



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Kristal Silisyum Fotovoltaik: Aşağıdan Yukarıya Maliyet Analizi Modeli

Essameldin KHADIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Essameldin KHADIR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kristal Silisyum Fotovoltaik: Aşağıdan Yukarıya Maliyet Analizi Modeli

Essameldin KHADIR

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

(2022, 54 Sayfa)

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

Doç. Dr. Bayram AKDEMİR

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Fotovoltaik dağıtımının gelecekte sürdürülebilir bir büyüme yaşaması için, özellikle güneş enerjisi kesintilerinin üstesinden gelmenin ek maliyetleri göz önüne alındığında, daha fazla maliyet düşürmeye ihtiyaç duyulabilir.

Kabul edilen maliyet analizi modeli, bir teknolojinin veya üretim sürecinin özelliklerinin bir veya daha fazla yolla maliyetlere nasıl katkıda bulunduğunu anlamak için ayrıntılı, cihaz düzeyinde maliyet modelleri kullanır. Analiz, bireysel maliyet bileşenlerinin PV teknolojilerinin fiziğiyle bağlantılı toplam maliyetlere nasıl katkıda bulunduğu hakkında bilgi sağlar.

Asgari Sürdürülebilir Fiyatlar modeli, iki temel metriği belirlemek ve hesaplamak için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti Hesaplama yazılımı (Sistem Danışmanı Modeli) ile birlikte Uluslararası Finansal Raporlama Standartlarına uygun olarak benimsenmiştir: $\$/W_p$ ve Seviyelendirilmiş Fotovoltaikler için Elektrik Maliyeti ve kentsel Çin'de 1.0 GW'den fazla üretim yapan bir tesis için sırasıyla 0.25 $\$/W_p$ ve Phoenix, Arizona - ABD için 4.80 sent/kWh olduğu bulunmuştur. Analizden çıkarılan rakamlara dayanarak, maliyet düşürme üzerinde en büyük etkiye sahip araştırma alanları belirlendi.

$\$/W_p$ metriğinin gelecek tahminlerinin 2025'te 0.19 $\$/W_p$ ve öngörülen gelecekte 0.17 $\$/W_p$ olacağı tahmin edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Maliyet Analizi Modeli, Asgari Sürdürülebilir Fiyat, Sistem Danışmanı Modeli, Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti.

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

Crystalline Silicon Photovoltaics: A Bottom-Up Cost Analysis Model

Essameldin KHADIR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING**

Advisor: Ass. Prof. Mümtaz MUTLUER

(2022, 54 Pages)

Jury

Ass. Prof. Mümtaz MUTLUER

Assoc. Prof. Bayram AKDEMİR

Prof. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

For PV distribution to experience sustainable growth in the future, especially considering the additional costs of handling solar disruption, further cost reductions may be needed.

The adopted cost analysis model uses detailed, device-level cost models to understand how features of a technology or manufacturing process contribute to costs in one or more ways. The analysis provides information on how individual cost components contribute to total costs linked to the physics of PV technologies.

The Minimum Sustainable Prices model has been adopted in accordance with the International Financial Reporting Standards together with the Levelized Cost of Electricity Calculator software (System Advisor Model, SAM), in order to identify and calculate two key-metrics: $\$/W_p$ and the Levelized Cost of Electricity for photovoltaics, and they have been found to be 0.25 $\$/W_p$ for a facility in urban China producing more than 1.0 GW, and 4.80 sent/kWh for Phoenix, Arizona - USA, respectively. Based on the numbers extracted from the analysis, areas of research that have the greatest impact on cost reduction have been identified.

Future projections of the $\$/W_p$ metric have been estimated to be: 0.19 $\$/W_p$ in 2025 and 0.17 $\$/W_p$ in the foreseen future.

Keywords: Photovoltaics, Cost Analysis Model, Minimum Sustainable Price, System Advisor Model, Levelized Cost of Electricity

ÖNSÖZ

Allah'a şükür

Essameldin KHADIR
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Araştırma Problemi.....	2
1.3 Hedefler	2
1.4 Tez Düzeni.....	2
1.5 Güneş Enerjisi:	3
1.5.1 Neden Güneş Enerjisi?	3
1.5.2 Güneş Enerjisine Giden Yol.....	4
1.6 Fotovoltaik Cihaz Temelleri	4
1.7 Güneş Enerjisi Dönüştürme Teknolojisi.....	4
1.8 Hava Kütlesi	4
1.9 Güneş Spektrumu	5
1.9.1 Güneşlenme	5
1.10 Temel Bilgiler	5
1.10.1 Güneş Pillerinde Işık Yönetimi	5
1.10.2 Fotonlar – Işık Kuantası	6
1.10.3 Fotonlar – Bir Yüzeyden Yansımalar.....	6
1.10.4 Optik Absorpsiyonu Geliştirme Yöntemleri	8
1.10.5 Yansıma önleyici kaplamalar	8
1.10.6 Optimum Film Kalınlığı.....	9
1.10.7 Optimize Edilmiş Bir Yansıma Önleyici Kaplamanın Nitelikleri	9
1.10.8 Dokulaştırma	9
1.10.9 Lambert Reflektörü	10
1.10.10 Arka yüzey yansıması, toplam iç yansıma	10
1.10.11 Işık Yönetimi	11
1.11 Sera Gazları ve Ortalama Küresel Sıcaklık.....	11
1.12 Maliyet, Fiyat ve Destek Mekanizmaları	12
1.12.1 Maliyet Kaldıraçları:	12
1.12.2 FV: Ölçek	13
2 KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	15
3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1 Aşağıdan Yukarıya Maliyet Modeli	28
3.2 Maliyet Modeli	28

3.2.1	Maliyet Ayrıştırma Stratejisi	28
3.3	Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti Hesaplayıcısı	32
3.3.1	Basit Seviyeli Elektrik Maliyeti Hesaplama Yazılımı	32
3.3.2	Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımı.....	34
3.4	Veri Kümeleri	38
4	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	40
4.1	Önceki on yılda c-Si Modül Maliyeti	40
4.2	$\$/W_p$ Sonuçlar.....	40
4.3	c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri	43
4.4	Basit Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti Hesaplayıcı Sonuçları	45
4.5	Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılım Sonuçları.....	45
5	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
	Tezin sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.	48
5.1	Sonuçlar	48
5.2	Öngörülen Modül Fiyat Tahminleri	48
	KAYNAKLAR.....	50
	EKLER.....	53
	EK-1 Solar Fotovoltaik Veri Kümesi (Maliyet Karşılaştırmaları 2020).....	53
	EK-2 c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyet Veri Kümesi (2020).....	54

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Güneş Enerjisi.....	3
Şekil 1.2. Güneş Pillerinde Işık Emilimi	6
Şekil 1.3. Havadan Katıya Yansıma.....	7
Şekil 1.4. Fotonlar – Bir Ortamdan İletim.....	7
Şekil 1.5. Farklı malzemeler için Absorpsiyon Katsayısı (α).....	8
Şekil 1.6. Yansıma Önleyici Kaplamalar	9
Şekil 1.7. Yüzeyde çoklu yansımalar	9
Şekil 1.8. Lambert Reflektörü	10
Şekil 1.9. Dokulu Arka Yüzey.....	10
Şekil 1.10. 550nm'de optimize edilmiş Optimize SiNx için Spektral Yansıma	11
Şekil 2.1. Güneş Enerjisi Yumuşak Maliyetleri.....	26
Şekil 3.1. c-Si tedarik zincirindeki önemli adımlar.....	30
Şekil 3.2. Silisyum pulların Hazırlanması için Czochralski Yöntemi.....	30
Şekil 3.3. Gelişen c-Si PERC Hücre Proses Akışı Teknolojileri	31
Şekil 3.4. FV Modülü Montajı.....	31
Şekil 3.5. Uluslararası Finansal Raporlama Standartları.....	32
Şekil 3.6. Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılım Arayüzü	35
Şekil 3.7. Model konumu olarak Phoenix, Arizona (ABD) seçildi	35
Şekil 3.8. Modelin modülü olarak SunPower SPR-E19-310-COM tek kristalli silisyum seçilmiştir.	36
Şekil 3.9. Yaskawa Solectria Solar: Modelin çeviricisi olarak SGI 750XTM [380V] seçildi.	36
Şekil 3.10. Sistem, 50 MW boyutunda, şebekeye bağlı sabit bir eğimdir.	37
Şekil 3.11. Finansal Parametreler	37
Şekil 4.1. Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Sonuçları Sekmesi	46
Şekil 5.1 Öngörülen Modül Fiyat Tahminleri.....	49

ÇİZELGELER

Çizelge 1.1. Güneş Enerjisi Dönüştürmek Teknolojisi	4
Çizelge 1.2. Güneş Işığı Yoğunluğu ($kWh/m^2/\mu m$) Vs Dalga Boyu	5
Çizelge 1.3. Tam yüklü üretim maliyeti, Çin - ABD, 2010	12
Çizelge 1.4. Şebeke Paritesi için 2-3 Kat Maliyet Azaltma Gerekliyor	13
Çizelge 1.5. Pazar Değişiklikleri	13
Çizelge 1.6. OECD bölgelerinde toplam elektrik üretimi, 2020'den 2021'e değişiklik	14
Çizelge 2.1. Güneş Panellerinin Zaman İçinde Maliyeti [17]	16
Çizelge 2.2. 2010'dan 2018'e Dünya FV Hücre/Modül Üretimi	17
Çizelge 2.3. Watt Başına Güneş Fiyatı İle Kilowatt-Saat Başına Güneş Fiyatı Arasındaki Karşılaştırma	22
Çizelge 2.4. Güneş Paneli Sistem Bileşenlerinin Maliyeti	22
Çizelge 2.5. Güneş FV modül maliyetinin veri kaynağına göre gelişimi, 1970-2020	25
Çizelge 3.1. Basit Seviyeli Elektrik Maliyeti Hesaplama Yazılımı	34
Çizelge 3.2. Kentsel Çin'de monokristal PERC hücre üretimi maliyetleri, 2020	39
Çizelge 3.3. Kentsel Çin'de monokristal PERC modül maliyetleri, 2020	39
Çizelge 4.1. Önceki on yılda c-Si Modül Maliyeti	40
Çizelge 4.2. PERC c-Si teknoloji ile (Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti (Minimum Sürdürülebilir Fiyatlar)	41
Çizelge 4.3. PERC c-Si teknoloji ile (Modül + Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti (Minimum Sürdürülebilir Fiyat)	42
Çizelge 4.4. Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Konut)	43
Çizelge 4.5. Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Ticari)	43
Çizelge 4.6. Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetler (Şebekeye Bağlı)	44
Çizelge 4.7. Yeni Modül Maliyeti ile c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Şebekeye Bağlı)	44
Çizelge 4.8. c-Si fotovoltaik sistem bileşenleri maliyetleri	45
Çizelge 4.9. Fotovoltaikler için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti	45
Çizelge 4.10. 50 MW'lık bir şebekeye bağlı sistem için bir yılda aylık AC enerji	46
Çizelge 4.11. 50 MW'lık bir şebekeye bağlı sistem için Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımından Temel Metrik Sonuçları	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\$/W_p$	Dollar per watt-peak (watt-peak başına dolar)
¢/kWh	Cents per kilowatt-hour (kilowatt-saat başına sent)
E_{ph}	Foton enerjisini
eV	Elektron volt
h	Planck sabiti
ν	Dalga frekansı
α	Absorpsiyon katsayısı
τ	Kalınlık
λ_0	Güneş spektrumunun zirvesindeki foton dalga boyu
n	Kırılma indisi
y_m	Modül üretiminde verim
y_c	Hücre üretiminde verim
y_w	Silisyum pulu üretiminde verim
Φ_{mi}	Modül başına girdi miktarı i
Φ_{ci}	Hücre başına girdi miktarı i
Φ_{wi}	Silisyum pulu başına girdi miktarı i
P_i	Girdi fiyatı i
n_{mc}	Modül başına hücre sayısı
n_{wC}	Hücre başına Silisyum pulu sayısı

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım (Alternating Current)
DC	Direct Akım (Direct Current)
c-Si	Kristal Silisyum (Crystalline Silicon)
FV	Fotovoltaik (Photovoltaic)
LCOE	Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (Levelized Cost of Energy)
SAM	Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model)

1 GİRİŞ

Fotovoltaik, enerji teknolojileri arasında en hızlı maliyet düşüşünü göstermiştir. Maliyet düşüşleri ve performans gelişimine paralel olarak, küresel FV dağıtımı hızla büyümüştür. Devam eden FV dağıtımı, enerji sistemlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının ve diğer kirliliğin azaltılmasına yardımcı olabilir ve iklim değişikliğinin azaltılmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, FV dağıtımının gelecekte sürdürülebilir bir büyüme deneyimlemesi için, özellikle güneş kesintisini ele almanın ek maliyetleri düşünüldüğünde daha fazla maliyet düşüş analizi ihtiyaç duyulabilir.

FV ve diğer teknolojilerdeki iyileştirme eğilimleri çeşitli araştırma toplulukları tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardaki yaklaşım, genellikle maliyet (veya diğer performans ölçütleri) ve üretim veya araştırma yatırım seviyelerine odaklanmıştır [1]. En yaygın kullanılan modellerden biri, bir teknolojinin maliyetini bir güç yasası olarak kümülatif üretimle ilişkilendiren deneyim eğrisidir. Bu ilişkiyi açıklayıcı veya öngörücü bir araç olarak kullanan çalışmalar, bir dizi teknoloji için performans iyileştirme oranlarını tahmin etmiştir [2]. Örneğin, kümülatif kapasite iki katına çıktığından, FV modül maliyetleri 1970'lerden bu yana %1'in altına düşmüştür [3]. Bu maliyet düşüşü için, kamu araştırma ve geliştirme çabaları ve pazar büyümesinin çeşitli sonuçları olmuştur; yaparak öğrenme, ölçek ekonomileri ve özel araştırma ve geliştirme çabaları. Bu çalışmalar, önemli yüksek düzeyli maliyet azaltma faktörlerinin varsayıldığı ve bunların maliyet üzerindeki etkilerinin ilişkilendirildiği teknoloji maliyet indirimlerine dayanmaktadır.

FV teknolojilerinin fiziğini dikkate alırken, bireysel maliyet bileşenlerinin toplam maliyetlere nasıl katkıda bulunduğuna dair bilgi sağlayan çalışmalara nadiren rastlanır. Bu tür çalışmalar ayrıca cihaz veya üretim düzeyinde gelecekteki teknik iyileştirmeler için yollar önerir ve gelecekte elde edilebilecek maliyet düşüşlerini öngörür. Bu bilgi, maliyet azaltma mekanizmalarını anlamak için gereklidir, ancak daha fazla modelleme ilerlemesi gerektirir.

1.1 Tezin Amacı

Kristal silisyum (c-Si) fotovoltaikler sağlam, üretilebilir ve dünyada bol miktarda bulunur. Ancak, c-Si modüllerinin sübvansiyonsuz hizmet ölçeğinde benimsenmesi için gerekli üretim maliyetlerinin elde edilmesinin önünde engeller vardır. c-Si fotovoltaiklerin bu hedefe ulaşma potansiyeli, c-Si plakaların, hücrelerin ve modüllerin üretimi için aşağıdan yukarıya bir maliyet modelinin geliştirilmesine bağlıdır. Bu nedenle, tezimizde iki temel

ölçütü belirlemek için bir maliyet analizi yapılacaktır: $\$/W_p$ ve seviyelendirilmiş elektrik maliyeti. Bu sayede maliyet düşürme potansiyeli yüksek araştırma alanları belirlenecektir.

Daha genel olarak, bu tez çalışması, pazar etkisine dayalı olarak araştırma ihtiyaçlarına öncelik veren, kullanıcı hedefli bir araştırma ve geliştirme çerçevesi sunmaktadır.

1.2 Araştırma Problemi

Çalışmanın temel amacı, fotovoltaiklerin geleneksel enerji üretimi ile rekabet edebilirliğini karşılaştırmak için son derece önemli olan $\$/W_p$ ve Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti gibi temel ölçütleri belirlemek için c-Si fotovoltaikler için aşağıdan yukarıya bir maliyet analizi yapmaktır. Maliyet azaltma üzerinde en büyük etkiye sahip araştırma alanlarını belirlemeye ek olarak yapılmaktadır.

1.3 Hedefler

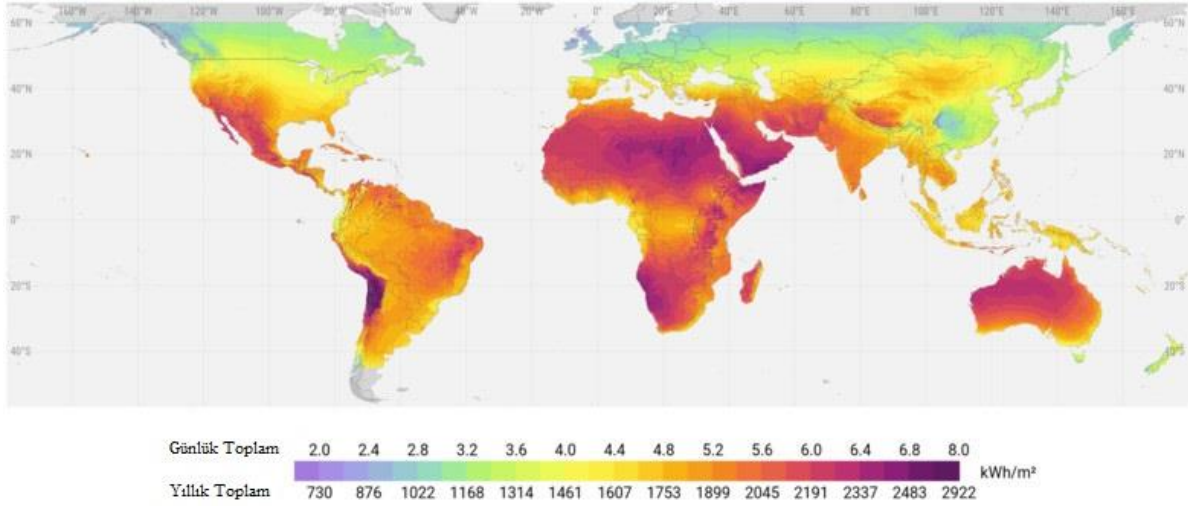
- Kentsel Çin'de 1.0 GW'den fazla üretim yapan bir tesiste c-Si fotovoltaik için $\$/W_p$ metriğini belirlemek için aşağıdan yukarıya bir maliyet analizi modeli kullanmak.
- Fotovoltaik endüstrisi için maliyet düşürmede en büyük etkiye sahip araştırma alanlarını sonuçlandırır.
- Phoenix, Arizona - ABD'de c-Si fotovoltaikler için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetinin Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti Hesaplama yazılımı (Sistem Danışmanı Modeli/ System Advisor Model - SAM) yardımıyla belirlenmesi.

1.4 Tez Düzeni

- 1- Birinci Bölüm: Bu bölüm, tezin amacını ve önemini, problem ifadesini, araştırmanın amaçlarını, tezin düzenini ve alanın teorik temellerini içerir.
- 2- İkinci Bölüm: Fotovoltaik alanındaki ilgili çalışmaların literatür taraması.
- 3- Üçüncü Bölüm: Elektriğin seviyelendirilmiş maliyetini belirlemek için benimsenen maliyet analizi yönteminin ve kullanılan yazılımın detaylandırılması.
- 4- Dördüncü Bölüm: Elde edilen sonuçları ve ilgili tartışmaları gösterir.
- 5- Beşinci Bölüm: Elde edilen bulgular hakkında bir sonuç çıkarır. Çalışmanın geleceğe yönelik tahminlerini önerir ve yaşam döngüsünde en büyük maliyet düşürme etkisine sahip araştırma alanlarını netleştirir.

