tercih edilen fotovoltaik teknolojisidir. Senelik üretimde de 2017 yılı itibarıyla yaklaşık olarak %62'lik bir oranla monokristal gözelerin önünde başı çekmektedir (Şekil 2.20). Senelik multikristal talebinin büyüklüğünü anlamak açısından 1 MW'lık multikristal fotovoltaik modül üretimi için yaklaşık olarak 5 tonluk multikristal silikona ihtiyaç duyulduğunu belirtmek isabetli olacaktır.



Şekil 2.20. Fotovoltaik teknolojileri üretim miktarları (2017), [34]

Multikristal fazları daha küçük kristal ya da kristalitlerinden oluşmaktadır. Multikristal (diğer bir adıyla yarı kristal silikon, polisilikon, poly-Si ya da sadece poly) daha küçük silikon kristallerden oluşan malzemedir. Multikristal gözeler bu durumdan ötürü parçalı karakteristik görüntüye sahiptirler.

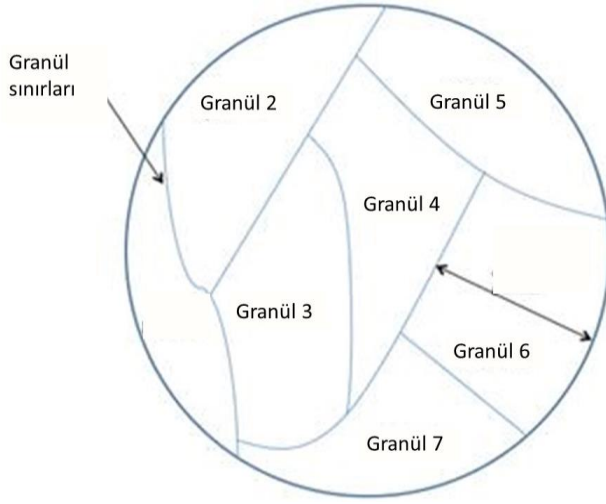


Şekil 2.21. Multikristal modül deseni, [6]

2006 yılı itibarıyla ilk defa dünya multikristal silikon arzının yarısı fotovoltaik üreticileri tarafından kullanılmıştır. 2007 yılında bu talep artarak devam etmiş ve ilgili yıl için multikristal silikon arzında yaşanan kısıntılardan ötürü küresel ölçekte multikristal silikon modül üretimlerinin yaklaşık olarak %25'i askıya alınmıştır [68]. 2008 yılında multikristal silikon fotovoltaik teknolojilerin üretilmesi için solar grad multikristal üreten sadece 12 üretici varken, bu sayı sadece 5 yıl içerisinde -2013 yılında- 100'ün üzerine çıkmıştır [69].

Monokristal silikon, multikristal silikona göre Czochralski yöntemi ile kristalizasyon sürecinden geçirildiğinden daha yüksek safsızlıkta bir yarı iletken olmasına rağmen multikristal silikonun üretimi daha az maliyetli olduğundan multikristal gözeleri fotovoltaik modül üretimi için daha cazip konuma getirmiştir.

Granül büyüklüğünün multikristal gözelerin verimliliğine etkisi olduğu görülmüştür. Buna göre kristal içerisindeki granüllerin büyüklüğü ne kadar artarsa multikristal göz verimliliğinin o denli arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.22.). Bunun nedeni olarak, verimliliği etkileyen ana faktörlerden biri olan rekombinasyon hadisesinin ağırlıkla granül sınırlarında gerçekleşmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.22. Kristal yapılarda granüller ve granül sınırları, [70]

Monokristal gözelerle kıyasla multikristal silikon fotovoltaik gözelerin üretilmesi için daha az malzemeye ihtiyaç vardır. Bu durum da multikristal silikon fotovoltaik gözelerin, monokristal gözelerle göre daha maliyet etkin bir şekilde üretilmesini beraberinde getirmektedir. Bu sayede multikristal silikon fotovoltaiklerin üretim hacmi ve kârlılık artmaktadır.

Multikristal silikondan göze üretilmesi için, multikristal silikonun, silikon bir yonga üzerine biriktirilmesine ihtiyaç yoktur. Multikristal silikon daha ucuz malzemelerin üzerine de biriktirilebilir ve bu multikristal göze maliyetlerini düşüren bir etkidir. Silikon yonga yerine daha maliyet etkin malzemeler üzerine biriktirme uygulamalarına bir örnek olarak cam üzerine kristal silikon (CSG) güneş gözelerini gösterebiliriz [71].

Biriktirme için silikon yonga ihtiyaç duyulmaması, multikristal silikon arzında yaşanabilecek bir kısıntıya karşı gerek fotovoltaik gerekse de diğer ilgili endüstriler (örneğin mikroelektronik endüstrisi) için bir sigorta niteliğindedir.

Yukarıda sıklıkla kullanılan, küresel fotovoltaik pazar payında yüksek oranlarda tercih edilen fotovoltaik teknolojilerine yer verilmiştir. Bu tez kapsamında bahsi geçen fotovoltaik teknolojilerine ek olarak günümüzde araştırma geliştirme

aşamasında olan bir çok fotovoltaik teknolojisi bulunmaktadır. Bu tezin kapsamını ise pazar payı en yüksek olan multikristal ve monokristal silikon fotovoltaikler oluşturacaktır.

## **2.3. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)**

### **2.3.1. Genel Bilgi**

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ISO 14040:2006 [72] ile standardize edilmiş, bir ürün, hizmet ya da süreç sisteminin çevresel etkilerinin saptanması için giderek daha sıklıkla kullanılmaya başlanan bir yöntemdir. Günümüzde bir çok kurum tarafından çevre politikalarının belirlenmesinde güvenilir bir araç olarak tercih edilmektedir. YDD, farklı kategorilerde çevresel etkilerin saptanabilmesi için yaşam döngüsü boyunca malzeme ve enerji girdi/çıktılarının derlenmesi ve değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır.

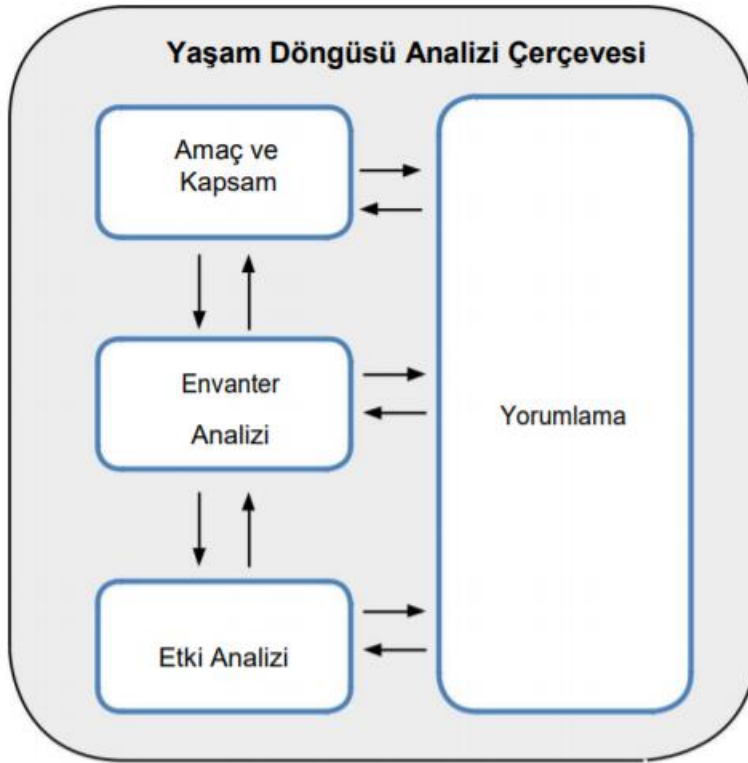
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Yaşam Döngüsü Analizi) bir ürün, hizmet ya da sürecin yaşam döngüsü boyunca enerji girdi ve çıktılarına ek olarak malzeme ve atık akışlarının saptanabilmesi için veri toplama ve kantitatif değerlendirme işlemlerini içermektedir. Bu işlemler, uygulayıcının amaç ve kapsam aşamalarında tanımladığı sistem sınırlarını kapsayan yaşam döngüsünde çevresel etki analizinin gerçekleştirilebilmesi için gereklidir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine başlanabilmesi için öncelikle odaklanılan sistem için amaç ve kapsam tanımlarının yapılması gereklidir. Bunun ardından sistemde kullanılacak kaynakların envanter analizi gerçekleştirilir ve amaç ve kapsam aşamasında tanımlanmış fonksiyonel birim dikkate alınarak çevresel etki analizi gerçekleştirilir. En son aşamada ise çevresel etki analizi sonuçları yorumlanır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde analiz, farklı kategori ve tiplerdeki malzemelerin üretim ve tüketimleri için gereken malzeme, enerji ve diğer kaynak kullanımlarının sayısal değerlerinden yararlanarak gerçekleştirilen analize dayanmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, ürün, hizmet ve

süreçler arasındaki farkları karşılaştırmalı olarak sunabilirken, ilgili süreçlerin etkinliği hakkında bir bilgi vermez.

### 2.3.2. YDD: ISO Standartları Ve Metodoloji

Tez kapsamında bu bölümde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin uluslararası ISO standartlarından 14040:2006 kodlu standart ile belirlenerek çizilmiş metodolojik çerçevesinden bahsedilecektir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çeşitli arka plan ve sektörden uygulayıcılar tarafından ISO tarafından aşağıdaki çerçeve ile ortaya konmuş 4 basamaklı yapıya sadık kalınarak uygulanmaktadır.



Şekil 2.23. Yaşam döngüsü analizi çerçevesi, [73]

Her ne kadar Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin aşamaları birbirinden bağımsız gibi görünse de aslen bir aşamanın sonucu diğerini beslemektedir. Aşamalar arasındaki okların çift taraflı gösterilmesinin nedeni Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi aşamalarının birbirleri arasındaki etkileşimli yapıyı belirtmek



amaçlıdır. Örneğin yaşam döngüsü değerlendirmesinin etki analizi aşamasında spesifik bir bilgi ya da verinin eksikliği ile karşılaşılırsa envanter analizi aşamasının kuvvetlendirilmesine çalışılmalıdır. Bir benzer örnek de sonuçların yorumlanması aşamasında görülmektedir. Sonuçların yorumlanması bölümü, çalışmanın amacını karşılamıyorsa amaç ve kapsam aşaması yaşam döngüsü değerlendirmesi uygulayıcısı tarafından revize edilmelidir.

