



**FOTOVOLTAİK PANELLERİN ÇEVRESEL ETKİ  
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Büşra ÇALIŞ**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

**FOTOVOLTAİK PANELLERİN ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Büşra ÇALIŞ**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

**KARABÜK  
Haziran 2021**

Büşra ÇALIŞ tarafından hazırlanan “FOTOVOLTAİK PANELLERİN ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

.....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 18/06/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İlhan CEYLAN ( KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Ali Etem GÜREL (DÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN ( KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Büşra ÇALIŞ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **FOTOVOLTAİK PANELLERİN ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Büşra ÇALIŞ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

**Haziran 2021, 46 sayfa**

Enerji talebi, teknolojinin gelişmesiyle birlikte yaşam içerisinde artmakta ve dünyanın enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hala fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Oluşan enerji ihtiyacı fosil yakıtlara yönelik talep artışına sebep olurken, kaynakların sınırlılığı ve çevreye salınan sera gazı emisyonları sebebiyle yenilenebilir enerjiye yönelim günden güne artmaktadır. Sınırsız ve temiz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi, en popüler yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisinin çeşitli kullanımları mevcuttur. Fakat fotovoltaik paneller vasıtasıyla elektrik üretimine dünya çapında daha fazla önem verilmektedir. PV paneller kristal silikon ve ince film teknolojisi olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. Bu çalışmada iki önemli teknoloji arasından en yaygın kullanıma sahip polikristal PV paneli ile kadmiyum tellür (CdTe) teknolojisi seçilmiştir. Polikristal ve kadmiyum tellür fotovoltaik panellerin yaşam döngüleri boyunca çevresel emisyon miktarları karşılaştırılmıştır. Yaşam döngüsü boyunca panellerin imalat, geri dönüşüm ve elektrik üretimi esnasında

oluşan emisyon miktarı saptanmıştır. Ek olarak bu iki PV modül tipinin enerji geri ödeme süreleri de hesaplanmıştır. Hem 1 m<sup>2</sup> polikristal hem de CdTe PV panellerinin yaşam döngüsü boyunca emisyon miktarı sırasıyla 201,4 ve 115,04 kg-CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır. Ayrıca polikristal panelin ortalama enerji geri ödeme süresi 0,92 yıl iken, CdTe panel için bu değer 0,57 yıldır. Bunun yanında, güneş panellerinin kullanımı ile oluşan emisyon miktarı ile kömür santrallerine oranla daha temiz enerji kaynağı olarak bilinen doğalgaz termik güç santralleri kıyaslanmıştır. Sonuç olarak PV panel tarafından çevreye salınan emisyon miktarı ile 17 yıllık ömrü boyunca aynı koşullar altında termik santral tarafından üretilen enerjinin sonucunda salınan emisyon arasında büyük bir fark gözlenmiştir. PV panel, termik santrale kıyasla 1,72 ton CO<sub>2</sub> emisyon tasarrufu sağlamaktadır. Başka bir ifadeyle, PV paneller 10 kat daha çevre dostu görünmektedir.

**Anahtar Sözcükler :** Polikristal, kadmiyum tellür, emisyon, enerji geri ödeme süresi, yaşam döngüsü.

**Bilim Kodu** : 92802

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT POTENTIAL OF PHOTOVOLTAIC PANELS**

**Büşra ÇALIŞ**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Energy Systems Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

**June 2021, 46 pages**

Energy demand, increases in life with the development of technology. Most of the world's energy needs are still met by fossil fuels. While the resulting energy need causes an increase in the demand for fossil fuels, the tendency to renewable energy is increasing day by day due to the limited resources and greenhouse gas emissions released into the environment. Solar energy, which is an unlimited and clean energy source, is among the most popular renewable energy sources. There are various uses of solar energy. However, worldwide attention is paid to the generation of electricity by means of photovoltaic panels. PV panels are grouped under two main headings; crystalline silicon and thin-film technology. In this study, polycrystalline PV panel and cadmium tellurium (CdTe) technology, which are the most widely used among two important technologies, were chosen. The emission amount of polycrystalline and cadmium telluride photovoltaic panels to the environment during the life cycle were compared. During the life cycle, the amount of emission released to the environment

during the production, recycling, and electricity generation of the panel was determined. In addition, energy payback times of these two PV types were calculated. The emission amount for both of 1 m<sup>2</sup> polycrystalline and CdTe PV panel throughout the life cycle was determined to be 201,4 and 115,04 kg–CO<sub>2</sub>, respectively. Besides, the average energy payback period of the polycrystalline panel is 0,92 years, while it is 0,57 years for the CdTe panel. In addition, the amount of emissions generated by the use of solar panels and natural gas thermal power plants, which are known as a cleaner energy source compared to coal power plants, were compared. As a result, a huge difference was observed between the emission amount released by the PV panel to the environment and the emission released as a result of the energy produced by the thermal power plant under the same conditions during its 17-year lifetime. PV panel saves 1,72 tons of CO<sub>2</sub> emissions compared to the thermal power plant, and so PV panels appear to be 10 times more environmentally friendly.

**Key Word** : Polycrystalline, cadmium telluride, emission, energy payback time, life cycle.

**Science Code** : 92802



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. İlhan CEYLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	12
FOTOVOLTAİK (PV) PANEL TEKNOLOJİSİ .....	12
BÖLÜM 3 .....	15
FOTOVOLTAİK PANELLERİN ÜRETİMİNDEKİ ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI.....	15
3.1. POLİKİRİSTAL PV PANEL ÜRETİM AŞAMALARININ VE ÜRETİMDEKİ ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ ..	16
3.1.1.Polikristal PV Panel Üretiminde Ortalama Emisyon Tahmini .....	18
3.1.2.Polikristal PV Panelin Geri Dönüşümü Esnasında Oluşan Emisyonun Yaklaşık Tahmini .....	22
3.1.3.Polikristal Panel İle Elektrik Üretiminden Kaynaklanan Ortalama Emisyon Miktarı .....	24
3.2. CdTe PANEL ÜRETİM AŞAMALARININ VE ÜRETİMDEKİ ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ .....	25
3.2.1.CdTe PV Panel Üretiminde Ortalama Emisyon Tahmini .....	26

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.2.2. CdTe PV Panelin Geri Dönüşümü Esnasında Oluşan Emisyonun Yaklaşık Tahmini .....	28
3.2.3. CdTe Panel İle Elektrik Üretiminden Kaynaklanan Ortalama Emisyon Miktarı .....	30
3.3. FOTOVOLTAİK PANELLERİN EMİSYON ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	31
BÖLÜM 4 .....	33
ENERJİ SEKTÖRÜ TARAFINDAN OLUŞAN SERA GAZI EMİSYONLARI İLE GÜNEŞ ENERJİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	33
BÖLÜM 5 .....	37
SONUÇLAR.....	37
KAYNAKLAR.....	39
ÖZGEÇMİŞ.....	46

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 2.1. PV panel yapısı.....	12
Şekil 3.1. Fotovoltaik panelin üretim aşaması.....	17
Şekil 3.2. Panel üretim aşamalarındaki enerji tüketimi.....	20
Şekil 3.3. Ülkelerde üretilen polikristal PV panellerin üretiminden salınan ortalama emisyon miktarı.....	21
Şekil 3.4. Polikristal PV panelin geri dönüşümü sırasında salınan emisyon miktarı.. ..	23
Şekil 3.5. CdTe güneş panelinin üretim aşaması. ....	27
Şekil 3.6. Ülkelerde üretilen CdTe PV panellerin üretiminden salınan ortalama emisyon miktarı.....	28
Şekil 3.7. CdTe PV panelin geri dönüşümü sırasında salınan emisyon miktarı.....	30
Şekil 3.8. Yaşamları boyunca polikristal ve CdTe güneş panellerinin emisyon miktarı.....	32

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. PV modül teknolojilerinin sınıflandırılması ve verimleri.....	14
Çizelge 3.1. Üretimde tüketilen elektriğin santraller tarafından üretilmesi ile açığa çıkan ortalama emisyon faktörü .....	18
Çizelge 3.2. 2018 yılında elektrik üretiminde kullanılan yakıtlar .....	22
Çizelge 3.3. Farklı ülkeler için polikristal panel ile üretilen elektrik değeri.....	24
Çizelge 3.4. Farklı ülkeler için CdTe panel ile üretilen elektrik değeri.....	31
Çizelge 4.1. Elektrik üretim kaynaklarına göre ortalama sera gazı emisyon değerleri .....	34

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

NO <sub>x</sub>	: Nitrojen oksit
SO <sub>2</sub>	: Sülfür dioksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
CH <sub>4</sub>	: Metan
N <sub>2</sub> O	: Diazot monoksit
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum dioksit
CdO	: Kadmiyum oksit
CdCl <sub>2</sub>	: Kadmiyum klorür
HCl	: Hidroklorik asit
H <sub>2</sub> S	: Hidrojen sülfür
CdS	: Kadmiyum sülfür
HFCs	: Hidroflorür karbonlar
PFCs	: Perfloro karbonlar
SF <sub>6</sub>	: Sülfür hekza florür

## KISALTMALAR

- PV : Photovoltaic (Fotovoltaik)
- IEA : International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
- ABD : Amerika Birleşik Devletleri (United States)
- AB : Avrupa Birliği (European Union)
- CSP : Concentrated Solar Power Systems (Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjili Güç Sistemleri)
- AC : Alternating Current (Alternatif Akım)
- DC : Direct Current (Doğru Akım)
- EVA : Etilen Vinil Asetat
- sc-Si : Monocrystalline Silicon (Monokristal Silikon)
- mc-Si : Polycrystalline Silicon (Poli veya Çok Kristalli Silikon)
- a-Si : Amorphous Silicon (Amorf Silikon)
- $\mu$ c-Si : Micromorph Silicon (Mikromorf Silikon)
- CdTe : Cadmium Telluride (Kadmiyum Telürür)
- CIS : Copper-Indium-Diselenide (Bakır-İndiyum-Diselenid)
- CIGS : Copper-Indium-Gallium-Diselenide (Bakır-İndiyum-Galyum-Diselenid)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Son yıllarda, artan nüfus ve hızla gelişen teknoloji sebebiyle, global enerji tüketiminde ve enerji talebinde büyük bir artış yaşanmıştır. Örneğin, dünyanın birincil enerji tüketimi son 10 yılda yıllık ortalama %1,7 oranında artmıştır. Günümüzde fosil yakıtlar yaklaşık %85 oranında en baskın enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [1,2]. Fosil yakıtlı sistemler büyük ölçüde hava kirliliğine neden olmaktadır [3]. Ancak bu sistemleri yaşamımızdan tamamen çıkarmak mümkün olmamakla birlikte hava kirliliğini önlemek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücünü arttırmak büyük önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi sonsuz enerji kaynaklarından biri olması sebebiyle popüler bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi ilk olarak sıcak su üretiminde ve mahal ısıtmasında kullanılmıştır. Ardından fotovoltaik hücrelerin yardımıyla elektrik üretimine başlanmıştır [4].

Son yıllarda hızla gelişim gösteren ve bu gelişimi sürdüren fotovoltaik panel teknolojisi enerji sektörü içerisinde dünyanın en büyük pazar paylarından birine sahip olan ve küresel çapta önem arz eden sektörlerin başında gelmektedir. Sektörün günümüzde bu kadar çok rağbet görmesi, uluslararası pazarda rekabet yaratmakta, bu rekabet de teknolojik gelişmeleri hızlandırarak olağan dışı kimyasal madde kullanımı ile panel üretimi gibi birtakım yeniliklere öncülük etmektedir [5,6]. Farklı inovasyonların yanında kendini güncelleyerek ilerleyen fotovoltaik panel sektörü; verimlilik, kullanım ömrü, mukavemet, gibi çeşitli özelliklerini iyileştirerek piyasaya sunmakta ve bu da zaman içerisinde küresel çapta fotovoltaik teknolojisinde talep artışına neden olmaktadır. Artan talebe karşılık hızla büyüyen bu pazarda yeni teknolojiler üzerinde çalışılarak her geçen gün ilerleme kaydedilmesiyle birlikte gelecek trendler belirlenmektedir [7,8].



Mevcut enerji raporları ve verileri değerlendirildiğinde önümüzdeki dönemlerde bu talebin daha da artması beklenmektedir [9]. Modern çağda uluslar, enerji talebindeki artışa yanıt verebilmek ve arz güvenliğini sağlayabilmek amacıyla enerji çeşitliliğini artırmaya yönelik politikalar izlemektedir [10]. Bu politikalar içerisinde yer alan ve devletler tarafından desteklenen fotovoltaik sektörü ülkelerin ithalat miktarını düşürerek enerjide arz güvenliği yarattığı için yatırımcılar tarafından önemli ölçüde tercih edilmektedir. Fakat bu sistemler arz-talep ihtiyacına anında karşılık veremediğinden bir miktar yetersiz kalmaktadır [11]. Durum bu boyuttan değerlendirildiğinde, dünyada arz-talep anlamında belirsizlik yaratmayan güvenilir sistemlere ihtiyaç duyulmakta ve bu sebeple arz-talep gelişmelerine anında cevap verebilen konvansiyonel yakıtlı sistemlerin de kullanımını doğrudan artmaktadır. Ancak bu sistemlerin faal olması ile birlikte nitrojen oksit (NO<sub>x</sub>), sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gibi sera gazlarının yanı sıra büyük miktarda külün de atmosfere salınması, hava kirliliği gibi birtakım sorunları da beraberinde getirmektedir [12]. Günümüzde küresel bir sorun haline gelen hava kirliliği canlıların sağlığını tehdit eden faktörler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Sera gazı emisyonlarının artışı gelecek nesiller için ciddi tehdit oluşturduğundan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine ek olarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik Kyoto Protokolü hazırlanarak anlaşmayı kabul eden ülkelere özgü çeşitli hedefler oluşturulmuştur [13]. Bu anlaşma içerisinde konvansiyonel yakıtlı sistemlerin çıkarttığı emisyon azaltılarak güneş enerji sistemlerini arttırmaya yönelik önlem maddeleri de yer almaktadır [14,15]. Sera gazını azaltmak amacıyla desteklenen fotovoltaik panel sistemleri düşük karbon emisyon değerine sahip olması nedeniyle son yıllarda ülkeler tarafından büyük ilgi görmekte ve çeşitli politikalar izleyerek kurulu gücünü yüksek seviyelere taşımaktadır [16].

Fotovoltaik panel sistemleri herkes tarafından temiz enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Fakat fotovoltaik panelin yaşam evreleri incelendiğinde panel üretimi, nakliye ve elektrik üretimi gibi çeşitli aşamalarda, enerji alışverişi sebebiyle doğrudan ve dolaylı emisyon açığa çıktığı gözlemlenmektedir [17,18]. Bunun yanında panel üretimi gerçekleştirilirken çeşitli kimyasal maddeler kullanılmakta ve bu kimyasal maddeler içerisinde zararlı toksinler yer almaktadır. Dolayısıyla panel içerisinde yer alan hammaddeler çevre sağlığı açısından birtakım tehditler oluşturmaktadır. Bu ve

benzeri nedenlerden dolayı fotovoltaik panellerin çevre dostu olup olmadığı çeşitli tartışmalara yol açmaktadır. Bazı görüşler PV panel üretiminde tüketilen enerjinin yaşamları boyunca ürettiği enerjiden daha fazla olduğu başka bir deyişle, enerjiyi amorti edemediği yönündeyken bazı görüşler de bu iddiaların aksini savunmaktadır. Çalışmanın bu aşamasında bu konu ile ilgili literatür taraması gerçekleştirilmiştir [19].

Fu vd.'nin 2015 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre Çin'de üretilen polikristal güneş panelinin, panel üretim tesislerinden elde edilen veriler doğrultusunda yaşam döngüsü incelenmiştir. Polikristal güneş panelinin üretim aşamaları ve mevcut temel parametreleri değerlendirilerek standartlara uygun olarak üretilen panelin özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Elektriğinin %72,31'ini kömür yakıtlı termik santrallerden üreten Çin'in, 200W<sub>p</sub>'lık bir polikristal PV paneli üretmek için 2522 MJ birincil enerjiye ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Buna ilave olarak panel için tüketilen enerjiye rağmen 25 yıllık kullanım ömrüne sahip olan polikristal PV panelleri oldukça çevre dostu sistemler olarak analiz edilmiştir [7].

