

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**DALGACIK ANALİZİ KULLANILARAK OPTİK FOTOĞRAFLARDAN
BULUTLULUK ORANI TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur Berkay KAHVECİ

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**DALGACIK ANALİZİ KULLANILARAK OPTİK FOTOĞRAFLARDAN
BULUTLULUK ORANI TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Uğur Berkay KAHVECİ
(301151022)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burak BARUTÇU

HAZİRAN 2018

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301151022 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Uğur Berkay KAHVECİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DALGACIK ANALİZİ KULLANILARAK OPTİK FOTOĞRAFLARDAN BULUTLULUK ORANI TAYİNİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Burak BARUTÇU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sema TOPÇU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zafer ASLAN
İstanbul Aydın Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **8 Haziran 2018**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışmada giderek önem kazanan yenilenebilir enerji sektöründeki güç üretim tahminine destek olması ve konuyla ilgili bilgi eksikliğinin giderilmesi amacıyla Dalgacık Analizi yöntemi kullanılarak bulutluluk oranı tayini yapılmıştır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği olağanüstü desteklerden ve katkılardan dolayı danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Burak BARUTÇU'ya en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmayı mümkün olduğunca kolay bir şekilde gerçekleştirmeme olanak sağlayan ve her zaman yanımda olan aileme oldukça minnettarım.

Son olarak ise hayatımda olduğu için kendimi çok şanslı hissetmemi sağlayan ve tez yazım sürecinde verdiği motivasyonla her türlü teşekkürü hak eden Gökçen GÖKÇELİ'ye çok teşekkür ederim.

Haziran 2018

Uğur Berkay Kahveci
(Fizik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
2. GÜNEŞ HÜCRESİ TEKNOLOJİSİ VE KARAKTERİSTİKLERİ	5
2.1 Güneş Hücresi Teknolojisi	5
2.1.1 Kristal silikon güneş hücreleri	6
2.1.1.1 Monokristal hücreler	6
2.1.1.2 Polikristal hücreler	7
2.1.2 İnce film güneş hücreleri	8
2.2 Güneş Hücresinin Karakteristiği	13
2.2.1 Kısa devre akımı	14
2.2.2 Açık devre gerilimi	14
2.2.3 Güç	14
2.2.4 Maksimum güç noktası (MPP)	15
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	17
3.1 Modül ve Diziler	17
3.1.1 Seri bağlantı	18
3.1.2 Paralel bağlantı	18
3.2 Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler	19
3.3 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler	20
4. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE PERFORMANSI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	23
4.1 Çevresel Faktörler	23
4.1.1 Ortalama solar radyasyon yoğunluğu	23
4.1.2 Hücresinin çalışma sıcaklığı	23
4.1.3 Panel yüzeyinin kirlenmesi	24
4.1.4 Korozyon	24
4.1.5 Gölge etkisi	25
4.1.6 Yansıma önleyici kaplama	26
4.2 Yapısal Faktörler	27
4.2.1 Güneş hücresi tipi	27
4.2.2 İlk çalışma	27
4.2.3 Panel üzerinde oluşan izler (Snail trail-Salyangoz izi)	28

4.3 İşletimsel Faktörler	29
5. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ (WAVELET TRANSFORM)	31
5.1 Fourier ve Dalgacık Dönüşümü İle İlgili Temel Bilgiler	31
5.2 Dalgacık Dönüşümünün Kullanım Alanları	34
6. YÖNTEM.....	35
6.1 Fotoğrafların Çekilmesi.....	35
6.2 Fotoğrafların Ön İşleme Tabi Tutulması	35
6.3 Dalgacık Ayrıştırmasının Uygulanması	36
6.4 Bulutluluk Oranının Hesaplanması	38
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	47
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ	55

KISALTMALAR

AM 1.5	: 1.5 Air mass
a-Si	: Amorf silisyum
a-Si:H	: Hidrojen katkılı amorf silisyum
BMP	: Bitmap formatı
CdS	: Kadmiyum sülfür
CdTe	: Kadmiyum tellür
CIGS	: Bakır-İndiyum-Galyum-Selenür
CZTS	: Bakır-Çinko-Kalay-Sülfür
CZTSSe	: Bakır-Çinko-Kalay-Sülfür-Selenür
Db-2	: Daubechies-2 dalgacığı
Db-6	: Daubechies-6 dalgacığı
EVA	: Etilen vinil asetat
GES	: Güneş enerjisi santrali
GH1	: Güneş hücresi-1
GH2	: Güneş hücresi-2
JPEG	: JPEG formatı
KZFD	: Kısa zamanlı fourier dönüşümü
MAX	: Maksimum değer
MSE	: Hataların karelerinin ortalaması (Mean Square Error)
m-Si	: Monokristal silisyum güneş hücresi
PSNR	: Peak Signal to Noise Ratio (Pik sinyal-gürültü oranı)
PVF	: Polivinil florür filmler
SnO₂	: Kalay-4-oksit
TiO₂	: Titanyum dioksit
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