Aşağıda sırasıyla yaşam döngüsü değerlendirmesinin ISO 14040:2016 standartları uyarınca çizilmiş aşamalarının ayrıntılarına yer verilecektir.

### **2.3.2.1. Amaç ve Kapsam**

Her yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışması, öncelikle çalışmanın amaç ve kapsamının belirlenmesi ile başlar. Bu aşamada yaşam döngüsü analizi uygulayıcısı, çalışmanın bağlamını ve çalışma sonuçlarının iletişiminin kiminle yapılacağı gibi ayrıntıları dikkate alır. Amaç ve kapsam aşaması yaşam döngüsü analizinin oldukça önemli bir basamağıdır ve çalışma boyunca uygulayıcının sadık kalacağı iskelet bağlamı ifade etmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmelerinin amaç ve kapsam dokümanları aşağıdaki detayları içermektedir.

Fonksiyonel birim: Üzerinde çalışılan sistemin konu alınan bölümü ile bilgi vermektedir. Herhangi bir üretim sisteminin ya da hizmetin ortaya çıkardığı birim ürün/ hizmetin referans alınarak girdi ve çıktılarını ilişkilendirilebileceği bir arka plan oluşturmak için tanımlanmaktadır. Ayrıca fonksiyonel birim alternatif mal ve hizmetlerin sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için ortak bir nokta sağlamaktadır.

Fonksiyonel birim bir ürün ya da hizmetin fonksiyonunu tanımlamak için kullanılmaktadır. Öyle ki 1m<sup>2</sup>'lik bir duvarın boyanarak 10 sene boyunca kullanılması senaryosunda fonksiyonel birim 10 yıl boyalı 1 m<sup>2</sup>'lik duvar olurken ilgili fonksiyonel birim, çevresinde girdiler, süreçler ve çıktılar olan bir

fonksiyonel sistemi de oluşturur. Bu sayede örnekteki fonksiyonun (duvarın boyanması) gerçekleşebilmesi için fırçadan, boyayı taşıyan tenekeye kadar ihtiyaç duyulan tüm malzemeler için fonksiyonel birimi besleyen akışlar oluşturulmaktadır,.

Sistem sınırları: Yaşam döngüsü değerlendirmesine tabi tutulacak sistemin içerisinde hangi süreçlerin olacağını belirleyen sınırlardır.

Çeşitli varsayım ve limitler: Yaşam döngüsü analizinin amaç ve kapsam aşamasında sistem sınırlarının çizilebilmesi ve analizin sağlıklı yapılabilmesi adına çeşitli varsayımlar tanımlanabilmektedir.

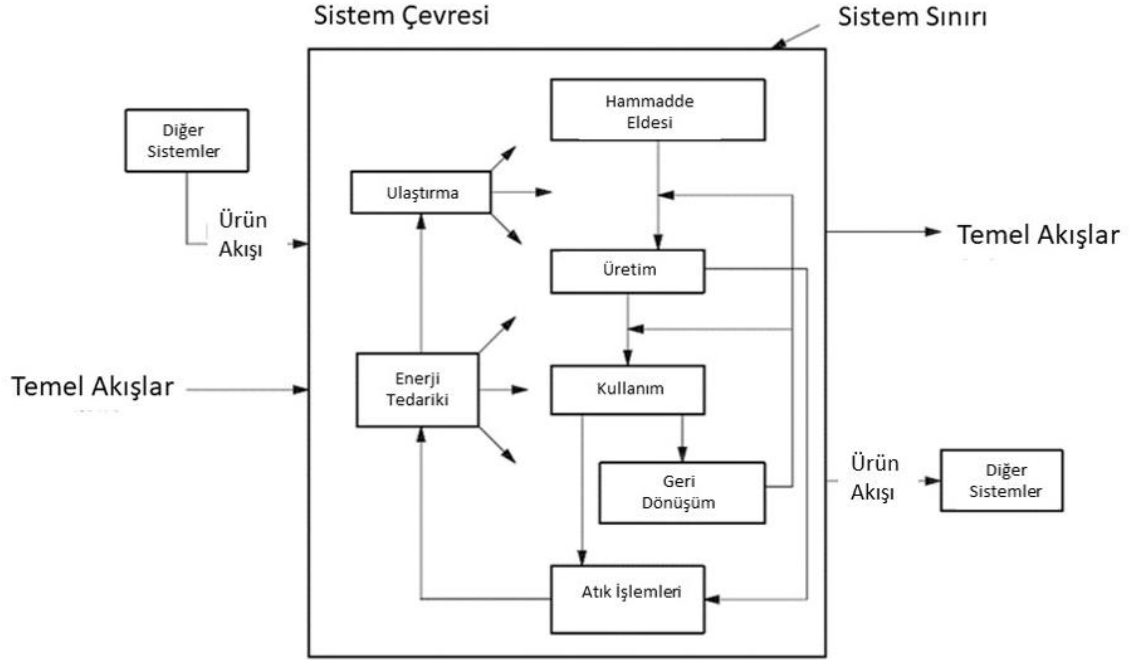
Bölüştürme yöntemleri: Birden fazla ürün (veya ara ürün)/fonksiyon ortak bir sürecin çevresel yükünü paylaşıyorsa ilgili yükün çeşitli oranlarla bahsi geçen ürünlere/fonksiyonlara dağıtılması gereklidir. Bu bölüştürme/dağıtım işlemi, sistem genişletme, ikame etme ya da parçalara ayırma [74] şeklinde gerçekleştirilebilmektedir.

Etki kategorileri: Yaşam döngüsü değerlendirmesinde kullanılacak etki kategorileri de (örneğin asidifikasyon, iklim değişikliği potansiyeli gibi) amaç ve kapsam aşamasında belirlenmektedir.

### **2.3.2.2. Envanter Analizi**

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde amaç ve kapsam belirlendikten sonra ilgili ürün/hizmet sisteminin doğadan/doğaya olan akışlarının envanterleri oluşturulmaya başlanır. İlgili envanter akışları, enerji, su, hammadde gibi girdileri ve hava, toprak ve suya olan salımları içermektedir. Bir yaşam döngüsü envanteri (Life Cycle Inventory, LCI) geliştirebilmek için üzerinde çalıştığımız sistemin bir modeli sisteme olan girdi ve çıktılar hesaba katılarak oluşturulur. İlgili model teknik sistem sınırlarını doğru bir şekilde resmedecek ve tedarik

zincirinde değerlendirilecek tüm bileşenleri içerecek şekilde bir akış diyagramı olarak gösterilir.



Şekil 2.24. Yaşam döngüsü değerlendirmesi akış diyagramı, [75]

Sistemin yukarıdaki gibi bir akış diyagramı ile modellenebilmesi için ihtiyaç duyulan tüm girdi ve çıktılara ait veri, sistem sınırları da dikkate alınarak sisteme konu olan tüm faaliyetler için toplanır.

Envanter analizi aşamasında toplanan tüm veri, amaç ve kapsam aşamasında tanımlanmış olan fonksiyonel birimle ilişkilendirilmelidir. Bu aşamada toplanan veri tablolar halinde sunulabilir ve bu aşamada dahi yorumlar yapılarak iyileştirilmeye açıktır.

Envanter analizi aşaması ile ortaya, odaklanılan ürün, hizmet ya da süreç için bir envanter ortaya çıkmış olur. Bu envanter sonucunda çalışmaya konu alınan

sistemin birim süreçlerine giren girdi ve birim süreçlerinden çıkan çıktılar için bilgi sağlayan bir yaşam döngüsü envanteri oluşmuş olur.

### **2.3.2.3. Etki Değerlendirmesi**

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde envanter analizini etki değerlendirme aşaması takip eder. Bu aşamada yaşam döngüsü envanterinin (LCI) akış sonuçları dikkate alınarak odaklanılan ürün, hizmet ya da süreç için direkt ya da dolaylı tüm çevresel etkilerin hesaplanması gerçekleştirilir.

Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) sırasıyla etki kategorilerinin, kategori göstergelerinin ve karakterizasyon modellerinin seçilmesi, sınıflandırmanın yapılması ve envanter parametrelerinin ayıklanarak ilgili etki kategorileri ile ilişkilendirilmesi adımıyla devam eder. Bunu takiben kategorize edilmiş yaşam döngüsü envanteri (LCI) akışlarının, çeşitli yaşam döngüsü etki değerlendirme (LCIA) metodolojilerinden biri ile (CML, TRACI, Eco Indicator 99, IPCC, RECIPE v.b.) karakterizasyonu gerçekleştirilir. Bu sayede envanter analizinden gelen veriler toplanarak etki kategorilerinin sonuçlarını oluşturur.

Yaşam döngüsü analizinin etki değerlendirme aşamasında yukarıda bahsi geçen adımlar gerçekleştirilmek zorundadır. Fakat zorunlu bu aşamaların haricinde etki değerlendirme aşamasında opsiyonel olan LCIA araçlarından normalizasyon, gruplama ve ağırlıklandırma gibi basamaklar yaşam döngüsü analizinin amaç ve kapsam tanımına göre kullanılabilir.

Normalizasyonda yaşam döngüsü analizinden elde edilen etki kategorisi sonuçları ilgilenilen bölgedeki toplam etkilerle (örneğin Türkiye) karşılaştırılır. Gruplama, etki kategorilerinin ayıklanması ve sıralanmasından oluşmaktadır. Ağırlıklandırma sırasında farklı çevresel etkiler birbirlerine göre ağırlıklandırılır.

Yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan etkiler ilgili ürün, hizmet ya da sürecin üretim, kullanım ve ömür sonu aşamaları için de sınıflandırılarak gözlenebilir. Bu sayede ilgili ürünün üretim aşamasından kaynaklanan birincil etkileri, kullanım etkileri ve ömür sonu etkileri gözlenebilmektedir.

Birincil etkiler hammadde eldesi, üretim, ilgili ürünün hedef pazara ulaştırılması için lojistik dahil olmak üzere ürünün kullanım aşamasına kadar olan kısmı kapsamaktadır. Kullanım etkileri adından da anlaşılacağı üzere ilgili ürün, hizmet ya da sürecin operasyonel olduğu zaman aralığında, kullanımı sırasında açığa çıkan etkileri kapsar. Kullanım etkilerinde bakım, onarım ve yenileme gibi süreçler dikkate alınmak durumundadır. Ömür sonu etkileri ise ürün, hizmet ya da sürecin ömrünü tamamladığı andan itibaren nasıl değerlendirileceğine göre (geri dönüşüm, yok etme vb.) değişen çevresel etkileri içermektedir.