Aman vd.'nin 2015 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre güneş enerji sistemleri çeşitli avantajlara sahip olan temiz enerji sistemi olmasına rağmen diğer enerji kaynaklarında olduğu gibi bu kaynakta da birtakım çevre, sağlık, güvenlik gibi çeşitli riskler ile karşı karşıya kalınmıştır. Bu çalışmada güneş enerji sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. PV panel içerisinde yer alan zehirli maddeler çalışmada belirtilmiştir. Panel içerisinde yer alan bazı kimyasalların çevresel açıdan ve sağlık açısından tehdit oluşturması sebebiyle dünya çapında erişim kısıtlaması getirilmesinden bahsedilmiştir. İçerisinde zehirli toksinlerin de bulunduğu güneş panellerinin daha az karbon emisyonu açığa çıkarması nedeniyle konvansiyonel yakıtlı sistemlere göre çevreye fayda sağladığı makalede sunulmuştur. Neticede karbon emisyonlarının indirgenmesi için konvansiyonel yakıtlı sistemler yerine güneş enerji sistemlerinin kullanımının artırılması önerisinde bulunulmuştur [20].

Yang vd.'nin 2015 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre Çin 2007'den beri PV panel teknolojisi üreticilerinin başında gelmiş ve dünyanın PV panel ihtiyacını büyük ölçüde karşılamıştır. PV panel üretimini gerçekleştirip yaklaşık %90'ını ihraç eden Çin, üretim yapılırken bazı hammaddelerin temin edilemediğini ve ithal edilen

hammadeler yardımıyla üretim gerçekleştirdiğini belirtmiştir. Nakliyattan ve fosil yakıtlardan kaynaklanan emisyon artışının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çalışmada yerel ve ithal hammadde alışverişleri de göz önüne alınarak polikristal güneş panellerinin yaşam döngüsü değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Çin’de elektrik üretiminde oldukça fazla kullanılan kömür tüketiminin azaltımı aynı zamanda hammadde ithalatının düşürülmesi de PV panel üretimindeki emisyon değerinin düşüşüne katkı sağlayacağı ortaya konulmuştur [21].

Latunussa vd.’nin 2016 yılında yapmış olduğu çalışmaya göre kullanım ömrü 25 ila 30 yıl aralığında olan kristal yapıları PV panellerin işlevsiz hale gelmesi sonucunda büyük ölçüde atık meydana geldiği belirtilmiştir. 2050 yılında meydana gelebilecek PV panel atıklarının 9,57 milyon tona ulaşması beklendiği söz konusu olduğundan bu atıkların hem çevre kirliliği hem de görüntü kirliliği yaratmaması için geri dönüştürülmesinin büyük önem arz etmekte olduğuna yer verilmiştir. Bunun yanında, PV panellerin geri dönüşümü sayesinde kıymetli metal kaybı önlenerek doğaya ve ekonomiye önemli ölçüde kazanç sağlayacağı üzerinde durulmuştur. Geri dönüşümün kazancı ile ilgili yapılan bu çalışmada örnek veri olarak 1000 kg silikon PV panelin geri dönüşümünde tahminen 370 kg CO<sub>2</sub> eşdeğerinde emisyon açığa çıktığı sonucuna varılmıştır [22].

Hou vd.’nin 2016 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre 21. yüzyılda PV panel teknolojisinin küresel pazar payında ve üretiminde dikkate değer artış gözlemlendiği bu artışa bağlı olarak dünyanın yükselen sektörleri arasında yer aldığı belirtilmiştir. Çin’deki Polikristal PV panel teknolojinin yaşam döngüsü; üretim aşamasından santralde faal olmasına, elektriğin taşınmasından santralin emekliliğine kadar tükettiği enerji kWh/Wp olarak hesaplanmıştır. Ardından PV sistemler ile diğer santrallerden açığa çıkan karbondioksit emisyonu g-CO<sub>2</sub> eşdeğeri/kWh olarak karşılaştırılarak grafik halinde sunulmuştur [23].

Filho vd.’nin 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada polikristal ve monokristal fotovoltaik panellerin üretim aşamaları maddeler halinde incelenmiştir. Fotovoltaik panel üretiminin belirli aşamalarında ihtiyaç duyulan enerji MJ/m<sup>2</sup> cinsinden verilmiştir. Arkasından fotovoltaik modül üretiminde ihtiyaç duyulan enerjiden

meydana gelen direkt ve dolaylı karbondioksit emisyonları incelenmiştir. Dolaylı emisyon her ülkede farklılık gösterdiği için ülkelerde üretilen panellerin emisyonları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda üretilen ve kurulan PV panelin emisyon değeri ile çevresel ömrü arasında ilişki incelenmiştir. Çalışmada polikristal ve monokristal güneş panelinin geri ödeme süresi 1,6 ila 2,3 yıl arasında hesaplanır iken açığa çıkarttığı sera gazı emisyonu 60,1-87,3 g-CO<sub>2</sub>/ kWh olarak hesaplanmıştır [24].

Yu vd.'nin 2017 yapmış oldukları çalışmaya göre Çin'in PV panellerin imalatında ve elektrik üretiminde dünyada birinci sırada yer aldığından bahsedilmiştir. Çin'de metalürjik yöntemle üretimi gerçekleştirilen polikristal güneş panellerinin şebekeye entegrasyonu birlikte elektrik üretimi de incelenerek yaşam döngüsü hakkında bilgi verilmiştir. Yu vd. imalat aşamasını incelerken çeşitli fabrikalardan elde ettiği verileri kullanarak üretimde kullanılan enerji ve hammadde gibi girdileri ortaya koymuştur. Neticede PV panelin çevreye verdiği etkiyi inceleyebilmek adına çevresel etki indeksleri hesaplanmıştır. Çin'deki PV panel yaşam döngüsünü diğer ülkeler ile karşılaştırıldığında çevresel etkilerinin diğer ülkelerden %56-66 oranında daha fazla olduğu kanaatine varılmıştır [4].

Vellini vd.'nin 2017 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre polikristal ve CdTe fotovoltaiik güneş modüllerinin üretim aşamaları değerlendirilmiştir. Üretim aşamalarında gerçekleşen işlemler kısaca açıklanmıştır. Bunun yanında, 1 m<sup>2</sup> lik polikristal güneş paneli referans alınarak üretim esnasında hammadde ve enerji girdi verileri tablolar halinde sunulmuştur. Polikristal güneş panelinin üretim aşamalarından sonra çevresel etkileri tablo ile sunulmuştur. Aynı şekilde 1 m<sup>2</sup> lik CdTe güneş paneli referans alınarak üretimi esnasında hammadde ve enerji girdi verileri de tablolar halinde sunulmuştur. Ardından CdTe güneş panelinin üretim aşamaları özetlenmiş ve çevresel etkileri tablo ile açıklanmıştır. Daha sonra polikristal panel ile CdTe panel arasında karşılaştırma yapılarak bu karşılaştırma sonucunda CdTe güneş panelinin çevreye daha az emisyon yaydığı fakat içerisinde bulunan kadmiyum elementinin son derece zehirli bir toksin madde olmasından dolayı geri dönüşüme girmesinin önem arz ettiğinden bahsedilmiştir [25].

Luo vd.'nin 2018 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre Singapur'da polikristal PV panellerin üretim aşaması hakkında kısaca bilgi verilmiş, yaşam döngüsü analiz edilmiş yaşam döngüsü envanteri değerlendirilmiş ve çevresel etkileri araştırılmıştır. Hücre teknolojisi, modül yapısı, modül verimliliği ve çerçeve türü gibi farklı teknik özelliklere sahip olan 3 adet polikristal PV panel kullanılarak enerjiyi geri ödeme süreleri ve sera gazı emisyon değerleri kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda, enerji geri ödeme süresi ve sera gazı emisyonu değerlerine bakılarak çerçevesiz çift camlı olan PV panelin diğer PV panellere göre daha fazla çevre dostu olduğu tespit edilmiştir [8].

Shahsavari ve Akbari'nin 2018 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre güneş enerjisi kullanımının güneş potansiyeli değerlendirdiği taktirde ülkelerin kalkınmasına büyük ölçüde katkı sağladığı ifade edilmiştir. Aynı zamanda fosil yakıtlara göre oldukça az emisyon değerine sahip olmasından dolayı çevresel tahribatı indirgediği, enerji üretimi ve kullanımı esnasında küresel anlamda üçte iki oranında sera gazı emisyonu açığa çıkardığı belirtilmiştir. Enerji üretimi esnasında kWh başına yaklaşık 530 gram CO<sub>2</sub>'in açığa çıktığı gözlemlenmiştir. Oluşan emisyonlar nedeniyle, insanların yaşam kalitesinin düştüğü ve bu durumun gelecek neslin hayatını büyük ölçüde tehdit ettiği vurgulanmıştır. Kömür, petrol, doğal gaz gibi yakıtların yoğun kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hava kirliliğini önemli ölçüde arttırmakta olduğu belirtilerek, bu emisyonların azaltılması için geleneksel yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yönünde görüş bildirilmiştir. Yenilenebilir kaynaklar içerisinde yer alan güneşin bu açıdan muazzam bir kaynak olduğu ve dünyanın güneş potansiyelinin oldukça yüksek değerlere tekabül ettiği belirtilmiştir. Güneşin dünya nüfusunun günümüzde tükettiği enerji miktarının 7900 katını karşılayabilecek kadar yüksek potansiyele sahip olduğu çalışmada saptanmıştır [26].

Xie vd.'nin 2018 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre kömür yakıtlı santralleri yoğun bir şekilde kullanan Çin'in temiz enerji sistemleri içerisinde yer alan fotovoltaik endüstrisine oldukça önem verdiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada Çin'de üretimi gerçekleştirilen çok kristalli fotovoltaik panellerin yaşam döngüleri incelenmiştir. Polikristal güneş panelinin üretim aşaması şema vasıtasıyla açıklanmıştır. Aynı zamanda üretim aşamasındaki malzeme, enerji ve emisyon değerleri tablo halinde sunulmuştur. Sonuç olarak fotovoltaik panellerin çevreye olumsuz yönde etkilerinin

olduğu saptanmıştır. Bu olumsuz etkilerin geliştirilmiş teknolojinin kullanımına ilave olarak hammadde ve enerji tüketiminin azaltılmasıyla değiştirilebileceği vurgulanmıştır [27].

Lopez vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmaya göre monokristal ve polikristal güneş panellerinin farklı yaşam döngüsü envanterleri incelenerek uluslararası yaşam döngü analizi iki farklı çizelge olarak sunulmuştur. Çizelge içerisinde yer alan panellerin; konumlandırılan bölgeye ulaşan ışınım değeri, modül verimliliği, panel ömrü, enerji geri ödeme süresi ve sera gazı emisyonu değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında fotovoltaik paneller ile enerji üretebilmek için panellerin optimum konumlandırılmasını inceleyebilmek amacıyla birçok envanter ele alınmıştır. Bunun yanında, Meksika'nın Kuzeybatısında yer alan Baja Kaliforniya eyaletindeki elektrik sektörü hakkında bilgi verilmiştir. Meksika için monokristal ve polikristal güneş panellerinin yaşam döngü analizine göre grafikler aracılığı ile Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) kılavuzu ve yenilenebilir enerji simülasyonu kullanılarak enerji geri ödeme süreleri ve sera gazı emisyonları karşılaştırılmıştır [28].

Guo vd.'nin 2019 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre ülkelerin temel politikası arasında temiz enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasının önem arz ettiğine yer verilmiştir. Özellikle Çin'in temiz enerji sistemleri arasında yer alan fotovoltaik enerjinin gelişimini desteklediği ve bu yönde politikalar geliştirildiği vurgulanmıştır. 2017 yılında Çin'in toplam kurulu güç kapasitesi 130 GW'ın üzerine taşınmıştır. Bu kapasitenin emisyonu 1,738 ila 3,079 arasında azalabileceği hesaplanmıştır. Ek olarak çalışmada fotovoltaik panel teknolojisiyle çeşitli aşamalarda meydana gelebilecek olan karbon emisyonunu hesaplamak üzere matematiksel hesaplama modülü oluşturulmuş ve analiz için makalede 1 kWh'lik fotovoltaik güç sistemi kullanılmıştır. 1 kWh'lik fotovoltaik güç sisteminin yaşam döngüsü boyunca 47584,23 kWh ila 15861,41 kWh elektrik ürettiği ve 23,684 ton ila 13,374 ton arasında emisyon azalttığı hesaplanmıştır [29].

Miller vd.'nin 2019 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre sera gazı emisyonlarının %40'ının elektrik sektöründen meydana geldiği ifade edilmiştir. Ulusların elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonları azaltmaya yönelik düşük karbon emisyon salımı

gerçekleştiren elektrik üretim sistemlerine geçiş yapmaya yöneldiği belirtilmiştir. Dünya genelinde 10 yıllık süreç içerisindeki PV panellerin kurulu gücü 50 kat arttırıldığı saptanmıştır. Güneş enerji santralleri elektrik üretimi esnasında düşük emisyon açığa çıkardığı ancak panel imalatı aşamasında yüksek emisyon salımı gerçekleştirdiği ifade edilmiştir. PV panel üretimi yapan ülkeler kıyaslandığında Çin'in kristal silisyum teknolojisine sahip olan panellerin üretimi esnasında daha fazla elektrik ve yakıt kullanmasından dolayı Avrupa ülkelerinin %25'den daha fazla emisyonla neden olduğuna dikkat çekilmiştir. Aynı zamanda çalışmada Almanya'da kullanılacak olan iki adet çok kristalli PV paneller incelenmiştir. Panellerin birinin Çin'den diğeri ise Avrupa'dan getirilip sisteme entegre edildiği varsayılmıştır. Bu iki panelin yaşamları boyunca ortalama açığa çıkartacağı emisyonları kıyaslandığında, Çin'den gelen paneller ile ortalama 67,5 g-CO<sub>2</sub>/kWh emisyon açığa çıkacağı, Avrupa'dan temin edilen panellerle ortalama 53,2 g-CO<sub>2</sub>/kWh eşdeğerinde emisyon açığa çıkacağı tahmin edilmiştir [30].

Ardente vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmaya göre PV panellerin geri dönüşüm işleminin oldukça önemli olduğunun ve toplanmasından imha edilip yeniden üretilmesine kadar her aşamasının dikkatle takip edilmesi gerektiğinin altı çizilmiştir. Aksi halde panel içerisinde bulunan kıymetli hammaddelerin dönüşümünün sağlanamayacağı ve tehlikeli maddelerin çevreye dağılmasının olumsuz sonuçlara yol açabileceği belirtilmiştir. Çalışmada kristal silisyum teknolojisine sahip olan PV panellerin geri dönüşüm aşamasındaki yaşam döngü analizi yapılmıştır. Panellerin düşük verimli geri dönüşüm işleminden ziyade yüksek verimli geri dönüşüm işlemi ile geri kazanımı gerçekleştirilmiştir. Yüksek verimli geri dönüşüm prosesi ile, genelde düşük verimli geri dönüşüm prosesinde geri kazanımı gerçekleştirilemeyen silisyum, gümüş, gibi çeşitli hammaddelerin tekrar elde edildiği saptanmıştır. Bu yöntemin kullanılması ile PV panellerin geri dönüşümünde %83 oranında kazanç sağlandığı sonucuna varılmıştır [31].