1.5 Güneş Enerjisi:

Güneş kaynağının bolluğunu göstermek için, günlük ve yıllık toplamların uzun vadeli yıllık ortalamalarında küresel yatay maruziyet aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Güneş Enerjisi[4]

1.5.1 Neden Güneş Enerjisi?

- 1- Enerji, insani gelişme için gerekli bir bileşendir.
- 2- Güneş kaynağı boldur.
- 3- Güneş kaynak dağılımı, artan insan enerji talebine iyi uyum sağlar.
- 4- Güneş yenilenebilir ve fosil enerjilere göre 5-10 kat daha düşük karbonlu bir enerji kaynağıdır [5].

Güneşten gelen enerji bedava ve güneş parlamaya devam edecektir. Güneş enerjisi yorulmak bilmez ve yenilenebilir olmakla birlikte, parlaklığı çevre dostudur. Güneş enerjisi sistemi, çevreye zararlı olan CO₂ yaymaz. Ayrıca güneş pillerinin yapımında kullanılan hammadde olan silisyum, yerkabuğunda en bol bulunan ikinci elementtir. Güneş enerjisi endüstrisinin gelişmesi ve teknolojinin artması nedeniyle FV güç sistemleri hem ticari hem de evsel kullanım için etkilidir. Son zamanlardaki fiyat indirimleri nedeniyle FV sistemlerinin fiyatları da artık daha uygundur. Buna karşılık, ana enerji kaynaklarımız olan fosil enerjiler tükeniyor. Fosil enerjilere olan yüksek bağımlılığımız, kaçınılmaz olarak, tükenene kadar fiyatlarını sürekli olarak artıracaktır. Azalan enerji kaynakları yenilenemez ve çevre açısından tehlikelidir. Son iklim değişikliği, kısmen, fosil enerjilerin yakılmasının neden olduğu atmosferdeki artan CO₂ konsantrasyonunun bir sonucudur [6].

Bu nedenle, garantili enerji arzı ve çevre koruma için alternatif yenilenebilir enerji kaynakları aramamız esastır. Bunun cevabı ise güneştir.

1.5.2 Güneş Enerjisine Giden Yol

- 1- Solar hem maliyet hem de ölçekte geleneksel fosil enerji bazlı enerji kaynaklarıyla yakınsama için hızlı bir yol izlemektedir.
- 2- Güneş enerjisinin geniş çapta benimsenmesini engelleyen çok sayıda zorluk tanımlanmıştır.
- 3- Bu zorluklara yanıtlar, FV teknolojisi, üretim ve dağıtım buluşlarında gömülüdür.
- 4- Bu sonuçları geliştirmek için geleceğin liderlerini yetiştirmek için bilim, teknoloji ve kesişen temalar hakkında sağlam bir temel anlayış gereklidir.

1.6 Fotovoltaik Cihaz Temelleri

- 1- Yük Oluşturma Işığı: elektronları uyarır ve kristalin etrafında hareket etmeleri için serbest bırakır.
- 2- Yük Ayrımı: Malzemeye (pn bağlantısı) yönlendirilen bir elektrik alanı elektronları süpürür.
- 3- Yük Toplama: Elektronlar enerjilerini harici bir yükte biriktirir, devreyi tamamlar.

1.7 Güneş Enerjisi Dönüştürme Teknolojisi

Güneş enerjisi dönüştürme teknolojisi, çıkış enerjisi türüne göre birçok kategoriye ayrılır. Aşağıdaki çizelge, güneş enerjisi dönüşüm teknolojisi kategorilerini açıklamaktadır.

Çizelge 1.1. Güneş Enerjisi Dönüştürmek Teknolojisi [7]

Güneş Enerjisi Dönüştürmek Teknolojisi							
Güneşten Elektrige		Güneşten Isıya Elektrige		Güneşten Isıya		Güneşten Yakıtlara	
Takipli	Takipsiz	Takipli	Takipsiz	Takipli	Takipsiz	Takipli	Takipsiz

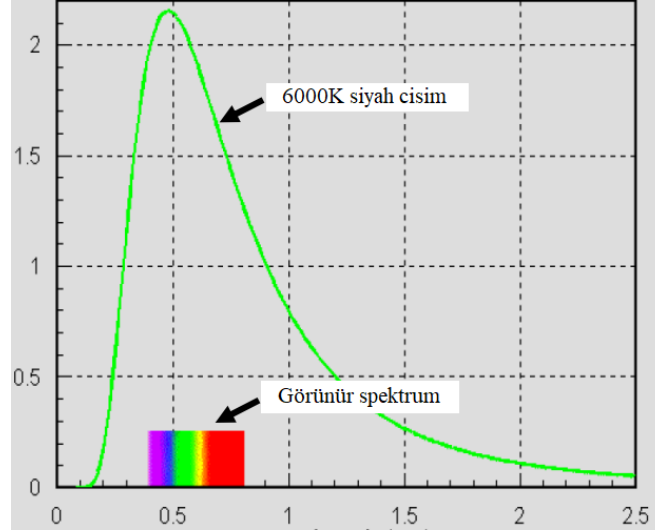
1.8 Hava Kütlesi

Hava Kütlesi, ışığın mümkün olan en kısa yol uzunluğu (yani, güneş doğrudan tepedeyken) normalize edilmiş atmosferde aldığı yol uzunluğudur. Hava Kütlesi, atmosferden geçerken ve hava ve toz tarafından emilirken ışığın gücündeki azalmayı ölçer.

1.9 Güneş Spektrumu

Güneş spektrumu, farklı yoğunluklarla ilişkili farklı türde dalga boyları içerir. Aşağıdaki tablo güneş ışığı yoğunluğunu ($\text{kWh/m}^2/\mu\text{m}$) ve dalga boyunu göstermektedir.

Çizelge 1.2. Güneş Işığı Yoğunluğu ($\text{kWh/m}^2/\mu\text{m}$) Vs Dalga Boyu[7]



1.9.1 Güneşlenme

Tipik olarak şu birimlerle verilir: birim alanda birim zamanda Enerji ($\text{kWh/m}^2/\text{gün}$):

FV sistemleri tasarlarken veya projelendirirken faydalıdır: Beklenen verim.

Etkilenenler: enlem, yerel hava durumu modelleri vb.

Sabit bir güneş enerjisi dizisi monte edilirken güneşin sabit bir zemin konumuna göre yörüngesi önemlidir.

Yerel hava durumu modelleri, günün belirli saatlerinde güneşe maruz kalmayı sınırlayabilir [7].

1.10 Temel Bilgiler

Her fotovoltaik cihaz aşağıdakilere uymalıdır:

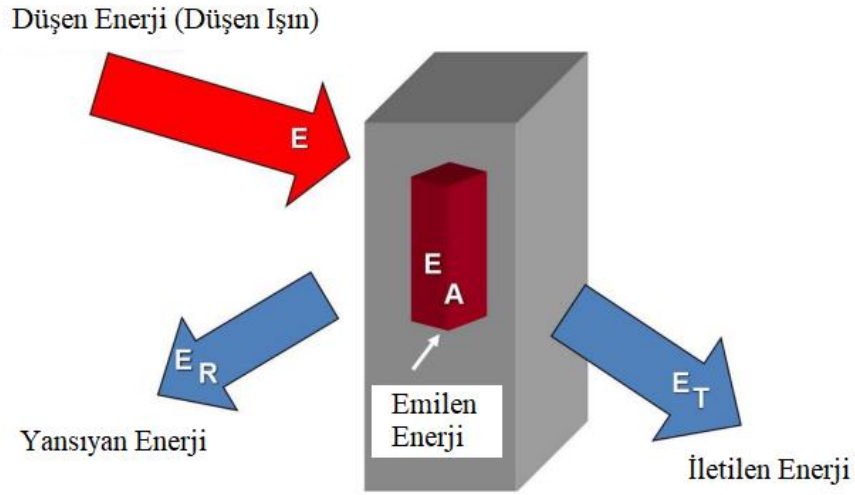
$$\text{Dönüştürme Verimliliği} = \frac{\text{Çıkış Enerjisi}}{\text{Giriş Enerjisi}}$$

1.10.1 Güneş Pillerinde Işık Yönetimi

Soğurulmayan fotonlar, faydalı enerji oluşturmak için kullanılamaz. (Soğurulmamış, iletilen veya yansıtılan anlamına gelir).

Sadece emilen enerji faydalı enerji üretebilir, bu yüzden bu kesri maksimize etmek istenmektedir.

Aşağıdaki şekil güneş pillerinde ışık emilimini göstermektedir.



Şekil 1.2. Güneş Pillerinde Işık Emilimi

1.10.2 Fotonlar – Işık Kuantası

Kuantum teorisi, foton enerjisinin frekans bağımlılığını tanımlar.

Görünür foton dalga boyları yüzlerce nanometre (nm) cinsindendir (güneş spektrumu tepe noktası ~ 550 nm).

Görünür foton enerjileri 0,6-6 elektron volt (eV) aralığındadır (güneş spektrumu tepe noktası ~2,3 eV).

İlgili formül:

$$E_{ph} = h\nu$$

E_{ph} : Foton enerjisini temsil eder.

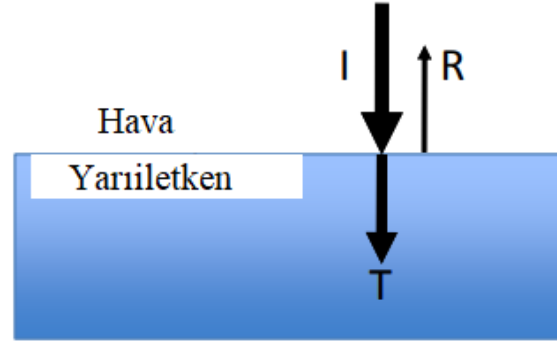
h : Planck sabiti.

ν : dalga frekansı.

Görünür ışık için tipik olan düşük enerjilerde (tek eV'ler), fotonlar öncelikle değerlik elektronları ile etkileşime girer [7].

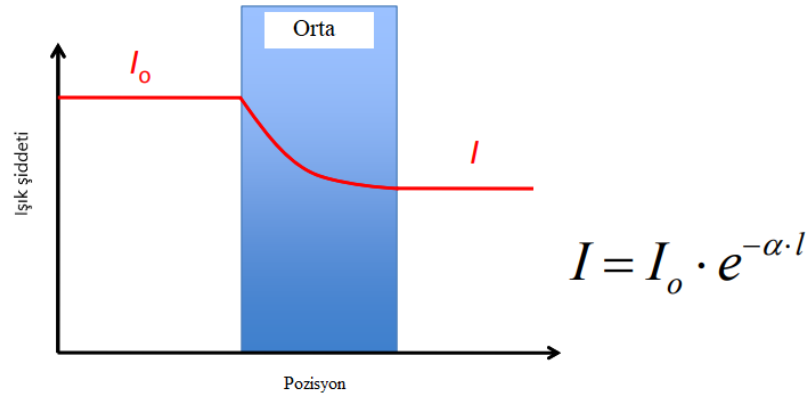
1.10.3 Fotonlar – Bir Yüzeyden Yansımalar

Görünür dalga boylarında, yansıyan ışının çoğu, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, kırılma indisinin gerçek doğasına bağlıdır:



Şekil 1.3. Havadan Katıya Yansıma [7]

Fotonlar – bir ortamdan iletim aşağıdaki şekille gösterilmektedir:



Şekil 1.4. Fotonlar – Bir Ortamdan İletim [7]

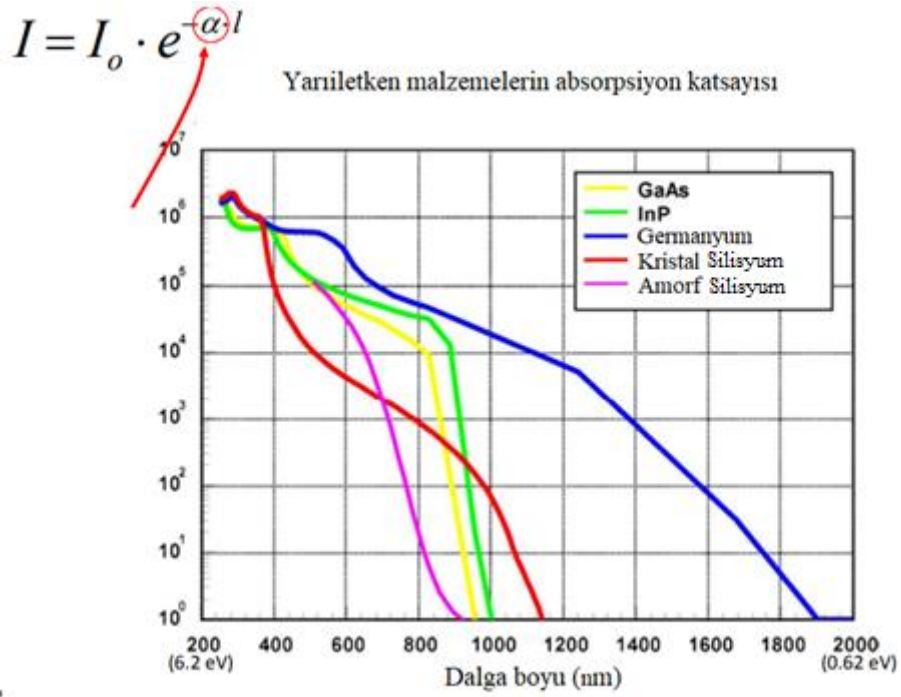
I_0 : ilk şiddeti

I : şiddet

α : absorpsiyon katsayısı

l : pozisyon

α (absorpsiyon katsayısı), aşağıdaki çizelgede gösterildiği gibi ışığın dalga boyunun ve ortamın özelliğinin bir fonksiyonu:



Şekil 1.5. Farklı malzemeler için Absorpsiyon Katsayısı (α) [7]

1.10.4 Optik Absorpsiyonu Geliştirme Yöntemleri

Optik absorpsiyonu geliştirme yöntemleri şunlardır[7]:

Yansıma önleyici kaplamalar

Dokulaştırma

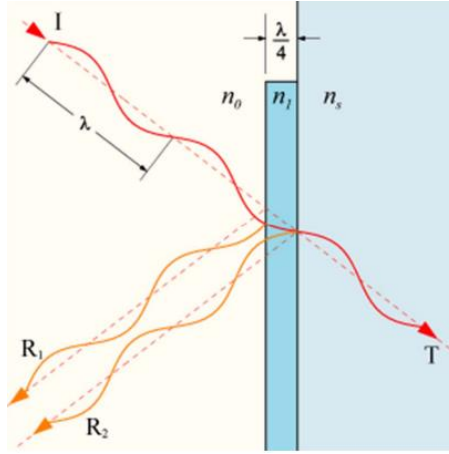
Arka yüzey yansıması, toplam iç yansıma

Plazmonikler

Faz kayması

1.10.5 Yansıma önleyici kaplamalar

Yansıma önleyici kaplama, ışığın yansıtıcılığını azaltmak ve absorpsiyon kısmını iyileştirmek için ışık yönetimi tekniklerinden biridir. Yansıma önleyici kaplama aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



Şekil 1.6. Yansımaya Önleyici Kaplamalar [7]

1.10.6 Optimum Film Kalınlığı

$$\tau = \frac{\lambda_0}{4n}$$

τ : kalınlık

λ_0 : Güneş spektrumunun zirvesindeki foton dalga boyu

n : kırılma indisi

1.10.7 Optimize Edilmiş Bir Yansımaya Önleyici Kaplamanın Nitelikleri

Soğurucu ve üst tabaka (hava, cam) arasındaki kırılma indisi.

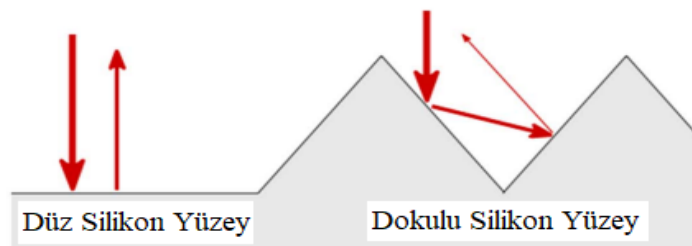
Çeyrek dalga boyu mertebesinde kalınlık (kırılma indisi için normalize edilmiştir).

İstikrarlıdır.

Yüzeydeki sarkan bağları pasifleştirerek ve yüzeydeki yükleri iterek (örneğin sabit yükler aracılığıyla) elektrik performansını artırır.

1.10.8 Dokulaştırma

Işığın absorpsiyonunu iyileştirmek için bir yüzey üzerinde çoklu yansımalar ortaya çıkar. Yüzeydeki çoklu yansımalar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



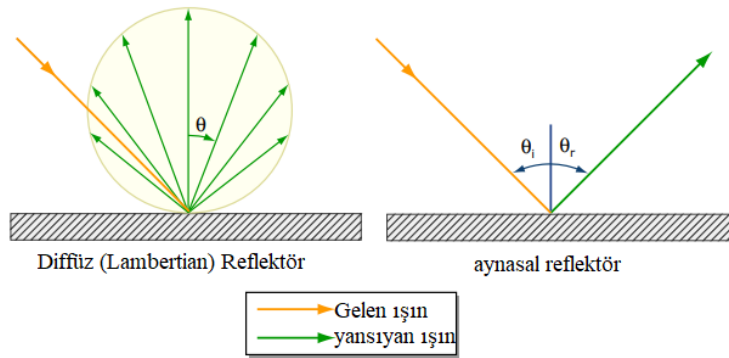
Şekil 1.7. Yüzeyde çoklu yansımalar [7]

Cihazın yüzeyinin tekstüre edilmesi şunlara neden olur:

- Işığın cihaza girme olasılığını artırın.
- Gelen ışığın etkili yol uzunluğunu artırın [7].

1.10.9 Lambert Reflektörü

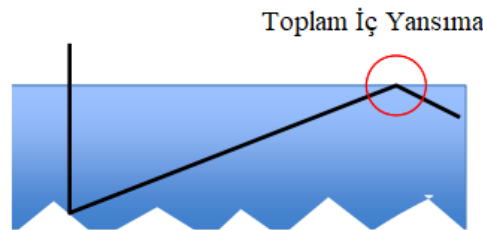
Lambert yansıma, dağınık bir şekilde yansıtan bir yüzeyi tanımlayan özelliktir. Bir Lambert yüzeyinin bir gözlemciye görünen parlaklığı, gözlemcinin görüş açısından bağımsız olarak aynıdır. Lambert yansıması aşağıdaki şekil ile gösterilmiştir:



Şekil 1.8. Lambert Reflektörü [8]

1.10.10 Arka yüzey yansıması, toplam iç yansıma

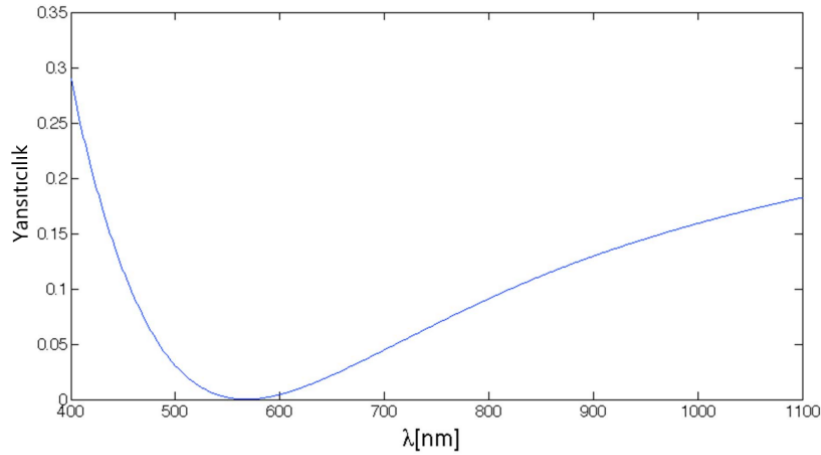
Dokulu arka yüzey, aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



Şekil 1.9. Dokulu Arka Yüzey [7]

Yablonovitch Limiti: $4n^2$: optik yol uzunluğunda maksimum artış, n : kırılma indisi [9].

550nm'de optimize edilmiş Optimize SiNx için Spektral Yansıma, aşağıdaki şekille gösterilmektedir:



Şekil 1.10. 550nm'de optimize edilmiş Optimize SiNx için Spektral Yansıma [7]

SiNx kalınlığı belirli bir dalga boyu için optimize edildiğinde, diğer dalga boyları zarar görür.