#### **2.3.2.4. Yorumlama**

Yaşam döngüsü analizinin yorumlama aşaması, yaşam döngüsü envanter analizi (YDEA) ve etki değerlendirmesi aşamalarında ortaya çıkan sonuçların tanımlanması ve kontrol edilmesine dayanan sistematik bir yaklaşımdır. Bu aşamada envanter analizi ve yorumlama aşamalarından gelen sonuçlar öncelikle özetlenir. Yorumlama aşaması ile yaşam döngüsü analizinden bir dizi sonuç ve öneri ortaya çıkar. ISO 14040:2006 standardı uyarınca yorumlama aşaması: Envanter analizi ve etki değerlendirmesi aşamalarında öne çıkan konuların tanımlanması, çalışmanın bütünlüğü, hassasiyeti ve tutarlılığı için gerekli kontrollerin gerçekleştirilmesi ile sonuçlar ve öneriler bileşenlerinden oluşmalıdır.

Yaşam döngüsü sonucunda yorumlama aşamasının uygulanmasının ana amaçlarından biri gerçekleştirilen çalışmanın kredibilitésinin sağlanarak iletişiminin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için elzemdir. Yaşam döngüsü yorumlaması, sonuçların kesinlik derecesinin anlaşılabilir olarak analiz amaca uygun olarak gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini algılamak ile başlar. Bunu

başarabilmek için hangi verinin hangi etki kategorisine ne denli katkıda bulunduğunu kavrayabilmek gerekir. Bu yüzden ilgili verinin bütünlüğü ve tutarlılığının değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak bu sayede yaşam döngüsü değerlendirmesi sonucu ortaya çıkan yorum ve sonuçlar sağlıklı bir arka plana dayandırılabilir.

Özet olarak, yaşam döngüsü değerlendirmesinde tek bir yaklaşım mevcut değildir. Yaşam döngüsü analizi, uygulayıcısının arzusuna ve önceliklerine göre farklı detaylarda uygulanabilir. Bu noktada önemli olan odaklanılan sisteme yaşam döngüsü bakış açısı ile yaklaşabilmektir.

### **2.3.3. YDD Avantaj ve Kısıtları**

Günümüzde üretilen ve tüketilen her türlü ürün, hizmet ya da sürecin çevresel etkileri ile ilgili artan bir farkındalık mevcuttur. Bu farkındalık beraberinde ilgili çevresel etkilerin saptanarak ölçümlenmesi ve ortadan kaldırılması ile ilgili yeni yöntemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu amaçla geliştirilen metotlardan biri olan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yöntemi, ilk defa 1960'lı yıllarda endüstriyel sistemlerin enerji tüketimini çevresel bir bakış açısı ile analiz etme gayesi ile ortaya çıkmıştır. Bunun için ilgili sistemlerin barındırdığı tüm süreçlerin (hammadde eldesinden ömür sonuna dek) enerji girdi ve çıktıları basit bir şekilde ortaya konmaya çalışılmıştır.

Ortaya çıkan ihtiyaçlara paralel olarak gelişen yaşam döngüsü değerlendirmesi metodolojisi günümüzde oldukça detaylı ve bütüncül bir bakış açısı sunan bir araç haline gelmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi her ne kadar bir ürün, hizmet ya da sürecin değer zinciri boyunca ortaya çıkan çevresel etkileri bütüncül bir şekilde resmetse de halen bazı kısıtlara sahiptir.

Her şeyden önce yaşam döngüsü değerlendirmesine başlanırken ortaya konan varsayımlar ve buna bağlı olarak belirlenen sistem sınırları subjektif olabilir.

Yaşam döngüsü envanter analizi için kullanılan teknik ve modeller ya da çevresel etkilerin hesaplandığı etki değerlendirme aşamasında yararlanılan etki değerlendirme metotları kendi içerilerindeki kabullerden ötürü çeşitli kısıtlar taşıyabilir.

Çeşitli coğrafi korelasyonlarla (küresel ya da bölgesel) sunulan yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları yerel uygulamalar için uygun olmayabilir. Bunun nedeni yereldeki koşulların bölgesel koşullar ile farklılıklar içerebilme ihtimalidir [76].

Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının kesinlik ve doğruluğu mevcut veri kalitesi, uygunluğu ve erişilebilirliği gibi kısıtlar nedeni ile tam olmayabilir. Zira yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasında yerel veri tabanlarının hiç olmaması ya da yoksunluğu gibi durumlarla karşılaşılabilir.

Tüm bu kısıtlardan ötürü yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları uygulayıcının odaklandığı alana göre subjektif sonuçlar verebilmektedir.

### 3. MODELLEME

#### 3.1. Fotovoltaiklerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

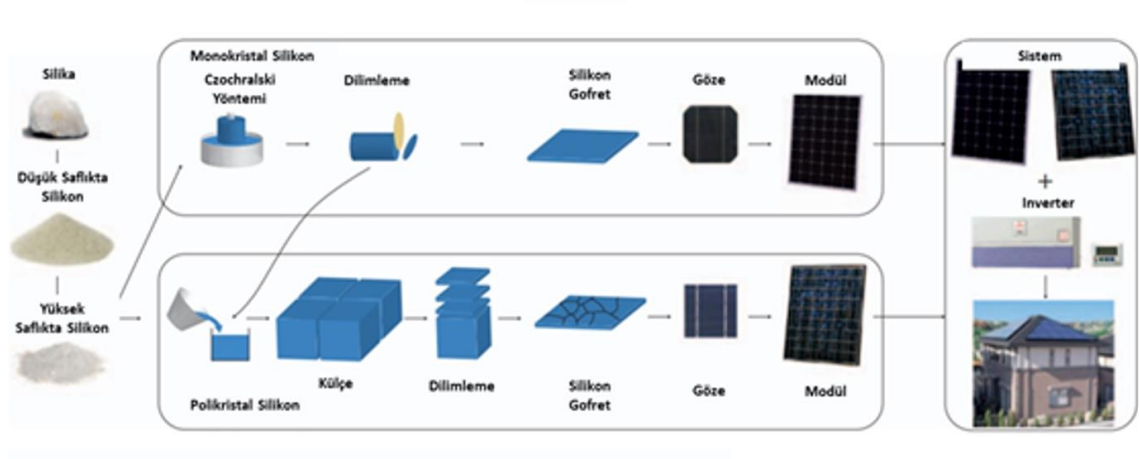
Her yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasında olduğu gibi amaç ve kapsam uygulayıcı tarafından belirlenir. Herhangi bir ürün, hizmet ya da süreç değerlendirilirken oluşturulan yaşam döngüsü envanter analizi, odaklanılan sistem ve alt sistemlerin malzeme/enerji girdileri ve ilgili tüm salımları konu alırken, enerji sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi, ilgili sistemler operasyonel oldukları süre boyunca enerji de ürettiklerinden farklı bir bakış açısıyla değerlendirilmelidir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında fotovoltaik sistemlerden elektrik eldesinin yaşam döngüsüne odaklanılacaktır. Küresel pazar payı en yüksek olan iki fotovoltaik teknolojisini (multikristal ve monokristal silikon) kullanan fotovoltaik sistemden elektrik üretiminin yaşam döngüsü, Ankara, Türkiye koşulları için karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilecek ve sonuçlar yorumlanacaktır.

Fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü değerlendirmesi sistemin ana bileşeni olan modüllerin yaşam döngüsüne ek olarak inverter, kablolama ve sistemin üzerinde durduğu destek ekipmanlarının yaşam döngüsünü de içerecek şekilde tasarlanacaktır.

Çalışma kapsamında ele alınan monokristal ve multikristal silikon modülleri kullanan fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsünün sınırları Şekil 2.25'te gösterilmiştir.





Şekil 2.25. Çalışmaya konu olan fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü sınırları

Teze konu olan fotovoltaik sistemlerde kullanılan monokristal ve multikristal modüller için sırasıyla silika eldesi, metalurjik grad silikon eldesi, solar grad silikon eldesi, silikon yonga üretimi ve son olarak da göze ve modül üretimi aşamalarına odaklanılmıştır. Ardından sistemlerimizin modül harici diğer bileşenlerinin (inverter, kablolama, destek yapısı) üretim aşamaları da yaşam döngümüze eklenmiştir. Bunu takiben sistemlerin 30 yıl süreyle elektrik üretimi de hesaba katılmıştır.

### 3.2. Amaç ve Kapsam

#### 3.2.1. Çalışmanın Amacı

Daha önceki bölümlerde de bahsi geçtiği üzere fotovoltaikler elektrik eldesi için giderek daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda fotovoltaiklerin yaşam döngüsü çevresel etkilerinin anlaşılabilmesi için YDD metodolojisine sıklıkla başvurulmuştur. Çeşitli modül türlerinin yaşam döngüsü etki analizi kümülatif enerji ihtiyacı, enerji geri dönüş süresi ve küresel ısınma potansiyeli göstergeleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir [77]. Literatürdeki kimi çalışmalarda ise [78] kWh elektrik üretimi başına CO<sub>2</sub> salımları ve enerji geri dönüş süresine (EPBT) odaklanılmıştır. Ayrıca pazar payının yüksekliğinden ötürü ağırlıklı olarak silikon bazlı fotovoltaik teknolojilerin yaşam döngüsü çalışılmıştır [79]. Literatürde fotovoltaiklerin yaşam döngüsü değerlendirmesi

çalışmalarına bakıldığında en sık kullanılan göstergelerin kümülatif enerji ihtiyacı (CED), enerji geri dönüş süresi (EPBT) ve üretilen birim elektrik (kWh) başına salınan CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazları olduğu görülmektedir [77].

Bu tez çalışmasında ise amaç iki farklı fotovoltaik teknolojisine sahip (monokristal silikon ve multikristal silikon) modülden oluşan evsel tip fotovoltaik sistemden (çatıya düz yerleşimli) Ankara konumunda elektrik eldesinin yaşam döngüsü analizini yapmaktır. Yaşam döngüsü analizimiz literatürde sıklıkla karşılaşılan kümülatif enerji ihtiyacı (CED), birim elektrik eldesi başına sera gazı salımları göstergeleri ile yapılacak ve bu bilgiler yardımı ile de enerji geri dönüş süresi (EPBT) ve yatırılan enerjiye karşı geri dönen enerji miktarı (ERoEI) hesaplanacaktır.

### **3.2.2. Fonksiyonel Birim**

Bu çalışmada kullanılan fonksiyonel birim 1 m<sup>2</sup>'lik modül alanıdır.