SEMBOLLER

a	: Panelin genişliği (m)
a₀, a_n, b_n	: Fourier katsayıları
A_g	: Panel ya da modül alanı (m ²)
C	: Elektron yük birimi
d	: Paneller arası bırakılması gereken minimum mesafe (m)
G_{eff}	: Efektif solar ışıyım yoğunluğu
I₀	: Diyodun doyma akımı
I_F	: Solar radyasyonun hücrede oluşturduğu akım
I_{pil}	: Güneş hücresinden alınan akım
I_{sc}	: Kısa devre akımı
k_B	: Boltzmann sabiti
η_g	: Panel ya da modül verimi
P_{dc}	: Panelden alınan DC güç değeri
P_m(T)	: Panel sıcaklığı T iken panelden alınan maksimum güç
P_{m,SKA}	: Panel standart koşullar altındayken panelden alınan maksimum güç
q	: Elektron yükü
R_P	: Paralel direnç
R_S	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık birimi
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
V_{yük}	: Yük gerilimi
Z	: Azimut açısı
Z_S	: Güney azimut açısı
β	: Tilt açısı
μ_P	: Panelin sıcaklık düzeltme katsayısı
δ	: Deklinasyon açısı
ε	: Gölgeleme açısı
φ	: Enlem açısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 8.1 : Bulutluluk oranları ve elde edilen başarı dereceleri.....	47
Çizelge 8.2 : Fotoğrafların PSNR değerleri.....	48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Monokristal güneş paneli ve hücresi	7
Şekil 2.2 : Polikristal güneş paneli ve hücresi	7
Şekil 2.3 : Amorf silisyum güneş paneli.....	9
Şekil 2.4 : Tek eklemlili CdTe ince film güneş hücresinin yapısı.....	10
Şekil 2.5 : CIGS ince film güneş hücresinin yapısı.....	11
Şekil 2.6 : Perovskit güneş hücresinin yapısı.....	12
Şekil 2.7 : Güneş hücresinin elektriksel devre olarak gösterimi (tam çizgiler – ideal durum, parçalı çizgiler – ideal olmayan durum).	14
Şekil 2.8 : Güneş hücresinin akım-gerilim (A-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri.	15
Şekil 3.1 : Seri bağlanmış güneş hücreleri.	18
Şekil 3.2 : Paralel bağlanmış güneş hücreleri.....	19
Şekil 3.3 : Doğru akım ve alternatif akımla çalışan yüklerin bulunduğu şebekeden bağımsız fotovoltatik sistem şeması.....	21
Şekil 4.1 : Panel içerisine sızan su buharı.....	25
Şekil 4.2 : Solar radyasyon ve güneş hücrelerinin soğurma spektrumları.....	26
Şekil 4.3 : Bazı ince film güneş hücrelerinin ilk 10 sene içerisindeki normalize edilmiş performans değerleri.	28
Şekil 4.4 : Fotovoltatik panellerde gözlenen salyangoz izi lekesi.....	28
Şekil 4.5 : Kontakları salyangoz izine karşı dayanıklı malzemeden (a) ve salyangoz izine karşı hassas malzemeden (b) yapılmış hücrelerin mikroskopik görünümü.	29
Şekil 4.6 : Panel ve azimut açılarının gösterimi.	30
Şekil 4.7 : Diziler arası mesafe ve diğer ilgili parametrelerin şekilsel gösterimi.....	30
Şekil 5.1 : Sinüs ve kosinüs dalgaları.	33
Şekil 5.2 : Bazı dalgacık ailelerinden sıklıkla kullanılan dalgacıklar.....	33
Şekil 5.3 : 2 boyutlu ayırık dalgacık ayrıştırmasının (4 aşama) kullanıldığı örnek bir çalışma, a) Asıl fotoğraf, b) 1. Kademedeki dikey detay sabiti, c) Ters ayrıştırma ile sentezlenen fotoğraf, d) Ayrıştırmanın tümünün şematik gösterimi.....	34
Şekil 6.1 : Kullanılan renk skalası (a), 2.aşama dikey detayı db-2 (b), 1.aşama dikey detayı db-6 (c), 1.aşama dikey detayı db10 (d) ve 3.aşama dikey detayı haar (e).....	36
Şekil 6.2 : Daubechies-2 dalgacığı ve skala fonksiyonu.	37
Şekil 7.1 : Fotoğraf-1'in ve analiz sonuçlarının görselleri	39
Şekil 7.2 : Fotoğraf-2'nin ve analiz sonuçlarının görselleri	40
Şekil 7.3 : Fotoğraf-3'ün ve analiz sonuçlarının görselleri	41
Şekil 7.4 : Fotoğraf-4'ün ve analiz sonuçlarının görselleri	42
Şekil 7.5 : Fotoğraf-5'in ve analiz sonuçlarının görselleri	43
Şekil 7.6 : Fotoğraf-6'nın ve analiz sonuçlarının görselleri	44
Şekil 7.7 : Fotoğraf-7'nin ve analiz sonuçlarının görselleri	45
Şekil 7.8 : Fotoğraf-8'in ve analiz sonuçlarının görselleri	46

DALGACIK ANALİZİ KULLANILARAK OPTİK FOTOĞRAFLARDAN BULUTLULUK ORANI TAYİNİ

ÖZET

Günümüzde fotovoltaik güç sistemlerinin verimlilikleri her ne kadar büyük gelişmeler kaydedilse de hala düşük düzeydedir. Bu sistemlerin sahip olduğu yaklaşık yüzde 25 verim düzeyleri, güneş enerji sistemlerinin büyük ölçüde kullanılması, enerji bağımlılığının azaltılması ve çevreye karşı olan sorumlulukların yerine getirilmesi anlamında engel oluşturmaktadır. Kısa vadede yapılması gereken bu sistemlerin verimlerini düşürebilecek her türlü etkenin etkisini sıfıra indirmek ve bu teknolojilerden mümkün olduğunca fazla bir şekilde yararlanmaktır.

Güneş enerjisi sistemlerinin verimleri bu sistemlerin nasıl konumlandırıldığı, bu sistemlerde hangi ekipmanların kullanıldığı ve bunların kaliteleri, panellerin güneş ışığını hangi açıyla aldığı, gölge etkisinin olup olmadığı ve sistemin kurulduğu bölgedeki yıllık radyasyon yoğunluğunun ortalamasının ne olduğu gibi bir çok değişkene bağlıdır. Bu değişkenlerden birisi, özellikle kristal silisyum pillerin performansını önemli ölçüde etkileyen bulutluluk oranı'dır.

Eğer bulutluluk oranı fazla ise direkt ışınım oranı azalacak ve difüzif ışınım oranı ise artacaktır. Bu nedenden dolayı difüzif ışınım altında iyi performans veren amorf-silisyum güneş hücresi dışındaki neredeyse her hücrenin performansı büyük ölçüde düşecektir. Bununla birlikte günümüzde kullanılan sistemler eğer şebekeye bağlı ise bu sistemlerin ne düzeyde üretim yapacaklarının bilinmesi, başka bir deyişle sistemlerin güç öngörüsünün yapılabilmesi gerekmektedir. Sağlıklı bir şekilde hesaplanmış bulutluluk oranı verisinin güç öngörüsü için kullanılan veritabanına eklenmesi, güç öngörülerinin daha tutarlı olmasına büyük ölçüde katkıda bulunacaktır.