Hocine vd.'nin 2019 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre PV panellerin yaşam döngüleri bulunduğu mekan, iklim ve sıcaklık gibi çeşitli parametreler hesaba katılarak değerlendirilmiştir. PV panellerin üretiminde kullanılan hammadde içeriği, üretime geçtiğinde bulunduğu bölgenin şartları gibi birçok faktörden etkilenerek

olumlu veya olumsuz yönde davranış sergilediği ve bunun da PV panellerin yaşam döngüsünü belirlediği ifade edilmiştir. Bu nedenle her bir PV panelin ömrü kendine özgü ve içinde bulunduğu koşulların göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada, bir PV panelin standart ortalama yaşam süresi ile aktif yaşam süresi karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak PV panel ömrünün kısıtlı olması sebebiyle sürdürülebilirliğin ciddi ölçüde etkilenebileceği tespit edilmiştir. Santralde hurdaya çıkan materyallerin geri dönüşüme gönderilmesi yeni panellerin satın alınması sırasında %20 oranında kâr sağlayarak ekonomik kazanım gerçekleştirilebileceği saptanmıştır [32].

Maani vd.'nin 2020 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre CdTe ve kristal silisyum teknolojisine sahip olan PV panellerin geri dönüşümü sırasında meydana gelen çevresel etkiler değerlendirilmiştir. Bunun yanında, farklı geri dönüşüm yöntemleri karşılaştırılarak hangi yöntemin çevreye daha olumlu bir etki oluşturduğu incelenmiştir. Piroliz dışında termal tabanlı yöntem düşük çevresel etkiye sahip olan yöntem olarak belirlenmiştir. Geri dönüşümün önemi vurgulanarak herhangi bir yöntem fark etmeksizin geri dönüşüm işlemi yapılmasının panelin sıfırdan üretimine kıyasla çevreyi büyük ölçüde olumlu yönde etkilediği ifade edilmiştir. Geri dönüşüm işlemi kristal panellerin yaşam döngüsüne %13 ila %25 arasında, CdTe PV panellerin yaşam döngüsüne ise %4 ila %5 arasında kazanç sağlamıştır. Geri dönüşüm aşamaları karşılaştırıldığında, kristal silisyum PV panelinin nitrik asit çözülmesi evresinde panelin diğer aşamalara kıyasla daha büyük çevresel etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. CdTe PV paneli ile kristal panel teknolojisine sahip olan PV panel karşılaştırıldığında ise CdTe PV panelinin geri dönüşümü esnasında daha az kimyasal maddenin kullanılmasından dolayı daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır [33].

Radziemska vd.'nin 2020 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre PV panellerin üretimleri esnasında yoğun enerjiye ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Enerji miktarını düşürmek amacıyla PV panel üretiminin geri dönüşüm ile desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada, kristal silikon panel teknolojisinin geri dönüşümü incelenerek çevresel etki potansiyeli değerlendirilmiştir. Geri dönüşüme uğrayarak üretilen silisyum panel ile geri dönüşüme uğramadan üretilen silisyum panel arasında



karşılaştırma yapılmıştır. Geri dönüşüm olmadan üretilen kristal silisyum panellerinin saflaştırılma aşamasında yüksek enerji kullanıldığı belirtilmiştir. Bu yoğun enerji kullanımının geri dönüşüm işlemi sırasında büyük oranda azaltıldığı, geri dönüşüm işleminde %58'e kadar enerji tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir. Ayrıca geri dönüşüme uğrayan panellerin %42 oranında sera gazını azaltmaya katkıda bulunduğu sonucuna varılmaktadır [34].

Liu vd.'nin 2020 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre yenilenebilir enerji sektörü düşük karbon emisyonuna sahip olduğu için desteklenmeyi hak eden sektörlerin başında geldiğine yer verilmiştir. Yenilenebilir enerji sektörü içerisinde yer alan PV panel teknolojisi düşük emisyonu sahip olsa da panel üretimi sırasında doğal gaz, kömür, vb. gibi yakıtların kullanımı sonucunda emisyon açığa çıkardığına da dikkat çekilmiştir. Bu çalışmada teknolojinin geliştirilmesiyle karbon emisyonun ilerleyen yıllar içerisinde daha da düşürülmesi gerektiği savunulmuştur. Çalışmada beş PV panel ele alınarak enerji ve karbon emisyonları incelenmiştir. Ayrıca bu beş panelin Çin, ABD ve Avrupa Birliği ülkelerindeki birim PV panel üretimindeki emisyonları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda PV panel üretiminde en yüksek emisyon açığa çıkartan ülke Çin olurken, en düşük emisyonu Avrupa Birliği ülkelerinin sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu emisyon farklılıklarının temel sebebinin enerji ve elektrik tüketiminde ülkelerin tükettiği birim elektrik katsayılarından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Üretilen beş panelin emisyon değerleri kıyaslandığında en fazla emisyon açığa çıkartan panelin monokristal güneş paneli olduğu tespit edilirken en düşük emisyon açığa çıkartan panelin ise CdTe güneş paneli olduğu sonucuna varılmıştır [35].

Literatür çalışmaları, PV sistemlerin kurulundan sonra diğer sistemlere kıyasla çok fazla emisyon açığa çıkmasa da, kurulum aşamasına kadar doğrudan veya dolaylı bir şekilde emisyon açığa çıktığını göstermektedir. Emisyona neden olan parametreler arasında panel imalatı ve elektrik üretimi dışında panelin kurulumu ve nakliyesi de yer almaktadır. Nakliyeden kaynaklanan emisyonların hesaplanması değişken olduğundan ve bölgeden bölgeye değişiklik gösterebileceğinden, emisyon miktarının çalışmada kullanılması büyük hatalara yol açabilir. Ayrıca kurulum esnasında emisyon miktarının belirlenmesi birçok faktörden etkilendiği için hesaplanması kolay değildir.

Bu sebeple kurulumdan ve nakliyattan kaynaklanan emisyon miktarının hesabı ihmal edilmiştir. Bu çalışmanın netlik kazanabilmesi için fotovoltaik panel teknolojisi içerisinde iki farklı kategoride yer alan (kristal silikon teknoloji içerisinde yer alan PV panel ile ince film teknolojisi içerisinde yer alan PV panel) 1 m<sup>2</sup>'lik güneş panellerinin imalatı, geri dönüşümü ve elektrik üretimi sırasında açığa çıkarttığı emisyon değerleri hesaplanmakta, enerji geri ödeme süreleri belirlenmekte ve iki panel kıyaslanmaktadır. Ardından en yüksek emisyon değerine sahip olan 1 m<sup>2</sup>'lik fotovoltaik panel vasıtasıyla elektrik üretiminden açığa çıkan emisyon değeri ile konvansiyonel yakıtlı sistemler içerisinde yer alan en düşük emisyon değerine sahip olan doğal gaz kaynaklı termik santralden aynı miktarda elektrik üretiminde açığa çıkan sera gazı emisyon değerleri karşılaştırılmaktadır. Kıyaslanan değerler doğrultusunda güneş enerji santrallerinin gerçek ölçüde çevresel faydasının olup olmadığı çalışmamızda araştırılmaktadır.

Çalışmamızın birinci bölümünde giriş ve literatür taraması yer almaktadır. Giriş bölümde fotovoltaik panel sektörüyle ilgili genel bilgiler verilmekte ve literatür taraması değerlendirilmektedir.

İkinci bölümde fotovoltaik panel teknolojisi ve paneli oluşturan materyaller tanımlanmaktadır. Ardından fotovoltaik panel teknoloji sınıflandırılarak tablo halinde sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde polikristal ve CdTe panellerin çevresel etkileri ile ilgili bilgiler verilmektedir. Fotovoltaik panel üreten beş farklı ülkenin verileri esas alınarak polikristal ve CdTe fotovoltaik panellerinin üretim ve geri dönüşüm aşamasında çevreye yaydığı emisyon değerleri hesaplanmaktadır. Üretim esnasında emisyonun en fazla açığa çıktığı aşama belirlenmektedir. Hesaplanan değerler doğrultusunda beş ülkede üretilen ve geri dönüştürülen paneller grafik aracılığıyla karşılaştırılmaktadır.

Dördüncü bölümde paneller ile doğal gaz kaynaklı termik santralden aynı miktarda elektrik üretiminde açığa çıkan sera gazı emisyon değerlerinin karşılaştırılmaktadır.

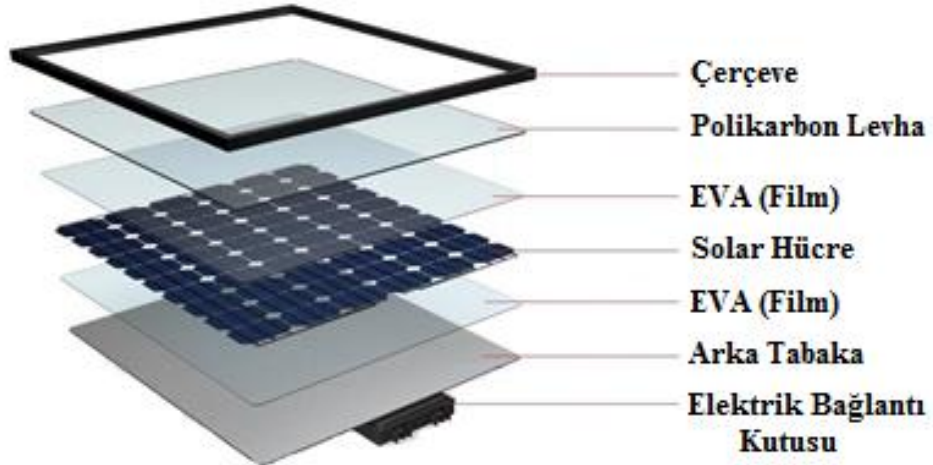
Beşinci bölümde çalışmanın sonunda elde edilen veriler değerlendirilerek gelecekle ilgili görüşler yer almaktadır.

## BÖLÜM 2

### FOTOVOLTAİK (PV) PANEL TEKNOLOJİSİ

Güneş enerjisiyle elektrik üretim sistemleri fotovoltaik ve yoğunlaştırılmış güneş güç sistemleri (CSP) olmak üzere iki ayrı grupta incelenmektedir. Dünya’da yoğunlaştırılmış güneş güç sistemlerinden ziyade fotovoltaik paneller yardımıyla elektrik üretim sistemleri tercih edilmektedir. 2017 yılında toplam elektrik üretiminin %2’lik kısmı PV paneller vasıtasıyla üretilmiştir [36,37]. Fotovoltaik panellerle elektrik üretim santralleri; PV hücreleri, panel taşıma sistemi, invertör, elektrik panosu, paratoner, trafo, AC ve DC elektrik kabloları gibi çeşitli bileşenlerden meydana gelmektedir. Güneş enerji santrallerinin kurulumunda yer alan, en temel eleman PV panellerdir. Bu nedenle çalışmada elektrik üretiminde kullanılan materyallerden ziyade sadece PV panellerin emisyonları değerlendirilmektedir [38].

Güneş hücrelerinin bir araya getirilmesiyle oluşan fotovoltaik panel, belirli oranda güneş ışınımının panele yansması ile panel içerisinde yer alan elektronların hareketi sonucunda doğru akım meydana getiren elektronik bir materyaldir [39]. Bu materyal fotovoltaik panel ya da fotovoltaik modül olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. PV panel yapısı [40].

Şekil 2.1’de fotovoltaik paneli oluşturan bileşenler verilmektedir. En altta bağlantı kutusu yer almaktadır. Bağlantı kutusu, elektrik bağlantıları yardımıyla panelden güç çıkışını sağlamaktadır. Bağlantı kutusunun hemen üzerinde alt tabaka yer almaktadır. Alt tabaka (polivinil florür ve polietilen tereftalat) yalıtkan yapıda malzemenin oluşmakta ve panel içerisindeki hücreleri dış etmenlerden korumaktadır. Güneş modülünün hem ön hem de arka yüzeyinde yer alan ve EVA (Etilen vinil asetat) olarak adlandırılan polimer film, kapsülasyon işlemi sonrasında modülde meydana gelebilecek güç kaybını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu polimer film güneş hücrelerini toz, kir gibi çeşitli olumsuz etkenlere karşı korumakta olup, yüksek güneş ışığı geçirgenliğine sahiptir [41]. Panelin en üst yüzeyinde çerçeve ve hemen altında polikarbon levha yer almaktadır. Alüminyumdan oluşan çerçeve taşıma ve kurulum esnasında kenarlarda meydana gelebilecek hasarlara karşı paneli korumaktadır. Çerçevenin hemen altında yer alan polikarbon levha ise panel bileşenlerini kötü hava şartlarından ve kum toz kir gibi çeşitli olumsuz etmenlere karşı korumaktadır. Ayrıca, verim kaybına yol açmamak için yüksek ışınım geçirgenliğine sahiptir. Bazı PV panellerde polikarbon levha yerine temperli cam da kullanılmaktadır. Fakat polikarbon levha cama kıyasla daha uzun ömürlü, ekonomik, ergonomik ve yüksek ışınım geçirgenliğine sahiptir. Bu nedenle panelde temperli cam yerine polikarbon levha daha fazla tercih edilmektedir.

Fotovoltaik panelin en önemli yapı taşı güneş hücreleridir. Günümüzde üretilen güneş hücrelerinin verimleri %5-20 arasında değişim göstermektedir [42]. Güneş hücresi üretiminde yüksek verim ile düşük maliyet büyük önem arz etmektedir. Yarı iletken malzemenin oluşan fotovoltaik hücreler farklı kimyasal elementlerden yararlanılarak çeşitli prosesler sonucunda üretilmektedir [43]. Dünyada çeşitli kimyasal maddelerin kullanımını sonucunda üretilen PV panellerinin sınıflandırılması ve verimliliği Çizelge 2.1’de verilmektedir. Sınıflandırma fotovoltaik panellerde kullanılan malzemelere göre yapılmaktadır.

Çizelge 2.1. PV modül teknolojilerinin sınıflandırılması ve verimleri [20].

PV Modül Teknolojisi ve Çeşitleri		Modül Verimi (%)
Kristal Silikon Teknolojisi	Monokristal Silikon (sc-Si)	14-20
	Poli veya Çok Kristalli Silikon (mc-Si)	13-15
	Amorf Silikon (a-Si)	6-9
	Mikromorf Silikon ( $\mu$ c-Si)	6-9
İnce Film	Kadmiyum Tellür (CdTe)	9-11
	Bakır-İndiyum-Diselenid (CIS)	10-12
	Bakır-İndiyum-Galyum- Diselenid (CIGS)	10-12

Çizelge 2.1’de fotovoltaik paneller içerisinde yer alan en verimli panelin monokristal güneş paneli olduğu görülmektedir. Monokristal PV paneller, daha saf silisyumdan üretildiği için polikristal panellere göre daha pahalı ve daha verimli olduğu bilinmektedir. Küresel fotovoltaik üretim teknolojilerinin pazar payını incelendiğinde, en yüksek paya sahip olan iki teknolojinin %51 oranla polikristal panel ile %41 oranla monokristal panel olduğu gözlemlenmektedir. Bu panelleri %5 oranla CdTe %2 oranla CIGS ve %1 oranla diğer fotovoltaik paneller takip etmektedir [44]. Monokristal güneş paneli polikristal güneş paneline göre daha az güneş ışınımı ile daha fazla elektrik üretimi gerçekleştirebilmesi nedeniyle güneş ışınım değeri az olan ülkelerde daha fazla tercih edilmektedir [8].

Çalışmada Çizelge 2.1’de verilen iki farklı teknoloji içerisinde en çok rağbet gören kristal silikon panel teknolojisi alt başlığında yer alan polikristal güneş paneli ile ince film teknolojisi sınıfı içerisinde yer alan Kadmiyum Tellür güneş paneli incelenmektedir. İki farklı teknoloji içerisinde aynı kategoride yer alan PV panellerin üretim ve işletim gibi çeşitli aşamalarda benzer süreçlerden geçtiği için hemen hemen aynı emisyon değerini açığa çıkardığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle çalışmada iki farklı teknoloji arasından farklı iki panel tercih edilmiştir. Seçilen iki panelinin üretim prosesleri incelenmekte, aynı zamanda üretiminde ve geri dönüşümünde kullanılan enerji verileri ile yaklaşık emisyon tahmini hesaplanarak çevresel etki potansiyeli değerlendirilmektedir.