1.10.11 Işık Yönetimi

Fotovoltaiklerin başarısı, olay aydınlatmasının emilimini artırmak için ışık yönetimi stratejilerinin tanıtılmasına dayanır. Bu stratejileri ışığın emilimini en üst düzeye çıkarmak için uyarlamak, çoklu tasarım parametreleri arasındaki karmaşık etkileşimi optimize etmeyi gerektirir. Işık yönetimi teknikleri aşağıdaki faydaları sağlar [7]:

- “Işık Yönetimi” Yüksek Emilimi sağlar.
- Işığın soğurucuya girmesini sağlar (yansımayı en aza indirmek).
- Soğurucunun içinde iyi bir ışık tutulmasını sağlar.
- Optik geliştirmek için gelen ışığın dalga boyunu değiştirir.
- Bant yapısını manipüle ederek malzemenin optik absorpsiyon katsayısını değiştirir.

1.11 Sera Gazları ve Ortalama Küresel Sıcaklık

600.000 yılı aşkın bir süredir, sera gazları ile küresel sıcaklık arasında güçlü bir ilişki mevcuttur. Son 12.000 yıldır, küresel sıcaklıklar, insan uygarlıklarının yükselişiyle aynı zamana denk gelecek şekilde sabit kalmıştır [10].

>%85 küresel enerji fosil yakıtlardan gelmektedir.

Enerji, GSYİH ve CO₂ arasında güçlü bir ilişki vardır.

Küresel enerji ihtiyacının istikrarlı bir şekilde artması öngörülmektedir.

CO₂ seviyeleri artmaya devam edecektir.

>Atmosferik CO₂ içeriğinde %20 artış vardır.

1.12 Maliyet, Fiyat ve Destek Mekanizmaları

Maliyet, fiyat ve destek mekanizmaları, fotovoltaik teknolojinin analizinin temelini oluşturur. Bu analiz, geleneksel enerji kaynaklarına karşı rekabet gücünü belirler.

1.12.1 Maliyet Kaldıraçları:

Verim

İşleme maliyetleri (\$/m²)

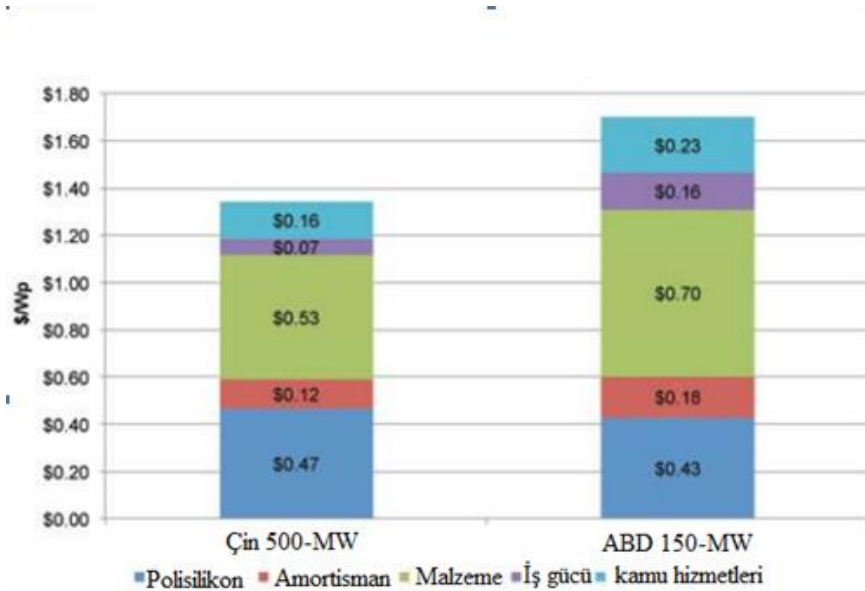
Üretim verimi

Sermaye ekipman maliyeti

Genel gider [7]

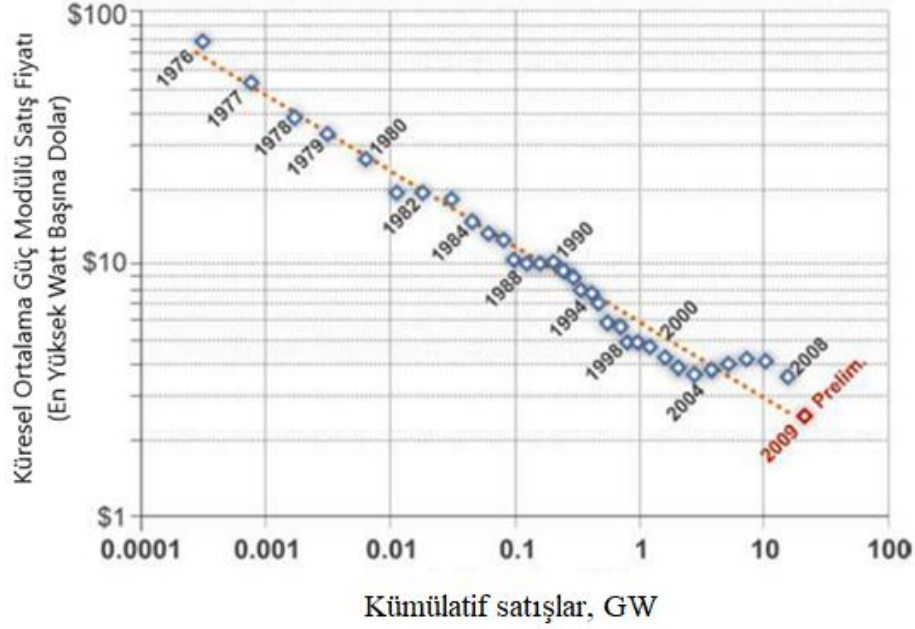
Tam yüklü üretim maliyeti, Çin - ABD, 2010, aşağıdaki çizelge ile gösterilmektedir:

Çizelge 1.3. Tam yüklü üretim maliyeti, Çin - ABD, 2010 [7]



Şebeke Paritesi için Gereken 2-3 Kat Maliyet Azaltımı, aşağıdaki çizelge gösterilmektedir:

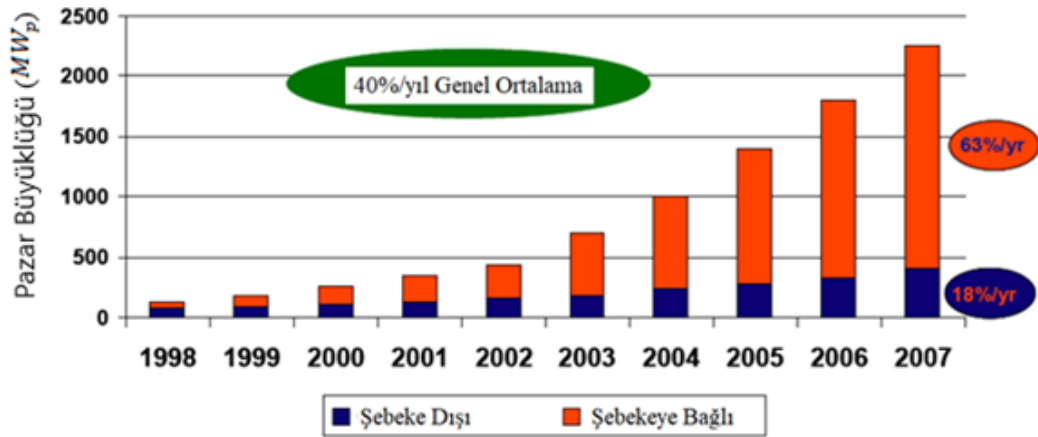
Çizelge 1.4. Şebeke Paritesi için 2-3 Kat Maliyet Azaltma Gerekıyor [7]



1.12.2 FV: Ölçek

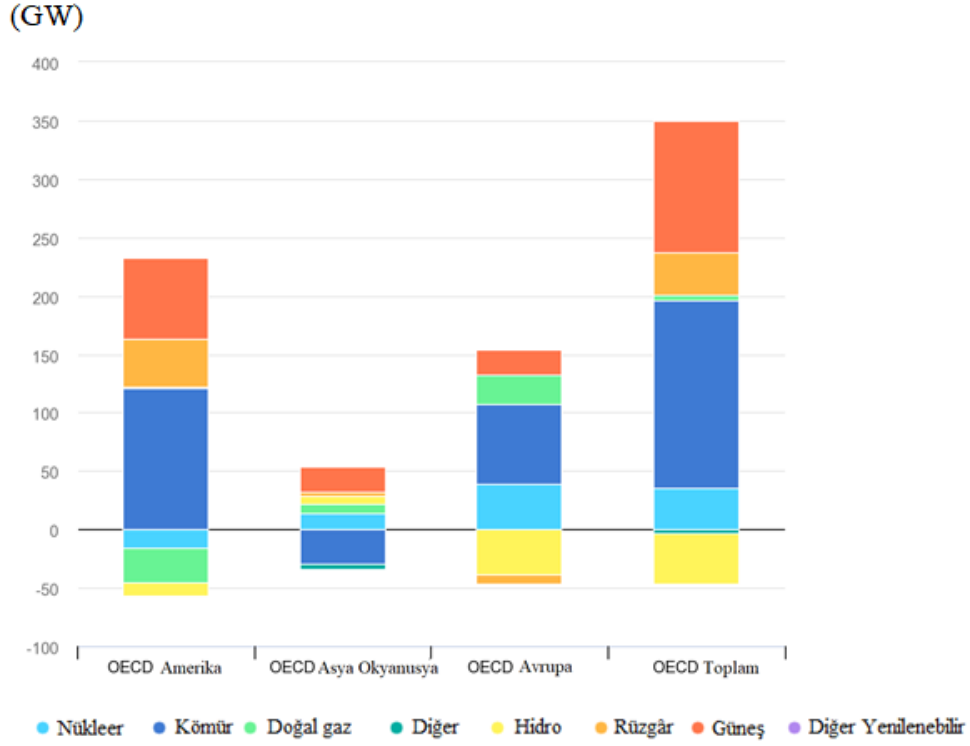
Pazar değişiklikleri aşağıdaki çizelge gösterilmiştir:

Çizelge 1.5. Pazar Değişiklikleri [11]



OECD bölgelerinde 2020'den 2021'e değişen toplam elektrik üretimi aşağıdaki çizelge gösterilmektedir:

Çizelge 1.6. OECD bölgelerinde toplam elektrik üretimi, 2020'den 2021'e değişiklik[12]



Tarihsel olarak c-Si, küresel FV modülü pazarına hakim olmuştur. Toplam modül kapasitesinin yaklaşık 40 GW olduğu 2014 yılında FV üretiminin %90'ından fazlasını oluşturdu ve toplam modül kapasitesinin yaklaşık 124 GW olduğu 2019 yılında FV gönderilerinin yaklaşık %94'ünü oluşturdu [13].

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

D. M. Powell ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada: kristal silisyum (c-Si) fotovoltaiikler sağlam, üretilebilir ve dünyada bol miktarda bulunur. Bununla birlikte, c-Si modüllerinin sübvansiyonsuz hizmet ölçeğinin benimsenmesi için gerekli olan 0.50–0.75 ABD \$/Wp fabrikasyon maliyetlerine ulaşmasının önünde engeller bulunmaktadır. C-Si fotovoltaiiklerinin bu hedefe ulaşmak için potansiyelini c-Si plaka, hücre ve modül üretimi için aşağıdan yukarıya bir maliyet modeli geliştirerek değerlendiriyoruz; maliyet üzerinde en büyük etkiyi sağlayan araştırma alanlarını belirlemek için bir duyarlılık analizi yapmak ve ileri teknoloji inovasyonunun yanı sıra, görüş alanı üretim inovasyonu ve ölçeğinin maliyet düşürme potansiyelini değerlendirmek. Verimliliği artırmak, silisyum kullanımını iyileştirmek ve üretim süreçlerini ve ekipmanı düzene koymak dahil olmak üzere büyük maliyet düşürme potansiyeline sahip araştırma alanlarını belirliyor ve bu araştırma alanlarını etkileyen devam eden araştırma ve geliştirme faaliyetlerini kısaca gözden geçiriyoruz. Amerika Birleşik Devletleri'nde silisyum emicilerle 0.50 ABD \$/Wp modül üretimini mümkün kılmak için birden fazla teknoloji yolunun mevcut olduğu sonucuna vardık. Daha genel olarak, bu çalışma, piyasa etkisine dayalı araştırma ihtiyaçlarını önceliklendiren, kullanıcı hedefli bir araştırma ve geliştirme çerçevesi sunar [14].

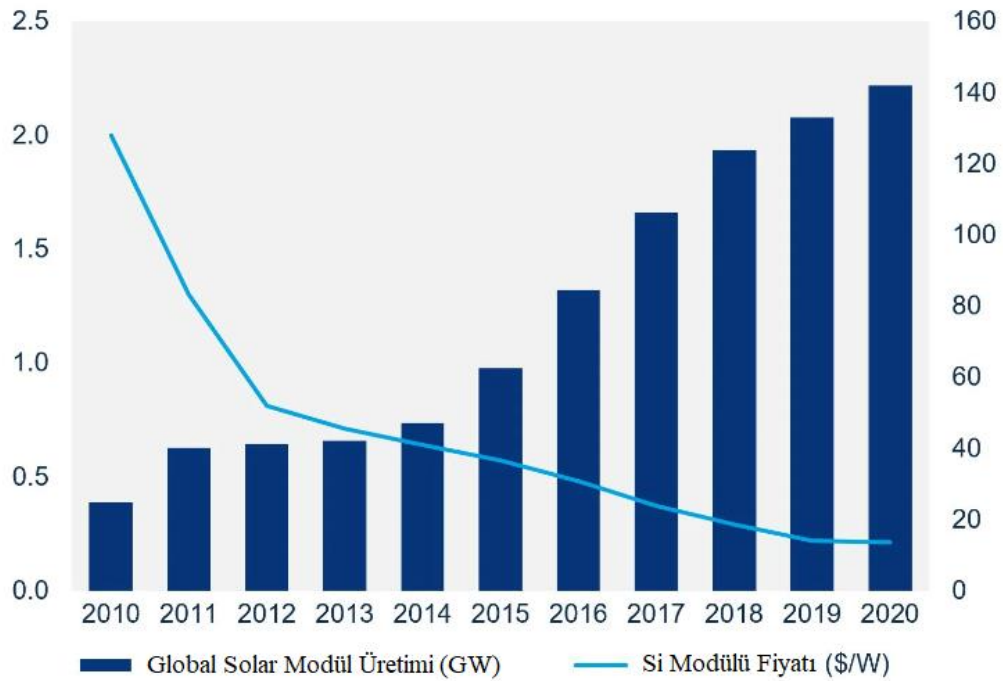
Kelsey A. W. Horowitz ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada: III-V çok bağlantılı hücrelerin aşağıdan yukarıya bir modelinin yanı sıra yüksek konsantrasyonlu bir FV (HCFV) modülü sunuyoruz. HCFV modül tasarımı için bugünün yetenekleriyle 0.59\$/W (DC) üretim maliyetleri hesaplıyoruz ve hücre maliyetlerini düşürmenin ve modül verimliliğini artırmanın, gelecekteki maliyet düşürmeleri için en umut verici yolları sunduğunu görüyoruz. Hücre maliyetleri, alt tabakanın yeniden kullanılması ve iyileştirilmiş üretim verimi ile önemli ölçüde azaltılabilir [15].

Sergio Shimura ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada: güvenilirlik kullanarak bir fotovoltaiik tesisin Seviyelendirilmiş Enerji Maliyetini (SEM) ve kullanılabilirliğini tahmin etmek için yeni bir metodoloji önermektedir. Geleneksel SEM tahmin yöntemi, bakım maliyetleri olarak rastgele yatırılan sermayenin yüzdesini kullanır. Ayrıca, teslim edilen enerji hesaplaması, üretimi durduran olaylardan (düzeltici ve önleyici bakım) kaynaklanan üretim kaybını içermez. Bu sorunları ele almak için önerilen model, her bileşenin verimini, operasyon maliyetlerini, ekip ve yedek parça yönetimi stratejisini, zaman ve arızalar için

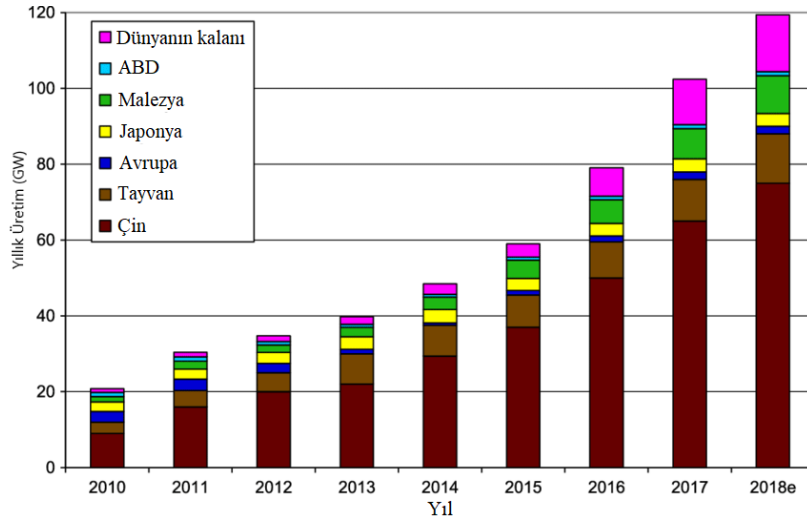
istatistiksel modelleri içerir. Üç farklı topolojiye sahip bir vaka çalışmasının sonuçları, bakım maliyetlerinin 7978.54 ABD doları ile 16,271.06 ABD doları arasında değiştiğini göstermektedir; SEM 115.31 ABD \$/MW saate 150.67 ABD \$/MW saate ve kullanılabilirlik %98.53'ten %99.01'e kadardır. Son olarak, olağan SEM tahmin yöntemiyle karşılaştırıldığında en yüksek fark, enerji maliyetinin %10.11 daha yüksek olduğu String Inverter topolojisi için gözlemlenir. Bu varyasyonlar, topoloji ve operasyon stratejisinin SEM üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir [16].

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (2017) yaptıkları çalışmada: güneş Panellerinin Zaman İçinde Maliyeti, aşağıdaki çizelge ile gösterilmektedir:

Çizelge 2.1. Güneş Panellerinin Zaman İçinde Maliyeti [17]



A. Jäger-Waldau ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada: 2010'dan 2018'e kadar Dünya FV Hücre/Modül Üretimi, aşağıdaki çizelge ile gösterilmektedir:

Çizelge 2.2. 2010'dan 2018'e Dünya FV Hücre/Modül Üretimi [18]

2017 yılında küresel hücre üretimine ilişkin üretim verileri 94 ile 100 GW arasında değişmekte olup, 2018 için tahminler 105 – 115 GW aralığındadır. Bu verilerdeki önemli sorgu, büyük ölçüde rekabetçi talep alanından ve ayrıca bazı şirketlerin yük numaralarını bildirirken, diğerlerinin anlaşmaları ve yine diğerlerinin ürün numaralarını bildirmesinden kaynaklanmaktadır. Çin, 2015 yılında toplam kurulu nominal kapasite açısından Almanya'yı yakaladıktan sonra, 2016'da Japonya ve 2017'nin başında ABD onu takip etmiştir [18].

2017'deki ürün hacmi, 40'ın üzerinde Bileşik Periyodik Büyüme Oranı ile 2000 yılının yaklaşık 320 katıydı. Hindistan, Malezya, Filipin veya Vietnam gibi diğer Asya ülkelerindeki ürün kapasiteleri. Bu yatırımların en büyük payının Çinli şirketler tarafından yapıldığını belirtmekte fayda vardır. FV sağlamlığındaki bir başka eğilim, 2011'den bu yana Orijinal Ekipman Üreticisi hacimlerindeki hızlı artış oldu ve bu da daha büyük şirketlerin kendi kapasitelerini eklemekten yük hacimlerini önemli ölçüde artırmalarına izin vermiştir.