### **3.2.3. Çalışmanın Kapsamı**

Tez kapsamında konu alınan fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsünün kapsamı:

- Hammadde eldesi (modül, destek yapıları, inverter, kablolama ve kurulum ekipmanları üretimi için)
- Silikon yonga, göze ve modüllerin üretimi
- Destek yapılarının üretimi
- İnverter üretimi
- Sistem kurulumu
- Operasyon (elektrik üretimi)

aşamalarını içermektedir.

Yaşam döngüsünde ömür sonu için herhangi bir senaryo tasarlanmamıştır. Zira çalışmada konu alınan fotovoltaik sistemler nispeten yeni teknolojiler olduklarından ömür sonu (30 yıl) senaryoları (geri dönüşüm vb.) üzerine yapılan çalışmalar halen sürmektedir.

#### 3.2.4. Kabuller ve Kullanılan Araçlar

Tez kapsamında yaşam döngüsü değerlendirmesi yazılımı olan SimaPro'nun 8.0.5.13 numaralı sürümünden yararlanılmıştır.

Fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü envanter analizinin gerçekleştirilebilmesi için tez çalışmasına konu olan sistemlerin operasyonel hale gelmesi adına gereken tüm süreçler aşağıdaki şekilde saptanmış ve envanter analizinin oluşturulabilmesi için ilgili veri kaynağından yararlanılmıştır (Çizelge 3.1.).

Çizelge 3.1. Süreç bazlı YDD veri kaynakları

Fotovoltaik Teknolojisi	mono-Si	multi-Si
<b>SÜREÇ</b>		
<b>Silika Eldesi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Metalurjik Grad Silikon Eldesi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Solar Grad Silikon Eldesi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Silikon Yonga Eldesi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Göze Üretimi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Modül Üretimi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Inverter Üretimi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Kablolama Üretimi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1
<b>Destek Yapıları Üretimi</b>	ecoinvent 3.1	ecoinvent 3.1

Ecoinvent veri tabanı ve tez kapsamında konu alınan fotovoltaik sistemlerin alt sistemleri (süreçler) dikkate alınarak aşağıdaki (Çizelge 3.2.) varsayımlar yapılmış ve envanter analizi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2. YDD Başlıca Paratmetreleri

<b>BAŞLICA PARAMETRELER</b>		
	<b>mono-Si</b>	<b>multi-Si</b>
<b>SOLAR GRAD SİLİKON</b>		
Teknoloji / Proses	Solar Grad Siemens	Solar Grad Siemens
Miktar	1,24 kg ham silikon/m <sup>2</sup> modül	0,65 kg ham silikon/m <sup>2</sup> modül
<b>KÜLÇE &amp; YONGA</b>		
Yonga Boyutları	156 mm x 156 mm	156 mm x 156 mm
Yonga Kalınlığı	270 - 300 µm	270 - 300 µm
Ham Silikon Beslemesi	0,783 kg ham/kg kristal	0,561 kg ham/kg kristal
Külçe / Yonga	0,0385	0,0224
Yonga / Modül	39,66	39,85
<b>GÖZELER</b>		
Göze Büyüklüğü	156 mm x 156 mm	156 mm x 156 mm
Yonga / Göze	1,030	1,035
Göze / Modül	38,50	38,50
<b>MODÜLLER</b>		
Modül Başına Hücre Sayısı	6 x 10	6 x 10
Modül Alanı	1,6 m <sup>2</sup>	1,6 m <sup>2</sup>
Modül Ağırlığı	20 kg	20 kg
Modül Verimliliği	15,40%	13,50%
Modül Gücü / Birim Alan	154 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>
<b>DESTEK YAPISI</b>		
Kullanılan Malzemeler	Alüminyum, Paslanmaz Çelik, HDPE	Alüminyum, Paslanmaz Çelik, HDPE
Modül Çerçeve Malzemesi	Alüminyum	Alüminyum
Modül Çerçeve Ağırlığı	2,13 kg/m <sup>2</sup> modül	2,13 kg/m <sup>2</sup> modül
<b>KABLOLAMA</b>		
DC Kablolama	2,16 m/m <sup>2</sup> modül (4 mm <sup>2</sup> kalınlık)	2,16 m/m <sup>2</sup> modül (4 mm <sup>2</sup> kalınlık)
AC Kablolama	0,11 m/m <sup>2</sup> modül (6 mm <sup>2</sup> kalınlık)	0,11 m/m <sup>2</sup> modül (6 mm <sup>2</sup> kalınlık)
<b>İNVERTER</b>		
İnverter Nominal Güç	2,5 kW	2,5 kW
İnverter Boyut	0,89 kW inverter/kWp modül	0,89 kW inverter/kWp modül

Fotovoltaik sistemlerin elektrik eldesi aşaması için gerekli varsayımlar ve kaynakları ise aşağıdaki çizelge ile sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Fotovoltaik elektrik üretimi sistem kabulleri

PARAMETRELER	Birim	Veri Kaynağı	Veri
Işınım (Ankara)	kWh/m <sup>2</sup> /yıl	MGM - 2018	1590
Performans Oranı (PR)	/	IEA PVPS Task 12 - Methodology Guidelines on Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity	0,75
Sistem Ömrü	Yıl	IEA PVPS Task 12 - Methodology Guidelines on Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity	30
Sistem Bozunması	Yıllık %	IEA PVPS Task 12 - Methodology Guidelines on Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity	0,7
Türkiye Şebeke Çevrim Faktörü	kWh/MJ <sub>prim</sub>	ecoinvent 3.1 – 2014	0,1047

### 3.3. Göstergeler ve Değerlendirme

Tez kapsamında yaşam döngüsü değerlendirmesinin yorumlama aşaması için kullanılacak göstergelere bu bölümde değinilmektedir.

Fotovoltaik sistemlerden elektrik eldesinin yaşam döngüsüne odaklanıldığından ilgili sistemlerin üretilmesi için gereken birincil enerji ihtiyacı (Cumulative Energy Demand, CED) ve buna bağlı sebep olunan sera gazı salımları (GHG emissions) hesaplanacaktır.

Bunun ardından ilgili sistemlerden elektrik eldesine odaklanılacak ve Ankara, Türkiye konumu için fotovoltaik sistemlerimizin yıllık enerji üretimleri ve sistem ömürleri (30 yıl) hesaba katılarak yaşam döngüleri boyunca ihtiyaç duydukları enerjiyi ne kadar sürede amorti ettiklerinin bir göstergesi olan enerji geri dönüş süreleri (Energy Payback Time, EPBT) hesaplanacaktır [80].

Son olarak da karşılaştırmalı maliyet analizi, sistemlerin ömürleri boyunca kendilerini kaç kez amorti ettiklerinin bir göstergesi olan yatırılan enerjiye karşın geri dönen enerji (Energy Return on Energy Invested, EROEI) göstergesi üzerinden yapılacaktır.

### 3.3.1. Birincil Enerji İhtiyacı

Kümülatif birincil enerji ihtiyacı olarak da adlandırılan birincil enerji ihtiyacı göstergesi bir fotovoltaik sistemin tüm bileşenlerinin yaşam döngüsü boyunca ihtiyaç duyduğu birincil enerjinin bir toplamıdır. Birincil enerji insan eliyle herhangi bir dönüşüme uğramamış, doğal kaynaklar içinde gömülü olan enerjinin (kömür, ham petrol, doğal gaz, uranyum gibi) bir göstergesidir. Birincil enerjinin kullanılabilir hale gelmesi için dönüştürülmesi ve taşınması gerekmektedir.

### 3.3.2. Enerji Geri Dönüş Süresi

Enerji geri dönüş süresi, bir fotovoltaik sistemin, sistemin kendisinin üretilmesi için gereken kadar enerjiyi ne sürede sisteme verdiğinin bir ölçüsüdür. Bir diğer deyişle sistemin enerji cinsinden ne kadar süre sonra artıya geçtiğinin zamansal bir ölçütüdür. Enerji geri dönüş süresi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Enerji Geri Dönüş Süresi} = (E_{mal} + E_{ür} + E_{taş} + E_{kur} + E_{ös}) / \left( \frac{E_{yıl}}{\mu_{ş}} \right)$$

$E_{mal}$ = Fotovoltaik sistemi oluşturan malzemelerin üretimi için gereken enerji

$E_{ür}$ = Fotovoltaik sistemin üretimi için gereken enerji

$E_{taş}$ = Yaşam döngüsü boyunca yapılan taşımalar için gereken enerji

$E_{kur}$ = Sistemin kurulumu için gereken enerji

$E_{ös}$ = Sistemin ömrü sonunda (geri dönüşüm vb.) gereken enerji

$E_{yıl}$ = Sistemin yıllık enerji üretim miktarı

$\mu_{ş}$ = Şebeke verimliliği

### **3.3.3. Sera Gazı Salımları**

Bir fotovoltaik sistemin yaşam döngüsü boyunca açığa çıkan sera gazı salımları CO<sub>2</sub> eşdeğeri cinsinden IPCC tarafından 100 yıllık zaman dilimi dikkate alınarak hazırlanmış küresel ısınma potansiyelleri kullanılarak bulunmaktadır.

### **3.3.4. Yatırılan Enerjiye Karşın Geri Dönen Enerji**

Yatırılan Enerjiye Karşın Geri Dönen Enerji (ERoEI) ifadesi basit anlamda bir enerji kaynağının içinde bulunduğu sisteme verdiği enerji ile sistemin varolması için sisteme verilen enerji arasındaki oranı ifade etmektedir.

Yatırılan Enerjiye Karşın Geri Dönen Enerji sistem ömrünün sistem enerji amorti süresine (EPBT) bir oranı olarak bulunmakta ve farklı enerji sistemlerin etkinliğini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaçla tez kapsamında iki farklı fotovoltaik sisteminin kabaca maliyet açısından karşılaştırılması için kullanılacaktır.

## 4. SONUÇLAR

### 4.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları

Tez kapsamında monokristal ve multikristal fotovoltaik modülleri kullanan güneş enerji sistemlerinin Ankara, Türkiye konumunda çatı üstü düz kurulumları için elektrik eldesinin yaşam döngüsüne odaklanılmıştır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde tanımlanan “1 m<sup>2</sup>'lik modül alanı” fonksiyonel birimi dikkate alınarak tüm sistem bileşenlerinin üretilmesi için ihtiyaç duyulan malzeme ve enerji girdileri alt alta toplanmış, fotovoltaik sistemlerimizin kümülatif enerji ihtiyaçları (CED) SimaPro yazılımı yardımıyla modül birim alan başına MJ<sub>prim</sub> olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için tezin “Modelleme” bölümünde yer alan kabuller ve veri kaynakları kullanılmıştır.