Bu tez çalışmasında bulutluluk oranı, çekilmiş olan yüksek çözünürlüklü fotoğrafların işaret işleme alanında oldukça başarılı olan dalgacık dönüşümü yöntemiyle analiz edilmesiyle hesaplanmıştır. Hangi dalgacığın kullanılması gerektiği konusunda özel bir renk skalası oluşturulmuş ve bu skala her bir dalgacık ile ayrı ayrı dönüşüme sokulmuştur. Bu veriler ışığında farklı hava şartlarında çekilmiş olan fotoğraflar Daubechies-2 dalgacığı kullanılarak 4 seviye boyunca ayrıştırılmış ve elde edilen en iyi yaklaşıklık bileşenine bir eşik değeri uygulanarak bulutlu bölgeler (beyaz piksel) ve bulutsuz bölgeleri (siyah pikseller) ifade eden ikilileştirilmiş (binary) fotoğraf elde edilmiştir. Sonrasında bulutlu bölgeleri ifade eden beyaz piksellerin sayısı fotoğraftaki toplam piksel sayısına oranlanarak bulutluluk oranı verisine ulaşılmıştır. Son olarak ise kullanılan yöntemin fotoğraflardaki gürültüyü ne derecede filtreleyebildiğinin anlaşılması anlamında PSNR değerleri hesaplanmış ve yöntemin bu anlamda değerlendirmesi yapılmıştır.

Sonuç olarak Dalgacık Dönüşümü'nün fotoğraflardaki gürültü bileşenlerini filtreleme konusunda oldukça başarılı olduğu ve bu başarının bulutluluk oranının yüksek doğrulukla hesaplanabilmesine olanak sağladığı görülmüştür. Özellikle açık, parçalı bulutlu ve parlaklık seviyesinin değişkenlik göstermediği kapalı hava fotoğraflarında

Dalgacık Dönüşümü yönteminin bulutluluk oranı hesaplamakta iyi sonuç verdiği ve yüksek bir doğruluk ile bulutluluk oranının hesaplandığı görülmüştür. Kapalı havalarda, özellikle de güneş ışınları sebebiyle parlaklık seviyesinin değişkenlik gösterdiği fotoğraflarda ise Dalgacık Dönüşümü yeterli derecede iyi bir sonuç verememiştir.

CLOUDINESS RATIO DETERMINATION FROM OPTIC PHOTOGRAPHS USING WAVELET ANALYSIS

SUMMARY

Nowadays, the efficiency of solar power systems are at low level although great improvements were made on the subject. According to laboratory tests, monocrystalline solar cells have 27%, polycrystalline solar cells which have been utilized widely across Europe, have 22.5% and among relatively new solar cell technologies perovskite solar cells have 21.5% efficiency when operating maximum capacity. These low efficiency values pose an obstacle to both decreasing energy dependance for all countries which policies regarding to utilizing solar energy technologies established within and fulfill responsibilities towards environment.

What needs to be done in the short term is that to diminish the effects of the factors which possibly may decrease efficiencies of these systems and to benefit from these technologies as much as possible.

Efficiencies of solar energy systems depend on many parameters such as placement of modules, equipments used in these systems and their qualities, tilt angle which may have the biggest effect in this regard, shadow effect, average annual solar irradiance at the location of modules and so on. There are many more parameters or factors that effects the power output of solar energy systems. By utilizing solar systems without considering all of the possible factors, low efficiencies tend to decrease even more and thus it becomes almost pointless to use renewable technologies as a reliable energy source.

Considering shadow effect and average annual solar irradiance parameters, these factors are also dependant to other circumstances. For instance, if shadow effect takes place in a solar system, it may stem from the dust collected on modules or objects that are in proximity such as trees or mountains but these factors do not effect solar irradiance. The phenomenon that effects solar irradiance and also causes shadow effect is formation of clouds. If clouds are present, solar system may experience shadow effect and direct/diffused radiation ratio is altered in a way that direct radiation ratio decreases and diffused radiation ratio increases. Increased diffused radiation ratio may be advantageous for amorphous solar cell systems because these cells tend to give maximum performance under diffused light conditions but apart from this particular case, increased diffused radiation ratio causes a decrease in solar energy systems' power output because of direct radiation dependance of most solar energy systems.

Moreover, being obliged to forecast power output of solar systems that are grid integrated requires accurate forecasting of power output which will only be possible if accurate data is collected. Measuring direct and diffused radiation does not contain any data regarding to whether shadow effect takes place or not. By knowing cloudiness ratio and possibly integrating this data to power output forecasting algorithms will greatly increase the accuracy of these predictions. In order to eliminate the lack of information based on accurate cloudiness ratio and to provide useful data for power

output prediction, cloudiness ratio is calculated in this thesis using widely known signal analysis technique “Wavelet Transform”.

Wavelet Transform technique is developed to be an alternative for Fourier Transform in which electrical signals is analyzed by decomposing them into complex exponentials. In FT, all the time related data is transformed into frequency domain. Although this process is very succesful providing data regarding to what frequency components are present in the signal and at what proportion, this transform does not give any information related to when these components occur in the signal. All the time related data is lost when FT is applied to any signal. In order to have an extensive information without losing time variant components, Short-Time FT was developed which gives data for both frequency and time components. Despite of being able to give information about frequency and time components, STFT is not able to present these datas with same resolution in both domains. Hence low resolution becomes apperent when STFT is applied. That is why “Wavelet Decomposition” is developed to have an extensive information about the signal without any resolution loss.

Wavelet Transform decomposes a signal into a family of wavelets. Unlike sinusiods, wavelets can be either symmetric/asymmetric, regular/irregular or sharp/smooth. Also wavelets are short-timed and have an average value of zero. There are different kind of wavelets such as Haar, Daubechies, Morlet, Coiflet, Symlets and etc. When a signal is decomposed using wavelets for N levels, signal is divided into two parts at every level, high and low-pass filters are applied to the signal after dividing process and it goes on until maximum level of decomposition (N) is reached. Section obtained after application high-pass filter is called “detail” and section obtained after application low-pass filter is called “approximation”. These filters are usually called “filter bank” and are fundamental elements of Wavelet Decomposition. High-pass filters are called wavelet functions and low-pass filters are called scaling functions.

In this thesis, cloudiness ratio is calculated by analysing high-resolution photos using Wavelet Analyzer Toolbox in MATLAB.

8 different high-resolution (10 MP) cloudy sky photos are taken from Istanbul Technical University Energy Institute. It is taken into account that photos have different cloud types and are taken during different weather conditions. The initial file format for the photos were JPEG. Just because JPEG is a compressive file format, it is not suitable for decomposition since a lot of non-visible components are erased during the process of compressing. In image processing the format Bitmap is mostly preferred. Since they have much higher resolutions and thus it is easy to perform changes on them and also have more information than any other format at pixel scale, image format is converted into BMP.