Halka açık şirketlerin borsa raporlarından, piyasa raporlarından ve iştiraklerden toplanan veriler, birçok veri kaynağıyla karşılaştırıldı ve bu nedenle 2016'ya göre yaklaşık 26'lık bir artışı temsil eden 97 GW'lık bir tahmine yol açtı ve yaklaşık 15'lik bir artış daha oldu. 2018 için bekleniyor [18].

İlk olarak 2007 ve 2011 yılları arasındaki büyük kapasite artışlarıyla tetiklenen güneş enerjisi endüstrisindeki kapasite fazlası, yalnızca kademeli olarak hafiflemiştir. Değer zinciri boyunca devam eden bir fiyat baskısı vardır. Ayrıca, spot piyasa fiyatlarının oynaklığı da büyük ölçüde artmıştır [18].

Güneş enerjisi sistemi donanımı için hızlı fiyat düşüşleri, tüm güneş enerjisi şirketlerini muazzam bir baskı altına soktu ve büyüme için taze sermayeye erişim, hayatta kalmak için çok önemliydi ve hala çok önemlidir. FV imalat endüstrisindeki bağlantı, 2009 yılından bu yana önemli sayıda şirketin kapanmasına veya devralınmasına neden olmuştur. Bu arızalara ve ürün hatları boşa olan veya aslında ürün kurulumlarını kalıcı olarak kapatan şirketlere rağmen, alana yeni girenlerin sayısı, özellikle büyük yarı iletken, inşaat veya enerji ile ilgili şirketler dikkat çekicidir ve yaklaşan kapasite geliştirmeleri için makul bir oyuncu kadrosunu oldukça spekülative hale getirir [18].

2014'ün başlangıcından bu yana, yeni kapasite artırımlarının reklamları önemli ölçüde arttı. 2017 yılının ilk üç çeyreğinde, kristal silisyum güneş pilleri (> 37 GW) ve ince film güneş pilleri (yaklaşık 2.7 GW) için yaklaşık 40 GW yeni üretim kapasitesi açıklandı. Yine de bu reklamlar ve doğrulanmış kıyafet siparişleri arasında büyük bir fark var. Ek olarak, devam eden maliyet baskısı ve gelişmiş kenarlı modüllere yönelim, eski ürün hatlarının yükseltilmesi veya bu gelişmiş etkili güneş pillerini üretebilecek üretim kapasiteleriyle değiştirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koyuyor. Bu nedenle, güneş pillerinin toplam net kapasite artışı, reklamların gösterdiğinden çok daha düşük olacaktır [18].

Genel eğilim hala, Çin'de ve özellikle Hindistan, Orta Doğu ve Güney Amerika'da yeni pazarlarda yıllık 50 GW'lık bir talep fırsatıyla beslenen daha fazla kapasite reklamları yönüne işaret ediyor. Solar fotovoltaik imalat endüstrisindeki en son trend, imalat 4.0 konseptine geçişi hızlandırma eğilimidir. Ana sürücü, tamamen otomatik ve uzaktan kumandalı üretim hatları kullanarak daha fazla maliyet düşürme fırsatıdır. Diğer teknolojik buluşlarla birlikte bu gelişme, eski ürün ekipmanına sahip FV üreticilerini olumsuz etkiliyor. Örneğin, 10,000 ton periyodik ürün kapasiteli polisilikon ekipman için 2006 – 2007 yılları arasında 1.5 milyar ABD doları yatırım talep edilmiş, ancak aynı kapasiteye sahip benzer ekipmanların sermaye harcama maliyetleri 2017 yılında 90 adet azalmıştır. Polisilikon ve pul ürünü, elektrik fiyatlarının Çin'in kıyı bölgelerinden 75 – 90 daha düşük olabileceği ülkenin kuzeybatı ve güneybatı bölgelerinde yeni kuruldu. Elektriğin hala pul ve polisilikon ürün maliyetlerinin yaklaşık 20 ila 40'ını oluşturması nedeniyle, bu hareket ilgili ürün maliyetlerinde önemli bir azalmaya yol açar [18].

Ürün İstatistiklerindeki Yanlılıklar [18]

Sadece sınırlı sayıda şirket güneş pilleri veya ince film modülleri için ürün numaraları bildirmektedir. Yük numaraları, daha önce üretilen, stoktaki ürünleri içerebilir. Bazı şirketler, silisyum pulları, hücreler veya modüller arasında ayırım yapmadan “güneş enerjisi ürünleri”

sevkiyatını rapor etmektedir. Orijinal Ekipman İmalatına (OEİ) yönelik artan eğilim, çift sayım olasılığını artırıyor.

Ocak 2018'de Avrupa'da kurulumlu ancak izin ve bağlantı maliyeti olmayan konut sistemleri için dünya ortalama sistem fiyatı 1.52\$/Wp (1.22 EUR/Wp) ile Avrupa'da 1.23\$/Wp (1,05 EUR/Wp) arasında ve diğer bazı durumlarda 1.73\$/Wp'ye (1.38 EUR/Wp) kadar. Ticari sistemler için aralık 0.76\$/Wp (0.61 EUR/Wp)–1.57\$/Wp (1.26 EUR/Wp) olarak verildi. 2017 yılı için, projelendirme ve izin maliyetlerini de içeren bir proje için toplam sermaye harcaması, 5'inci yüzdelik dilim ile yüzde 95'lik dilim aralığı için kWp başına 898\$ ile 3754\$ arasında, ağırlıklı ortalama ise kWp başına 1388\$ olarak verildi. Ek olarak ortaya çıkan seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri, güneş radyasyonu, sabit işletme ve bakım maliyetleri, borç maliyeti ve ülkeden ülkeye farklılık gösteren öz sermaye getirisi beklentilerine bağlıdır. 2017 yılında gerçekleştirilen FV sistemlerinden LCOE için genel aralık 37\$/MWh ile 308\$/MWh arasındayken, alt uç, kamu hizmeti ölçekli projeleri ve üst uç konut çatı projelerini temsil etmektedir [18].

2009'dan bu yana, elektrik satın alma anlaşmalarının fiyatı, makul finansman maliyetleriyle dünyanın daha güneşli bölgelerinde yaklaşık %70 oranında azalarak 50\$/MWh'ye ulaştı. 2017 yılında yine bir dizi rekor kıran elektrik satın alma sözleşmesi ve 20 \$/MWh'nin altındaki teklifler görüldü ve Ekim 2017'de Suudi Arabistan'da 300 MW'lık bir proje için Masdar tarafından MWh başına 66.97 SAR veya 17.86 \$'lık bir teklifle yeni bir düşük gözlemlendi. Ayda 3040 GWh güneş fotovoltaik elektriği için MWh başına ortalama 20.8 \$ fiyatla teklifler gördü. Kazanan konsorsiyumun en geç 1 Ocak 2020'de elektrik dağıtımına başlaması gerekiyor. Şili, Meksika ve Arabistan'daki bu çok düşük teklifler ve enerji satın alma anlaşmaları ancak mükemmel güneş enerjisi kaynakları, yüksek borç payları ve çok düşük borç maliyetlerinin bir kombinasyonu ile mümkündür. Bunların yanı sıra bazı tarifelerin enflasyona endeksli olması ve elektrik dağıtımının başlamasının 2020 kadar geç olabilmesi mevcuttur [18].

2017, güneş enerjisine yapılan toplam küresel yatırımın %18'lik bir artışla 137 milyar dolardan 161 milyar dolara çıktığını gördü. Aynı zamanda, yeni fotovoltaik gücün yıllık kurulu kapasitesi %25'ten fazla artarak 94 GW'nin üzerine çıktı. 2018 FV pazarı için piyasa tahminleri, 100 GW aralığında bir konsensüs değeriyle 94 ile 111 GW arasında değişmektedir. Önümüzdeki yıllar için benzer bir büyüme oranı beklenirken, bu, IEA Yenilenebilir Enerji 2017 Raporunda 2017 ve 2022 yılları arasında yaklaşık 580 GW güneş FV kapasitesi ilavelerinin hızlandırılmış senaryosunu bile aşıyor. Bu, çoğunlukla şebekeye bağlı fotovoltaik

pazarını temsil eder. Şebekeden bağımsız ve tüketici ürünleri pazarlarının ne ölçüde dahil edildiği açık değildir, ancak bu pazarların önemli bir bölümünün takip edilmesi çok zor olduğu için hesaba katılmadığına inanılmaktadır. Ancak, artan pazar büyüklüğü ile bu segmentler yüzde olarak küçülür [18].

Goksin Kavlak ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada: fotovoltaik (FV) modül maliyetleri kırk yılda hızla düşmüştür, ancak nedenler belirsizliğini korumaktadır. Burada, bir teknolojiadaki maliyet değişikliklerinin nedenlerini ölçmek için kavramsal bir çerçeve ve nicel bir yöntem geliştiriyor ve bunu FV modüllerine uyguluyoruz. Yöntemimiz, maliyeti zaman içinde değişen değişkenlere ayıran bir maliyet modeliyle başlar. Daha sonra her bir değişkenin katkısını ölçmek için maliyet değişikliği denklemleri türetilir. Düşük seviyeli maliyet düşürme mekanizmaları olarak adlandırdığımız maliyet modeli değişkenlerinde gözlemlenen değişiklikler ile yüksek seviyeli mekanizmalar olarak adlandırdığımız araştırma ve geliştirme, yaparak öğrenme ve ölçek ekonomileri arasında ayırım yapıyoruz. Artan modül verimliliğinin 1980-2012 döneminde maliyet düşüşünün önde gelen düşük düzeyli nedeni olduğunu ve düşüşün neredeyse %25'ine katkıda bulunduğunu görüyoruz. Devlet tarafından finanse edilen ve özel Ar-Ge, bu dönemdeki en önemli üst düzey mekanizmaydı. Bununla birlikte, 2001'den sonra, ölçek ekonomileri, Ar-Ge'ye önem vererek, maliyet düşürmenin daha önemli bir nedeni haline geldi. Pazar büyümesini teşvik eden politikalar, özel olarak finanse edilen Ar-Ge ve ölçek ekonomileri aracılığıyla ve daha az bir ölçüde yaparak öğrenme yoluyla FV'nin maliyetini azaltmada kilit bir rol oynamıştır. Burada sunulan yöntem, geriye dönük veya ileriye dönük olarak birçok teknolojiyi ve maliyetin yanı sıra performans ölçütlerini incelemek için uyarlanabilir [19].

Keziban ÇALIK ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada: yüksek konsantrasyonlu fotovoltaikler, uzun süredir, gelen güneşi küçük fotovoltaik hücrelere yoğunlaştırmak için uygun fiyatlı optikler kullanarak maliyetleri düşürmenin bir yolu olarak düşünülmüş ve ihtiyaç duyulan değerli yarı iletken malzemenin kuantumunu azaltmıştır. Yine de, geleneksel, düz plaka fotovoltaik için modül fiyatları düşmüştür ve bu nedenle mevcut yüksek konsantre fotovoltaik maliyetleri ve olasılığı hakkında daha derin bir anlayışa ihtiyaç vardır. Bu çalışma, bir Fresnel lens, ikincil optik eleman ve III-V triadik bağlantı hücreleri kullanan bir sistemin aşağıdan yukarıya üretim maliyeti modelini kullanarak bu sorunları aydınlatmayı amaçladı.

Bu model, tüm yüksek konsantrasyonlu fotovoltaik tasarımlarını temsil etmese de sayısız pazarlanabilir modülle aynı temel ilkeleri içerir ve bu nedenle bu teknolojinin maliyet sürücülerini anlamak için makul bir başlangıç noktası sunar [20].

R. M. David Feldman ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada: endüstri olgunlaştıkça ve en büyük küresel ölçekte üretime ulaştığından, güneş panellerinin maliyeti son on yılda önemli ölçüde azaldı. 2010'dan bu yana güneş paneli fiyatları kabaca %90 düşerken, küresel güneş enerjisi dağıtımı %400'ün üzerinde arttı ve tüm küresel güneş enerjisi tedarik zincirindeki bu inanılmaz büyüme oranı fiyatları önemli ölçüde düşürdü [21].

Tıpkı bilgisayarlar, büyük ekran TV'ler ve cep telefonları gibi, güneş panellerinin şimdi sahip olduğu ölçek ekonomileri, enerji endüstrisini temelden değiştiren dramatik bir maliyet eğrisi üretti. Şebeke ölçekli güneş enerjisi tesisatları artık dünyanın birçok yerinde diğer tüm elektrik üretim biçimlerinden daha ucuz ve kömür ve doğal gazla çalışan eski, daha kirli enerji santrallerinin yerini almaya devam edecek. Ek olarak, ev sahipleri artık elektrik üretimlerine her zamankinden daha uygun maliyetli bir şekilde sahip olabiliyorlar [21].

Watt Başına Güneş Paneli Fiyatı

Bir güneş enerjisi sisteminin watt başına fiyatı, ev sahibinin kurulmakta olan her watt güneş enerjisi için ödeyeceği fiyattır. Bir güneş sistemi için watt başına fiyatı hesaplamak için: Brüt sistem maliyetinin sistemdeki watt sayısına bölümü ile bulunur [21].

Kilowatt-Saat Başına Güneş Paneli Fiyatı

Watt başına fiyat, güneş enerjisi tekliflerinin nispi maliyetlerini karşılaştırırken en çok yardımcı olur, kilowatt-saat başına fiyat, çoğunlukla, gücünüzü elektrik kuruluşundan almaya devam etmenin temel durumuna göre güneş enerjisinin değerini göstermek için kullanılır. Elektrik faturaları sürekli artan oranlara tabi olsa da, bir güneş enerjisi sistemi satın almak, 25 yıllık elektrik için sabit bir fiyatla ön ödeme yapmak ve sizi onlarca yıllık oran artışlarından korumak olarak düşünülebilir [21]. Watt başına güneş fiyatı ile kilowatt-saat başına güneş fiyatı arasındaki karşılaştırma, aşağıdaki çizelge gösterilmektedir:

Çizelge 2.3. Watt Başına Güneş Fiyatı İle Kilowatt-Saat Başına Güneş Fiyatı Arasındaki Karşılaştırma[21]

Watt Başına Güneş Fiyatı	Kilowatt-Saat Başına Güneş Fiyatı
Brüt sistem maliyeti / Toplam sistem gücü	Net sistem maliyeti / Toplam ömür boyu sistem üretimi
Güneş enerjisi fiyat tekliflerini birbiriyle karşılaştırmak için kullanışlıdır	Güneş enerjisi ile elektrik faturasını karşılaştırmak için kullanışlıdır
Bir sistemin GÜCÜ ile ilgilidir	Bir sistemin ÜRETİMİNE AİTTİR

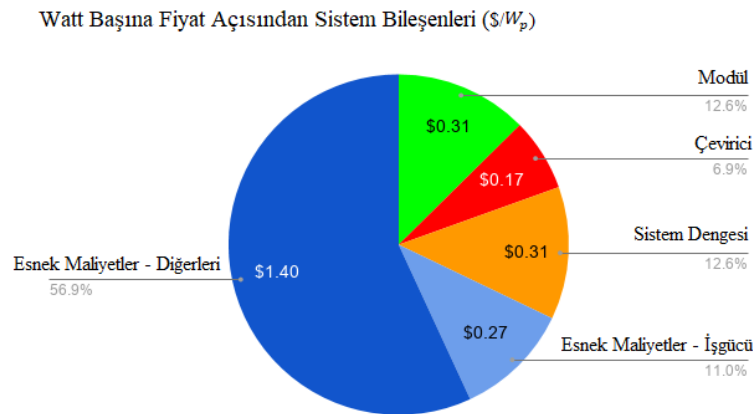
Güneş Paneli Kurulum Maliyeti

Güneş sistemlerinin sadece güneş panellerinin kendisinden çok daha fazlasını içerdiğini anlamak önemlidir. Paneller, genel güneş sisteminin yalnızca bir bileşenidir ve bu diğer bileşenler aslında projenin maliyetinin çoğunu oluşturur.

En temel güneş enerjisi sistemi bile paneller, bir invertör, bir montaj/raf sistemi, kanallar ve elektrik bağlantıları dahil olmak üzere çok sayıda önemli bileşen içerir. Bazı sistemler ayrıca çatı iyileştirmeleri ve evin ana elektrik panelindeki yükseltmeler gibi yükseltmeler gerektirebilir [21].

Güneş Paneli Sistem Bileşenlerinin Maliyeti

Güneş Paneli Sistem Bileşenlerinin Maliyeti, aşağıdaki çizelge ile gösterilmiştir:

Çizelge 2.4. Güneş Paneli Sistem Bileşenlerinin Maliyeti[17]

Bir eve güneş paneli kurmanın maliyeti nedir?

Kısa cevap, buna bağlı olmasıdır. Güneş enerjisi sistemi maliyetleri, ihtiyaç duyulan enerji miktarı, mevcut çatı alanı miktarı, kullanılan panel ve invertör çeşitleri ve güneş enerjisi

sistemine pil dahil olup olmadığı gibi birçok faktöre bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Bir güneş enerjisi sisteminin ortalama maliyeti 20-30,000 \$ civarındadır (teşviklerden önce), ancak sistem boyutu ihtiyaç duyulan güç miktarıyla orantılıdır [21].

Sonuç olarak: Güneş paneli maliyetleri son on yılda önemli ölçüde düştü ve güneş sistemlerini ev sahipleri için her zamankinden daha erişilebilir hale getirdi. Güneş sistemi maliyetlerini ve güneş sistemlerinin birincil bileşenlerini değerlendirmek için anahtar terimleri bilmek, güneş enerjisi sistemlerinin maliyetini etkileyen en önemli hususları anlamaya yardımcı olur [21].

Onur Ozcan ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada: Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi için fotovoltaik sistemin uygulanması karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Uygulama aşamasında belirlenen alan için FV sistem boyutlandırması yapılır. Bu alan 5 alt üretim alanından oluşmaktadır ve 180,330 m²'dir. FV sisteminin toplam nominal kurulu gücü 8865 MW'tır. Sistemde kullanılan ekipmanın işletilen personel ile aynı olması şartıyla sistemin üretimi ve finansal performansı; Türkiye'nin sosyo-ekonomik gelişimi İstanbul, İzmir ve Ankara şehirleriyle karşılaştırılmıştır. Bölgelerin yıllık güneş radyasyonu verileri ve ilgili optimal güneş paneli açıları; FVsyst programına ilgili literatür verileri kullanılarak erişilmiş ve sistemin belirlenen şehirleri için yıllık üretim hesaplamaları yapılmıştır. Üretim simülasyonlarının sonuçları, kullanılan alan (parsel) ve ekipman finansal hesaplamaları yapmak için kullanılmıştır. Çalışmanın mali analiz bölümünde, projenin ömrü boyunca oluşan tüm maliyetler hesaplanmıştır. Oluşturulan 3 alternatif için yatırım getirisi ve proje geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Üç şehir için yıllık üretim ve finansal performans karşılaştırmaları yapılmış ve yatırımların sonuçları incelenmiştir [22].

Bum Choong Kim ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada: Asya güneş fotovoltaik (FV) enerji piyasasındaki hızlı büyüme nedeniyle, verimli yatırım stratejileri geliştirmek için karar verme modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Önceki çalışmalar büyük ölçüde teknolojik koşullara ve makroekonomik göstergelere odaklanmıştı, ancak finans sektörünün artan ihtiyaçlarına odaklanmadı. Bu çalışmada, proje düzeyinde güneş FV yatırımı ve finansal faktörlerin bir değerlendirme modeli geliştirdik. Model, bulanık analitik hiyerarşi sürecini uygular ve ilk yatırımdan sonra finansmana erişim ve çıkış stratejileri gibi finansal faktörleri vurgulayarak yatırım için uygun değerlendirme göstergelerini seçer. Ayrıca, her bir paydaş için göstergelerin göreceli önemini ortaya çıkardık. Paydaş analizi, her bir piyasa katılımcısının risklerini ölçerek karşılaştırma yapılmasını sağlar. Ekonomik faktörler

(%71.57) en önemli değerlendirme faktörleri olarak seçildi, bunu politika faktörleri (%16.26) ve teknik faktörler (%12.17) izledi. Kârlılığı doğrudan etkileyen göstergelere daha yüksek ağırlıklar atandı. Paydaşlar, politika faktörlerinde önemli farklılıklar gösterdi. Elektrik üretim şirketleri, politika faktörlerinde diğer gruplara göre daha yüksek ağırlık değerleri gösterdi.