Sistemlerin kurulum aşamasına kadar ihtiyaç duydukları kümülatif enerji miktarları ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelinin (IPCC) ortaya koyduğu küresel ısınma potansiyelleri (IPCC 2013 GWP 100a) [81] dikkate alınarak sistemlerin üretimi dolayısıyla salınan sera gazları, modül alanı başına “g CO<sub>2</sub> eşdeğeri cinsinden SimaPro yazılımı ile saptanmıştır.

Bunun ardından Ankara'nın yıllık ortalama ışınım miktarı (kWh/m<sup>2</sup>), sistemlerimizin performans oranları (%) , sistem ömürleri (yıl) ve yıllık bozunma oranları (%) dikkate alınarak fonksiyonel birim (1 m<sup>2</sup> 'lik modül alanı) üzerinden sistemlerimizin ömürleri boyunca (30 yıl) üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır.

Fotovoltaik güneş enerji sistemleri, elektrik üretimleri sırasında karbon salımına neden olmamaktadır. Bu faydanın ön plana çıkarılarak karşılaştırılabilmesi adına monokristal ve multikristal modülleri kullanan fotovoltaik sistemlerimizin



yaşam döngülerinde hammadde eldesinden, sistem kurulumunun tamamlanmasına dek olan aşamalardan kaynaklanan (ömür sonu atık bertarafı aşaması yok sayıldığından) karbon salımları, sistemlerden üretilen elektriğin birimi (kWh) başına hesaplanmıştır.

Bir sonraki aşamada sistemlerimizin etkinliğinin karşılaştırılabilmesi adına sistemlerin üretilmesi için gereken birincil enerji miktarının, sistemlerin elektrik üretimi sayesinde ne sürede amorti edildiğinin bir ölçütü olan enerji geri dönüş süreleri (EPBT) hesaplanmış ve karşılaştırmaya tabi tutulmuştur.

Son olarak da sistemlerimizin karşılaştırmalı maliyet analizi, yatırılan enerjiye karşın geri dönen enerji (ERoEI) kavramı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin ayrıntılı sonuçlarına Çizelge 4.1'de yer verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları

	mono-Si	multi-Si
<b>Sistem Parametreleri</b>		
Fonksiyonel Birim	1 m <sup>2</sup> 'lik modül	1 m <sup>2</sup> 'lik modül
Kurulum Tipi	Evsel / Düz Çatı	Evsel / Düz Çatı
Modül Verimliliği	%15,4	%13,5
Sistem Ömrü	30 yıl	30 yıl
Ortalama Işınım Miktarı (Ankara)	1590 kWh / m <sup>2</sup> /yıl	1590 kWh / m <sup>2</sup> /yıl
Performans Oranı	0,75	0,75
Sistem Bozunma Oranı	%0,7 / yıllık	%0,7 / yıllık
Türkiye Şebeke Çevrim Faktörü	0,1047 kWh/ MJ <sub>prim</sub>	0,1047 kWh/ MJ <sub>prim</sub>
<b>Değerlendirme Sonuçları</b>		
Kümülatif Birincil Enerji İhtiyacı	5400 MJ <sub>prim</sub> / m <sup>2</sup> modül	4500 MJ <sub>prim</sub> / m <sup>2</sup> modül
Sera Gazı Salımları	338000 g CO <sub>2</sub> eşdeğeri / m <sup>2</sup> modül	272000 g CO <sub>2</sub> eşdeğeri / m <sup>2</sup> modül
Sistem Ömrü Boyunca Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarı	4950,15 kWh / m <sup>2</sup> modül	4339,42 kWh / m <sup>2</sup> modül
Üretilen Birim Elektrik Enerjisi Başına Sera Gazı Salımı	68,28 g CO <sub>2</sub> eşdeğeri / kWh	62,68 g CO <sub>2</sub> eşdeğeri / kWh

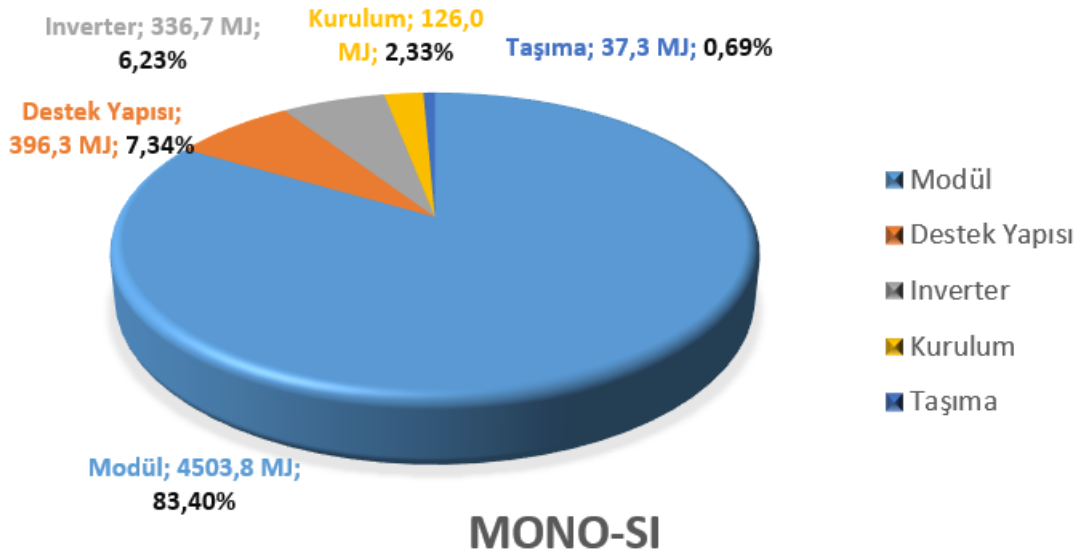
EPBT	3,08 yıl	2,93 yıl
ERoEI	9,75	10,25

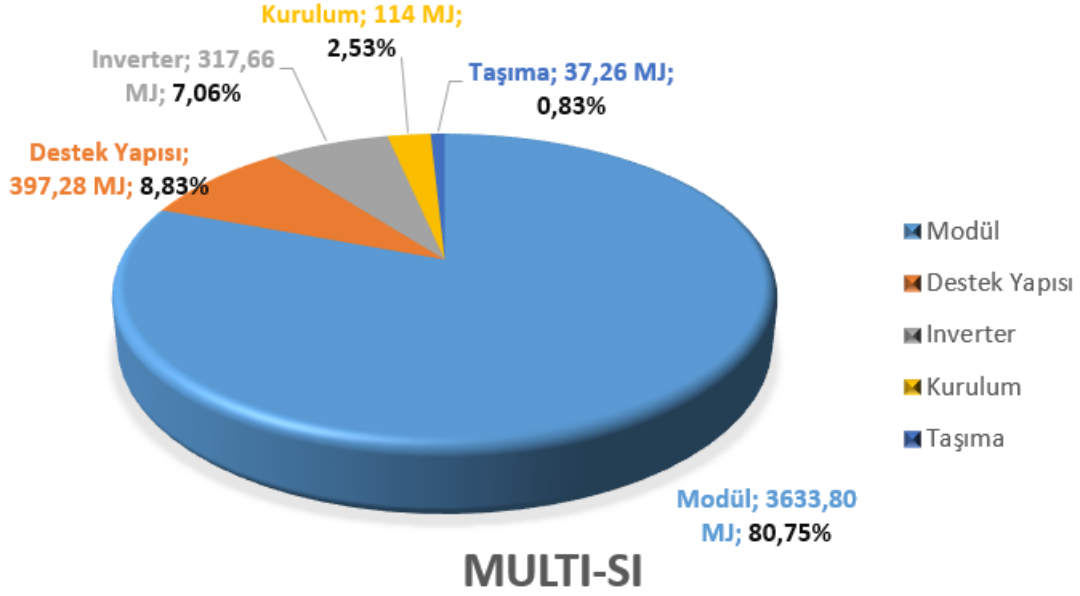
## 4.2. Tartışma

Tez kapsamında fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları 5 farklı alanda ortaya konmuştur.

### 4.2.1. Kümülatif Enerji İhtiyacı

Yaşam döngüsü değerlendirmesi ile monokristal ve multikristal fotovoltaik sistemlerin fonksiyonel birim üzerinden kümülatif enerji ihtiyaçları saptanmıştır. Buna göre monokristal modül kullanan sistemler için hammadde eldesinden sistemin kurulması aşaması da dahil olmak üzere tüm süreç boyunca enerji ihtiyacı 5400 MJ kadardır. Öte yandan multikristal sistemlerde bu enerji ihtiyacı 4500 MJ kadardır. Bu enerji ihtiyacının kırılımına baktığımızda her iki sistem için de oransal olarak en yüksek (>%80) enerji tüketiminin fotovoltaik panellerin üretilmesi kaynaklı olduğu görülmektedir. Bu duruma en büyük katkılar silikonun safsızlaştırılması (MG-Si'nun SOG-Si'na dönüştürülmesi) ve yonga üretimi aşamalarından gelmektedir (Şekil 4.1.).