## BÖLÜM 3

### FOTOVOLTAİK PANELLERİN ÜRETİMİNDEKİ ÇEVRESEL ETKİ POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Fotovoltaik panellerle elektrik üretimi günümüzde diğer kaynaklara göre daha az karbon emisyonuna sebep olmasından dolayı çevre dostu olarak görülmektedir. Fakat üretimde kullanılan bazı kimyasal maddelerin sağlanması ve işlenmesi gibi çeşitli proseslerin yanı sıra bu proseslerin içerisinde tüketilen enerjiden açığa çıkan emisyon, çevreyi olumsuz bir şekilde doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir. Aynı zamanda panellerin güneş enerji santrallerine entegrasyonu ile birlikte elektrik üretimini gerçekleştirmesi durumunda da emisyon açığa çıkmaktadır. Dolayısıyla fotovoltaik paneller vasıtasıyla elektrik üretimi gerçekleştirilirken de çevresel zarar meydana gelmektedir [42].

Günümüzde fotovoltaik panel teknolojisine olan yoğun ilgiden dolayı teknoloji her geçen gün gelişim göstermekte, farklı kimyasalların ve yöntemlerin kullanılmasıyla çeşitli güneş panelleri tasarlanarak üretime sunulmaktadır [45]. Güneş panellerinin üretiminde kullanılan hammadde ve proses farklılıkları gibi çeşitli sebeplerden emisyon değeri panelin cinsine göre değişiklik göstermektedir. Bu durum yalnızca farklı cins panellerin üretiminde geçerli değil aynı zamanda özdeş paneller içinde geçerli olmaktadır [6]. Başka bir deyişle, panel üretim prosesleri ülkeler arasında genel olarak değişiklik göstermese de, emisyon değeri açısından farklılık gösterebilmektedir. Bunun sebebi fotovoltaik panel üretiminde tüketilen enerjinin birçok faktöre bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Detaylandırılacak olursak; panel üretim tesislerinde kullanılan hammaddenin başka ülkelere transfer edilmesi, yakıt ve elektrik gibi sebepler emisyon farklılıklarına yol açan faktörler arasında yer almaktadır. Bu gibi gerekçelerden dolayı üretimi gerçekleştirilen herhangi bir güneş panelinin emisyon değeri net olarak ifade edilememekte fakat mevcut literatür çalışmalarıyla birlikte yaklaşık tahminler yapılabilmektedir [46]. Fotovoltaik panelden

kaynaklanan emisyonu genel olarak 4 aşamada değerlendirmek mümkündür. Bu aşamalar;

- Hammadde üretiminin sağlanması
- Panel üretimi
- Santralde elektrik üretimi
- Geri dönüşüm

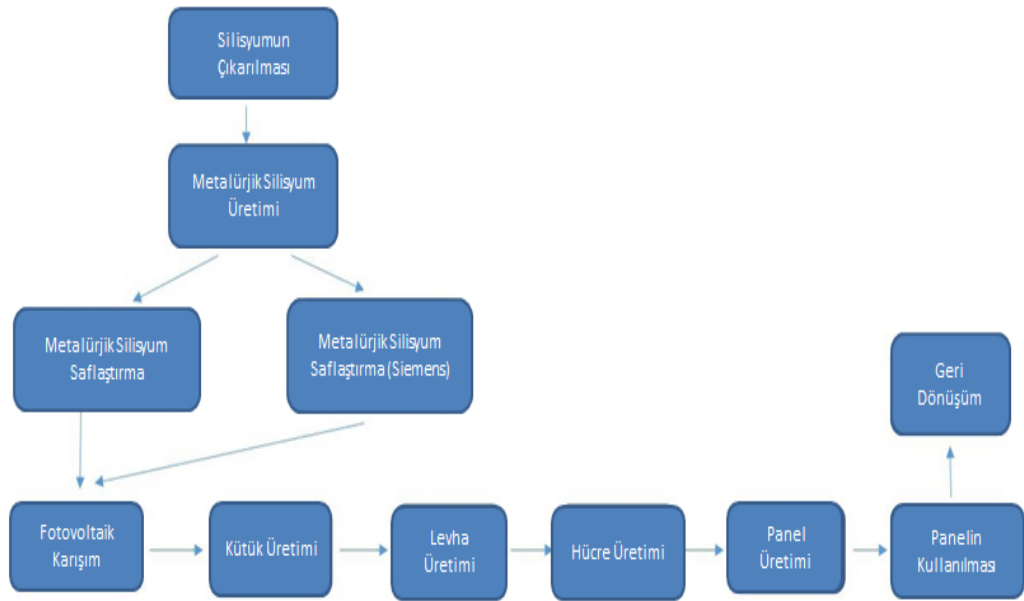
gibi çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. Bu aşamaların yanı sıra nakliye, kurulum ve benzeri faktörlerde emisyon açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Fakat bu emisyon değerleri çok fazla değişiklik gösterdiğinden dolayı çalışmanın doğruluğunu etkilememek amacıyla ihmal edilmiştir.

### **3.1. Polikristal PV Panel Üretim Aşamalarının ve Üretimdeki Çevresel Etki Potansiyelinin İncelenmesi**

Fotovoltaik paneller çeşitli hammaddelerin kullanımı sonucunda üretilmektedir. Fotovoltaik panel imalatında kullanılan hammaddeler arasında yer alan kurşun, silikon, tetra klorür ve diğer bileşiklerin yüksek derecede zehirli madde içermesi sebebiyle çevresel tehdit arz etmektedir. Bunun yanında panellerin üretimi esnasında tesis kurallarına dikkat edilmediği takdirde insan sağlığında olumsuz etkilere yol açmaktadır. Dünya’da fotovoltaik panel teknolojisi içerisinde en yaygın kullanıma sahip olan monokristal ve polikristal yapıları modül teknolojilerinin hücre üretiminde kimyasal madde olarak saf silisyum kullanılmaktadır [47].

Silisyum doğada çok fazla bulunmakta lakin fotovoltaik panel üretilirken saf silisyuma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle silisyumu üretmek ve saflaştırmak adına prosesler geliştirilmiştir. Silisyumun saflaştırılması için yoğun enerji harcanmaktadır. Daha detaylı açıklayacak olursak, saflaştırma işleminde önemli ölçüde elektrik enerjisi ve ısı enerjisi kullanımı gerçekleştirilmektedir. Silisyumun saflaştırılma işleminde kömür veya kömür türevi yakıtlar vasıtasıyla ya da elektrikli ark fırınlarında yüksek sıcaklıkta reaksiyona girmesi sonucunda indirgenme meydana gelmektedir [48]. İşlem sonucunda belirli oranda metalürjik silisyum, silisyum dumanı ve atık ısı açığa

çıkılmaktadır. Açığa çıkan enerji diğer aşamalarda geri kazanımda kullanılmaktadır. Silisyum dioksitin ( $\text{SiO}_2$ ) indirgenmesiyle yüksek oranda saf silisyum (metalürjik silisyum) çıktısı elde edilmektedir. Bu işlem sırasında da yüksek enerji girdisine ihtiyaç duyulmasından dolayı işlem sonucunda belirli miktarda emisyon oluşumu gerçekleşmektedir. Saflaştırma aşamasında yoğun enerji girdisini azaltmak için Siemens metodu geliştirilmiştir. Daha az elektrik girdisi sebebiyle dünya genelinde büyük ölçüde Siemens yöntem tercih edilmektedir. Bu aşamadan sonra kristal kütükler (ingot) elde edilir ve kütükler levhalara (wafer) çevrilmektedir. İşlem sonrasında levhalar ince dilimlere ayrılmaktadır. Bu noktada malzemenin mukavemeti azalmakta fakat verimliliği artmaktadır. Levhalar dilimlenerek fotovoltaik hücreler elde edilmektedir. Hücreler diğer yardımcı elemanlar yardımıyla birleştirilerek modülü oluşturmaktadır. Proseslerin her aşamasında saflaştırılma işlemindeki enerji tüketimi kadar fazla olmasa da, enerji tüketimi devam etmektedir. Üretim aşaması Şekil 3.1’de verilmektedir [49].



Şekil 3.1. Fotovoltaik panelin üretim aşaması [25].

Dünya’da az sayıda güneş paneli hücre üreticisi bulunmaktadır. Fotovoltaik pazarda ya hücreler son prosese girmeyip talepte bulunan diğer ülkelere gönderilmekte ya da son prosesi tamamlanarak üretilen panel menşei olarak ülkenin adını taşımaktadır. Üretimi tamamlanmış paneller kullanıma sunulmak amacıyla çeşitli bölgelere



gönderilmektedir. Kurulumu gerçekleştirilen tesisin aktif hale gelmesiyle birlikte belirli miktarda emisyon salımı santralin enerji üretmesiyle devam etmekte ayrıca aktif olarak santralde rol alan paneller herhangi bir olumsuzlukta toprak ile temas etmesi sonucunda santral çevreye ciddi zararlar vererek yer altı sularını kirletebilmekte, toprağın alkali dengesini bozarak topraktaki canlı yaşamına olumsuz olarak etkileyebilmektedir [50]. Bu gibi olumsuzlukları önlemek amacıyla hem üretim hem de işletim aşamasında gerekli tedbirlerin alınmasının yanı sıra kullanım ömrü dolan materyallerin geri dönüşüm tesislerine gönderilmesi gerekmektedir [51].

### 3.1.1. Polikristal PV Panel Üretiminde Ortalama Emisyon Tahmini

Fotovoltaik panel üretiminin her aşamasında belirli oranda enerji tüketiminden dolayı doğrudan veya dolaylı olarak emisyon açığa çıkmaktadır. Kuvars kumunun temini, metalürjik silisyum üretimi ve çeşitli hammaddelerin tesise taşınması aşamalarında doğrudan emisyon meydana gelmektedir. Dolaylı emisyon ise fotovoltaik panel üretiminde tesiste kullanılan enerji ihtiyacının santraller tarafından giderilmesiyle açığa çıkmaktadır [21].

Çizelge 3.1. Üretimde tüketilen elektriğin santraller tarafından üretilmesi ile açığa çıkan ortalama emisyon faktörü [52].

Ülkeler	Elektrik Üretiminden Kaynaklanan CO <sub>2</sub> Emisyon Değer Faktörü (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)
Almanya	0,67
Amerika	0,55
Brezilya	0,09
Çin	0,97
Japonya	0,44

Bu çalışma dolaylı emisyon hesabı yapılırken, enerji santrallerinde kullanılan yakıt cinsinin ortalama hesabı yapılarak oluşturulmuştur. Ülkelerin elektrik üretirken kullandıkları yakıtların oluşturduğu emisyon değerleri Çizelge 3.1’ de verilmektedir.

Düşük, orta ve büyük yıllık ışınım değerine sahip Almanya, Amerika, Brezilya, Çin ve Japonya gibi ülkeler tercih edilmiştir.

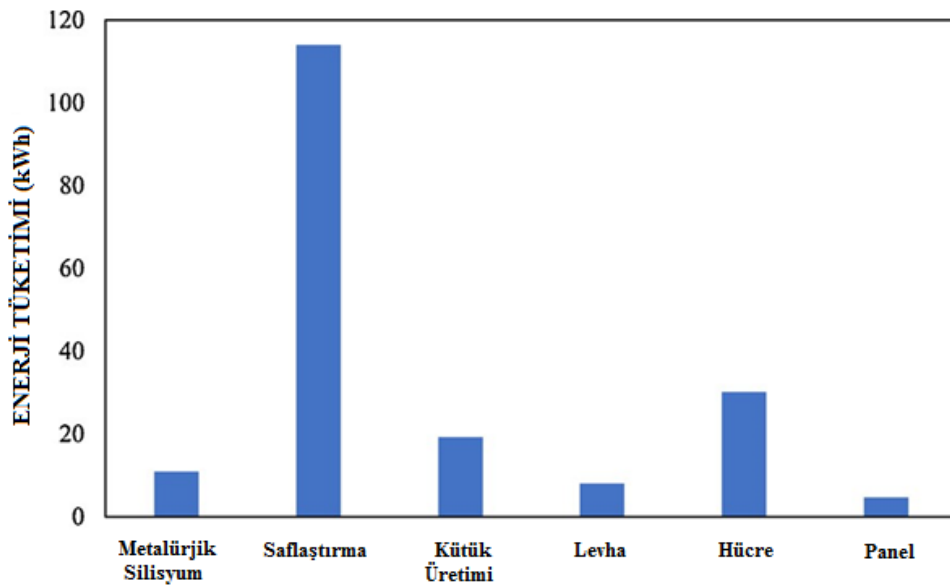
Doğrudan emisyon faktörü hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$DEF = TE \times EF \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'deki DEF dolaylı emisyon faktörü (kg-CO<sub>2</sub>), TE panel üretim tesisinde tüketilen elektrik enerjisi (kWh), EF elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon faktörüdür (kg-CO<sub>2</sub>/kWh).

1 m<sup>2</sup>'lik polikristal güneş paneli üretiminde kullanılan veriler ele alındığında ilk olarak silisyumun temini aşamasında, 1 kg metalürjik silisyumun temini için ortalama 11 kWh elektrik ve 23,1 MJ değerinde akaryakıt kullanılmaktadır. Bunun sonucunda 1 kg kuvars kumunun elde edilmesi için proses esnasında doğrudan 399 g-CO<sub>2</sub> civarında emisyon açığa çıkmaktadır. Bu esnada düşük miktarda doğrudan emisyon meydana geldiğinden, doğrudan meydana gelen emisyon değeri göz ardı edilmektedir. Dolaylı emisyon hesaplandığında, bu değer 0,99 ila 10,67 kg-CO<sub>2</sub> aralığında tabloda yer alan ülkeler arasında değişim göstermektedir. Ardından gelen silisyum saflaştırma aşaması geleneksel ve Siemens adı verilen iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Geleneksel yöntemin kullanılmasıyla 1 kg metalürjik silisyum elde etmek için gerçekleştirilen saflaştırılma işleminde 114 kWh elektrik ve 122 MJ ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşama esnasında da doğrudan ve dolaylı emisyon açığa çıkmaktadır. Üretimde kullanılan ısı enerjisinden 1,57 kg-CO<sub>2</sub> değerinde doğrudan emisyonun meydana geldiği belirlenmiştir. Dolaylı emisyonun ise ülkeler arasında 10,26-110,58 kg-CO<sub>2</sub> değerleri aralığında değişim gösterdiği saptanmıştır. Bir önceki metodun yerine saflaştırma işleminde Siemens yöntemi büyük ölçüde tercih edilmektedir. Siemens metodunun kullanılması ile silisyumun saflaştırılması aşamasında ise 110 kWh elektrik ve 185MJ ısı enerjisi gerekmektedir. Bu aşama esnasında da yaklaşık 2,32 kg-CO<sub>2</sub> civarında doğrudan emisyon açığa çıkmaktadır. Üretim esnasında kullanılan elektrikten dolayı oluşan emisyon değeri ise 9,9-106,7 kg-CO<sub>2</sub> arasında değişiklik göstermektedir. Saflaştırma işleminin ardından gelen aşamada kütük üretimi için yaklaşık 19,3 kWh değerinde elektrik kullanımı