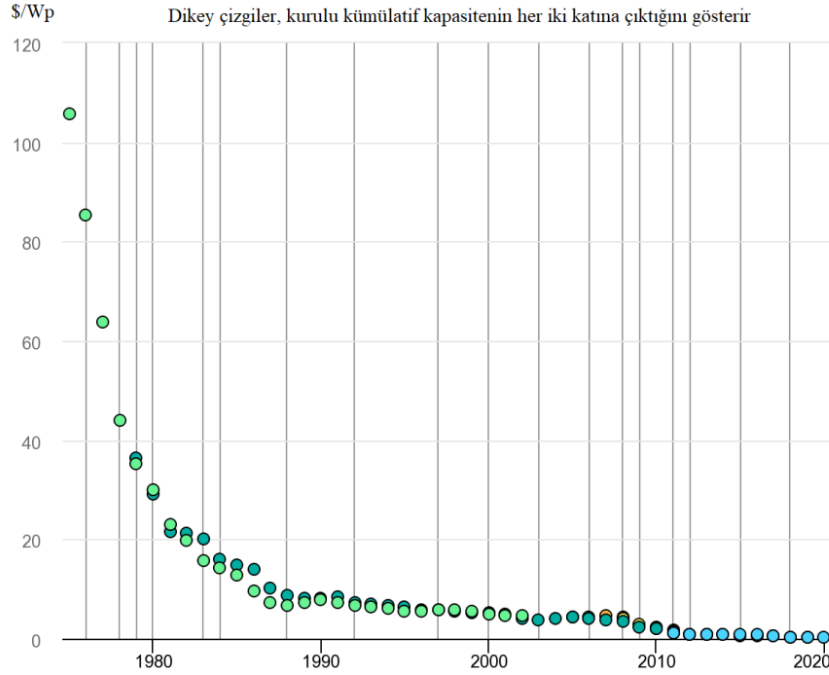
Algı farklılıklarının ölçülmesi, etkili yatırım stratejileri oluşturmak ve politikalar geliştirmek için temel veriler sağlar. Bu nedenle, önerilen model daha verimli güneş FV projesi geliştirilmesine katkıda bulunacaktır [23].

Nathan L. Chang ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada: tandem bir yapı oluşturmak için iki fotovoltaiik (FV) hücrenin istiflenmesi, FV modüllerinin verimliliğini artırabilir ve yeterince düşük maliyetle elde edilirse, gelecekte FV pazarına hakim olabilir. Silisyum-perovskit tandem hücresi verimliliğinde hızlı ilerleme kaydedildi, bu nedenle bu yaklaşımın ticari çekiciliğini analiz etmede maliyet modellemesi önemli hale geliyor. Önceki maliyet modellemesinde idealleştirilmiş üretim süreçleri varsayılırken, bu çalışma önce hem homojonksiyon hem de heterojonksiyonlu alt silisyum hücrelerin kullanıldığı, aşağıdan yukarıya bir maliyet ve belirsizlik modeli kullanılarak ayrıntılı olarak analiz edilen ve daha sonra rapor edilen diğer SPT yüksek verimli hücreler ile karşılaştırılan altı gösterilen SPT dizisine odaklanıyor. Bu, yüksek maliyetli delik taşıma malzemesi ve (2.2',7.7'-tetrakis [N, N-di (4-) gibi elektron taşıma katmanı malzemeleri dahil olmak üzere perovskit hücresindeki maliyet engellerini tanımlar. metoksifenil) amino] -9.9'- spirobifloren ve [6.6] -fenil-C61-butirik asit metil ester ve yüksek israf oranına sahip spin kaplama kullanımı. Bu maliyet sorunları çözüldüğünde, silisyum hücre maliyeti önemli hale gelir ve p-tipi silisyum pullarıyla daha düşük maliyetli homojonksiyon hücrelerinin kullanılması maliyetleri daha da düşürebilir. Analiz edilen dizilerin en düşük maliyetli kısımlarını ve gelişmiş bir perovskit biriktirme sürecini birleştiren varsayımsal orta vadeli düşük maliyetli bir dizi, tahmini olası maliyeti 1.50 ABD doları/hücre olup, %25 verimlilikle birleştirilirse, uygun düzeyde bir elektrik maliyeti verecektir (endüstri standardı c-Si hücreleriyle karşılaştırılmıştır).

Bu analiz, bu teknoloji alanındaki daha yüksek verimliliklere paralel olarak maliyet sorunlarını ele almak için araştırma yönergelerine rehberlik eder [24].

Kavlak ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada: 1970-2020 veri kaynağına göre solar FV modül maliyetinin gelişimi aşağıdaki çizelge gösterilmektedir:

Çizelge 2.5. Güneş FV modülü maliyetinin veri kaynağına göre gelişimi, 1970-2020[25]

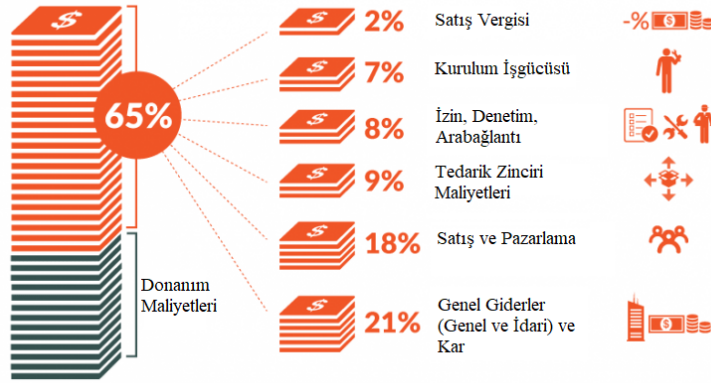


David Feldman ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada: enerji teknolojisi araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) tipik olarak performansı artırmaya ve ekipman ve kurulum maliyetlerini düşürmeye odaklanır. Ancak, bu tür Ar-Ge'nin diğer faktörler üzerinde önemli dolaylı etkileri de olabilir. Ar-Ge faaliyetlerinin finansman maliyetleri üzerindeki etkisinin dahil edilmesi, bu kararların sonuçlarının daha eksiksiz bir resmini sağlayabilir ve politika yapıcılarının daha iyi kararlar almasına izin verebilir. Bu yazıda, güneş enerjisi sektöründe finansman maliyetlerini etkileyen bazı tarihsel Ar-Ge örneklerini tartışıyoruz, finansmanı etkileyebilecek Ar-Ge alanlarını özetliyoruz ve Ar-Ge'nin finansman maliyetleri üzerindeki etkisini ölçmek için kullanılacak metodolojik yaklaşımları tanımlıyoruz. sonuç, seviyelendirilmiş enerji maliyeti. Güneş enerjisi sektöründeki finansman maliyetlerinde, mevcut seviyelerden düşük risk seviyelerine kadar Ar-Ge kaynaklı azalmaların, Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetini yaklaşık %25 oranında azaltabileceğini tahmin ediyoruz [26].

Güneş Enerjisi Teknolojileri Ofisi (2021) yaptıkları çalışmada: güneş enerjisi yumuşak maliyetleri nelerdir ve neden önemlidir? Yazılım maliyetleri, güneş enerjisine geçişle ilişkili donanım dışı maliyetlerdir. Bu maliyetler, güneş enerjisine izin verilmesi, finansmanı ve kurulumunun yanı sıra güneş enerjisi şirketlerinin yeni müşteriler edinmek, tedarikçilere ödeme yapmak ve kârlarını karşılamak için yaptıkları harcamaları içerir. Bu yumuşak

maliyetler, müşterinin bir güneş enerjisi sistemi için ödediği toplam fiyatın bir kısmı haline gelir. Son yıllarda güneş enerjisi donanım maliyetleri düşerken, yazılım maliyetleri toplam güneş sistemi maliyetlerinin artan bir payını temsil ediyor. Katkıda bulunan çok fazla faktör olduğu için, bu maliyetleri saptamak zor olabilir ve çeşitli çözümler gerektirebilir [27].

Aşağıdaki çizelgede gösterilen güneş enerjisi yumuşak maliyetleri:



Şekil 2.1. Güneş Enerjisi Yumuşak Maliyetleri [27]

Fotovoltaik için uluslararası teknoloji yol haritası (2021) yaptıkları çalışmada: monokristal pulları, Czochralski işlemiyle büyütülen silindirik külçelerden kesilir. 2019'daki tipik Czochralski monokristal külçeler 200–215 mm çapında ve yaklaşık 3–6 m uzunluğunda, 225–800 kg kütleli. Bu işlem, külçe başına yaklaşık 10.000–14.000 pul ile sonuçlanır. Yakın zamana kadar, baskın Czochralski pul boyutu 156.75 x 156.75 mm düzden düze idi ve (M2 formatı) olarak adlandırılan toplam 245 cm² yüzey alanı vardı. Bununla birlikte, geçen yıl içinde çok sayıda daha büyük pul formatı ana akım haline geldi. Burada yüzey alanı 258 cm² olan (M4 formatı) incelenmiştir. [28].

Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Derneği (2022) yaptıkları çalışmada: ABD, 22 milyon Amerikan evine güç sağlamak için yeterli olan 126.1 GW toplam kurulu kapasiteye ulaşmak için 2022'nin ilk çeyreğinde 3.9 gigawatt (GW) güneş enerjisi FV kapasitesi kurdu. Güneş, ilk çeyrekte ABD'de eklenen tüm yeni elektrik üretim kapasitesinin %50'sini oluşturuyordu. Konut güneş enerjisi, yıllık %30 artışla 1.2 GWdc kurulu güç ile tarihin en büyük çeyreğine sahipti. Ancak, büyük ölçüde tedarik zinciri zorlukları nedeniyle diğer segmentlerde kurulumlar yavaşladı. Kamu hizmeti ölçekli güneş enerjisi kurulumları, 2021'in ilk çeyreğine

göre %41 düşüşle 2,173 MWdc'ye ulaştı ve yeni tedarik 2017'den bu yana en düşük seviyesindeydi [29].

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Kabul edilen maliyet analizi modeli, bir teknolojinin veya üretim sürecinin özelliklerinin bir veya daha fazla yolla maliyetlere nasıl katkıda bulunduğunu anlamak için ayrıntılı, cihaz düzeyinde maliyet modelleri kullanır. Analiz, bireysel maliyet bileşenlerinin PV teknolojilerinin fiziğiyle bağlantılı toplam maliyetlere nasıl katkıda bulunduğu hakkında bilgi sağlar.

Asgari Sürdürülebilir Fiyatlar modeli, iki temel metriği belirlemek ve hesaplamak için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti Hesaplama yazılımı (Sistem Danışmanı Modeli/ System Advisor Model - SAM) ile birlikte Uluslararası Finansal Raporlama Standartlarına uygun olarak benimsenmiştir: $\$/W_p$ ve Seviyelendirilmiş Fotovoltaikler için Elektrik Maliyeti. Ham veri setleri çeşitli akademik ve resmi kaynaklardan toplanmıştır.

3.1 Aşağıdan Yukarıya Maliyet Modeli

Bu analizde kullanılan aşağıdan yukarıya maliyet modeli, bireysel FV modülü değer zincirinin öğelerini bir araya getirir. Alternatif olarak, yukarıdan aşağıya bir yaklaşım piyasa fiyatlarını dikkate alır ve varsayılan marjlar ve dağıtım maliyetleri yoluyla üretim maliyetini tahmin eder [14].

3.2 Maliyet Modeli

Maliyet modeli, bir ürün veya hizmeti sunmak için yatırılan toplam değeri belirlemeye yönelik bir yöntem veya çerçevedir. Sürecin kapsamı ve detayı duruma bağlı olarak değişebilir, ancak tüm maliyet modellemelerinin amacı, değer çıktısı ile karşılaştırma için değer girdisini değerlendirmenin doğru bir yolunu bulmaktır. Bu, belirli bir ticari girişimin potansiyelini değerlendirmek, fiyat noktaları belirlemek ve genel karlılığı tahmin etmek için gerekli bir adımdır.

3.2.1 Maliyet Ayrıştırma Stratejisi

İlk olarak FV modülleri için bir maliyet modeli geliştiriyoruz. Maliyet bileşenleri, üretimde kullanılan girdilerin miktarlarına (veya kullanım oranlarına) ve fiyatlarına göre hesaplanır. Kullanılan maliyet modeli aşağıdaki formülle gösterilmektedir [19]:

Formül 3.1. Maliyet Modeli

$$C_m \left(\frac{\$}{\text{modül}} \right) = \underbrace{\frac{1}{y_m} \sum_{i \neq c, w} \phi_{mi} P_i}_{\text{hücre dışı modül maliyetleri}} + \underbrace{\frac{n_{mc}}{y_m y_c} \sum_{i \neq w} \phi_{ci} P_i}_{\text{silisyum pulu dışı hücre maliyetleri}} + \underbrace{\frac{n_{mc} n_{cw}}{y_m y_c y_w} \sum_i \phi_{wi} P_i}_{\text{silisyum pulu maliyetleri}},$$

y_m : modül üretiminde verim

y_c : hücre üretiminde verim

y_w : silisyum pulu üretiminde verim

ϕ_{mi} : modül başına girdi miktarı i

ϕ_{ci} : hücre başına girdi miktarı i

ϕ_{wi} : silisyum pulu başına girdi miktarı i

P_i : girdi fiyatı i

n_{mc} : modül başına hücre sayısı

n_{wc} : hücre başına silisyum pulu sayısı.

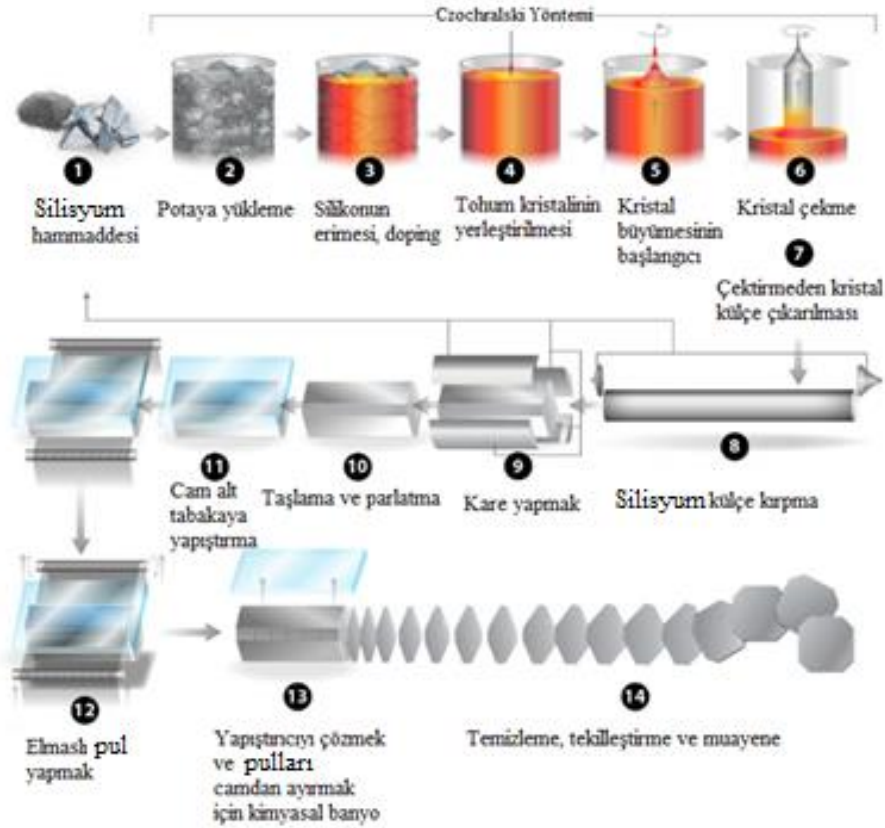
Bu denklem, FV'ye özgü bir ayrıştırma şeması olan plaka, hücre ve modül maliyetlerini temsil etmek için yazılır. Maliyetlerin kullanım oranları (ϕ) ve girdi fiyatları (p) açısından formüle edilmesi, herhangi bir teknolojiyi tanımlayabilen genel bir yöntemdir. (ϕ) değişkenler genellikle verimliliği ve malzeme kullanımını iyileştirmeye yönelik mühendislik çabalarının bir sonucu olarak değişirken, (p) değişkenleri toplu satın alma, kıtlık veya diğer piyasa etkileri [25], veya girdi ikameleri nedeniyle değişir.

FV üretim maliyetlerinin üç seviyesinin her birinde- plaka üretimi, hücre üretimi ve modül üretimi- malzeme, işçilik, işletme ve bakım, elektrik ve tesis ve ekipmanın amortismanı maliyetleri vardır [19]. C-Si tedarik zincirindeki temel adımlar aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:



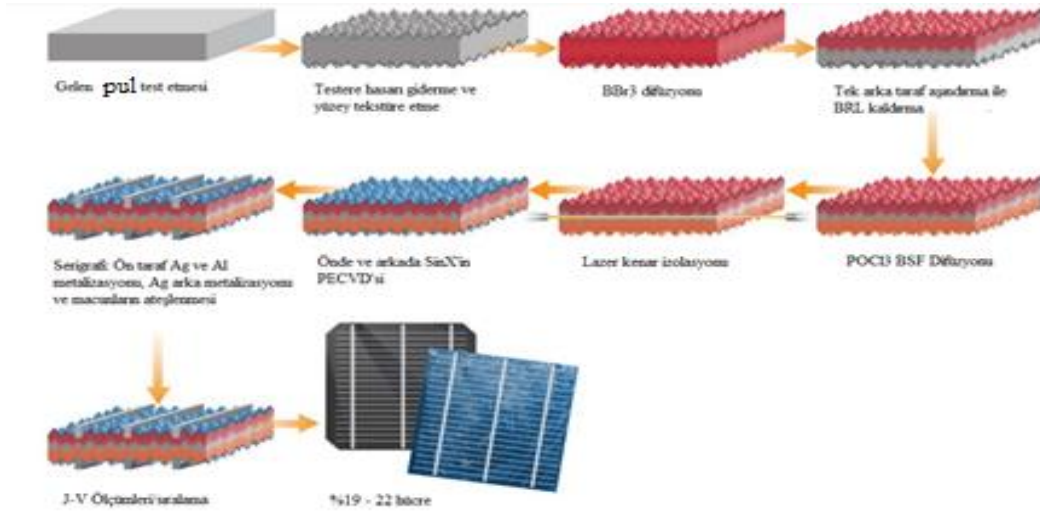
Şekil 3.1. c-Si tedarik zincirindeki önemli adımlar [30]

Silisyum pulları hazırlanması için czochralski yöntemi, aşağıdaki şekil ile gösterilmektedir:



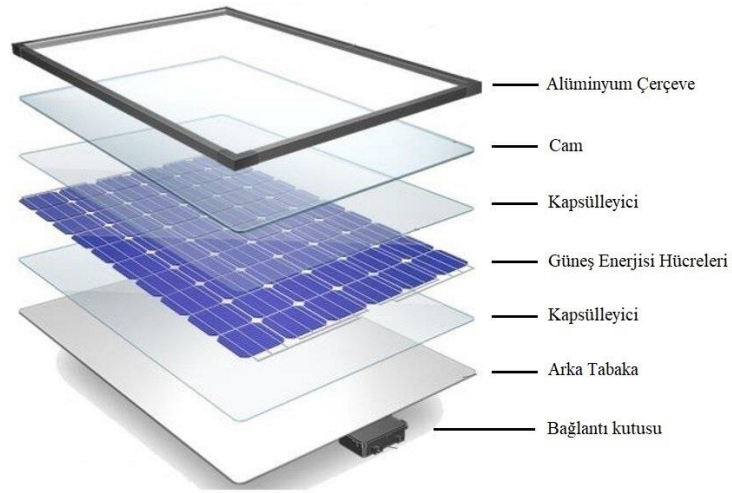
Şekil 3.2. Silisyum pulların Hazırlanması için Czochralski Yöntemi [31]