In order to determine which wavelet should be used for this study, a simple color scale that has a range of colors with lightest one being white and the darkest one being cyan, is created and decomposed using different wavelets. It has been established that Daubechies-2 wavelet should be used for this study and maximum decomposition level should be 4. Also 2-dimension discrete wavelet decomposition is used for decomposing photographs since they are 2-dimensional.

After decomposition, the approximation that gives best trade-off value between noise-free and high-resolution is chosen by visual inspection. Then, chosen approximation is binarized with black pixels indicating cloud-free areas whereas white pixels indicate cloudy areas. Next step of the study was to calculate the numbers of white pixels and dividing it to the total number of pixels in the photograph. By multiplying the result

by 100, final cloudiness ratio was obtained as percentage. Lastly, in order to determine Wavelet Transform's talent on filtering out noise components from a given photograph, PSNR was calculated using approximations and denoised approximations. Average of 54 dB PSNR value was calculated which means Wavelet Decomposition method filters out noise components almost completely.

Results of this study revealed that 2-D Discrete Wavelet Transform is very successful at filtering out noise components in photographs. Also this decomposing method is good at calculating cloud ratio for partial cloudy, clear weather and cloudy weather conditions in which brightness level is equally dispersed. Analysis was able to distinguish blue colored pixels (sky) from white colored pixels (cloud) with great success. But DWT was not able to give good results on cloudy weather conditions where average pixel value of all 3 layers were about the same and where brightness in photographs caused by sunlight was nonhomogenous.

1. GİRİŞ

Enerji kavramı ortaya konulduğu andan günümüze kadar önemini arttırarak neredeyse yeryüzündeki tüm insanlar için bilinen bir olgu olmuştur. Giderek artan insan nüfusu ile birlikte teknolojiye yaşanan gelişmeler sebebiyle birim zamanda tüketilen enerji miktarı giderek artmakta ve böylece enerji kaynaklarına olan talep de giderek artış göstermektedir. Bu nedenle de gelecekte güvenilir, verimli ve sürekliliği olan enerji kaynaklarının kullanılması gerekliliği ön plana çıkmaktadır.

Enerji kaynakları kullanımlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılırlar. Yenilenebilir ve yenilenemez enerji türleri enerji kaynaklarının kullanımlarına göre yapılan bir sınıflandırmadır, birincil ve ikincil enerji kaynakları ise bu kaynakların dönüştürülebilirliklerine göre yapılmış bir sınıflandırmadır [1].

Yenilenemeyen enerji kaynaklarına örnek olarak nükleer enerji, petrol, kömür ve doğalgaz verilebilir. Birincil enerji kaynakları değiştirilmemiş, türetilmemiş enerji kaynaklarıdır, bu enerji kaynaklarına örnek olarak kömür, petrol, doğalgaz verilebilir. Birincil enerji kaynaklarından üretilen enerji kaynaklarına ise (elektrik, benzin, hava gazı, sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) vs.) ikincil enerji kaynakları denir [2]. Sanayi devriminden bu yana artan makineleşme ve yaygınlaşan ağır endüstri beraberinde çok fazla enerji talebi doğurduğu ve mevcut sistem ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan enerji eldesi üzerine kurulu olduğu için bu gerçek şaşırtıcı değildir. Özellikle fosil yakıtların yenilenebilir enerji kaynakları arasında olmaması ve dolayısıyla zamanla tükenecekleri gerçeği günümüze kadar sürekli yükselmiş olan enerji talebinin gelecekte nasıl karşılanacağı sorusunu akıllara getirmektedir. Üstelik fosil yakıtların kullanımı sırasında çevreye vermiş oldukları zararlı atıklar düşünülürse kullanılması gereken enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması fikri değer kazanmaktadır.

Yenilenebilir enerji sürekliliği olan doğal enerji kaynaklarından elde edilen enerji türüdür. Bu enerji türleri güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi, hidrolik enerji ve hidrojen enerjisi olarak verilebilir.

Günümüzde ülkeler enerji bağımsız olabilmek adına, ekonomik durumları, teknolojik kapasiteleri ve sahip oldukları doğal kaynaklar elverdiğince yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Öyle ki, günümüzde tüketilen toplam enerjinin yüzde 20'si yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjiyle sağlanmaktadır [3]. Bu doğrultuda özellikle ülkemizde de yenilenebilir enerji alanında yatırımlar yapılmaya devam etmektedir. 2016 yılı verilerine göre Türkiye'nin yenilenebilir enerji toplam kurulu gücü 35 MW seviyelerindedir ve tüketilen toplam enerjinin 3'te 1'inden fazlası yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır [3].

Yenilenebilir enerji, fosil yakıtlar ile karşılaştırıldığında daha çevre dostu bir enerji kaynağı olarak göze çarpmaktadır ve bu sebeple kullanımının yaygınlaşmasının yanında ülkeler enerji alanında daha bağımsız olmak adına yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Bunun bir göstergesi olarak 2015 yılında 1969 GW olan küresel yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin 2021 yılında 2795 GW'a ulaşacağı öngörülmektedir[4]. Bir başka deyişle yenilenebilir enerjiden elde edilen enerji miktarı 6 yıl içerisinde yaklaşık %42'lik bir artış gösterecektir. Bu artış oldukça dramatik bir artıştır ve küresel anlamda ülkelerin yenilenebilir enerji sektörüne ne kadar önem verdiğinin ve vereceğinin açık bir göstergesidir.

Çevre dostu, güvenilir, sürekliliği olan ve yeryüzünde ki en yaygın enerji kaynaklarından birisi olan Güneş, Dünya'ya sağlamış olduğu enerji ile yeryüzünde ki yaşamın temelini oluşturmaktadır. Genel olarak bu enerjiden yararlanma yöntemleri elektrik ve ısı eldesi şeklindedir. Stefan-Boltzmann yasasından yararlanılıp yapılan hesaplamalara göre birim zamanda Güneş yüzeyinden yayılan enerji miktarı 3.8×10^{23} kW kadardır. Bu enerjinin ise 1.8×10^{14} kW'lık bir bölümü Dünya'ya ulaşmaktadır [5]. 2010 yılında küresel yıllık toplam enerji tüketiminin 15×10^{13} kwh olduğu ve bu değer 2020 yılında tahminen 18×10^{13} kwh olacağı düşünüldüğünde [6] Güneş'ten Dünya'ya gelen enerjinin büyüklüğü, bir enerji kaynağı olan Güneş'i diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre bir adım öne çıkarmakta ve Güneş enerjisinden elde edilebilecek enerjinin potansiyeli ile ilgili olarak önemli fikirler vermektedir.