Şekil 4.1. Farklı aşamalar için birincil enerji ihtiyaçları

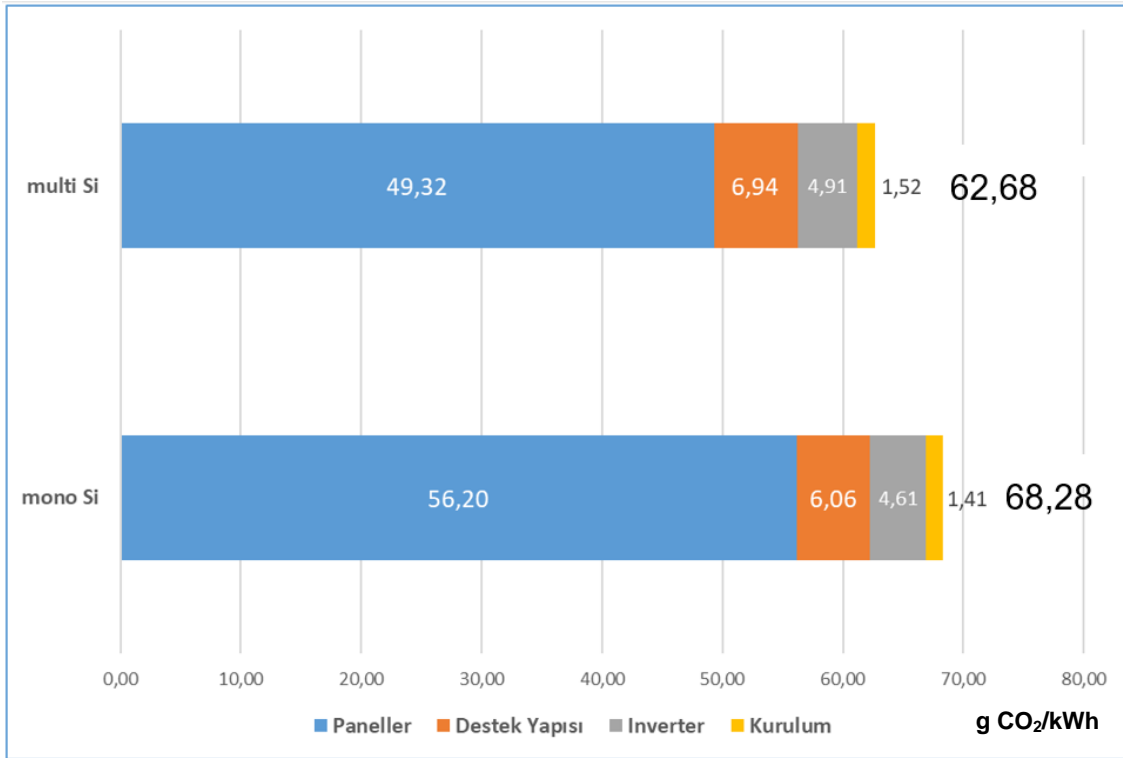
Her iki fotovoltaik sistem için fonksiyonel birim başına en düşük enerji ihtiyacının da hammadde eldesinden sistemlerimizin ömrü sonuna kadar hesaba katılan taşıma faaliyetleri olduğu görülmektedir (Şekil 4.1.). Her iki sistemin yaşam döngüsü boyunca taşıma faaliyetleri için birincil enerji ihtiyacı yaklaşık olarak %1'den azdır.

Fotovoltaik sistemlerin üretimi içerisinde bu denli enerji yoğun bir aşama olan modül üretiminin daha enerji etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi adına her geçen gün Ar-Ge çalışmalarına daha da önem verilmektedir [82]. Monokristal ve multikristal modüllerin üretimi için ihtiyaç duyulan külçe ve blokların eldesi için Siemens süreci yerine akışkan yataklı reaktörlerin kullanılmaya başlanması üretim için ihtiyaç duyulan enerjinin azalmasına sebep olmaktadır [83]. Buna ek olarak malzeme ve enerji kullanımı noktasında bir diğer sıcak nokta olan külçe/ blok kesimi süreçlerinde giderek daha ince yongalar kesilebiliyor olması ve ilgili kesim işlemi sonrası çıkan atığın sistemde kullanılmak üzere geri dönüştürülmesi fotovoltaik sistemlerin modül üretimi aşamasının çevresel etkisinin giderek azalmasına sebep olmaktadır [83].

#### 4.2.2. Sera Gazı Salımları

Monokristal ve multikristal fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüleri boyunca neden oldukları salımlar, SimaPro yazılımı içerisinde bulunan IPCC 2013 GWP 100a veritabanı yardımı ile hesaplanmıştır. Monokristal fotovoltaik sistemler, fonksiyonel birim başına yaşam döngüleri boyunca 338 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazı salımına neden olurken, multikristal sistemler ise 272 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazı salımına sebep olmaktadır.

Fotovoltaik sistemlerin üretiminde enerji yoğunluğunun en yüksek olduğu süreç panel üretimi olduğundan, enerji tüketimi kaynaklı sera gazı salımları ağırlıklı olarak bu süreçten gelmiştir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Farklı aşamalar için sera gazı salımları

#### 4.2.3. Sistem Ömrü Boyunca Üretilen Elektrik Enerjisi

Tez kapsamında fotovoltaik sistemlerimizin ömrü 30 yıl olarak kabul edilmiştir. İki farklı modül tipini kullanan fotovoltaik sistemlerimizin ömürleri boyunca

ürettikleri elektrik, fonksiyonel birim dikkate alınarak, öncelikle sistemlerin üretilmesi için ihtiyaç duyulan malzeme ve enerjinin bir karşılığı olan birincil enerji ihtiyaçlarının sistemler için ayrı ayrı ne kadar sürede amorti edildiğinin karşılaştırılabilmesi için kullanılmıştır.

İkinci olarak sistemlerimizin ömürleri boyunca ürettikleri elektriğin birimi başına (kWh) sistemin sebep olduğu sera gazı salımı miktarı hesaplanmıştır. Sera gazı salımları hammadde eldesinden sistemlerin elektrik üretir hale geldikleri ana kadar olan salımları kapsamaktadır. Bu yüzden sistemlerin ürettiği elektriğin kWh'ı başına açığa çıkan sera gazı miktarlarını hesaplamak, sistemlerin birbirlerine oranla ne denli çevreci olduğunu göstermesi açısından elzemdir.

Bu hesaplamalar için ortaya çıkarılan, sistem ömrü boyunca üretilen enerji miktarları Ankara (1590 kWh/m<sup>2</sup> yıllık ortalama ışınım miktarına sahip) konumunda monokristal sistemler için 4950,15 kWh, multikristal sistemler için ise 4339,42 kWh kadardır.

Bu noktada literatürdeki çalışmalarda gözlenen bir eksiğin altını çizmekte fayda vardır. Fotovoltaiklerden elektrik eldesinin yaşam döngüsünü konu alan çalışmalarda sistemlerimizin ömrü boyunca üretebileceği elektrik, sadece kurulum yapılan bölgenin ışınım değeri ve sistemin verimlilik parametreleri ile hesaplanmakta ve bu durum sistem verimliliğine direkt etkisi olan sıcaklık bileşenini konu dışı bırakmaktadır. Farklı fotovoltaik teknolojilerinin karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizi yapılırken sıcaklık etkisinin de işin içine katılması daha gerçekçi enerji geri dönüş sürelerine ulaşılabilmesi için şarttır.

#### **4.2.4. Birim Elektrik Başına Sera Gazı Salımları**

Bilindiği üzere fotovoltaik sistemler elektrik üretimleri boyunca karbon salımına neden olmamaktadır. Bu nedenden ötürü bir çok yenilenebilir enerji sisteminde de olduğu gibi ürettikleri her birim elektrik enerjisi için konvansiyonel sistemlerle karşılaştırıldıklarında net pozitif bir etkiye sahiptirler.

Her ne kadar fotovoltaik sistemler elektrik üretimleri boyunca net pozitif etkiye sahip olsalar da ilgili sistemlerin üretilebilmesi için çeşitli malzeme ve enerji kaynağı kullanıldığından bu sistemlerin elektrik üretebilmesi için iklim değişikliğine ne gibi etkileri olduğunun saptanması gereklidir.

Bu sebeplerden ötürü sistemlerimizin ömür boyu sera gazı salımlarının, ürettikleri ömür boyu elektrik enerjisine bölünmesi ile birim elektrik başına sera gazı salımları hesaplanmıştır.

Monokristal sistemler için bu miktar, 68,28 g CO<sub>2</sub> eşdeğeri/kWh olurken, multikristal sistemler için 62,68 g CO<sub>2</sub> eşdeğeri/kWh kadar olmuştur. Bunun nedeni monokristal modüllerin üretilmesi için silikonun saflaştırılması ve yonga üretimi aşamalarının multikristal modüllerle karşılaştırıldığında daha enerji yoğun süreçler olmasıdır. Ayrıca yenilenebilir enerji sistemlerinden elektrik eldesinin etkinliğine dikkat çekmesi açısından Türkiye şebekesinin 2011 yılına ait sera gazı salım yoğunluğunun 480 g CO<sub>2</sub> eşdeğeri/kWh kadar olduğunu belirtmekte fayda vardır [84]. Bu bilgiye ek olarak belli başlı fosil yakıt kaynaklarının kWh başına sera gazı salımlarının Çizelge 4.2'deki gibi olduğu görülmektedir. İlgili veriler güneşten elektrik eldesinin çevreci boyutunun altını çizmektedir.

Çizelge 4.2. Fosil yakıt kaynaklarından sera gazı salım miktarları [85]

Enerji Kaynağı	Salım Miktarı (g CO <sub>2</sub> eşdeğeri/kWh)
Çöp Gazı	373
Doğal Gaz	374
Fuel Oil	755
Linyit	1080
LPG	413
Dizel	805
Nafta	461
Taş Kömürü	1018

#### **4.2.5. Enerji Geri Dönüş Süreleri**

Enerji geri dönüş süresi, fotovoltaik sistemlerimizin üretilmesi için aldıkları enerjinin eş miktar kadarını ne kadar sürede içinde buldukları sisteme geri verdiklerinin zamansal bir ölçüsüdür.

Bu değerlerin hesaplanabilmesi için sistemlerin bir sene içerisinde üretebildikleri enerji miktarının sistemlerin kurulu olduğu lokasyonun şebeke verimliliği (enerji çevrim faktörü) hesaba katılarak birincil enerji birimine ( $MJ_{prim}$ ) çevrilerek sistemlerin varolması için gereken gömülü, herhangi bir çevrime uğramamış birincil enerjiye (kümülatif enerji ihtiyacı) oranlanması gerekmektedir.

Bu bilgiler ışığında hesaplanan enerji geri dönüş süreleri monokristal modül kullanan sistemler için 3,08 yıl, multikristal modül kullanan sistemler için ise 2,93 yıl kadardır.

#### **4.2.6. Karşılaştırmalı Maliyet Analizi**

Yaşam döngüsü değerlendirmesi sonuçları ışığında fotovoltaik sistemlerin karşılaştırmalı maliyet analizi ilgili sistemlerin enerji açısından maliyetlerini yaşam döngüleri boyunca kaç kez çıkardıklarının bir ölçütü olan yatırılan enerjiye karşın geri dönen enerji (ERoEI) göstergesi üzerinden yapılmıştır.

Buna göre multikristal modülleri kullanan fotovoltaik sistemler ömürleri boyunca operasyonel hale gelmeleri için ihtiyaç duydukları enerjinin 10,25 katını, monokristal modülleri kullanan sistemler ise 9,74 katını içinde buldukları sisteme geri vermektedir. Bu bağlamda multikristal modüllü fotovoltaik sistemlerin, monokristal modüllü fotovoltaik sistemlere göre güneşten elektrik eldesi noktasında daha maliyet etkin bir seçenek olduğu görülmektedir.