Gelişmekte olan c-si PERC hücre proses akış teknolojileri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:



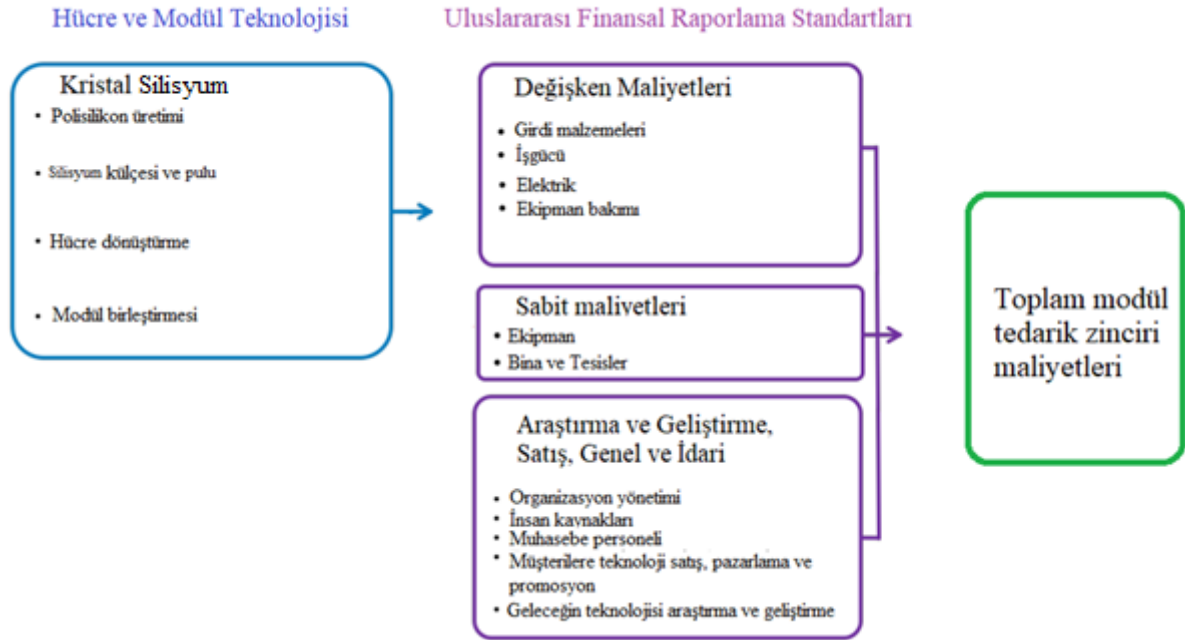
Şekil 3.3. Gelişen c-Si PERC Hücre Proses Akışı Teknolojileri [31]

FV Modül Montajı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



Şekil 3.4. FV Modülü Montajı [32]

Asgari Sürdürülebilir Fiyatlar modeli, Uluslararası Finansal Raporlama Standartlarına uygun olarak benimsenmiştir. Uluslararası finansal raporlama standartları aşağıdaki şekil ile gösterilmektedir:



Şekil 3.5. Uluslararası Finansal Raporlama Standartları [30]

Maliyet modeli için gerekli verileri belirlemek ve toplamak için her bir teknoloji için üretim sürecinin ayrıntılı tasdikine ihtiyaç vardır. Şekil 3.5 sağ tarafı, Uluslararası Finansal Raporlama Standartlarına göre maliyet çıktılarının yapısını özetlemektedir.

"Toplam modül tedarik zinciri maliyetleri" etiketli çıktı miktarı, modül satış fiyatından farklıdır. Satış fiyatını tahmin etmek için, kâr ve kurumlar vergisi oranının yanı sıra faiz ve temettü ödemelerini (sermaye maliyeti) hesaba katmak için bir faaliyet marjı uygulanmalıdır. Bu tezde, Asgari Sürdürülebilir Fiyatlar, brüt marjı %10 olarak tanımlanmaktadır.

3.3 Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti Hesaplayıcısı

Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, belirli bir maliyet geri kazanım süresi boyunca bir jeneratörü inşa etmek ve işletmek için gereken tahmini geliri ifade eder.

3.3.1 Basit Seviyeli Elektrik Maliyeti Hesaplama Yazılımı

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından tasarlanmış bir yazılım aracıdır. Seviyelendirilmiş enerji hesaplayıcısı, yenilenebilir enerji teknolojilerinin sermaye

maliyetlerini, operasyonları ve bakımı, performansı ve yakıt maliyetlerini kapsayan bir ölçümü hesaplamak için basit bir yol sağlar. Tipik miktarlar aşağıdaki gibi yazılıma girilmiştir:

Süre: 20 yıl.

İndirim Oranı: 2.5%

Sermaye Maliyeti: 930 \$/kW

Sermaye Faktörü: 43.6%

Sabit İşletme ve Bakım Maliyetleri: 25 \$/kW- yıl

Isı Oranı: 10,000 Btu/kWh

Yakıt maliyeti: 3.79 \$/MMBtu

Elektrik Fiyatı: 12 sent/kWh

Maliyet Arttırma Oranı: 3%

Seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin basit bir şekilde hesaplanması için, önce basit bir araç kullanılarak tahminde bulunuldu, ardından Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) yazılımı kullanılarak dikkatli bir hesaplama yapıldı. Basit Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti Hesaplama Yazılımı, aşağıdaki şekil ile gösterilmektedir:

Çizelge 3.1. Basit Seviyeli Elektrik Maliyeti Hesaplama Yazılımı

Simple Levelized Cost of Energy Calculator	
Financial	
Periods (Years):	20 ?
Discount Rate (%):	2.5 ? 
Renewable Energy System Cost and Performance	
Capital Cost (\$/kW):	930 ?
Capacity Factor (%):	43.6 ?
Fixed O&M Cost (\$/kW-yr):	25 ?
Variable O&M Cost (\$/kWh):	0.000 ?
Heat Rate (Btu/kWh):	10000 ?
Fuel Cost (\$/MMBtu):	3.79 ?
Today's Utility Electricity Cost	
Electricity Price (cents/kWh):	12 ?
Cost Escalation Rate (%):	3 ? 

3.3.2 Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımı

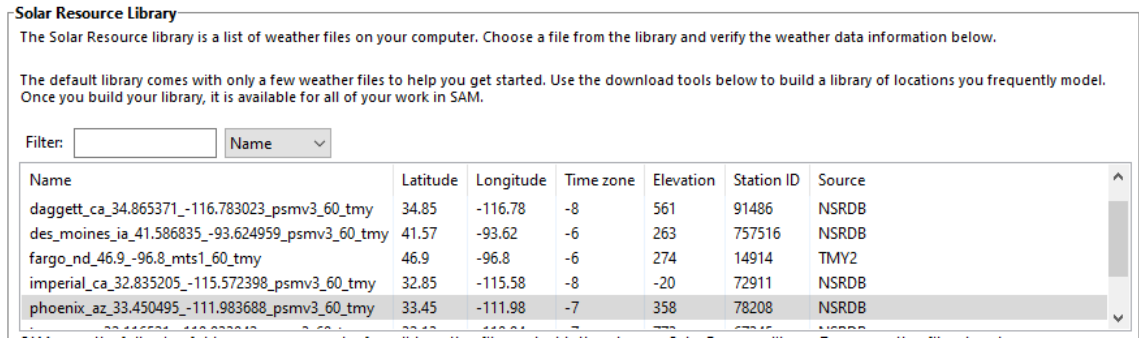
Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından tasarlanan gelişmiş Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımı, 50 MW'lık bir şebekeye bağlı c-Si fotovoltaik sistem için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti için daha doğru sonuçlar üretmek amacıyla kullanılmıştır. Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımı Arayüzü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



Şekil 3.6. Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılım Arayüzü

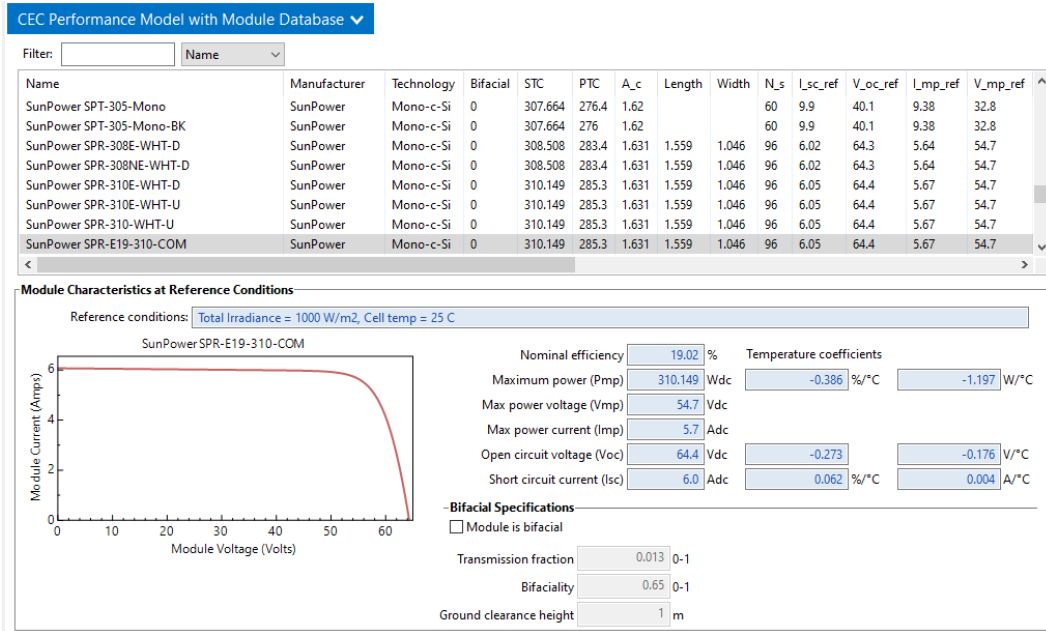
3.3.2.1 Giriş Verileri

Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi Phoenix, Arizona (ABD) model konumu olarak seçilmiştir:



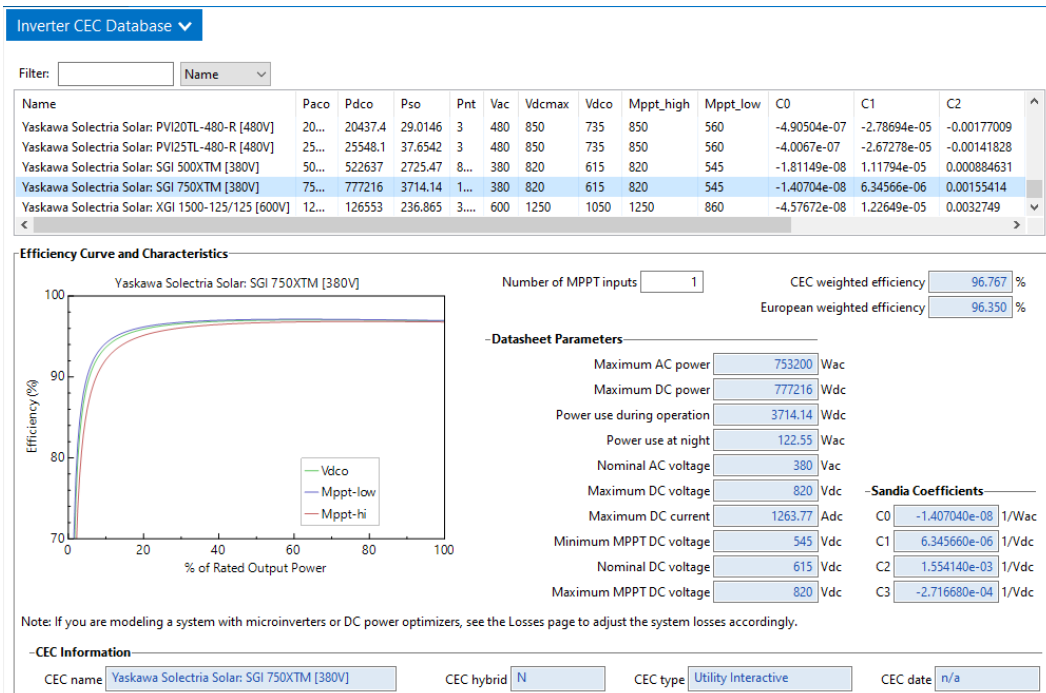
Şekil 3.7. Model konumu olarak Phoenix, Arizona (ABD) seçildi

Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, modelin modülü olarak (SunPower SPR-E19-310-COM) tek kristalli silisyum seçilmiştir:



Şekil 3.8. Modelin modülü olarak SunPower SPR-E19-310-COM tek kristalli silisyum seçilmiştir.

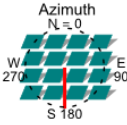
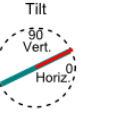
Yaskawa Solectria Solar: Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, modelin inverteri olarak SGI 750XTM [380V] seçilmiştir:



Şekil 3.9. Yaskawa Solectria Solar: Modelin çeviricisi olarak SGI 750XTM [380V] seçildi.

Sistem, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, şebekeye bağlı 50 MW sabit eğimlidir:

AC Sizing		Sizing Summary	
Number of inverters	50	Nameplate DC capacity	50,002.222 kWdc
DC to AC ratio	1.33	Total AC capacity	37,660.000 kWac
Size the system using modules per string and strings in parallel inputs below.		Total inverter DC capacity	38,860.800 kWdc
☐ Estimate Subarray 1 configuration		Number of modules	161,220
		Number of strings	13,435
		Total module area	262,949.820 m ²

DC Sizing and Configuration				
To model a system with one array, specify properties for Subarray 1 and disable Subarrays 2, 3, and 4. To model a system with up to four subarrays connected in parallel to a single bank of inverters, for each subarray, check Enable and specify a number of strings and other properties.				
Electrical Configuration	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
	(always enabled)	☐ Enable	☐ Enable	☐ Enable
Modules per string in subarray	12			
Strings in parallel in subarray	13,435			
Number of modules in subarray	161,220			
String Voc at reference conditions (V)	772.8			
String Vmp at reference conditions (V)	656.4			
Tracking & Orientation				
  ☒ Fixed ☐ 1 Axis ☐ 2 Axis ☐ Azimuth Axis ☐ Seasonal Tilt ☒ Tilt=latitude				

Şekil 3.10. Sistem, 50 MW boyutunda, şebekeye bağlı sabit bir eğimdir.

Finansal parametreler aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

Capital and Operating Costs			
System capacity 50,002.222 kW			
☐ Enter costs in \$ ☒ Enter costs in \$/kW			
Capital cost	53,455,000.00	930.00	
Fixed operating cost (annual)	360,000.00	13.00	
Variable operating cost	0.0000	\$/kWh	
Financial Assumptions			
☐ Enter fixed charge rate ☒ Calculate fixed charge rate			
Fixed charge rate (real)	0.098	Analysis period	20 years
		Inflation rate	2.5 %/year
		Internal rate of return (nominal)	13 %/year
		Project term debt	60 % of capital cost
		Nominal debt interest rate	4 %/year
		Effective tax rate	28 %/year
		Depreciation schedule	Schedule Edit... % of capital cost
		Annual cost during construction	Schedule Edit... % of capital cost
		Nominal construction interest rate	3.5 %/year
Fixed charge rate (FCR) 0.081602577429			
FCR = CRF · PFF · CFF (see below)			
Reference Values			
Capital recovery factor (CRF)	0.076	Capital cost (CC)	46,502,066.26 \$
Project financing factor (PFF)	1.065	Fixed operating cost (FOC)	650,028.88 \$
Construction financing factor (CFF)	1.012	Variable operating cost (VOC)	0.00 \$/kWh
LCOE = (FCR · CC + FOC) / Annual Energy + VOC		WACC (for reference only) 0.043	

Şekil 3.11. Finansal Parametreler

Sonuçta ortaya çıkan miktar 930 \$/kW sistemin sermaye maliyeti olmuştur. Sabit İşletme Maliyeti: 13 \$/kW- yıl. Dönem 20 yıl olarak belirlenmiş ve finansal varsayım parametreleri için girdi olarak tipik miktarlar kullanılmıştır.

3.4 Veri Kümeleri

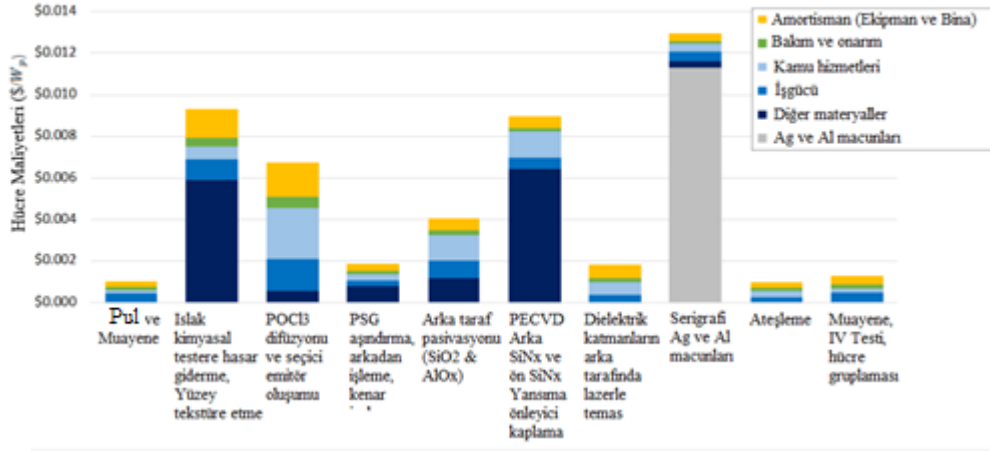
Varsayımlar, kentsel Çin'de 72 hücreli modüllerin üretimini içeriyor.

Değişken maliyetler, bitmiş ürüne dönüştürülen hammaddeleri, imalat işçiliği, ekipman ve bina ile ilgili elektrik ve bakımla ilgili yedek parça veya işçilik için tüm doğrudan maliyetleri içerir [33].

Sabit maliyetler; tipik olarak, FV üretimi için, bu maliyetler doğrusal bir yıllık çizelgenin ardından amortisman tabi tutularak rapor edilir. İlk yatırımlara sermaye harcamaları denir ve amortisman giderleri, ekipmanın kullanım ömrünü tanımlayan dönem boyunca vergi indirimi olarak kullanılabilir. Amortisman süresi, FV üretim ekipmanı için 5-10 yıl ve satın alınan (kiralanan) binalar ve diğer tesisler için 15-25 yıldır. Doğrusal veya doğrusal bir program kullanılıyorsa, toplam yatırımın yıllık üretime (yılda watt olarak) ve varsayılan kullanım ömrüne (yıl olarak) bölünmesiyle sermaye harcamaları ortalama watt başına amortisman giderine dönüştürülebilir. Üretim ekipmanının artık değeri olmayacağı ve amortisman programından sonra değiştirilmesi gerektiği varsayılmaktadır, bu da FV endüstrisinde gözlemlenen teknoloji eskime oranı ile tutarlı görünmektedir [33].