2016 yılında dünya üzerindeki kümülatif solar panel kurulu gücündeki artış 2015 yılına göre %50 artış göstererek 75 GW olarak gerçekleşmiştir, bu artışın ise yaklaşık yarısını tek başına Çin gerçekleştirmiştir ve böylece ilk defa toplam güneş panelleri gücündeki artış diğer tüm yakıt türlerindeki artıştan daha fazla olmuştur [7].

Ülkemizde de güneş enerjisinin kullanımı son zamanlarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Öyle ki, Türkiye’de 2014 yılında 40 MW olan toplam güneş paneli kurulu gücü 2015 yılında 249 MW’a, 2016 yılında ise 830 MW değerine ulaşmıştır fakat sektörde yaşanan bu büyümeye rağmen güneş enerjisinin toplam kurulu güç kapasitesi içindeki payına bakıldığında bu oran sadece %1 olarak gerçekleşmiştir [3].

1.1 Tezin Amacı

Güneş enerjisinden elektrik üretiminde dikkat edilmesi gereken bir çok nokta vardır, bunlardan belki de en önemlisi üretim yapılması planlanan bölgedeki solar radyasyon değeridir fakat solar radyasyon ölçümü güneş panelinin üzerine gölge düşüp düşmeyeceği hakkında bir bilgi vermez. Dolayısıyla yüksek bir solar radyasyon ölçüm değeri, her zaman verimli ve bol üretim anlamına gelmemektedir. Bu nedenle üretim yapılan bölgedeki bulutluluk oranının hesaplanıp elde edilen verilerin öngörü yapmak için kullanılan programlara girdi olarak verilmesi bu anlamda yapılan üretim tahminlerini daha tutarlı hale getirecektir.

Bu sebeple bu tez çalışmasında gökyüzündeki bulutluluk oranı, çekilmiş olan yüksek çözünürlüklü fotoğrafların Matlab programı içerisinde yer alan Dalgacık Analizi (Wavelet Analysis) programcığı aracılığı ile işlenerek hesaplanmıştır. Gökyüzü ile ilgili veriler içeren fotoğraflar bahsedilen yöntemle ayrıştırılıp mümkün olan en gerçekçi bulutluluk oranına ulaşılmaya çalışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Bulutluluk oranı hesaplamalarının Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) kullanılarak hesaplanması literatürde sık rastlanan bir araştırma konusu olmamakla birlikte literatürde bulutluluk analizi ile ilgili araştırmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmalardan birisi 2012 yılında TÜBİTAK bünyesinde yürütülmüştür. Sözü edilen çalışmada gündüz ve gece olmak üzere iki farklı zaman diliminde çekilen fotoğraflar nümerik analiz yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Gündüz vakti çekilen fotoğraflara renkli görüntü işleme yöntemleri, gece çekilen fotoğraflara ise gri seviye eşik değeri belirleme yöntemi kullanılarak bulutluluk tespiti yapılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemler bağlantılı bileşen etiketleme yöntemi, K-means yöntemi ve Otsu yöntemidir. Çalışmanın sonucunda ise K-means yöntemiyle havanın parçalı bulutlu

olması durumunda bulutluluk tespitini yüksek doğrulukla gerçekleştirebildiği ortaya konmuştur [8].

2017 yılında Zehn, Z ve diğ. güneş enerjisi güç öngörüsünün yapılabilmesi amacıyla bulut öngörüsü araştırması yapmışlardır. Bu çalışmada çekilen gökyüzü fotoğrafları Otsu metodu kullanılarak analiz edilmiş ve bulut tespiti yapılmıştır. Sonrasında tespit edilen bulutun konumu, şekli ve deformasyonunu dijital ortama aktarabilmek amacıyla matematiksel bir yöntem ortaya konmuştur. Devamında bulut deformasyon sürecinin bulutlar hakkında elde edilen dijital ortamdaki bilgiler kullanılarak bir algoritma aracılığı ile optimizasyonu yapılmıştır. Son olarak ise lineer ekstrapolasyon yöntemi ile ileri bir zamandaki bulut şekli ve konumu öngörülmüştür. Çalışma sonucunda gerçekleştirilen simülasyonlar ile ortaya konan yöntemin uygulanabilirliği kanıtlanmıştır [9].

2. GÜNEŞ HÜCRESİ TEKNOLOJİSİ VE KARAKTERİSTİKLERİ

2.1 Güneş Hücresi Teknolojisi

Güneş panelleriyle günlük hayatta kullandığımız çoğu elektronik eşyaya çalışmaları için gerekli enerji sağlanabilmektedir, hatta günümüzde büyük yapıların ihtiyaç duydukları enerji dahi güneş pillerinden elde edilen elektrik enerjisiyle karşılanabilmektedir. Öyle ki büyük bir yapıda elektriklerin kesilmesi durumunda güneş pillerinden elde edilen elektrik enerjisinin akülerde depolanmasıyla güneş enerjisi kimi durumlarda hayat kurtarıcı olabilmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik eldesi yöntemi temelde fotoelektrik etki prensibine dayanır. Bu sürecin fotoelektrik etkiden tek farkı iletken olarak yarı-iletken kullanılmasıdır. Yarı iletken malzemelerin elektrik akımına karşı gösterdikleri direncin büyüklüğü çoğu metal ve tüm yalıtkanların elektriksel akıma karşı göstermiş oldukları direnç değerlerinin arasında kaldığı için bu tip maddelere yarı iletken maddeler denir [10]. Yarı iletkenlerin iletkenlikleri dışarıdan uygulanan elektriksel gerilim farkı, ısı, ışık ve manyetik alan gibi etkiler ile metallerin aksine kontrol edilebildiği için bu maddeler güneş hücreleri dahil olmak üzere günümüzdeki çoğu elektronik cihazda kullanılmaktadır. Fotonlar yarı-iletken yüzeyine gelir ve yarı-iletken bünyesindeki herhangi bir ya da birden fazla elektrona sahip olduğu enerjisinin tamamını ya da bir kısmını verip, elektronu bir üst enerji seviyesine taşır. Bu olay sonucunda bir elektron-hole çifti meydana gelir. Elektron mümkün olduğunca kısa bir süre içerisinde bir önceki durumda bulunduğu enerji seviyesine geri dönme eğiliminde olacağından ya da başka bir deyişle oluşan “hole” ile tekrar biraraya gelmeye çalışacağından ötürü çoğunlukla pozitif ve negatif katkılandırılmış yarıiletkenler oluşturulup bir elektrik alan yaratılarak bu durumun önüne geçilir ve elektronun devreyi dolaşması sağlanır. Böylece elektrik akımı meydana gelmiş olur.