## 5. TARTIŞMA VE YORUM

Tez kapsamında fotovoltaiklerden elektrik eldesinin yaşam döngüsüne odaklanılmıştır. Fotovoltaik sistemlerin varolma gayesi elektrik üretimi olduğundan dünyada yüzdesel olarak en çok tercih edilen iki fotovoltaik teknolojisi üzerinden çevresel etkiler, atık aşaması hariç tüm yaşam döngüsü için enerji ihtiyaçları ve sera gazı salımları ortaya konarak karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

İlgili karşılaştırma yapılırken ülkemiz bağlamı fotovoltaik sistemlerden elektrik eldesinin yaşam döngüsü değerlendirmesine entegre edilmiştir. Bu nedenle Ankara konumunun 2018 yılı birim alana ( $m^2$ ) düşen ortalama ışınım değerleri kullanılarak, monokristal ve multikristal modül kullanan sistemlerin ihtiyaç duydukları birincil enerji, bu malzeme ve enerji akışları nedeni ile ortaya çıkan sera gazı, sistemlerin ömürleri boyunca üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarı, birim elektrik başına sera gazı salımları, enerji geri dönüş süreleri ve yatırılan enerjiye karşın geri dönen enerji ölçütleri saptanmıştır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi ile ortaya çıkan sonuçların literatürdeki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir [86] [87]. Literatürde monokristal silikon modüller konu alınarak gerçekleştirilen kimi çalışmalara baktığımızda kümülatif enerji ihtiyacının birim modül alanı ( $m^2$ ) başına 4160 – 15220 MJ<sub>prim</sub> aralığında olduğu görülmektedir [88] [89]. Ayrıca kimi çalışmalarda da [90] monokristal silikon modüllerin birim alanı ( $m^2$ ) başına kümülatif enerji ihtiyacının farklı kabul ve varsayımlardan ötürü 5300 – 16500 MJ aralığında olduğu saptanmıştır. İlgili çalışmalar sonucu monokristal fotovoltaik sistemlerin yıl cinsinden saptanan enerji geri dönüş süreleri ise 4,5 ve 8,9 yıl kadar olmuştur [88] [89]. Enerji geri dönüş sürelerindeki bu farklılık sistemlerde kullanılan farklı malzemeler, modül verimliliği ve sistemlerin kullanıldığı bölgelerin ışınım değerlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Monokristal fotovoltaikleri kullanan sistemler için malzeme girdileri çok farklılaşmasa da gerek modül verimlilikleri gerekse de Ankara'nın ışınım değerleri bahsi geçen çalışmalardaki [88] [89] bölgelerinkinden daha

yüksek olduğundan tez çalışmamızdaki enerji geri dönüş süresi monokristal fotovoltaik sistemler için 3,08 yıl kadar olmuştur (Çizelge 5.1.).

Literatürdeki kimi çalışmalardan [88] [89] monokristal fotovoltaik sistemlerin yaşam döngüleri boyunca ürettikleri birim elektrik enerjisi başına (kWh) sera gazı salımlarınının 61 ve 165 g CO<sub>2</sub> eşdeğeri kadar olduğu görülmekte bu değerler tez sonucumuz ile paralellik göstermektedir.

Çizelge 5.1. Mono/ Multikristal fotovoltaikler YDD sonuçları

Çalışma	FV Teknolojisi	Kümülatif Enerji İhtiyacı (CED)	Enerji Geri Dönüş Süresi (EBPT) (Yıl)	Sera gazı salımları (g CO <sub>2</sub> eşdeğeri / kWh)
Kato [88]	Monokristal	4160 – 15220 MJ / m <sup>2</sup>	8,9	61
Kannan [89]	Monokristal	2,2 MJ/kWh	4,5	165
Alsema [90]	Monokristal	5300-16500 MJ / m <sup>2</sup>	3-4	/
Alsema [91]	Multikristal	4122 MJ/m <sup>2</sup>	2,7	/
Pacca [92]	Multikristal	4020 MJ/modül	7,5	72,4
Tez Çalışması	Monokristal	5400 MJ/m <sup>2</sup>	3,08	68,28
Tez Çalışması	Multikristal	4500 MJ/m <sup>2</sup>	2,93	62,68

Multikristal fotovoltaik sistemler, monokristal fotovoltaik sistemlere yakın verimlilik değerlerine sahip olsalar da yaşam döngüleri boyunca daha düşük enerjiye ihtiyaç duyduklarından daha az enerji geri dönüş süreleri ve sera gazı salımlarına sahiptirler. İlgili sistemlerden elektrik eldesinin yaşam döngüsünü konu alan literatürü taradığımızda ise buna paralel bulgularla karşılaşılmaktadır [91] [92]. Literatürde geçen çalışmalarla tezimizde ulaştığımız 4500 MJ/ m<sup>2</sup>lik kümülatif enerji ihtiyacı değeri de uygunluk göstermektedir. Ayrıca yıl cinsinden enerji geri dönüş süreleri ve üretilen birim elektrik enerjisi başına sera gazı salımları da paralellik göstermektedir.

Bu örtüşmelerin yanı sıra ilk kez Ankara, Türkiye konumu için küresel ölçekte en yüksek taleple tercih edilen iki fotovoltaik teknolojisinden elektrik üretiminin

yaşam döngüsüne aynı çalışmada yer veriliyor olması ulusal literatüre katkı açısından önemlidir.

Bu sayede çalışmamız güneş enerjisi yatırımlarında ekonomik maliyete ek olarak çevresel perspektifin de kullanılmaya başlanması açısından teşvik edici bir çalışma olmuştur. Bu bakış açısı göz önünde bulundurulduğunda güneş enerjisine yatırım yapmayı düşünen birinin tez çıktılarına göre multikristal modülleri kullanan bir fotovoltaiik sistemi tercih etmesi çevresel açıdan daha mantıklı olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, [sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf) (Erişim tarihi: **11 Eylül 2019**)
- [2] F. D. Angelo, C. J. C. Jabbour, S. V. Galina, Environmental innovation: in search of a meaning, *World Journal of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development*, Vol. 8 Issue: 2/3, **(2012)** 113
- [3] A. Luqmani, M. Leach, D. Jesson, Factors behind sustainable business innovation: The case of a global carpet manufacturing company, Vol. 24 *Environmental Innovation and Societal Transitions*. **(2017)** 94
- [4] C. W. Babbitt, A “systems” perspective on clean technology, *Clean Technologies and Environmental Policy* Vol. 19 Issue: 10 **(2017)** 2341
- [5] L. Binaghi, M. Del Borghi, M. Gallo, The Application of the Environmental Product Declaration to Waste Disposal in a Sanitary Landfill - Four Case Studies, *The International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 12 Issue 1 **(2007)** 40.
- [6] A. E. Björklund, Survey of approaches to improve reliability in lca, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7 **(2002)** 64.
- [7] O. Larsson Ivanov, D. Honfi, H. Stripple, Uncertainty and variation in LCA - Implementation of probabilistic methods to assess environmental impacts of infrastructures, *Lund University Report* **(2018)**.
- [8] IEA, Renewables 2018 Market analysis and forecast from 2018 to 2023, <https://www.iea.org/renewables2018/> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [9] Our World in Data, Renewable Energy, [ourworldindata.org/renewable-energy](https://ourworldindata.org/renewable-energy) (Erişim Tarihi: **30 Ağustos 2019**)
- [10] IEA, Renewables, <https://www.iea.org/topics/renewables/> (Erişim Tarihi: **30 Ağustos 2019**)
- [11] Business Insider, This incredible fact should get you psyched about solar power, <https://www.businessinsider.com/this-is-the-potential-of-solar-power-2015-9> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [12] SEIA, Solar Energy, <https://www.seia.org/initiatives/about-solar-energy>

(Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)

[13] Our World In Data, Solar PV, <https://ourworldindata.org/renewable-energy#solar-pv> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)

[14] A. C. Díaz, Energy Life Cycle Assessment (LCA) of silicon-based photovoltaic technologies and the influence of where it is manufactured and installed, Master Thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona **2014**.

[15] A. Metz, M. Fischer, J. Trube, International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 8<sup>th</sup> edition, PV Manufacturing in Europe Conference, Brussels, May 19<sup>th</sup> 2017, **2017**.

[16] MIT, The Future of Solar Energy, An Interdisciplinary MIT Study, **2015**.

[17] UN Climate Change News, Global Energy Interconnection Is Crucial for Paris Goals, <https://unfccc.int/news/global-energy-interconnection-is-crucial-for-paris-goals>, (Erişim tarihi: 10 Haziran **2019**)

[18] IEA, CO2 Emissions from Fuel Combustion 2018, **2018**.

[19] A. Jäger-Waldau, Snapshot of Photovoltaics, *Energies*, 12, (**2019**) 769

[20] IEA, World Energy Outlook 2018, <http://www.iea.org/weo2018/scenarios/> (Erişim tarihi: 10 Haziran **2019**)

[21] M. Metayer, H.J. Fell, The projections for the future and quality in the past of the World Energy Outlook for solar PV and other renewable energy technologies. 31st EU PVSEC, Hamburg, **2015**

[22] C. Breyer, D. Bogdanov, A. Aghahosseini, A. Gulagi, M. Child, A. S. Oyewo, J. F. Orozco, K. Sadovskaia, P. Vainikka, Solar photovoltaics demand for the global energy transition in the power sector. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 26, Issue 8, (**2018**), 505-523

[23] BNEF, Clean Energy Investment Exceeded \$300 Billion Once Again in 2018, <https://about.bnef.com/blog/clean-energy-investment-exceeded-300-billion-2018/> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)

[24] H. J. J. Yu, Virtuous cycle of solar photovoltaic development in new regions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 78 (**2017**) 1357-1366

[25] FS-UNEP Collaborating Centre, Bloomberg New Energy Finance, Global Trends in Renewable Energy Investment 2018, [http://www.iberglobal.com/files/2018/renewable\\_trends.pdf](http://www.iberglobal.com/files/2018/renewable_trends.pdf) (Erişim tarihi: **12 Eylül 2019**)