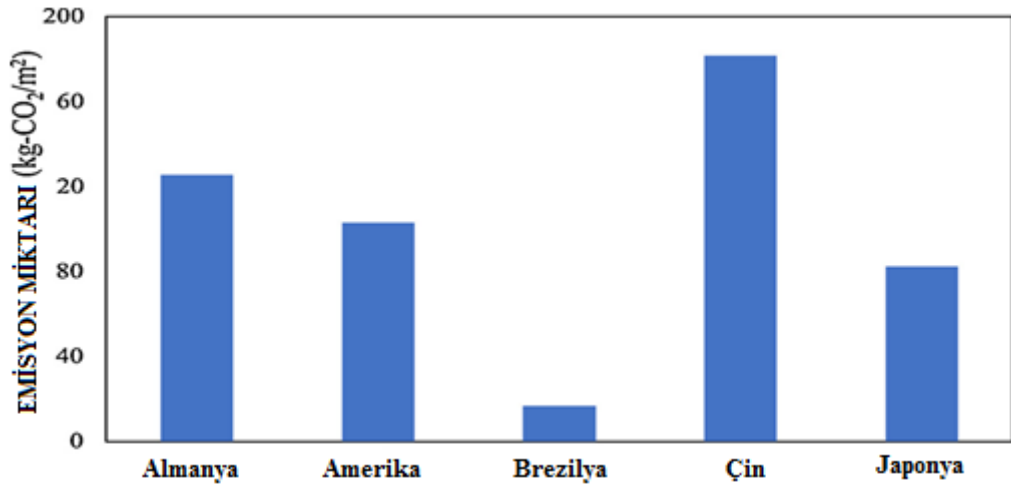
gerçekleştirilmektedir. Bu proste doğrudan emisyon oluşmamaktadır. Proste elektrik kullanımından dolayı meydana gelen dolaylı emisyon ülkelere göre 1,74 ila 18,92 kg-CO<sub>2</sub> değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Kütüğün levha dilimlerine dönüştürülmesi prosesinde ise 8 kWh'lik bir elektrik kullanımının yanı sıra 4 MJ akaryakıtı ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada meydana gelen doğrudan emisyon değeri 0,06 kg-CO<sub>2</sub> değerine denk geldiğinden levha üretimi aşamadaki emisyon değeri birçok tez çalışmasında ihmal edilmektedir. 8 kWh elektrik tüketiminden açığa çıkan dolaylı emisyon ise 0,72-7,76 kg-CO<sub>2</sub> değerinde ülkeler arasında değişiklik göstermektedir. Panel üretim proseslerinin son aşamasından biri olan levhalardan hücrelerin elde edilmesi esnasında 30,2 kWh civarında elektrik enerjisine ve 5,9 MJ akaryakıtı ihtiyaç duyulmaktadır. Hücre üretimi prosesinde yakıt kullanımından meydana gelen doğrudan emisyon 0,09 kg-CO<sub>2</sub> değerindedir. Emisyon değeri diğer proseslerdeki emisyon değerleri ile kıyaslandığında açığa çıkan emisyonun göz ardı edilebilecek kadar az olduğu gözlemlenmiş ve emisyon değeri ihmal edilmiştir. Elektrik tüketimi sonucunda salımı gerçekleşen emisyon değerleri ise ülkeler arasında 2,72-29,29 kg-CO<sub>2</sub> arasında çeşitlilik göstermektedir. 1 m<sup>2</sup>'lik PV panel üretimi 4,7 kWh elektrik ve 5,4 MJ akaryakıt kullanımı ile sonlandırılmaktadır. Son aşamada yakıt kullanımından 0,081 kg-CO<sub>2</sub> değerinde emisyon açığa çıkarken, elektrik kullanımından dolayı olarak 0,42-4,56 kg-CO<sub>2</sub> civarında emisyon açığa çıkmaktadır [25]. Panel üretim aşamasında tüketilen enerji değerleri Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2. Panel üretim aşamalarındaki enerji tüketimi.

Polikristal PV panel üretimindeki bütün prosesler incelendiğinde, en fazla enerjinin %61'lik payla silisyumun saflaştırılma aşamasında tüketildiği belirlenmiştir. Dolayısıyla en fazla emisyon salımı bu proseste gerçekleşmektedir. İkinci en yüksek enerji tüketimi %16'lık payla hücre üretimi aşamasında oluşmaktadır.

1 m<sup>2</sup>'lik polikristal güneş paneli üretiminde, güneş paneli üreten beş ülke baz alındığında, açığa çıkan emisyon değeri yaklaşık olarak hesaplanmıştır. 1 m<sup>2</sup>'lik polikristal güneş paneli üretiminde her bir ülke için farklı emisyon değerleri gözlemlenmiştir. Tahmini emisyon miktarı Şekil 3.3'de görüldüğü gibi; Almanya'da 125,42 kg-CO<sub>2</sub> , Amerika'da 102,96 kg-CO<sub>2</sub> , Brezilya'da 16,85 kg-CO<sub>2</sub> , Çin'de 181,58 kg-CO<sub>2</sub> , Japonya'da 82,37 kg-CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Ülkelerde üretilen polikristal PV panellerin üretiminden salınan ortalama emisyon miktarı.

En düşük emisyon değerine sahip olan ülke 16,85 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> değeri ile Brezilya olmuştur. Çizelge 3.2'de verilen elektrik üretim değerleri incelendiğinde, Brezilya'nın 2018 yılında elektriğin %83,7'sini yenilenebilir enerji kaynaklarından ürettiği belirlenmiştir. Brezilya'nın diğer ülkelere kıyasla, elektriği büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynakları ile üretmesi sebebiyle, panel üretimi esnasında açığa çıkan karbon emisyonu diğer ülkelere oranla olağanüstü düzeyde daha düşüktür. Bu durum Brezilya'da üretilen paneli daha çevre dostu kılarak yatırımcılara sunmaktadır. Hesaplamadan çıkartılan sonuca göre ülkelerin elektrik üretiminde kullandığı yakıt,

imal edilen PV panelleri dolaylı olarak etkilemekte ve üretilen panelin çevreci olup olmadığını kısmen belirlemektedir.

Çizelge 3.2. 2018 yılında elektrik üretiminde kullanılan yakıtlar [53].

Yakıt Türü\ Ülkeler	Almanya	Amerika	Brezilya	Çin	Japonya
Petrol (TWh)	5,2	26,4	11,5	10,7	60
Doğal gaz (TWh)	83	1578,5	46,8	223,6	386,9
Kömür (TWh)	229	1245,8	21,9	4732,4	347,2
Nükleer (TWh)	76,1	849,6	15,6	294,4	49,1
Hidroelektrik (TWh)	16,9	288,7	387,7	1202,4	81
Rüzgar (TWh)	111,6	277,7	48,5	366	6,8
Güneş (TWh)	46,2	97,1	3,1	177,5	71,7
Diğer Yenilenebilir (TWh)	51,4	83,7	52,9	90,7	33,7
Diğer (TWh)	29,3	13,3	-	14	15,3
TOPLAM (TWh)	648,7	4460,8	588	7111,8	1051,6

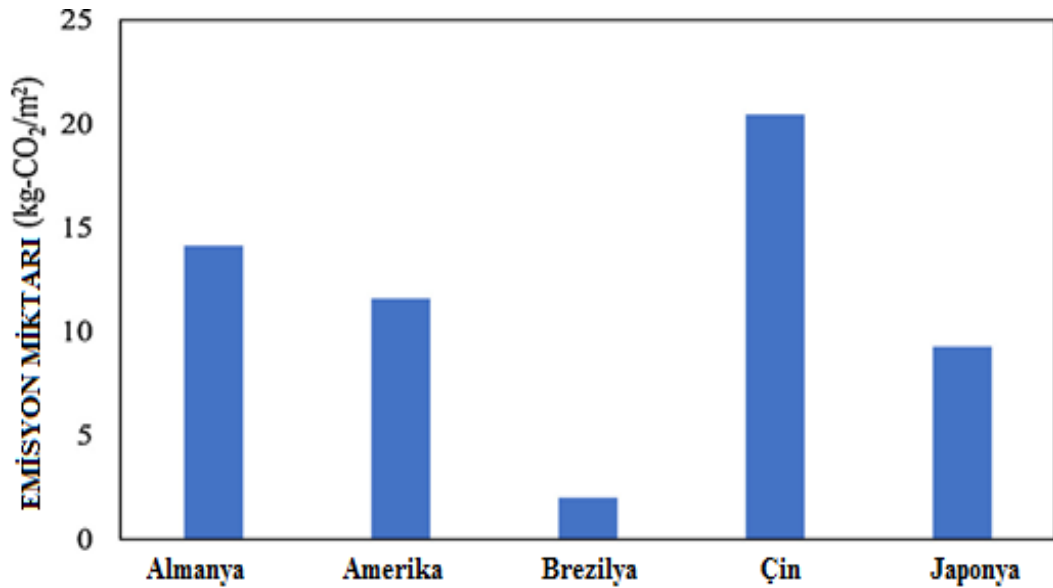
### 3.1.2. Polikristal PV Panelin Geri Dönüşümü Esnasında Oluşan Emisyonun Yaklaşık Tahmini

Santralde kullanılan monokristal ve polikristal panellerin ortalama kullanım ömrü piyasa tarafından 25 yıl olarak belirlenmiştir. Fakat gelişen teknoloji ile birlikte bu panellerin ömrünün artırılması üzerinde çalışılmaktadır. Ortalama 17 yıl sonra bu panellerin verim kaybında artış yaşanmaktadır. Bu nedenle çoğu santralde teorik yaşam bitmeden önce PV panel kurulumunun yenilendiği gözlemlenmektedir [54]. Yenileme sonucunda hurdaya çıkan PV modüllerin özel elektronik atıkların toplandığı kutular ile geri dönüşüme gönderilmesi gerekmektedir. Aksi halde doğaya atılmasıyla birlikte içerisinde yer alan kimyasal maddelerin doğayı geri dönülemez şekilde tahrip edeceği bilinmektedir [54].

Geri dönüşüme gönderilen fotovoltaik panellerin, geri dönüşüm işlemi panelin yeniden üretimine ciddi manada katkı sağlamaktadır. Geri dönüşüm

gerçekleştirilmeden üretilen PV panel üretimde yer alan birçok prosese kıyasla, geri dönüşüm ile üretilen proste daha az hammadde ve enerji kullanılmaktadır [55]. Geri dönüşüm işleminde, silikonun temininden levha üretimine kadar normal prosese oranla, çok az hammadde ve enerji kullanılması sebebiyle, düşük emisyon açığa çıkmaktadır [56]. Geri dönüşüm işleminde levha üretimi aşamasında hammadde büyük ölçüde geri dönüşüme uğrayan panelden sağlanır. Geri dönüşüm işlemi genellikle iki aşama olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu aşamalardan ilki modülün hızlı bir şekilde ayrılabilmesi için modüle ısı işlem uygulanmasıdır [57]. Bu yöntem oldukça basit, hızlı ve ekonomik bir işlemdir [58]. İkinci aşama ise ilk aşamaya göre daha meşakkatli olan bir işlemdir. Bu aşamada kimyasal proses ile modülün geri kazanımı sağlanmaktadır. Geri dönüşüm işlemi belirli hammadde ve sıcaklıkla birlikte panelin birleştirilmesi sonucunda bitirilmektedir [22].

1 m<sup>2</sup>'lik polikristal panelin geri dönüşümü ele alındığında, işlem sonucunda 0,889 m<sup>2</sup>'lik polikristal güneş paneli temin edilmektedir. İşlem esnasında yaklaşık 21,1 kWh civarında elektrik enerjisi tüketilmektedir. Tüketilen enerji dolaylı emisyonu neden olmaktadır. Sonuç olarak dolaylı emisyon değeri ülkeler arasında 2-20,47 kg-CO<sub>2</sub> aralığında değişim göstermektedir. Ortalama emisyon değeri 11,5 kg-CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmaktadır. Şekil 3.4'de ülkelerin emisyon miktarı verilmektedir [25].



Şekil 3.4. Polikristal PV panelin geri dönüşümü sırasında salınan emisyon miktarı.

Hesaplama da geri dönüşümle üretilen panel ile geri dönüşüm olmadan üretilen panel kıyaslandığında, ortaya büyük emisyon farkı çıktığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçların nezdinde geri dönüşümün ne kadar önemli olduğu bir kez daha anlaşılmıştır.

### 3.1.3. Polikristal Panellerin Elektrik Üretiminden Kaynaklanan Ortalama Emisyon Miktarı

Günümüzde her alanlarda karşımıza çıkan güneş panelleri kullanılan hammaddenin saflığı, malzemenin iletkenliği, camın geçirgenliği gibi çeşitli materyallerin yanı sıra panele ulaşan güneş ışınım değeri, panelin güneşe doğru açı ile konumlandırılması gibi çeşitli parametreler sebebiyle farklı miktarda elektrik üretmektedir [59]. 1 m<sup>2</sup> ve 150W'lık çıkış gücüne sahip polikristal güneş paneli %14 panel verimliliği, %90 sistem verimliliğiyle, optimum güneş radyasyonu ve uygun sıcaklığın olduğu koşullarda panelin çalıştığı varsayılmaktadır. Bu koşullar altında, ortalama elektrik gücü ve ilgili emisyon miktarı hesaplanmıştır. Kullanma ömrü 25 yıl kabul edilen polikristal PV paneller santrallerde 17 yıl sonunda değiştirilmektedir. Bu nedenle PV paneller kullanımları süresince, 17 sene içerisinde ortalama elektrik üretimi boyunca açığa çıkardığı emisyon değeri ele alınmıştır. Bu varsayımlar doğrultusunda ülkelere göre ortalama elektriksel güç ve emisyon miktarı Çizelge 3.3'de verilmiştir [60].

Çizelge 3.3. Farklı ülkeler için polikristal panel ile üretilen elektrik değeri [61].

Ülke	Güneş Işınımı (kWh/ m <sup>2</sup> -yıl)	Elektrik Üretimi (kWh)	Emisyon (kg- CO <sub>2</sub> ) (17 yıl)	Enerji geri ödeme süresi (yıl)
Almanya	1228	154,73	60,35	1,35
Amerika	1996	251,88	98,09	0,83
Brezilya	2096	297,28	115,77	0,7
Çin	1834	231,09	89,93	0,9
Japonya	1552	195,55	76,16	1,07

Enerji geri ödeme süresi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır [62,63].

$$EGÖS = \frac{E_c}{E_{PV}} \quad (3.2)$$

$$E_C = E_P + E_R \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.2 ve 3.3'deki EGÖS enerji geri ödeme süresi (yıl),  $E_c$  PV panel üretimindeki enerji tüketimi (kWh),  $E_{PV}$  PV panellerle elektrik üretimi (kWh/yıl),  $E_P$  panel üretim aşamasındaki elektrik tüketimi (kWh) ve  $E_R$  panel geri dönüşümdeki enerji tüketimidir (kWh).

Polikristal panellerde, enerji geri ödeme süresi 0,7- 1,35 yıl arasında değişmektedir. En düşük enerji geri ödeme süresi 0,7 yıl ile Brezilya'ya aittir.

### **3.2 CdTe Panel Üretim Aşamalarının ve Üretimdeki Çevresel Etki Potansiyelinin İncelenmesi**

Silisyumun saflaştırılması esnasında yüksek enerji tüketimi, PV panel maliyetinde artışa yol açmaktadır. PV panel maliyetinin düşürülmesi ve verimin artırılması gibi çeşitli amaçlar nedeniyle günümüzde PV hücre üretiminde çeşitli hammaddeler kullanılmaktadır. Bu hammaddeler arasında yer alan kadmiyum, kurşun, indiyum, galyum ve diğer bileşiklerin yüksek derecede zehirli madde içermesinden dolayı çevresel tehdit arz etmektedir [64,65]. Günümüzde CdTe güneş panelinin üretimi gerçekleşmekte fakat kristal yapıli fotovoltaiik paneller kadar talep edilmemektedir. Bunun en büyük nedeni ise kristal yapıli paneller kadar verimlerin ve mukavemetlerinin yüksek olmamasıdır. CdTe güneş panelinin temel ana hammaddesi olan kadmiyum doğada tek başına bulunmamaktadır. Fakat işlenmesiyle kolay olarak elde edilebilmesinin aksine temel ana maddeleri arasında yer alan tellür nadir bulunan elementler arasında yer almaktadır [66].