Silikon güneş pillerinde en çok kullanılan elementtir ve bir yarı-iletkendir. Silikon’un doğada fazla miktarda bulunması ve dolayısıyla maliyetinin fazla olmaması, yüksek sıcaklıklarda iletkenlik özelliğinin dramatik bir şekilde artması, çevreye zararının

oldukça az olması ve kristal formdaki Silikon'un yapısının neredeyse mükemmel olması bu durumun sebepleri olarak verilebilir [11]. Bu durumun aksine Silikon'un güneş ışınlarını absorbe etme kapasitesi oldukça düşüktür bu yüzden üretilecek olan güneş hücresinin güneş ışınlarını hapsetmesi başka bir deyişle mümkün olduğunca içinde tutması gerekmektedir ve bu nedenle güneş pillerinde mümkün olduğunca saf, nispeten kalın veya birden çok silikon katmanını kullanılması gerekmektedir [12].

2.1.1 Kristal silikon güneş hücreleri

2.1.1.1 Monokristal hücreler

Günümüzde laboratuvar koşullarında en yüksek verimin elde edildiği fakat üretiminin de bir o kadar zahmetli olduğu Monokristal Güneş Pilleri büyük çoğunlukla Czochralski metoduyla elde edilen ingottan üretilmektedir. Bu metod yüksek orada saflaştırılmış polisilikonun inert gaz ortamında eritilmesi işlemi ile başlar, tüm proseslerin sonunda hangi tip yarıiletken elde edilmek isteniliyorsa çözeltiye o doğrultuda katkılandırmalar yapılır ve ergimiş hale gelen polisilikonun içerisine bir çubuğa bağlı “kristal tohum” denilen tek bir silikon kristali batırılır ve çözeltinin içerisinde bulunduğu pota ile ters yönde ve eşit hızda döndürülerek çözelti dışına doğru istenilen hızda çekilir. Bu aşamayı ergimiş halde bulunan silikonun tohum etrafında toplanıp katılaşması süreci takip eder. Kristal tohumun ergimiş çözelti içerisinde çıkarılırken ki hızı ve ortam sıcaklığı oluşan kristal yapının çapını bir kaç milimetre seviyesinde tutacak şekilde ayarlanır böylece tohum ve çözeltinin ilk temas ettiği anda oluşabilecek muhtemel dislokasyonlar elimine edilmiş olur. Dislokasyonlar elimine edildikten sonra çubuğun dönüş hızı ve çubuğun çözelti içinden çıkartılma hızı tekrar ayarlanıp oluşmakta olan ingotun istenilen kalınlık değerine ulaşması sağlanır. Sonrasında ise oluşan silisyum ingotu elmas kesiciler ile istenilen kalınlıklarda yatay olarak kesilir fakat oluşan ingot silindirik yapıda olduğundan dolayı kesim sonrası oluşan katmanlar da dairesel şekilde olmaktadır. Panel üreticileri panel yüzeyini mümkün olduğunca dolu olarak kullanmak istedikleri için kesim sonucunda oluşan dairesel katmanlar altıgene benzer bir biçimde kesilir ve son şekillerini almış olurlar [11, 13]. Monokristal panel ve hücresi Şekil 2.1’de verilmiştir.

2017 yılında yapılan laboratuvar testlerine göre monokristal silikon güneş pillerinin verimleri yaklaşık yüzde 27 olarak ölçülmüştür [14].



Şekil 2.1 : Monokristal güneş paneli ve hücresi.

2.1.1.2 Polikristal hücreler

Güneş hücresi üretmenin başka bir yolu Czochralski metodundaki kristal tohumunu ergimiş çözültiden çıkarma işleminin olmadığı, bunun yerini “kalıp dökme” işleminin aldığı bir yöntemdir. Bu yöntemde silikon çözültisi eritilir ve kare şeklindeki kalıplara dökülür, kalıpların kontrollü bir şekilde soğutulmalarıyla büyük tanecik yapılı bir silikon blok meydana gelir ve bu taneciklerin boyutları mm/cm skalasıdır. Sonrasında bu kare bloklar kablolu doğrama ile istenilen kalınlıklarda kesilip silikon katmanlar elde edilir. Bu yöntemle elde edilen hücrelerin verimleri 2017 yılında yapılan laboratuvar ölçümlerine göre %22,5 civarındadır fakat modül skalasında bu düşük verim kendisini amorti etmekte ve Polikristal Silikon Güneş pilleri düşük üretim maliyetleri sebebiyle tercih edilmektedir [12, 14].

Bu yöntemin en büyük avantajlarından birisi oluşturulan katmanların kare şeklinde olmasıdır, böylece dikdörtgen bir panelin tamamı polikristal hücreler ile doldurulabilmektedir. Polikristal panel ve hücresi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Polikristal güneş paneli ve hücresi.

2.1.2 İnce film güneş hücreleri

Fotovoltaik etkiden yararlanılarak elektrik enerjisi üretmeye yarayan bir başka güneş hücresi çeşidi de İnce Film güneş hücresi'dir. Kristal silikon güneş hücrelerinin üretimleri temelde yüksek sıcaklıklar gerektirdiklerinden dolayı pahalı olduğu için daha ucuza mal edilebilen güneş hücreleri arayışında İnce Film Güneş Hücreleri ön plana çıkmıştır.

İnce film güneş hücrelerinin bir çok çeşidi bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında üzerinde durulacak ince film güneş hücreleri sırasıyla; amorf silisyum (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum selenit (CIGS), bakır çinko kalay selenit (CZTS), perovskit ve kuantum noktalar (Quantum Dots)'dır.