- [26] IEA, World Energy Outlook, 2017 Global Annual Installed Capacity, <https://www.iea.org/weo2017/> (Erişim Tarihi: **30 Ağustos 2019**)
- [27] IEA, Photovoltaic Power Systems Programme PVPS 2017, [http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6&eID=dam\\_frontend\\_push&docID=4412](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6&eID=dam_frontend_push&docID=4412), (Erişim Tarihi: **2 Eylül 2019**)
- [28] A. Zervos, Renewables 2018 Global Status Report, REN21, **2018**.
- [29] Anonim, Total Solar Power by Country, <https://geoshen.com/posts/total-solar-power-capacity-by-country-2016>, (Erişim Tarihi: **12 Eylül 2019**)
- [30] KPMG International, Taxes and Incentives for Renewable Energy, **2013**.
- [31] J. F. Kirkegaard, T. Hanemann, L. Weischer, M. Miller, Toward a Sunny Future? Global Integration in the Solar Pv Industry, Peterson Institute for International Economics Working Paper, 10 (**2010**) 6
- [32] IEA, Sustainable Development Scenario (SDS), [www.iea.org/weo/weomodel/sds/](http://www.iea.org/weo/weomodel/sds/) (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [33] IEA, Solar PV, <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/solarpv/> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [34] Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report 2018, **2018**.
- [35] SEIA, Solar Soft Costs Fact Sheet, <https://www.seia.org/sites/default/files/2019-05/Solar-Soft-Costs-Factsheet.pdf>, (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [36] A. Jäger-Waldau, PV Status Report 2018, Publications Office of the European Union, Luxembourg, **2018**.
- [37] IEA, Solar Photovoltaic Roadmap, [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv\\_roadmap\\_foldout.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap_foldout.pdf), (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [38] J. Odden, G. Halvorsen, H. Rong, R. Gløckner, Comparison of the energy consumption in different production processes for solar grade silicon, **2008**
- [39] H. Nuying, A. Hwang, Solar Wafer Production to See Over-Capacity by Year-End 2018, <https://www.digitimes.com/news/a20180109PD204.html>, (Erişim Tarihi: **12 Eylül 2019**)
- [40] IEC, Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements, **2016**.

- [41] U.S. Department of Energy, Solar Performance and Efficiency, <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/solar-performance-and-efficiency>, (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [42] A. Kumar, Predicting efficiency of solar cells based on transparent conducting electrodes, Journal of Applied Physics Volume 121 Issue 1, **(2017)**
- [43] Fraunhofer ISE, New world record for solar cell efficiency at 46% – French-German cooperation confirms competitive advantage of European photovoltaic industry, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [44] NREL, Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [45] A. M. Elshurafa, S. R. Albardi, S. Bigerna, C. A. Bollino, Estimating the learning curve of solar PV balance-of-system for over 20 countries: Implications and policy recommendations, Journal of Cleaner Production, Volume 196, **(2018)** 122-134
- [46] E. S. Rubinalnês, I. M. L. Azevedoa, P. Jaramillo, S. Yeh, A review of learning rates for electricity supply technologies, Energy Policy 86 **(2015)** 198-218
- [47] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2018, [https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA\\_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf](https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf), (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [48] A. J. Rix, J. D. T. Steyl, J. Rudman, U. Terblanche, J. L. van Niekerk, First Solar's CdTe module technology – performance, life cycle, health and safety impact assessment, Stellenbosch University, **2015**
- [49] J. Lifton, Access To The Limited Global Supply Of Tellurium Is Critically Important, <http://www.techmetalsresearch.com/access-to-the-limited-global-supply-of-tellurium-is-critically-important/> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [50] A. RR. Jean, V. Wilkening, J. A. Field, R. S. Alvarez, Leaching of cadmium and tellurium from cadmium telluride (CdTe) thin-film solar panels under simulated landfill conditions, Journal of Hazardous Materials, Volume 336 **(2017)** 57-64
- [51] D. Sica, O. Malandrino, S. Supino, M. Testa, M. Lucchetti, Management

of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 3 (2018) 2934-2945

[52] IEA, End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies, Report IEA-PVPS T12-10, 2018.

[53] M. Raugei, S. Bargigli, S. Ulgiati, Energy and Life Cycle Assessment of Thin Film CdTe Photovoltaic Modules, 2005

[54] NREL, Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells, <https://www.nrel.gov/pv/copper-indium-gallium-diselenide-solar-cells.html> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2019)

[55] PV Magazine, CIGS is back, back again, <https://www.pv-magazine.com/2018/07/21/the-weekend-read-cigs-is-back-back-again/> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2019)

[56] N. Goyal, These Ultra-Thin and Flexible Solar Panels Can Stick to Any Surface Like Wallpaper, <http://www.industrytap.com/ultra-thin-flexible-solar-panels-can-stick-surface-like-wallpaper/43636> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2019)

[57] W. Qarony, M. Hossain, M. Khalid Hossain, J. Uddin, A. Haque, A. R. Saad, Y. H. Tsang, Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis, Results in Physics, Volume 7 (2017) 4287-4293

[58] C. Crowell, Researchers improve efficiency of organic PV cells to 15 percent, <https://solarbuildermag.com/news/organic-pv-cell-efficiency-improves-to-15-percent/> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2019)

[59] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A. W.Y. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (Version 53), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Volume 27, Issue 1, (2019) 3-12

[60] A. Garg, S. Rastogi, A. Singh, L. Sowjanya Pali, S. K. Gupta, Degradation of organic photovoltaic devices: a review. Nanomaterials and Energy, Volume 2 Issue 1 (2013) 42-58

[61] Anonim, 450mm Test Wafers, a Path Forward?, <http://450mm.com/blog/2015/01/16/test-wafers-part-one/> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2019)

[62] NREL, Best Research Cell Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (Erişim tarihi: 10 Haziran 2019)



- [63] Canadian Solar, Solar Industry Technology Report 2015-2016, [www.canadiansolar.com/media/canadian\\_solarsolar\\_industry\\_technology\\_report\\_2015-2016.pdf](http://www.canadiansolar.com/media/canadian_solarsolar_industry_technology_report_2015-2016.pdf) (Erişim Tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [64] V. Perraki, Epitaxial Silicon Solar Cells (**2011**)
- [65] Siemens Process, [www.sciencedirect.com/topics/engineering/siemens-process](http://www.sciencedirect.com/topics/engineering/siemens-process), (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [66] B. Koerner, The Inside Story of the Great Silicon Heist, <https://www.wired.com/story/inside-story-of-the-great-silicon-heist/> (Erişim Tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [67] Fraunhofer ISE, THESSO – High Efficiency Multi-Crystalline Silicon Wafers for Photovoltaics, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/thesso-high-efficiency-multi-crystalline-silicon-wafers-for-photovoltaics.html> (Erişim Tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [68] Financial Times, Silicon shortage hits solar power hopes, <https://www.ft.com/content/e50784ea-78cb-11db-8743-0000779e2340> (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [69] J. Bernreuter, F. Haugwitz, The Who's Who of Solar Silicon Production, Bernreuter Research Report, **2012**
- [70] Wikipedia, Grain Boundary, [https://en.wikipedia.org/wiki/Grain\\_boundary](https://en.wikipedia.org/wiki/Grain_boundary) (Erişim Tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [71] M. Green, P. A. Basore, N. Chang, D. Clugston, R. Egan, R. Evans, D. Hogg, S. Jarnason, M. Keevers, P. Lasswell, J. O'Sullivan, U Schubert, A. Turner, S. Wenham, T. Young, Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules, *Solar Energy*, Volume 77, Issue 6 (**2004**) 857-863
- [72] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen, H-J. Klüppel, The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 11, (**2006**) 80-85
- [73] J J. Potting, W. Klöpffer, J. Seppälä, J. Risbey, S. Meilinger, G. Norris, G.L. Lindfors, M. Goedkoop, Best available practice in life cycle assessment of climate change, stratospheric ozone depletion, photo-oxidant formation, acidification, and eutrophication, **2001**
- [74] M. Brander, C. Wylie, The use of substitution in attributional life cycle assessment, *Greenhouse Gas Measurement and Management Journal*, Volume 1, Issue 3-4 (**2011**) 161-166

- [75] F. Rubik, K. Jacob, H. Vagt, Scope of and Scientific Framework for the CALCAS Concerted Action,
- [76] J. Rieradevall, X. Domènech, P. Fullana, Application of life cycle assessment to landfilling, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 2 (1997) 141
- [77] J. Peng, L. Lu, H. Yang, Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 19, (2013), 255-274
- [78] A. Sumper, Life-cycle assesment of a photovoltaic system in Catalonia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 8, (2011), 3888-3896
- [79] AF. Sherwani, JA. Usmani, Life cycle assesment of solar PV based electricity generation systems: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 1, (2010), 540-544
- [80] P. K. Bhandari, M. J. Collier, J. R. Ellingson, S. D. Apul, Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 47 (2015) 133-141
- [81] IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, <http://www.climatechange2013.org/>, (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [82] P. Wawer, J. Müller, M. Fischer, P. Engelhart, A. Mohr, K. Petter, Latest Trends in Development and Manufacturing of Industrial, Crystalline Silicon Solar-Cells, *Silicon PV*, Freiburg, **2011**.
- [83] E. A. Alsema, M. Wild-Scholten, Reduction of Environmental Impacts in Crystalline Silicon Photovoltaic Technology: An Analysis of Driving Forces and Opportunities, *MRS Proceedings*, (2011)
- [84] ABB, Turkey Energy Efficiency Report, [library.e.abb.com/public/a2c92d1d4f7f2405c1257be9002c5060/Turkey.pdf](http://library.e.abb.com/public/a2c92d1d4f7f2405c1257be9002c5060/Turkey.pdf) (Erişim tarihi: **10 Haziran 2019**)
- [85] I. Ari, M.A. Koksal, Carbon dioxide emission from the Turkish electricity sector and its mitigation options, *Energy Policy*, Volume 39, Issue 10, (2011) 6120-6135
- [86] A.Stoppato, Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation, *Energy*, Volume 33, Issue 2 (2008) 224-232

- [87] W. Luo, Y. S. Khoo, A. Kumar, J. S. C. Low, Y. Li, Y. Shee Tan, Y. Wang, A. G. Aberle, S. Ramakrishna, A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 174 **(2018)** 157-162.
- [88] K. Kato, A. Murata, K. Sakuta, Energy pay-back time and life-cycle CO<sub>2</sub> emission of residential PV power system with silicon PV module, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 6, Issue 2 **(1998)** 105-115.
- [89] R. Kannan, K. C. Leong, R. Osman, H. K. Ho, 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*, Volume 80 **(2006)** 555-563.
- [90] E. A. Alsema, Energy pay-back time and CO<sub>2</sub> emissions of PV systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 8, Issue 1 **(2000)** 17–25.
- [91] G. J. M. Phylipsen, E. A. Alsema, Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules, Report No. 95057, Utrecht University, **1995**.
- [92] S. Pacca, D. Sivaraman, G. Keoleian, Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems, *Energy Policy*, Volume 35, Issue 6 **(2007)** 3316– 3326.