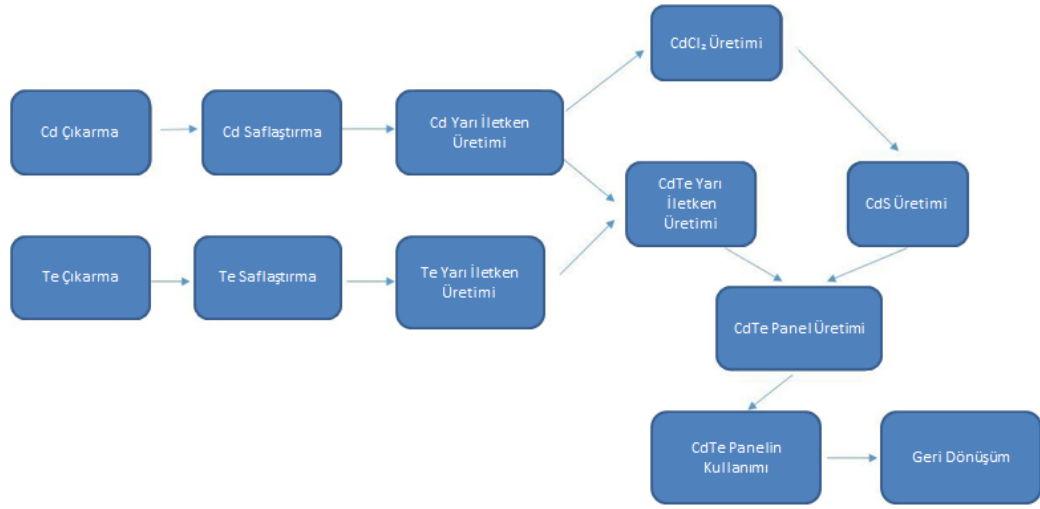
Kadmiyum beşte dört oranında çinkonun, beşte bir oranında kurşun cevherinin ve az miktarda bakır cevherinin eritilmesiyle elde edilmektedir. Kadmiyum üretimi iki ayrı proses sonucu üretilebilir. Prosesler çinkonun veya kurşunun arıtılmasıyla



gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada en fazla kullanılan yöntem incelenmektedir. Çinko arıtma yöntemi olan çinko tozu ile çinko sülfat çözeltisinin çökmesi sonucunda oluşan kadmiyum süngerinde %99,5 değerinde saf kadmiyum açığa çıkması ele alınmıştır. İşlem sırasında elde edilen süngerin geri kazanım tesisinde iki gün boyunca buhar içerisinde oksitlenmesi sonucunda kadmiyum oksit (CdO) oluşumu sağlanmaktadır. Kadmiyum oksit saflaştırma, çökeltme, arıtma gibi çeşitli işlemlerden geçmektedir [67]. Bütün bu işlemlerin sonucunda yarı iletken olan kadmiyum ürün olarak açığa çıkmaktadır. Ürün iki ayrı proses içerisinde kullanılmak amacıyla iki kısma ayrılmaktadır. Birinci kısım da yarı iletken kadmiyumun hidroklorik asit (HCl) ile tepkimeye girmesi sonucunda kadmiyum klorür ( $CdCl_2$ ) üretimi gerçekleştirilmektedir. Kadmiyum klorür ile hidrojen sülfür ( $H_2S$ ) tepkimeye maruz bırakılarak kadmiyum sülfür (CdS) elde edilmektedir. İkinci kısım ise tellür (Te) hammaddesinin işlenmesi ve saflaştırılması gibi çeşitli aşamalardan geçmesidir. İşlem sonunda %99,99 oranında saf tellür oluşmaktadır. Aşamalar sonucunda yarı iletken tellürün elde edilmesinin ardından elde edilen yarı iletken tellür ile yarı iletken kadmiyum kimyasal reaksiyona sokularak yarı iletken kadmiyum tellür oluşumu sağlanmaktadır. İki ayrı kısma ayrılarak iki farklı ürünün elde edilmesi sonucunda prosesin son evresinde kadmiyum sülfür ve yarı iletken kadmiyum tellür (CdTe) ürünleri işleme tabi tutularak fotovoltaik panel üretimi gerçekleştirilmiş olmaktadır [68].

### **3.2.1.CdTe PV Panel Üretiminde Ortalama Emisyon Tahmini**

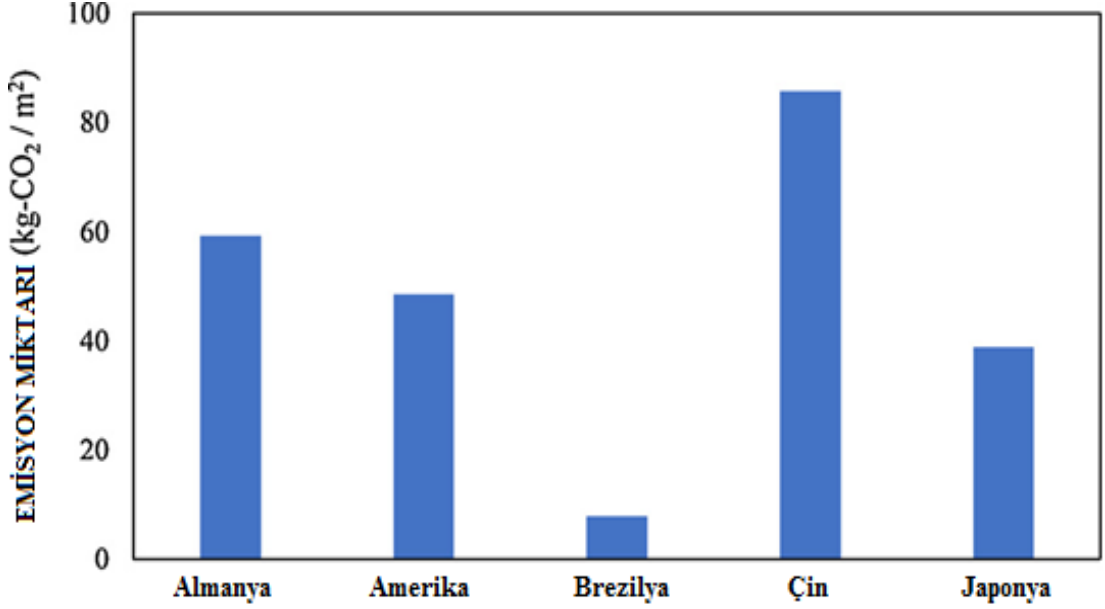
1 m<sup>2</sup>'lik kadmiyum tellür panelinin üretimi için kullanılan enerji verileri ele alınmıştır. Çalışmada doğrudan gerçekleşen emisyon değerleri çok az değerlere tekabül etmesinden dolayı bu değerler göz ardı edilmiştir. Polikristal için yapılan dolaylı emisyon hesaplamasında kullanılan elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon değer faktörü ve formüller bu bölümde de kullanılarak tahmini bir hesaplama yapılmıştır [69]. Çizelge 3.1 yardımıyla beş ülkede CdTe güneş paneli üretiminde açığa çıkan emisyon değerleri karşılaştırılmıştır. CdTe güneş panelinin üretim aşaması Şekil 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.5. CdTe güneş panelinin üretim aşaması [25].

1 kg kadmiyum üretimi için kadmiyumun saflaştırılması aşamasında 1,25 kWh elektrik kullanılmaktadır. Saflaştırma işlemi sonucunda beş ülke kıyaslandığında, 0,11-1,21 kg-CO<sub>2</sub> aralığında emisyon açığa çıkmaktadır. Saflaştırma işleminden sonra yarı-iletken kadmiyum üretimi aşamasında 3,86 kWh değerinde enerji tüketimi gerçekleşmektedir. İşlem esnasında çevreye 0,35 ila 3,74 kg-CO<sub>2</sub> aralığında emisyon salımı olmaktadır. 0,646 kg yarı iletken kadmiyumun ve 0,419 kg hidroklorik asidin reaksiyona sokulması sonucunda 1 kg kadmiyum klorür üretiminin sağlanması için 0,0425 kWh değerinde enerji harcanmaktadır. İşlem 0,3 ila 41,23 g-CO<sub>2</sub> arasında düşük emisyonla sebep olmaktadır. İşlemin ardından kadmiyum sülfür elde edilmesi için 0,004 kWh kadar enerji tüketimi gerçekleşmekte ve işlem için 0,36-3,88 g-CO<sub>2</sub> aralığında çok düşük miktarda, göz ardı edilebilecek düzeyde emisyon açığa çıkmaktadır. Panel üretimi için ihtiyaç duyulan tellürün temininde 0,043 kWh elektrik harcanmasıyla 3,87-41,71 g-CO<sub>2</sub> civarında az miktarda karbondioksit emisyonu salımı olmaktadır. Ardından tellürden yarı iletken tellür üretmek için 10,89 kWh değerinde enerjiye ihtiyaç duyulmakta ve işlem sonucunda 0,98-10,56 kg-CO<sub>2</sub> arasında emisyon açığa çıkmaktadır. Üretim sonucunda açığa çıkan yarı iletken kadmiyum ile bir miktar yarı iletken tellürün hammadde olarak kullanılmasıyla ve 12,4 kWh değerinde enerji tüketmesiyle panel üretiminin son evresinde kullanılacak olan yarı iletken kimyasal bileşik CdTe elde edilmektedir. Ayrıca işlem sırasında 1,12-12,03 kg-CO<sub>2</sub> arasında emisyon meydana gelmektedir. 1 m<sup>2</sup> kadmiyum tellür paneli üretiminin son aşaması için elde edilen kimyasal bileşikler ve diğer hammaddelerin yardımıyla yaklaşık 58

kWh değerinde elektrik enerjisinin kullanılmasıyla 5,22-56,26 aralığında emisyon açığa çıkmaktadır [25].



Şekil 3.6. Ülkelerde üretilen CdTe PV panellerin üretiminden salınan ortalama emisyon miktarı.

Şekil 3.6’de güneş paneli üreten beş ülke baz alınarak 1 m<sup>2</sup>’lik CdTe güneş paneli üretiminde açığa çıkan emisyon değeri yaklaşık olarak hesaplanmıştır. 1 m<sup>2</sup> CdTe güneş paneli üretiminde her bir ülke için farklı emisyon değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca 1 m<sup>2</sup>’lik CdTe güneş paneli ile 1 m<sup>2</sup>’lik polikristal güneş panelinin üretimi kıyaslandığında CdTe güneş panelinin daha az emisyonla yol açtığı saptanmıştır.

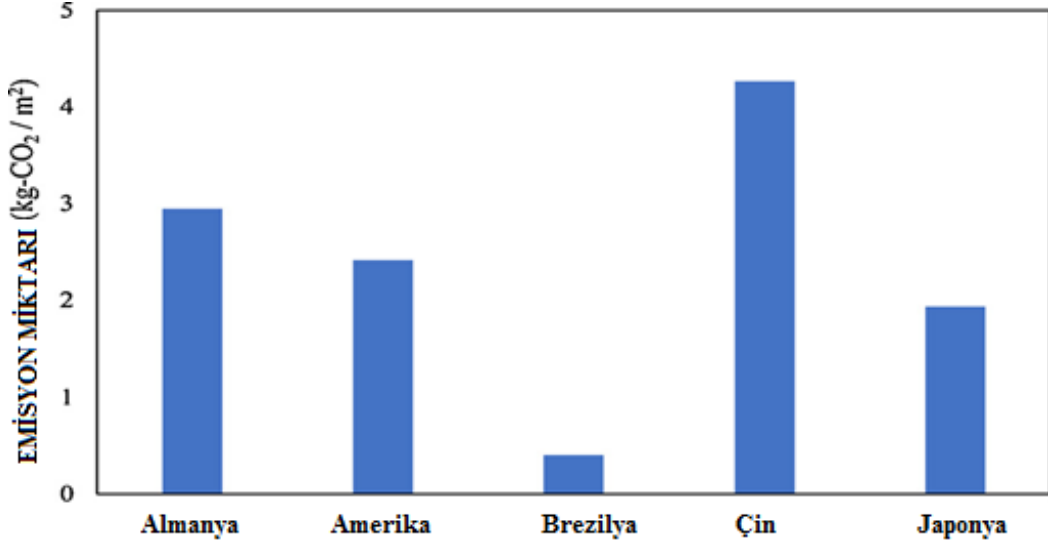
### 3.2.2. CdTe PV Panelin Geri Dönüşümü Esnasında Oluşan Emisyonun Yaklaşık Tahmini

Kadmiyum Tellür panellerinin ortalama kullanım ömrü 20-25 yıl arasında değişiklik göstermektedir [70]. Fakat CdTe panellerinde diğer panel gibi bir süre sonra verim kaybına uğramaktadır. Santrallerde pek tercih edilmeyen bu paneller diğer kullanım alanlarında ihtiyaca göre değiştirilmektedir. CdTe güneş panellerinin de diğer fotovoltaik paneller gibi özel elektronik atıkların toplandığı konteyner içerisinde istiflenerek geri dönüşüme gönderilmesi gerekmektedir. Ayrıca CdTe panellerin herhangi bir tahribata uğraması halinde panelin üretimden çıkarılması ve geri

dönüşeme gönderilmesi önem arz etmektedir. CdTe güneş paneli, polikristal güneş paneline göre daha zararlı kimyasallardan üretildiğinden çevre için daha tehlikelidir [71]. Bunun sebebi ise içerisinde yer alan zararlı kimyasal maddelerin su ile (yağmura maruz kalma) temas etmesi sonucunda toprağa ulaşan kimyasalların toprağın ve toprakta yaşayan canlıların hayatında risk teşkil etmesinden ötürü bu panellerin doğa ile hiçbir şekilde temas etmemesi gerekir. Bu ve benzeri nedenlerden panellerin üretimi, kullanımı ve geri dönüştürülmesi gibi çeşitli aşamalarda çevre ve canlı güvenliği için büyük dikkat ve özen gösterilmesi gerektiği bir kez daha vurgulanmaktadır [63].

Geri dönüşüme gönderilen CdTe güneş panellerinin yaklaşık %90'ı geri kazanılmaktadır. Böylece CdTe güneş panellerin üretiminde büyük kolaylık ve hammadde tasarrufu sağlamaktadır. 1 m<sup>2</sup>'lik CdTe güneş panelinin geri dönüşümü incelendiğinde, 0,0412 kg CdTe güneş paneli açığa çıktığı gözlemlenmektedir. İşlem sırasında 4,4 kWh değerinde enerji tüketimi gerçekleşmekte ve tüketim sonucunda 0,4-4,27 kg-CO<sub>2</sub> aralığında dolaylı emisyon salımı meydana gelmektedir. Ülkelerin CdTe güneş panelinin geri dönüşümü aşamasında çevreye salınan emisyon miktarı Şekil 3.7'de verilmiştir [25].

Geri dönüşümle üretilen CdTe güneş panel ile geri dönüşüm olmadan üretilen CdTe güneş paneli kıyaslandığında, ortaya büyük emisyon farkı çıktığı gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, geri dönüşüm işlemi fotovoltaik panel çeşitlerinin her birinin üretimde büyük enerji tasarrufu sağladığı gözlemlenmektedir. Ayrıca enerji tasarrufunun yanında önemli ölçüde hammadde ve emisyon tasarrufu da sağlanmaktadır.



Şekil 3.7. CdTe PV panelin geri dönüşümü sırasında salınan emisyon miktarı.

### 3.2.3. CdTe Panel İle Elektrik Üretiminden Kaynaklanan Ortalama Emisyon Miktarı

Polikristal güneş panelinde olduğu gibi, CdTe güneş panelinde de elektrik üretmek için çevreye salınan emisyonları hesaplamak amacıyla panel verimliliği haricinde aynı koşullar uygulanmıştır. 1 m<sup>2</sup> ve 150W'lık çıkış gücüne sahip CdTe güneş paneli %10 panel verimliliği ve %90 sistem verimliliğiyle optimum güneş radyasyonu aldığı ve uygun sıcaklığın bulunduğu ortamda panelin çalıştığı varsayılmaktadır. Bu koşullar altında ortalama elektrik gücü ve ilgili emisyon miktarı hesaplanmıştır. Hizmet ömrü 25 yıl kabul edilen PV paneller santrallerde 17 yıl sonunda değiştirilmektedir. CdTe güneş panelinin kullanımı esnasında, ortalama 17 yıl içerisinde elektrik üretimi boyunca, emisyon açığa çıkarmaktadır [72]. Bu varsayımlar doğrultusunda ülkelere göre ortalama elektrik üretimi ve emisyon miktarı Çizelge 3.4'de verilmiştir.