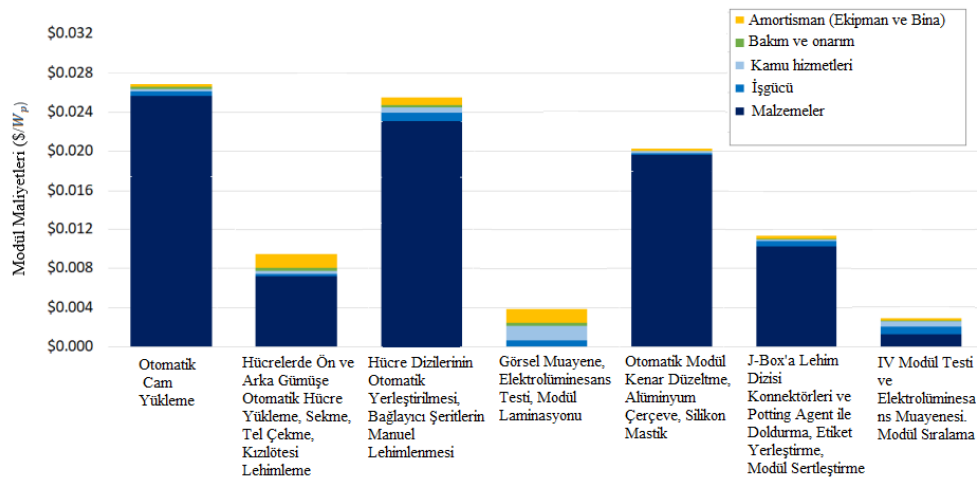
2019 yılında halka açık ilk 11 FV firmasının gelir tabloları kullanılarak Satış, Genel ve İdari giderler gelirlerin $9,2 \pm 1,9\%$ 'u, Ar-Ge giderleri ise gelirlerin $2,8 \pm 0,7\%$ 'si olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle genel giderler, tezin geri kalanında gelirlerin 9% 'u Satış, Genel ve İdari giderler ve gelirlerin 3% 'ü Ar-Ge giderleri olarak kabul edilerek hesaplanır [34]. Silisyum pulu fiyatlandırması 0.069 \$/W civarındadır [31]. Kentsel Çin'deki monokristal PERC hücre üretim maliyetleri, 2020, aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir:

Çizelge 3.2. Kentsel Çin'de monokristal PERC hücre üretimi maliyetleri, 2020[31]



Çizelge 3.2 maliyetler, ön temas için hücre başına 75 mg Ag macununun yanı sıra arka temas için 30 mg Ag macunu ve 0.9 g Al macunu varsaymaktadır ve bunlar 560\$/kg'lık Ag spot fiyatlandırmasına dayanmaktadır. Bu macunların (katkı maddeleri dahil) yapısına bağlı olarak, toplam metalizasyon pastası malzeme maliyetleri %62 ön yüz Ag'den, %18 arka yüz Ag'den ve %20 arka yüz Al'den olmak üzere $0.011 \$ \pm 0.002 \$/W$ olarak hesaplanmıştır. Hücre başına tüketilen 0.35 kWh elektriğin olduğunu varsayıyoruz. Saatte 3,000 Puldeki POCl₃ difüzyon adımları dışında, verimin saatte 6,000 Pul olduğu varsayılır. Kentsel Çin'deki monokristal PERC modül maliyetleri, 2020, aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir:

Çizelge 3.3. Kentsel Çin'de monokristal PERC modülü maliyetleri, 2020[31]



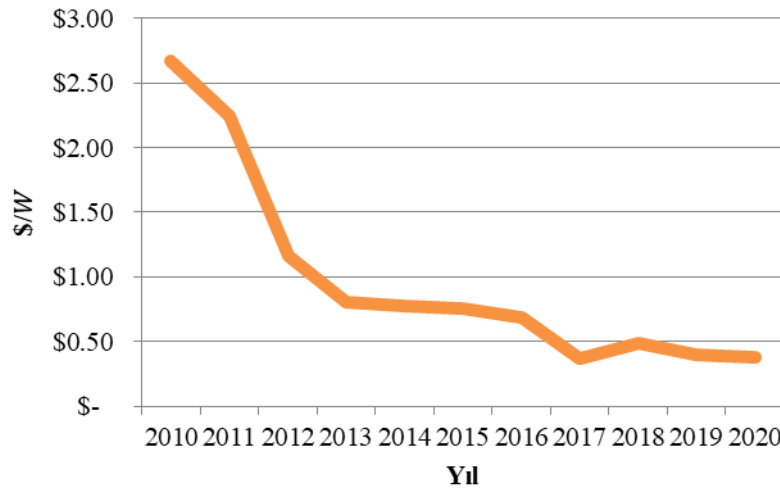
4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Önceki on yılda c-Si modül maliyetleri, PERC c-Si (Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti, PERC c-Si (Modül + Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti, c -Si fotovoltaiik sistem bileşenleri maliyetleri için sonuçlar ve seviyelendirilmiş elektrik maliyeti bu bölümde gösterilir

4.1 Önceki on yılda c-Si Modül Maliyeti

Önceki on yılda c-Si Modül Maliyetleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Ek 1'de gösterilen verilere dayanmaktadır):

Çizelge 4.1. Önceki on yılda c-Si Modül Maliyeti

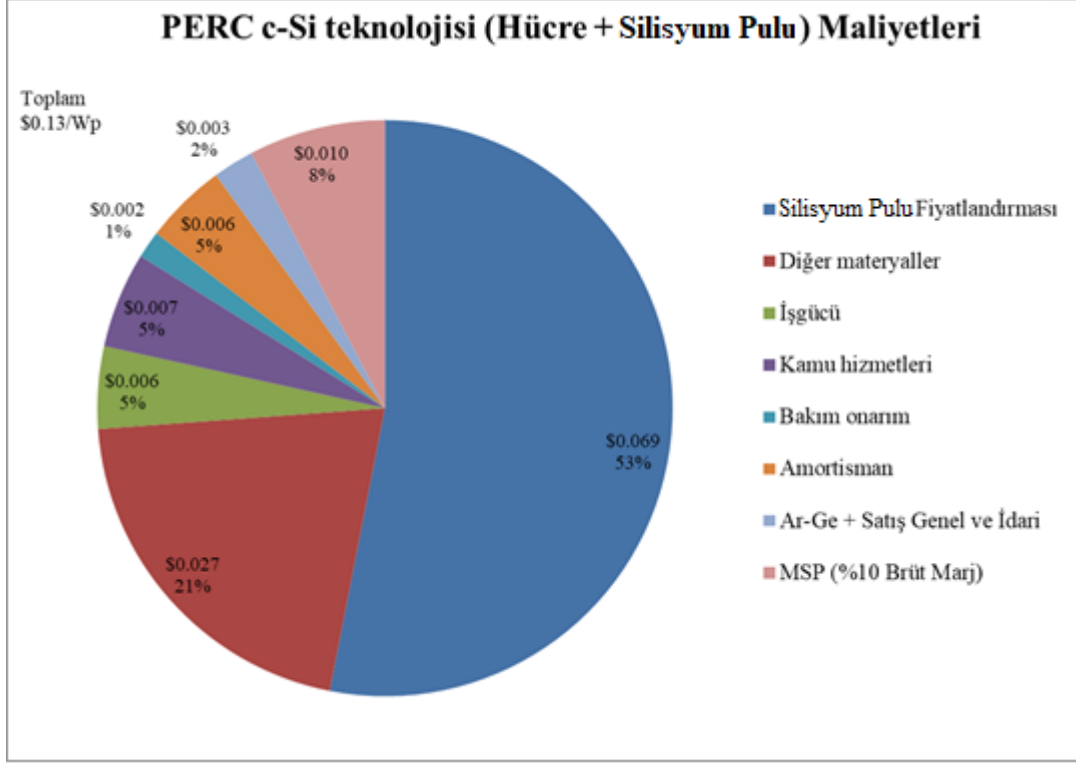


4.2 $\$/W_p$ Sonuçlar

- 1- p-tipi Czochralski silisyum pul üretimi fiyatlandırması $0.069 \$/W_p$.
- 2- Monokristal PERC hücre dönüşümü için toplam maliyet (pul maliyeti dahil değil) $0.049 \$/W$ 'a ulaşır.
- 3- Çizelge 3.3 maliyetlerin toplamı yaklaşık $0.13 \$/W_p$ ile sonuçlanır. Maliyetlerin %80'inden fazlası malzemelere atfedilir. Bir sonraki en büyük katkıda bulunanlar, esas olarak inceleme, elektrolüminesans ve laminasyon adımı sırasında meydana gelen ekipman ve yardımcı tesislerdir.
- 4- Silisyum pulu fiyatının maliyetini hücre maliyetlerine eklemek şu sonuçları verir:

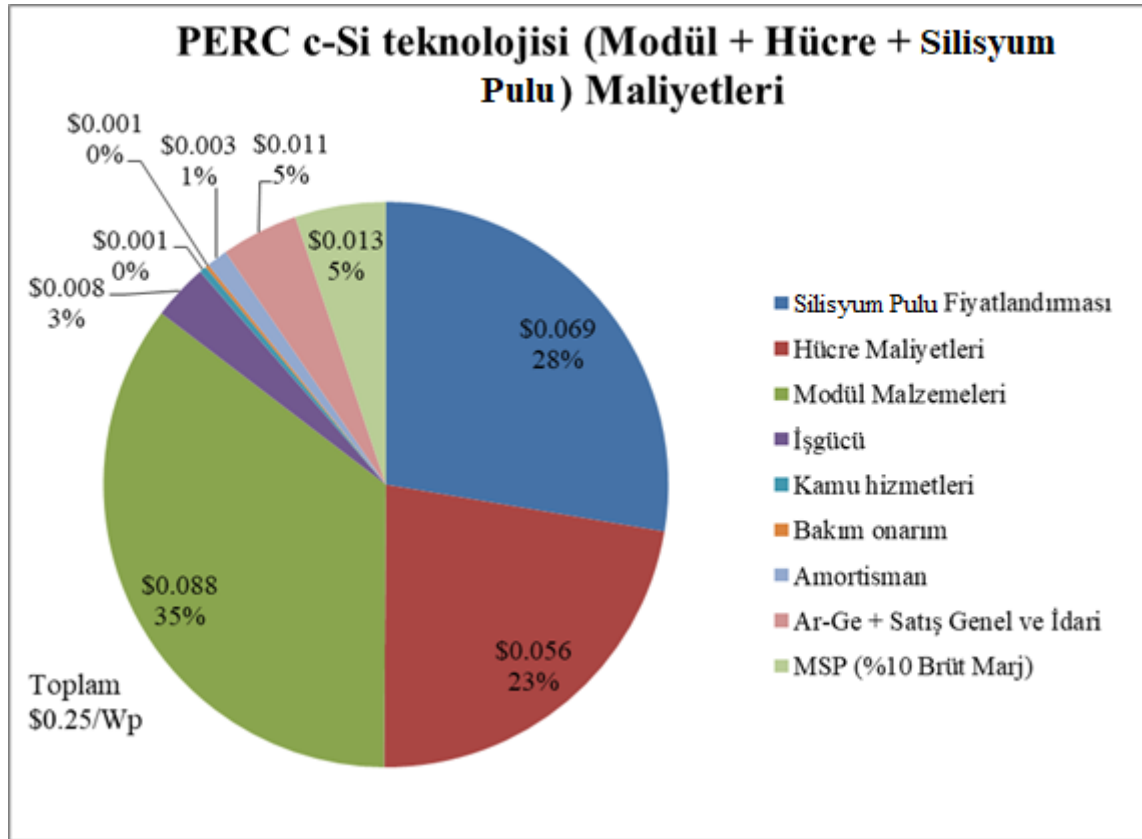
PERC c-Si teknolojisi (Minimum Sürdürülebilir Fiyatlar) ile (Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir:

Çizelge 4.2. PERC c-Si teknolojisi ile (Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti (Minimum Sürdürülebilir Fiyatlar)



Not: Toplamlar, tüm operasyonların kentsel Çin'de yılda 1 GW'tan daha büyük üretim hacimlerinde bulunduğunu varsaymaktadır. Tek başına malzeme maliyetleri, diğer tüm değişken maliyetler artı tüm sabit maliyetlerden daha yüksektir, çünkü otomasyon verimliliğini ve verimi artırırken sermaye harcamalarını azaltmadaki ikili faydaları vardır. PERC c-Si teknolojisine sahip (Modül + Hücre + Silisyum Pulu) Maliyeti (Minimum Sürdürülebilir Fiyat) aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir:

Çizelge 4.3. PERC c-Si teknolojisi ile (Modül + Hücre + Silisyum Pulu) maliyeti (Minimum Sürdürülebilir Fiyat)



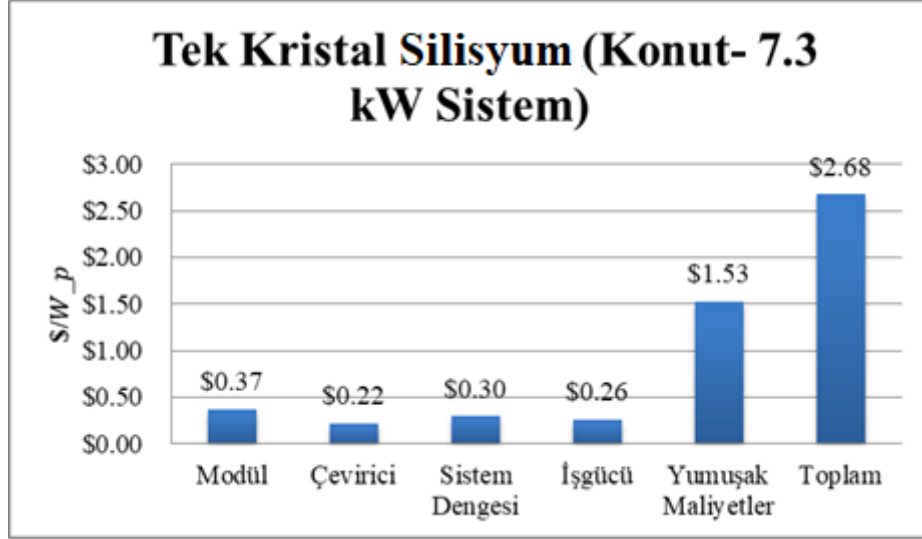
Tek başına malzeme maliyetleri, diğer tüm değişken maliyetler artı tüm sabit maliyetlerden daha yüksektir, çünkü sermaye harcamalarını azaltırken otomasyon verimliliğini ve verimini artırmadaki ikili faydalar nedeniyle. Maliyetlerin %80'inden fazlasının malzemelere atfedildiği sonuçlardan açıkça görülmektedir. Bir sonraki en büyük katkıda bulunanlar, esas olarak inceleme, elektrolüminesans ve laminasyon adımı sırasında meydana gelen ekipman ve yardımcı hizmetlerdir.

Dolayısıyla, Fotovoltaik maliyetini azaltmak için gereken araştırma alanları şunlardır: Malzemeler, (Muayene, Elektrolüminesans ve Laminasyon Teknikleri). Bu nedenle modüllerin verimliliğini artırmak ve genel olarak daha az malzeme kullanımı ile sonuçlanmakta ve dolayısıyla toplam modül maliyetinde azalma sağlanmaktadır. Ölçek ekonomileri yoluyla ek fiyat düşüşleri sağlanabilir, ancak bunlar bu çalışmada açıkça modellenmemiştir.

4.3 c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri

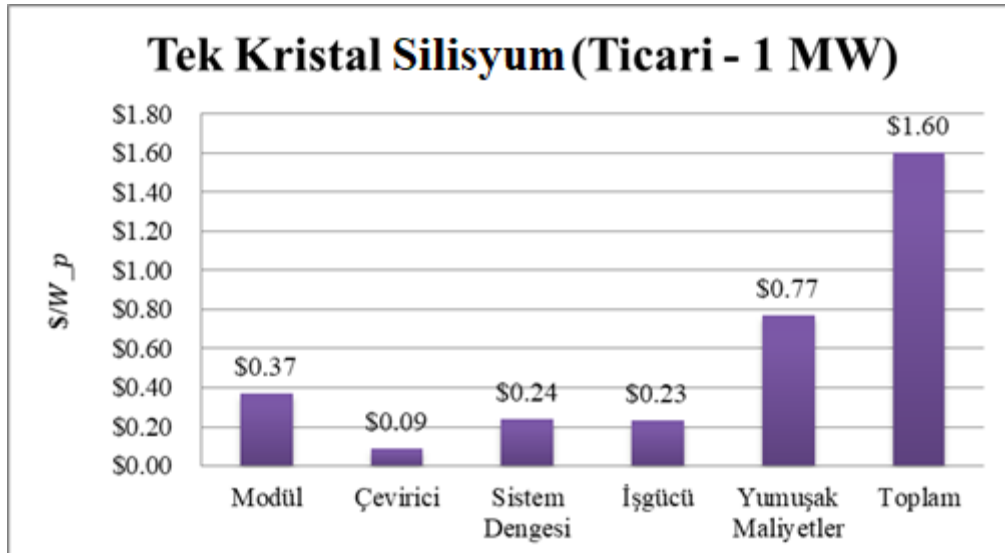
Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Konut) aşağıdaki çizelge ile gösterilmektedir (Bu veriler Amerika Birleşik Devletleri içindir):

Çizelge 4.4. Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Konut)



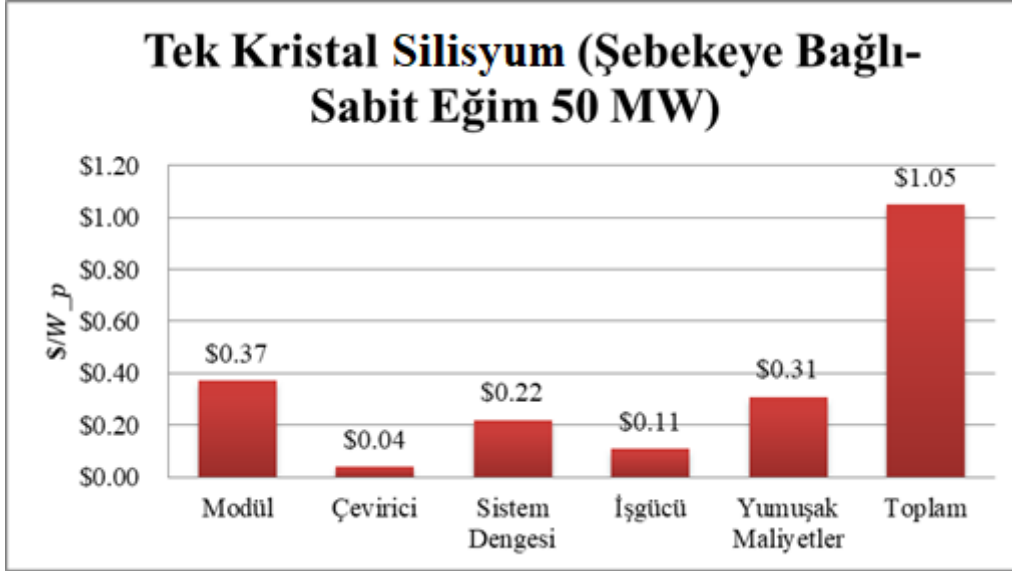
Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Ticari) aşağıdaki çizelge ile gösterilmektedir (Bu veriler Amerika Birleşik Devletleri içindir):

Çizelge 4.5. Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Ticari)



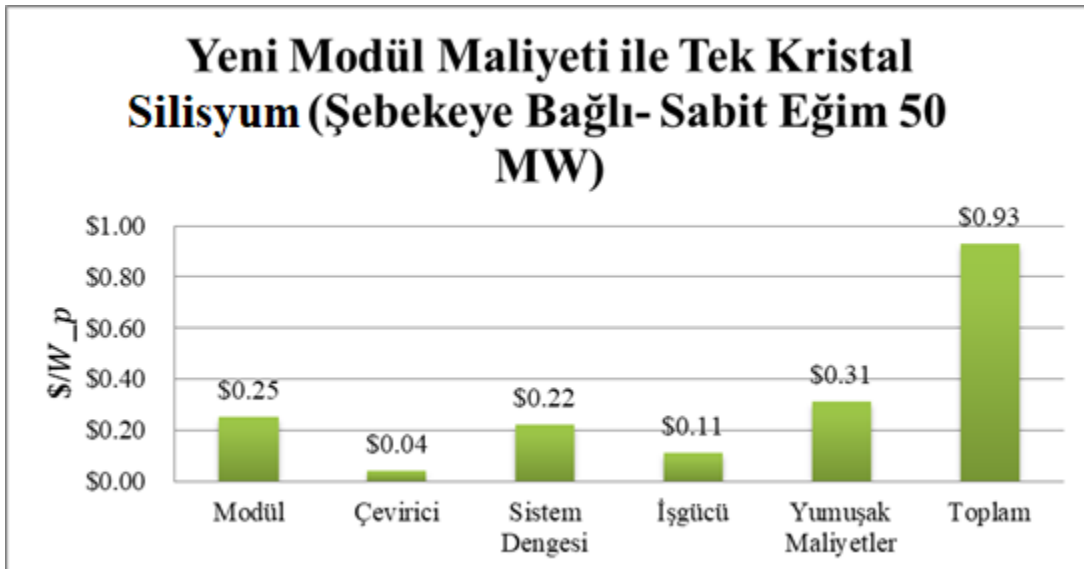
Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Şebekeye Bağlı) aşağıdaki çizelge ile gösterilmektedir (Bu veriler Amerika Birleşik Devletleri içindir):