Literatürün amorf silisyum (a-Si) katmanıyla tanışması Sterling ve Swann sayesinde 1965 yılında olmuştur. Bu çalışmada a-Si katmanı Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition) yöntemiyle oluşturulmuştur [15] ve bu yöntem günümüzde Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemiyle birlikte hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

Amorf kelimesi “şekilsiz” anlamına gelmektedir ve kristal yapıda olmayan tüm katıların yapısını tarif etmek için kullanılır. Amorf yapıda kristal yapıda olduğu gibi bir düzen yoktur, atomlar düzensiz bir şekilde yerleşmişlerdir ve bu nedenle amorf katılardaki bazı bağlar ya kararsızdır ya da boş durumdadır. Atomlar arasındaki kısa mesafelerdeki düzensizlik ve bağların sağlam olmaması (dangling bonds) normal dışı bir elektriksel iletkenliğe sebebiyet vermektedir [16]. Yapılan araştırmalar ve deneyler sonucunda amorf silisyum'daki bu istenmeyen durumların “Hidrojen” katkılılandırmasıyla elimine edilebileceği ortaya konmuştur fakat bu katkılılandırmanın fotovoltaik prensiple elektrik enerjisi eldesini kısıtladığı 1977 yılında Staebler ve Wronski'nin çalışmalarıyla kanıtlanmıştır, bu durum literatürde Staebler-Wronski etkisi olarak bilinmektedir [17]. Bu çalışmada Hidrojen katkılılandırılmış a-Si (a-Si:H) uzun süreyle güneş ışığına maruz bırakıldığında yapısında yarı-kararsız değişikliklerin olduğu ve bu değişikliklerin de fotovoltaik verimi dolayısıyla enerji eldesini düşürdüğü kanıtlanmıştır. Neyse ki aynı çalışmada bu olumsuz etkilerin a-Si:H örneğinin yüksek sıcaklıklarda ($>150^{\circ}\text{C}$) üzerinde tavlanmasıyla geri döndürülebildiği de deneysel çalışmalarla sunulmuştur. Amorf silisyum güneş paneli görseli Şekil 2.3'te verilmiştir.

Amorf silisyum bir direkt bant yarıiletkenidir ve sahip olduğu bu özellik sayesinde mikrometre mertebesinde ince bir a-Si katmanı güneş ışınlarının büyük bir bölümünü soğurabilir [16]. Bu özellik a-Si'nin gündelik hayatımızda kullandığımız saatlerde ve hesap makinelerinde kullanılabilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 2.3 : Amorf silisyum güneş paneli.

Bir başka ince film güneş hücresi çeşidi ise kadmiyum tellür'dür. Bir direkt band materyali olan CdTe, CIGS ve CZTS'nin aksine 1,5eV değerinde akım ve voltaj dönüşümünün en etkili gerçekleştiği hücredir [18]. Bu nedenle de güneş hücresinden elektrik üretimi için oldukça uygundur. Bununla birlikte bir çalışmada teorik olarak CdTe hücrelerinin verimlerinin %27 olduğu yapılan hesaplamalarla belirtilmiştir [19]. İlk CdTe hücresi ise Bonnet ve Rabnehorst tarafından 1972 yılında laboratuvarında üretilmiştir. Bu çalışmada çoklu p-n CdTe-CdS eklemi kullanılmış ve çalışma sonucunda %6 verim elde edilmiştir. 3 aşamanın izlendiği bu prosedürde CdTe buhar fazı birikimi yöntemiyle, CdS ise yüksek vakum buharlaşması yoluyla elde edilmiştir [20]. Tek p-n CdTe-CdS eklemli CdTe ince film yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir.

Her araştırma konusunda olduğu gibi CdTe güneş hücreleri de çeşitli araştırma ve deneyler sonucunda iyileştirilmiş ve bu güneş hücrelerinde verim 2016 yılında yapılan deneyler sonucunda yaklaşık %22 olarak ölçülmüştür [14]. Ayrıca 2015 yılında yapılan bir çalışmada CdTe ince film güneş hücrelerinin ve bu hücrelerden üretilen güneş panellerinin yapıları itibariyle düşük ışınım (low-light irradiance) altında elektrik enerjisi üretimi için uygun oldukları ortaya konmuştur [21].

Çevreye olan etkileri bakımından incelendiğinde ise literatürde yer alan çalışmalar CdTe bileşiğinin insan sağlığı için oldukça zararlı olduğu konusunda fikir birliğindedir. Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunda CdTe ince film güneş hücrelerinin çevreye bir zararı olmaması için üretimlerinin titizlikle gerçekleştirilmesi ve panellerin çevreye olumsuz etkilerinin önüne geçilmesi için geri dönüşüm

prosedürlerinin eksiksiz uygulanması gerektiği konuları üzerinde durulmaktadır [22-24].

Roma Üniversitesi'nde 2017 yılında yapılan bir araştırmanın sonuçlarına göre ise CdTe güneş hücrelerinin üretiminde silisyum güneş hücrelerinin üretimine oranla daha az fosil yakıt kaynaklı enerji (birincil enerji) tüketildiği ve dolayısıyla üretim maliyetinin ve çevreye zararının daha az olduğu sonucu ortaya konmuştur. Ayrıca yine aynı çalışmada CdTe güneş hücrelerinin, çevreye herhangi bir zararlarının olmaması ve bu teknolojinin gelecekte daha başarılı olması adına, mutlaka kullanım sürelerinin sonunda geri dönüşümlerinin yapılması gerekliliği vurgulanmıştır [23].

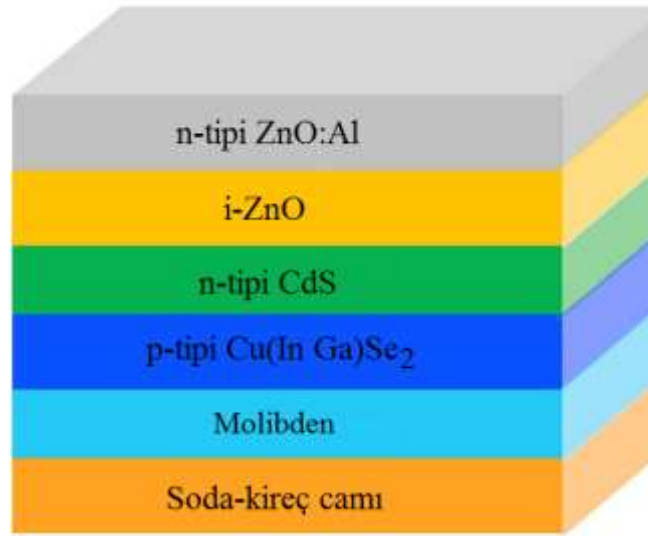


Şekil 2.4 : Tek eklemlili CdTe ince film güneş hücresinin yapısı [16].