1 m<sup>2</sup>'lik CdTe güneş paneli incelendiğinde, panel üretilirken elektrik üretiminde ortalama 88,49 kWh değerinde, geri dönüştürülür iken 4,4 kWh değerinde güç kullanılmaktadır. 1 m<sup>2</sup>'lik CdTe güneş paneli için toplam 92,89 kWh elektrik tüketilir. Enerji geri ödeme süresi polikristal güneş panelindeki aynı eşitlikle hesaplanmaktadır. CdTe güneş panellerinde, enerji geri ödeme süresi ülkelere göre 0,4-0,85 arasında değişmektedir.

Çizelge 3.4. Farklı ülkeler için CdTe panel ile üretilen elektrik değeri [61].

Ülke	Güneş Işınımı (kWh/ m <sup>2</sup> -yıl)	Elektrik Üretimi (kWh)	Emisyon (kg- CO <sub>2</sub> ) (17 yıl)	Enerji geri ödeme süresi (yıl)
Almanya	1228	110,52	43,01	0,85
Amerika	1996	179,91	70,04	0,52
Brezilya	2096	232,89	90,78	0,4
Çin	1834	165,06	64,26	0,56
Japonya	1552	139,68	54,40	0,67

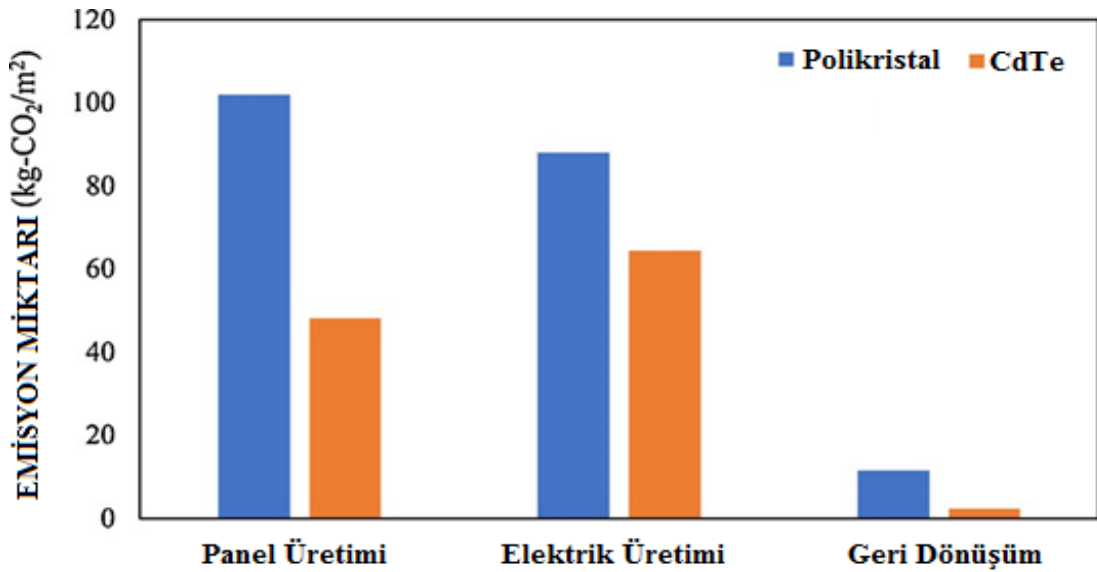
Çizelge 3.4’de Brezilya’nın 17 yıllık dönemde 90,78 kg-CO<sub>2</sub> değerinde emisyon miktarına sahip olduğu görülmektedir. Brezilya bu dönemde en yüksek CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip ülke gibi görünse de, kWh başına en düşük CO<sub>2</sub> oranına sahip ülkedir. Ayrıca, ülkenin güneş enerji politikasına önem verdiği görülmektedir. Brezilya kömür kullanımını azaltması, yenilenebilir enerji kaynaklarını ve hidroelektriği arttırması sonucunda en düşük emisyon değerine sahip olan beş ülke arasında ilk sırada yer almaktadır. İlaveten, ülkeler arasında en yüksek güneş radyasyonuna maruz kalan ülke olduğundan güneş enerjisi için oldukça uygundur. Böylece Brezilya’da güneş enerjisine yapılan yatırımlara değmektedir. PV panellerin yüksek miktarda enerji üretmesi, enerji geri ödeme süresini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu da halkı güneş enerjisinden daha fazla yararlanmaya teşvik etmektedir.

### 3.3. Fotovoltaik Panellerin Emisyon Analizinin Değerlendirilmesi

Güneş enerji santrallerinde büyük oranda monokristal ve polikristal PV panel kullanılmaktadır. Monokristal ve polikristal PV panellerden açığa çıkan emisyon oranları hemen hemen benzerlik göstermektedir [73]. Bu çalışmada iki farklı teknoloji içerisinde yer alan kristal silikon PV panel ile CdTe güneş paneli ele alınmıştır. Polikristal ve CdTe güneş panellerinin üretilmesinde ve kullanım ömrünün sona ermesi sonucunda gerçekleştirilen geri dönüşüm sürecinde, ülkeden ülkeye emisyon farklılıkları gözlemlenmektedir. Bu aşamalarda ülkelerin açığa çıkan emisyon değerlerinin ortalaması değerlendirilmiştir. Güneş panelleri optimum açıda güneş

ışınımı ve sistem verimliliği gibi birçok faktöre göre farklı verimlilik oranına sahip olmaktadır. Elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon miktarları için çalışmadaki ülkelerin değerlerinin ortalaması alınmıştır. Polikristal ve CdTe güneş panellerinin ömrü boyunca saldığı emisyon miktarı verilmektedir. Çalışmada panel üretimi, panel elektrik üretimi ve geri dönüşüm aşamaları için çevreye salınan CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanmıştır. Buna göre polikristal güneş paneli ile bir yılda ortalama 226,1 kWh elektrik üretildiği tespit edilmiştir. CdTe güneş paneliyle ise bir yılda 165,61 kWh elektrik üretildiği tespit edilmiştir.

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi polikristal güneş panelinin panel üretimi, elektrik üretimi ve geri dönüşüm işlemi sonucunda, 17 yıllık ömrü boyunca, 201,4 kg-CO<sub>2</sub> emisyon açığa çıkarmıştır. Polikristal güneş panelinin enerji geri ödeme süresi, ülkelerin ortalama değerleri alınarak 0,92 yıl olarak belirlenmiştir. CdTe güneş panelinin 17 yıl boyunca çevreye saldığı toplam emisyon miktarı 115,04 kg-CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır. Enerji geri ödeme süresi ise 0,57 yıl olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Yaşamları boyunca polikristal ve CdTe güneş panellerinin emisyon miktarı.

## BÖLÜM 4

### ENERJİ SEKTÖRÜ TARAFINDAN OLUŞAN SERA GAZI EMİSYONLARI İLE GÜNEŞ ENERJİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sera gazları; karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), diazot monoksit (N<sub>2</sub>O), hidroflorür karbonlar (HFCs), perfloro karbonlar (PFCs), sülfür hekza florür (SF<sub>6</sub>) gibi çeşitli gazlar meydana gelen atmosfer bileşenleridir. Atmosferde zaman içerisinde yoğunlaşan sera gazları hem doğal yollarla hem de çeşitli insan faaliyetleri sonucunda meydana gelmektedir. Sera gazların meydana gelmesine neden olan faktörler arasında; ulaşım, elektrik üretimi, konut ısıtması gibi sektörlerde fosil yakıtların kullanımı, sanayileşme, tarım ve hayvancılık faaliyetleri, nüfus artışı, ormanların tahrip edilmesi vb. konular yer almaktadır [74].

Dünyada açığa çıkan karbondioksit 1990 yılında 14,8 milyar ton iken bu değer günümüzde %143,5 oranında artış göstererek 36 milyar tonun üzerinde karbondioksit değerine ulaşmıştır. Bu artışların en temel sebebi nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler gibi çeşitli faktörlerin enerjiye olan talebinden kaynaklanmıştır. Veriler incelendiğinde, toplam sera gazı emisyon değeri sektör bazında değerlendirildiğinde, %78 oranında en fazla karbondioksit yayan sektörün enerji sektörü olduğu belirlenmiştir. Dünya enerjinin büyük bir kısmını birincil enerji kaynaklarından temin etmektedir. Güncel birincil enerji tüketimi incelendiğinde, dünyanın enerjisi %85 oranında fosil yakıtlı kaynaklardan karşıladığı karşımıza çıkmaktadır [36,37]. Sonuç olarak modern çağın etkisiyle özellikle de konvansiyonel yakıtların kullanımıyla sera gazı emisyonlarında son yıllarda ciddi artışlar yaşandığı veriler ile kanıtlanmıştır. Günümüzde konvansiyonel yakıtların kullanımı sonucunda oluşan karbon emisyonun daha fazla tahribata yol açmaması adına, global çaplı birtakım anlaşmalar doğrultusunda karbon salınımı minimuma indirmek için emisyon hedefleri belirlenmektedir. Anlaşmalar doğrultusunda belirlenen hedefler ile ülkeler enerji, endüstri gibi çeşitli politikaları iyileştirerek önemli adımlar atmaktadır. Fakat bazı ülkeler bu emisyon azaltma politikasına yeterince riayet etmemektedir. Anlaşma



içerisinde daha yaşanabilir bir çevre bırakmak amacıyla konvansiyonel yakıt sistemlerinin kullanımının azaltılması ve yenilenebilir enerji sistemlerinin artırılması yönelik maddelere yer verilmektedir. Bu maddeler neticesinde özellikle yenilenebilir enerji içerisinde yer alan güneş enerji santrallerinin artırılmasına yönelik birtakım çalışmalar yürütülmektedir. Dünya çapında güneş enerji politikası izleyen ülkeler çeşitli teşvikler ile fotovoltaik sistemleri gerçek anlamda desteklemektedir. Günümüzde fazlaca talep görmeye başlamış ve gelecekte daha da kullanımı yaygınlaşması beklenen fotovoltaik panel sistemleri çevre dostu olarak kabul edilen ve elektrik üretiminde karbondioksit emisyonu düşüren bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır [29].

Atmosferde çeşitli sera gazları bulunmaktadır. Dünyada yapılan faaliyetler sonucunda ciddi boyutlarda emisyonlar açığa çıkmaktadır. Sera gazlarının belirli bir düzeyin üzerinde olması atmosferin yapısını bozmaktadır. Sera gazları arasında yüksek oranda salım değerine sahip olan gaz CO<sub>2</sub>'dir [13]. Başka bir deyişle, atmosferde en fazla artış oranına sahip gaz karbondioksittir. Çalışmada sera gazı emisyon hesaplarında CO<sub>2</sub> emisyon değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Elektrik üretim kaynaklarına göre ortalama sera gazı emisyon değerleri [75].

---

<b>KAYNAK</b>	<b>ORTALAMA SERA GAZI EMİSYONU (ton-CO<sub>2</sub>/ GWh)</b>
Linyit	1504
İthal Kömür	888
Taş Kömür	888
Petrol	733
Doğal gaz	499
Jeotermal	38
Biyokütle	26
Hidrolik	26
Güneş	23
Rüzgar	10

---

Çizelge 4.1’de 1 GWh elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılan birincil enerji kaynaklarının sera gazı emisyon değerleri ton-CO<sub>2</sub> cinsinden verilmektedir. Tablodan da gözlemlendiği gibi enerji üretiminde kullandığımız kaynakların her biri belirli oranda karbondioksit emisyonuna sebep olmakta ve kullanılan kaynağın cinsine göre değişiklik göstermektedir. Günümüzde en fazla karbondioksit salımı termik santraller tarafından gerçekleştirilmektedir. Özellikle, linyit kömürün kullanıldığı santrallerde emisyon oranını ciddi derecede artmaktadır. Termik santraller içerisinde en az tahribata yol açan kaynak doğal gaz olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğal gaz diğer konvansiyonel yakıtlara kıyasla nispeten daha temiz enerji kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretim gerçekleştiren santraller düşük emisyon salımı açığa çıkarması sebebiyle çevresel tahribat en aza indirmektedir.

Elektrik üretiminde meydana gelen sera gazı emisyon değerinin hesaplanmasında, üretilen elektrik miktarı ile Çizelge 4.1’de yer alan ortalama sera gazı emisyon faktörü kullanılmaktadır. Kaynak bazında meydana gelen sera gazı emisyonları aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$SGE = [ \sum(E\ddot{U}D \times EF) ] \times 10^{-6} \quad (4.1)$$

Burada; SGE toplam sera gazı emisyonu (MtCO<sub>2</sub>), EÜD elektrik üretim değeri (GWh), EF ortama sera gazı emisyon (Emisyon Faktörü) değeridir (tonCO<sub>2</sub>/GWh).

Polikristal güneş panelinde panel üretimi, elektrik üretimi ve geri dönüşüm işlemi sonucunda 17 yıllık ömrü boyunca ortalama 201,4 kg-CO<sub>2</sub> emisyon açığa çıkmıştır. Bu üretim konvansiyonel yakıtlar arasında yer alan en düşük karbondioksit emisyonuna yol açan doğal gaz kaynaklı termik santraller ile gerçekleştirilse 1918 kg-CO<sub>2</sub> oranında karbondioksit emisyonu açığa çıkaracağı hesaplanmaktadır. Sonuç olarak, doğal gaz kaynaklı termik santraller ile güneş enerji santralleri karşılaştırıldığında, 17 yıl boyunca eşit miktarda elektrik üretimi güneş enerjisi ile gerçekleştirildiği takdirde 1,72 ton-CO<sub>2</sub> oranında meydana gelebilecek emisyonun tasarruf sağlanmış olacaktır.

1 kWh elektrik üretmek için 0,249 m<sup>3</sup> doğal gaz termik santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. 1 m<sup>2</sup>'lik polikristal güneş paneli ile 17 yıl boyunca üretilen 2815,37 kWh değerindeki elektrik doğal gaz kaynaklı termik santraller ile üretilirse 701,03 m<sup>3</sup> doğal gaz kullanılmış olur. Güneş enerji sistemlerinin kullanımı yüzde yüz yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Güneş enerji sistemleri doğal gaz rezervi bulunmayan ülkelerde dışarıdan ithal edilen doğal gazın elektrik üretim oranını düşürmesiyle birlikte yakıt tasarrufu sağlayarak ekonomik kazançta bulunacaktır.