Çizelge 4.6. Tek c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetler (Şebekeye Bağlı)



Yeni Modül Maliyetli (Şebeke Bağlantılı) c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenlerinin Maliyeti aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir (Bu veriler Amerika Birleşik Devletleri içindir):

Çizelge 4.7. Yeni Modül Maliyeti ile c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyetleri (Şebekeye Bağlı)



Modül üretimindeki maliyet düşüşü, son sonuçlara göre \$0.12/W'dir.

c-Si fotovoltaik sistem bileşenleri maliyetleri bir tabloda özetlenmiştir

Çizelge 4.8. c-Si fotovoltaik sistem bileşenleri maliyetleri

Konut	Ticari	Şebekeye Bağlı	Yeni Modül Maliyeti ile Şebekeye Bağlı
\$2.68	\$1.60	\$1.05	\$0.93

4.4 Basit Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti Hesaplayıcı Sonuçları

Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti hesaplama yazılımının çalıştırmanın sonucu aşağıdaki gibidir:

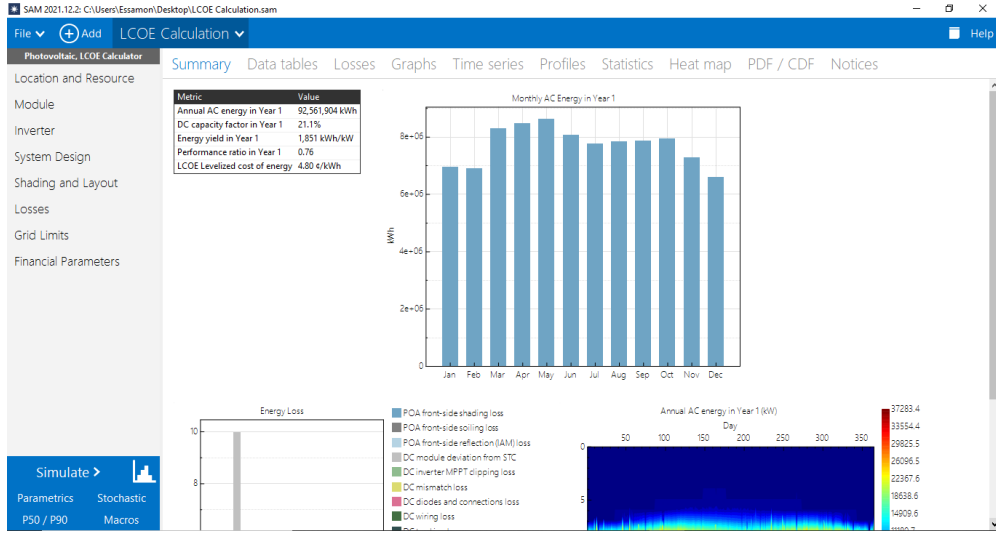
Çizelge 4.9. Fotovoltaikler için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti

Results	
Levelized Cost of Utility Electricity (cents/kWh):	16.2 ?
Simple Levelized Cost of Renewable Energy (cents/kWh):	6.0 ?

Fotovoltaikler için Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti 6.0 sent/kWh olarak hesaplanmıştır (Bu analizin finansman sorunlarını, iskonto sorunlarını, gelecekteki değiştirme veya bozulma maliyetlerini içermediğini. Kapsamlı bir analiz için bunların her birinin dahil edilmesi gerekir.)

4.5 Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılım Sonuçları

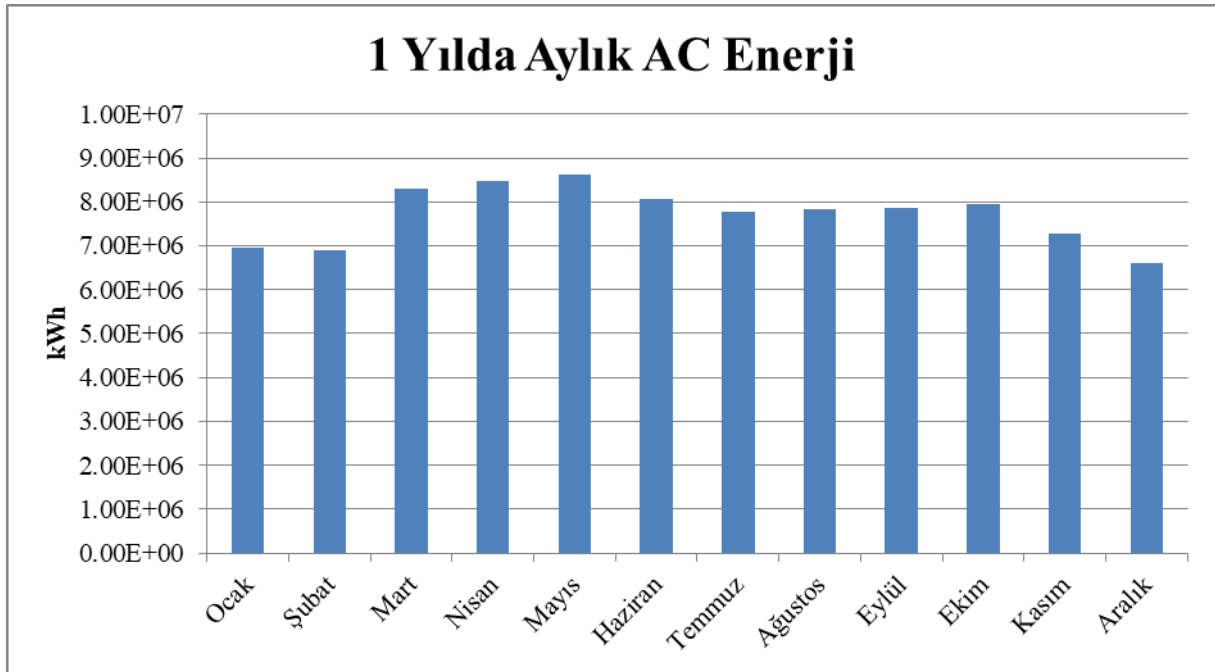
Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Sonuçları Sekmesi aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Bu analiz Phoenix, Arizona - ABD içindir):



Şekil 4.1. Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Sonuçları Sekmesi

50 MW şebekeye bağlı bir sistem için yıllık aylık AC enerjisi aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir:

Çizelge 4.10. 50 MW'lık bir şebekeye bağlı sistem için bir yılda aylık AC enerjisi



50 MW'lık bir şebekeye bağlı sistem için Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımından Temel Metrik Sonuçları aşağıdaki grafikte gösterilmektedir:

Çizelge 4.11. 50 MW'lık bir şebekeye bağlı sistem için Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) Yazılımından Temel Metrik Sonuçları

Metrik	Miktar
1. Yılda yıllık AC enerjisi	92,561,904 kWh
1. Yılda DC kapasite faktörü	21.1%
1. Yılda enerji verimi	1,851 kWh/kW
1. Yılda performans oranı	0.76
LCOE Seviyelendirilmiş enerji maliyeti	4.80 ¢/kWh

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

5.1 Sonuçlar

Modülün Minimum Sürdürülebilir Fiyatlar bu tezde aşağıdan yukarıya üretim maliyet analizi ile incelenmiştir.

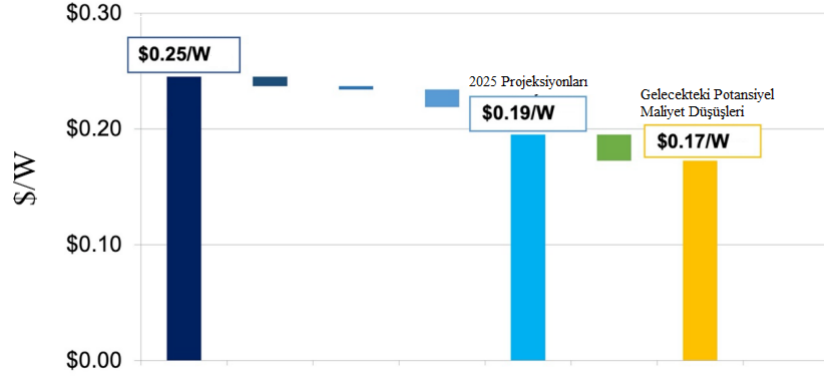
- 1- Şekil 5.1, kentsel Çin'de 1.0 GW'den fazla üretim yapan ve modül maliyetinin (**0.25 \$/W_p**) olduğu bir tesiste seri üretime gömülü c-Si FV teknolojisinin sonuçlarını özetlemektedir.
- 2- Fotovoltaik maliyetini azaltmak için ihtiyaç duyulan araştırma alanları şunlardır: Malzemeler, (Muayene, Elektrolüminesans ve Laminasyon Teknikleri). Bu, modüllerin verimliliğinin artması ve genel olarak daha az malzeme kullanımı ile sonuçlanır, böylece toplam modül maliyetini düşürür.
- 3- ABD'de yerleşik üç farklı kategori (Konut, Ticari ve Şebeke Bağlantılı) için toplam sistem maliyetleri (\$/W) sırasıyla: 2.68, 1.60 ve 1.05 \$/W_p'dir. Ve modülün şebekeye bağlı ölçeği için hesaplanan yeni maliyet rakamı (0.25 \$/W_p) ile tüm fotovoltaik sistem maliyeti için yeni sonuç **0.93 \$/W_p**'ye düştü.
- 4- Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model – SAM) kullanılarak Phoenix, Arizona - ABD için Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti ve daha önce elde edilen sistem maliyeti şu şekilde hesaplanmıştır: **4.80 ¢/kWh**, bu da 11.96 ¢/kWh'lik geleneksel şebeke elektriğinin maliyetiyle rekabet edebilir.

5.2 Öngörülen Modül Fiyat Tahminleri

- 1- 2025 projeksiyonu, daha büyük Czochralski külçe boyutları, daha ince pullar, azaltılmış Ag pasta kullanımı, daha yüksek verim ve %23 modül verimliliğine artış varsayıyor. Spesifik olarak, bu, külçe kütlesinin 375 kg'dan 450 kg'a çıkarılmasını, pulların 160 µm kalınlığa (180 µm'den) inceltmesini ve projeksiyonlara dayalı olarak bir M6 pul formatına geçişi içerir.
- 2- Ayrıca, Ag kullanımının 50 mg/hücre'ye düşeceği, hücre veriminin iki katına çıkması ve modül veriminin %30 oranında artacağı varsayılmaktadır. Uzun vadeli

projeksiyon, yüksek verimli n-tipi modüllerin yaygın olarak benimsenmesi nedeniyle ortalama modül verimliliğinin %26'ya yükseldiğini varsayar.

Öngörülen modül fiyat tahminleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:



Şekil 5.1 Öngörülen Modül Fiyat Tahminleri

KAYNAKLAR

- [1] Nagy, «Statistical basis for predicting technological progress,» *PLOS One*, cilt 8, 2013.
- [2] Grubler, «Dynamics of energy technologies and global change,» *Energy Policy*, cilt 27, p. 247–280, 1999.
- [3] McDonald, «Learning rates for energy technologies,» *Energy Policy*, cilt 29, p. 255–261, 2001.
- [4] G. S. Atlas, «Global Solar Atlas,» Available: <https://globalsolaratlas.info/global-PV-potential-study>.
- [5] V. F. e. al., «Emissions from Photovoltaic Life Cycles,» *Environmental Science & Technology*, cilt 42, p. 2168–2174, 2008.
- [6] P. Insights, «www.PVinsights.com,» 2021. Available: <http://PVinsights.com/Knowledge>.
- [7] M. O. F. o. Photovoltaics.
- [8] Available: <https://sites.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap10/chap10.htm>.
- [9] E. Yablonovitch ve G. Cody, «Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells,» %1 içinde *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1982.
- [10] E. J. Brook, «Tiny Bubbles Tell All,» *Atmospheric science*, cilt 310, pp. 1285-7, 2005.
- [11] e. p. i. association, european photovoltaic industry association.
- [12] I. E. Agency, «Electricity production by aggregate in OECD regions, variation from 2020 to 2021,» International Energy Agency, 2022.
- [13] S. M. Research, SFV Market Research, 2019.
- [14] D. M. Powell, «Crystalline silicon photovoltaics: a cost analysis framework for determining technology pathways to reach baseload electricity costs,» *Energy & Environmental Science*, cilt 5, no. 3, p. 5874–5883, 2012.
- [15] K. A. W. Horowitz, «A bottom-up cost analysis of a high concentration PV module,» %1 içinde *American Institute of Physics Conference Proceedings*, Aix-les-Bains, France, 2015.
- [16] S. Shimura, «Production costs estimation in photovoltaic power plants using reliability,» *Solar Energy*, cilt 133, pp. 294-304, 2016.
- [17] NREL, « U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017,» NREL, 2017.
- [18] A. Jäger-Waldau, «Snapshot of photovoltaics,» *EPJ Photovoltaics*, cilt 9, p. 6, 2018.
- [19] G. Kavlak, «Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules,» *Energy Policy*, cilt 123, pp. 700-710, 2018.
- [20] C. F. Keziban ÇALIKK, «A Cost-Effective Theoretical Novel Configuration of Concentrated Photovoltaic System with Linear Fresnel Reflectors,» *Journal of Polytechnic*, cilt 3, pp. 583-589, 2019.
- [21] «solar.com,» Solar, 2021. Available: <https://www.solar.com/learn/solar-panel-cost/>.
- [22] O. Ozcan, «Project and cost-based evaluation of solar energy performance in three different geographical regions of Turkey: Investment analysis application,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, cilt 22, no. 4, pp. 1098-1106, 2019.
- [23] «Evaluation Model for Investment in Solar Photovoltaic Power Generation Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process,» *Sustainability*, cilt 11, no. 10, p. 2905, 2019.
- [24] N. L. Chang, «A bottom-up cost analysis of silicon–perovskite tandem photovoltaics,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, pp. 1-13, 2020.

- [25] Kavlak, «Metal production requirements for rapid photovoltaics deployment,» *Energy & Environmental Science*, cilt 8, p. 1651–1659, 2015.
- [26] R. J.-A. a. R. M. David Feldman, «Quantifying the impact of R&D on PV project financing costs,» *Energy Policy*, cilt 142, no. C, 2020.
- [27] S. E. T. Office, «Energy Efficiency and Renewable Energy,» 2021. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-soft-costs-basics>.
- [28] I. T. R. f. Photovoltaic, «Large Format Wafer Preferred, But More Development Work Required,» VDMA, 2021.
- [29] S. E. I. a. Association, «Solar Market Insight Report 2022 Q2,» Solar Energy Industries and Association, 2022.
- [30] I. C. National Renewable Energy Laboratory, «Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results,» National Renewable Energy Laboratory, 2021.
- [31] D. Feldman, V. Ramasamy ve R. Margolis, «U.S. Solar Photovoltaic BESS System Cost Benchmark Q1 2020 Report,» National Renewable Energy Laboratory, 2021.
- [32] J. Svarc, «Solar Panel Construction,» 2020.
- [33] I. E. Agency, «Renewables 2017–Analysis and Forecasts to 2022,» International Energy Agency, 2017.
- [34] R. J.-A. a. R. M. David Feldman, «Quantifying the impact of R&D on PV project financing costs,» *Energy Policy*, cilt 142, no. C, 2020.
- [35] Trancik, «Energy technologies evaluated against climate targets using a cost and carbon trade-off curve,» *Environmental Science & Technology*, cilt 47, p. 6673–6680, 2013.
- [36] Trancik, «Renewable energy: Back the renewables boom,» *Nature*, cilt 507, p. 300–302, 2014.
- [37] Hertwich, «Integrated life-cycle assessment of electricity supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, cilt 112, p. 6277–6282, 2015.
- [38] Braff, «Value of storage technologies for wind and solar energy,» *Nature Climate Change*, cilt 6, p. 964–970, 2016.
- [39] S. V. Study, «SunShot Vision Study. Technical Report,» U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2012.
- [40] Bettencourt, «Determinants of the pace of global innovation in energy technologies,» *PLoS One*, cilt 8, 2013.
- [41] Funk, «What drives exponential improvements?,» *California Management Review*, cilt 55, p. 134–152, 2013.
- [42] Goodrich, «A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, cilt 114, p. 110–135, 2013.
- [43] Jones-Albertus, «Technology advances needed for photovoltaics to achieve widespread grid price parity,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, cilt 24, p. 1272–1283, 2016.
- [44] I. c. N. E. Observatory.
- [45] <http://www.answers.com/topic/solar-power-1>.
- [46] <http://www.PVeducation.org/PVcdrom>.
- [47] T. S. e. al, «Toward A 25%-efficient polycrystalline thin-film tandem solar cell,» %1

içinde *Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003.

- [48] M. a. T. Kavlak, «Evolution of solar PV module cost by data source, 1970-2020,» Bloomberg LLP, 2020.
- [49] S. e. a. Woodhouse, «Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map,» National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, Colorado, 2019.
- [50] Greentechmedia, «Greentechmedia,» 2020. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-PV-has-become-cheaper-and-better-in-the-2010s-now-what>.
- [51] A. I. a. P. R. Michael Taylor, «Renewables: The True Costs,» International Renewable Energy Agency, 2020.

EKLER**EK-1 Solar Fotovoltaik Veri Kümesi (Maliyet Karşılaştırmaları 2020)[31]**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Modül	\$ 2.67	\$ 2.24	\$ 1.16	\$ 0.80	\$ 0.77	\$ 0.76	\$ 0.69	\$ 0.37	\$ 0.48	\$ 0.39	\$ 0.38
Çevirici	\$ 0.48	\$ 0.72	\$ 0.48	\$ 0.45	\$ 0.34	\$ 0.32	\$ 0.23	\$ 0.20	\$ 0.22	\$ 0.23	\$ 0.22
Sistem Dengesi	\$ 0.58	\$ 0.53	\$ 0.50	\$ 0.54	\$ 0.50	\$ 0.36	\$ 0.39	\$ 0.38	\$ 0.32	\$ 0.29	\$ 0.27
İş gücü	\$ 1.17	\$ 0.74	\$ 0.70	\$ 0.87	\$ 0.35	\$ 0.36	\$ 0.32	\$ 0.32	\$ 0.28	\$ 0.25	\$ 0.24
Yumuşak Maliyetler - Diğer (Satış Vergisi, Genel Gider ve Kar)	\$ 2.62	\$ 2.39	\$ 1.83	\$ 1.42	\$ 1.63	\$ 1.57	\$ 1.52	\$ 1.67	\$ 1.49	\$ 1.40	\$ 1.36
Model Güncellemelerinden Ek Maliyetler*										\$ 0.21	\$ 0.24
Toplam	\$ 7.53	\$ 6.62	\$ 4.67	\$ 4.09	\$ 3.60	\$ 3.36	\$ 3.16	\$ 2.94	\$ 2.78	\$ 2.77	\$ 2.71

EK-2 c-Si Fotovoltaik Sistem Bileşenleri Maliyet Veri Kümesi (2020)

	Tek Kristal (Şebekeye Bağlı)	Tek Kristal (Ticari)	Tek Kristal (Konut 7.3kW Sistem)
Modül	\$ 0.37	\$ 0.37	\$ 0.37
Çevirici	\$ 0.04	\$ 0.09	\$ 0.22
Sistem Dengesi	\$ 0.22	\$ 0.24	\$ 0.30
İşgücü	\$ 0.11	\$ 0.23	\$ 0.26
Yumuşak Maliyetler	\$ 0.31	\$ 0.77	\$ 1.53
Toplam	\$ 1.05	\$ 1.60	\$ 2.68