## BÖLÜM 5

### SONUÇ

Bu çalışmada polikristal ve CdTe panellerinin imalatı, geri dönüşümü ve elektrik üretimi esnasında açığa çıkarttığı CO<sub>2</sub> emisyon miktarları araştırılmıştır. Araştırmada beş ülkeye yer verilmiştir. Düşük, orta ve yüksek güneş ışınım radyasyonuna sahip ülkeler seçilerek kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Paneller kendi aralarında karşılaştırılırken, ülkelerin emisyon miktarının ortalaması alınmıştır. Araştırmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Beş farklı ülkenin emisyon miktarları belirlendiğinde ve karşılaştırıldığında Brezilya'nın en düşük emisyon miktarına sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi PV panel üretiminde tüketilen elektriğin %83'ünün yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesidir.
- Polikristal ve CdTe panel emisyon miktarları yaşamları boyunca sırasıyla 201,4 kg-CO<sub>2</sub> ve 115,04 kg-CO<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre CdTe panelinin çevreye emisyon salımı polikristal panelden daha azdır. Yine de CdTe güneş paneli, panel verimliliği düşük olması, çevre ve insan sağlığı için zararlı maddeler içermesi sebebiyle çok fazla tercih edilmemektedir.
- Polikristal güneş panelinin üretimi için harcanan enerji, geri dönüşüm için ihtiyaç duyulan enerjiden 9,52 kat daha fazla olduğundan panel üretiminde geri dönüşüm işleminin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.
- Beş farklı ülkenin emisyon miktarının ortalaması alındığında, polikristal panelin enerji geri ödeme süresi 0,92 yıl belirlenirken, CdTe güneş panelinin enerji geri ödeme süresi 0,57 yıl olarak belirlenmiştir. Her iki panel için üretimde harcanan enerji bir yıldan daha az sürede karşılanabilmektedir.
- 17 yıl boyunca çevreye salınan PV panelinin emisyon miktarı 201,4 kg-CO<sub>2</sub> iken, doğal gaz santrali ile aynı miktarda elektrik üretmek için çevreye salınan emisyon miktarı 1918 kg-CO<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir. Böylece PV panellerin

diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha çevreci olduğu anlaşılmaktadır. Termik santral ile gerçekleştirilen elektrik üretimi PV panel ile gerçekleştirildiğinde 1,72 ton CO<sub>2</sub> emisyon tasarrufu ve 701,03 m<sup>3</sup> yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

- Fosil yakıt rezervlerinin düşmesi fiyat arttırmakta ve olası savaşlar gibi olumsuz durumları tetiklemektedir. Ancak güneş, güneş enerjisinde yakıt olarak kullanıldığından, fosil yakıtlar gibi fiyat artışı ve rezerv kaygısı yoktur. Bu nedenle herhangi bir olumsuzluktan etkilenmeyen bu enerji kaynağına yapılan yatırımlar büyük önem taşımaktadır.
- Ayrıca birçok enerji kaynağının taşınması büyük bir sorun teşkil etmektedir. Kendi rezervleri olmayan ülkeler için, yüksek yakıt maliyetinin en büyük sebebi yakıtların taşınmasıdır. Ancak güneş enerjisi için böyle bir nakliye ücretine gerek yoktur.
- Ülkelerin, karbon salımı ile ilgili Kyoto protokolü kapsamında taahhüt ettikleri hedeflerine ulaşabilmeleri için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeleri gerekmektedir. Ülkeler enerji politikalarında hedeflerine ulaşabilmeleri için güneş enerjisinin kullanımına daha fazla dikkat etmelidir.

PV paneller çevreci bir sistem oldukları için tercih edilmektedir. Bu nedenle ki güneş enerjisi sistemleri geleceğin sistemleri arasında gösterilmektedir. PV paneller ile ilgili birçok iyileştirmeler yapılabilir. Bu çalışmada yapılan CO<sub>2</sub> emisyon analizi daha da geliştirilebilir. Zira çalışmada nakliye ve montaj ihmal edilmiştir. Ancak referans olarak ortalama bir mesafe alınarak nakliye hesaplanabilir. Ayrıca PV panel üretim fiyatının son 10 yılda düştüğü bilinmektedir. Bu düşüş muhtemelen devam edecektir. Bunun için son 10 yılda 1 m<sup>2</sup> lik panel için teknolojik gelişme katsayısı gibi bir bileşen hesaplanabilir. Böylece geri dönüşüm süresi daha da kısalmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., Ceylan, İ., "Environmental and economic assessment of a low energy consumption household refrigerator", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 23 (2): 365–372 (2020).
2. Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Biçen, Y., "Assessment of machine learning, time series, response surface methodology and empirical models in prediction of global solar radiation", *Journal Of Cleaner Production*, 277: 122353 (2020).
3. Ceylan, İ., Yıldız, G., Gürel, A.E., Ergün, A., Tosun, A., "The effect of malfunctions in air handling units on energy and exergy efficiency", *Heat Transfer Research*, 51 (11): 1007–1028 (2020).
4. Yu, Z., Ma, W., Xie, K., Lv, G., Chen, Z., Wu, J., Yu, J., "Life cycle assessment of grid-connected power generation from metallurgical route multi-crystalline silicon photovoltaic system in China", *Applied Energy*, 185: 68–81. (2017).
5. Dubey, S., Jadhav, N.Y., Zakirova, B., "Socio-Economic and environmental Impacts of silicon based photovoltaic (PV) technologies", *Energy Procedia*, 33: 322–334 (2013).
6. Gerbinet, S., Belboom, S., Leonard, A., "Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: a review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 38: 747–753 (2014).
7. Fu, Y., Liu, X., Yuan, Z., "Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China", *Journal Of Cleaner Production*, 86: 180–190 (2015).
8. Luo, W., Khoo, Y.S., Kumar, A., Low, J.S.C., Li, Y., Tan, Y.S., Wang, Y., Aberle, A.G., Ramakrishna, S., "A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 174: 157–162 (2018).
9. Ağbulut, Ü., Gürel, A.E., Ergün, A., Ceylan, İ., "Performance assessment of a V- Trough photovoltaic system and prediction of power output with different machine learning algorithms", *Journal Of Cleaner Production*, 268: (2020).
10. Khanlari, A., Güler, H.Ö., Tuncer, A.D., Şirin, C., Bilge, Y.C., Yılmaz, Y., Güngör, A., "Experimental and numerical study of the effect of integrating plus-shaped perforated baffles to solar air collector in drying application", *Renewable Energy*, 145: 1677–1692 (2020).

11. Peng, J., Lu, L., Yang, H., "Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 19: 255–274 (2013).
12. Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., Yıldız, G., "Energy, Exergy and Environmental assessments (3E) of various refrigerants in the refrigeration systems with internal heat exchanger", *Heat Transfer Research*, (2020).
13. Ağbulut, Ü., Ceylan, İ., Gürel, A.E., Ergün, A., "The history of greenhouse gas emissions and relation with the nuclear energy policy for Turkey", *International Journal Of Ambient Energy*, 1–9 (2019).
14. Hosenuzzaman, M., Rahim, N.A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A.B.M.A., Nahar, A., "Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 41: 284–297 (2015).
15. Sherwani, A.F., Usmani, J.A., V., "Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 14: 540–544 (2010).
16. Desideri, U., Proietti, S., Zepparelli, F., Sdringola, P., Bini, S., "Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems", *Applied Energy*, 97: 930–943 (2012).
17. Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., Xu, C., "Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China", *Solar Energy*, 133: 283–293 (2016).
18. Reich, N.H., Alsema, E.A., van Sark, W.G.J.H.M., Turkenburg, W.C., Sinke, W. C., "Greenhouse gas emissions associated with photovoltaic electricity from crystalline silicon modules under various energy supply options", *Progress In Photovoltaics*, 19 (5): 603–613 (2011).
19. Ito, M., Kato, K., Komoto, K., Kichimi, T., Kurokawa, K., "A Comparative study on cost and life-cycle analysis for 100MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in de- serts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules", *Progress In Photovoltaics*, 16 (1): 17–30 (2008).
20. Aman, M.M., Jasmon, G.B., Mokhlis, H., Solangi, K.H., Badarudin, A., Kazi, S.N., Hossain, M.S., Bakar, A. H. A., "A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 41: 1190–1204 (2015).
21. Yang, D., Liu, J., Yang, J., Ding, N., "Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade", *Journal Of Cleaner Production*, 94: 35–45 (2015).
22. Latunussa, C.E.L., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L., "Life Cycle

- Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 156: 101–111 (2016).
23. Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Yao, Q., "Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China", *Applied Energy*, 164: 882–890 (2016).
  24. Filho, G.L.T., Rosa, C.A., Barros, R.M., Santos, I.F.S.D, Silva, F. D. G. B. ., "Study of the energy balance and environmental liabilities associated with the manufacture of crystalline Si Photovoltaic Modules and deployment in different regions", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 144: 383–394 (2016).
  25. Vellini, M., Gambini, M., Prattella, V., "Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTe-panels", *Energy*, 138: 1099–1111 (2017).
  26. Shahsavari, A., Akbari, M., "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 90: 275–291 (2018).
  27. Xie, M., Ruan, J., Bai, W., Qiao, Q., Bai, L., Zhang, J., Li, H., Lv, F., Fu, H., "Pollutant payback time and environmental impact of Chinese Multi-Crystalline Photovoltaic production based on Life Cycle Assessment", *Journal Of Cleaner Production*, 184: 648–659 (2018).
  28. Lopez, J.F.A., Granados, A.P.A., Trevizo, M.E.G., Leon, A.L., Morales, G. B., "Energy payback time and Greenhouse Gas emissions: Studying the international energy agency guidelines architecture", *Journal Of Cleaner Production*, 196: 1566–1575 (2018).
  29. Guo, X., Lin, K., Huang, H., Li, Y., "Carbon footprint of the photovoltaic power supply chain in China", *Journal Of Cleaner Production*, 233: 626–633 (2019).
  30. Miller, I., Gençer, E., Vogelbaum, H.S., Brown, P.R., Torkaman, i S., O’Sullivan, F. M., "Parametric modeling of life cycle greenhouse gas emissions from photovoltaic power", *Applied Energy*, 238: 760–774 (2019).
  31. Ardente, F., Latunussa, C.E., Blengini, G. A., "Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling", *Waste Management*, 91: 156–167 (2019).
  32. Hocine, L., Samira, K. M., "Optimal PV panel’s end-life assessment based on the supervision of their own aging evolution and waste management forecasting", *Solar Energy*, 191: 227–234 (2019).
  33. Maani, T., Çelik, İ., Heben, M.J., Ellingson, R.J., Apul, D., "Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panel", *Science Of The Total Environment*, 735: 138827 (2020).



34. Radziemska, E.K., Lazewska, A. K., "The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 205: 110259 (2020).
35. Liu, F., Bergh, J. C. V. D., "Differences in CO2 emissions of solar PV production among technologies and regions: Application to China, EU and USA", *Energy Policy*, 138: 111234 (2020).
36. "IEA, 2020. International Energy Agency. [Online]: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=world&energy=electricity&year=2017>.", .
37. "IEA, 2020. International Energy Agency. [Online]: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019>.", .
38. Fthenakis, V.M., Kim, H. C., "Photovoltaics: life-cycle analyses", *Solar Energy*, 85: 1609–1628 (2011).
39. Braga, A.F.B., Moreira, S.P., Zampieri, P.R., Bacchin, J.M.G., Mei, P. R., "New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: a review", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 92: 418–424 (2008).
40. Sarkın, A.S., Ekren, N., Sağlam, Ş., "A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels", *Solar Energy*, 199: 63–73 (2020).
41. Acar, B., Gürel, A.E., Ergün, A., Ceylan, İ., Ağbulut, Ü., Can, A., "Performance assessment of a novel design concentrated photovoltaic system coupled with self-cleaning and cooling processes", *Environmental Progress And Sustainable Energy*, 39 (5): (2020).
42. Lunardi, M.M., Alvarez-Gaitan, J.P., Bilbao, J.I., Corkish, R., "Comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules", *Applied Sciences*, 8 (8): 1396 (2018).
43. Padoan, F.C.S.M., Altimari, P., Pagnanelli, F., "Recycling of end of life photovoltaic panels: a chemical prospective on process development", *Solar Energy*, 177: 746–761 (2019).
44. Bracquene, E., Peeters, J.R., Dewulf, W., Duflou, J. R., "Taking evolution into account in a parametric LCA model for PV panels", *Procedia CIRP*, 69: 389–394 (2018).
45. Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., Gekas, V., "Environmental impacts from the solar energy technologies", *Energy Policy*, 33: 289–296 (2005).
46. Khanlari, A., Sözen, A., Şirin, C., Tuncer, A.D., Gungor, A., "Performance enhancement of a greenhouse dryer: analysis of a cost-effective alternative solar air heater", *Journal Of Cleaner Production*, 251: 119672 (2020).

47. Wong, J.H., Royapoor, M., Chan, C. W., "Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 58: 608–618 (2016).
48. Jungbluth, N., "Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the swiss ecoinvent database", *Progress In Photovoltaics*, 13 (5): 429–446 (2005).
49. Wu, P., Ma, X., Ji, J., Ma, Y., "Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study", *Energy Procedia*, 105: 68–74 (2017).
50. Xu, L., Zhang, S., Yang, M., Li, W., Xu, J., "Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011-2016: a life cycle assessment approach", *Journal Of Cleaner Production*, 170: 310–329 (2018).
51. Bogacka, M., Pikon, K., Landrat, M., "Environmental impact of PV cell waste scenario", *Waste Management*, 70: 198–203 (2017).
52. Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A., Lovell, J., "Electricity specific emission factors for grid electricity", *Ecometrica*, (2011).
53. "BP Statistical Review of World Energy, 2019. BP Statistical Review of World Energy. 68th Edition. [Online]: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>", .
54. Akinyele, D.O., Rayudu, R.K., Nair, N. K. C., "Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria", *Renewable Energy*, 101: 537–549 (2017).
55. Müller, A., Wambach, K., Alsema, E., "Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process. GreenCambridge University Press, Cambridge, UK, 0895-G03-07.1.", 895 (2005).
56. Yue, D., You, F., Darling, S. B., "Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: life cycle energy and environmental comparative analysis", *Solar Energy*, 105: 669–678 (2014).
57. Yao, Y., Chang, Y., Mesanet, E., "A hybrid life-cycle inventory for multicrystalline silicon PV module manufacturing in China", 9 (Environmental Research Letters): 114001 (2014).
58. Huang, B., Zhao, J., Chai, J., Xue, B., Zhao, F., Wang, X., "Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process", *Solar Energy*, 143: 132–141 (2017).
59. Pacca, S., Sivaraman, D., Keoleian, G. A., "Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems", *Energy Policy*, 35: 3316–3326

- (2007).
60. de Wild-Scholten, M. J., "Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 119: 296–305 (2013).
  61. "2020 GSA, Global Solar Atlas. [Online]: <https://globalsolaratlas.info/map>", .
  62. Bernal-Agustin, J.L., Dufo-Lopez, R., "Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain", *Renewable Energy*, 31: 1107–1128 (2006).
  63. Fthenakis, V. M., "Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 8: 303–334 (2004).
  64. Tammaro, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., Manzo, S., "Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels", *Journal Of Hazardous Materials*, 306: 395–405 (2016).
  65. Kato, K., Hibino, T., Komoto, K., Ihara, S., Yamamoto, S., Fujihara, H., "A life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 67: 279–287 (2001).
  66. Kranz, L., Buecheler, S., Tiwari, A. N., "Technological status of CdTe photovoltaics", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 119: 278–280 (2013).
  67. Tao, J., Yu, S., "Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 141: 108–124 (2015).
  68. Sumper, A., Garcia, M.R., Robles, R.V., Jane, J.B., Peiro, J. A., "Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)", *Renewable And Sustainable Energy Review*, 15: 3888–3896 (2011).
  69. Raugei, M., Bargigli, S., Ulgiati, S., "Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si", *Energy*, 32: 1310–1318 (2007).
  70. Alsema, E. A., "Energy pay-back time and CO2 emissions of PV systems", In *Practical Handbook of Photovoltaics*, 1097–1117 (2012).
  71. Sinha, P., Wade, A., "Assessment of leaching tests for evaluating potential environmental impacts of PV module field breakage", *Ieee J. Photovolt.*, 5 (6): 1710–1714 (2015).
  72. Fthenakis, V.M., Kim, H. C., "Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in the Life Cycle of CdTe Photovoltaics. GreenCambridge University Press, Cambridge, UK, 0895-G03-06", (2005).
  73. Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M. J., "Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. Green Cambridge University Press,

Cambridge, UK, 0895-G03-05.1.", (2005).

74. Ağbulut, Ü., "Turkey's electricity generation problem and nuclear energy policy", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects*, 41 (18): 2281–2298 (2019).

## ÖZGEÇMİŞ

Zonguldak Devrek Lisesi'nde eğitim gördü. 2013 yılda Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliğini başladı. Genel mühendislik derslerinin yanı sıra mekanik tesisat, doğalgaz sistemleri, iklimlendirme ve havalandırma sistemleri, ısıtma sistemleri, yalıtım teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, jeotermal, hidrojen, biyokütle...), ileri nükleer enerji teknolojisi, güç elektroniği, ısı pompası, enerji yönetimi ve mühendislik ekonomisi, ekserji uygulamaları gibi konularda eğitim aldı. 2018 yılında mezun olduktan sonra Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı altında yüksek lisans programına başladı ve halihazırda eğitimine devam etmektedir.