CIGS, CdTe ince film güneş hücresi ile birlikte büyük bir potansiyele sahiptir. Bunun nedenleri olarak bu teknolojilerin a-Si ve kristal silikon güneş hücrelerine göre nispeten daha yeni üretilmiş olması ve özellikle CIGS yapısındaki her bir bileşenin bant aralığının kontrol edilebilmesi söylenebilir [25].

CuInSe₂ yapısı ilk olarak 1953 yılında H.Hahn tarafından üretilmiş ve 1974 yılında yapılan çalışmayla ilk kez fotovoltaik amaçlarla kullanılması önerilmiştir [26, 27]. CIGS ince filmlerinin yapısında altlık (substrat) olarak soda-kireç camı kullanılmaktadır, camın üstü ise p tipi Cu(InGa)Se₂ ile temas halinde ki molibden ile kaplanır. P tipi Cu(InGa)Se₂ ile n tipi CdS ana eklemi oluşturur. CdS'nin üstünde çinko oksit tabakası, en üst tabaka olarak ise alüminyum ile katkılandırılmış n tipi çinko oksit bulunmaktadır [16, 28]. Bu yapıya sahip ince film görseli Şekil 2.5'te verilmiştir.

2017 yılında gerçekleştirilen deneyler sonucunda CIGS ince filmlerinin verimlerinin %21.5 seviyesine çıkartıldığı kanıtlanmıştır [14].



Şekil 2.5 : CIGS ince film güneş hücresinin yapısı [16].

CZTS ince filmleri ise esasen yapıları gereği CIGS ince film güneş hücreleriyle büyük benzerlikler göstermektedirler. CIGS yapısında bulunan İndiyum ve Galyum elementleri Çinko ve Kalay ile değiştirilerek CZTS yapısı oluşturulabilmektedir. Bu durumun olumlu getirisi ise Çinko ve Kalay'ın çevreye olan olumsuz etkilerinin, İndiyum ve Galyum'a oranla çok düşük olması sebebiyle, CZTS ince film güneş hücrelerinin doğaya bir zararının olmamasıdır. Ayrıca CZTS yapısında kullanılan elementlerin dünya üzerinde bolca bulunduğu, dolayısıyla ucuza temin edilebildikleri ve karakteristik optik özelliklere sahip olmaları sayesinde bu ince film türü günümüzde sürekli gelişim göstermektedir [29]. Tüm bu olumlu verilerin aksine CZTS ince film güneş hücrelerinin geniş yelpazede kullanılmasının önünde bazı engeller bulunmaktadır. CZTS'nin sentezlenmesi sırasında kullanılan sülfürleştirme ve selenyumlaştırma proseslerinin farklı büyüme mekanizmalarına sebebiyet vermeleri, bu ince film türünün tez fazlı olarak sentezlenmesinin çok güç olması, molibden altlığının CZTSSe materyali ile kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan safsızlıklar, açık devre gerilimi açıklığının fazla olması (V_{oc} deficit) bu sorunların başlıcalarıdır [30].

Son 10 yıl içerisinde literatürde yer alan CZTS ince film güneş hücreleri çalışmalarının artmasıyla hakkında giderek daha fazla bilgi edinilen bu ince filmlerin verimleri 2013 yılında gerçekleştirilen bir çalışma ile %12,6 olarak ölçülmüştür [14].

Özellikle son 10 yıl içerisinde büyük gelişme gösteren bir diğer güneş hücresi türü olan Perovskit güneş hücreleri, genellikle iletken bir oksitten oluşan elektrot, yük taşıyıcı tabakaları (elektron ve deşik taşıyıcı tabakalar) ve bu tabakalar arasına

yerleştirilmiş olan aktif tabaka, son olarak ise genelde metalik karaktere sahip bir karşıt elektrottan meydana gelir. Bahsedilen yapının altına metal tabaka, üstüne ise cam tabaka yerleştirildikten sonra panel yapısı oluşturulmuş olur. İlgili yapı Şekil 2.6’da verilmiştir. Perovskit güneş hücrelerinde aktif tabaka olarak kullanılan perovskit materyaller ABX_3 kimyasal formülüne sahip bileşiklerdir ve bu formülde A organik bir katyon, B inorganik bir katyon, X ise Cl(Klorür), Br(Bromür) ve I(İyodür) gibi halojenürlerdir [16]. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda $CH_3NH_3PbX_3$ formülüne sahip perovskit materyallerin fotovoltaiik uygulamalar için çok uygun olduğu ortaya konmuştur ve bu durumun sebebi olarak bu formüle sahip bileşiklerin mobilitesinin ve elektron/deşik difüzyonu mesafesinin oldukça fazla olduğu, düşük yüzey rekombinasyon hızına ve yüksek optik soğuruculuğa sahip olmaları verilmiştir [31].

Verimli sayılabilecek ilk perovskit güneş hücreleri 2012 yılında üretilmiş olmalarına rağmen günümüze kadar bu hücrelerin verimlerinde büyük gelişme kaydedilmiştir [32] ve 2017 yılı ortalarında ortaya konan bir çalışma ile bu güneş hücrelerinde yaklaşık %21 verime ulaşılmıştır [14].



Şekil 2.6 : Perovskit güneş hücresinin yapısı [33].

Günümüzde fotovoltaiik prensiple elektrik enerjisi elde etmek amacıyla üretilmiş olan güneş hücreleri arasında teorik olarak en fazla verime sahip olan güneş hücresi kuantum noktalarla arabant oluşumlu güneş hücreleridir. Kuantum noktalar ile arabant oluşturulan bir güneş hücresinin teorik verimi 2000 yılında yapılan bir araştırmayla yaklaşık %63,2 olarak hesaplanmıştır [34]. Tek p-n eklemi kullanılarak üretilen güneş pillerinde de benzer bir çalışma gerçekleştirilmiştir ve bu hücrelerin teorik verimi ise %33,7 olarak hesaplanmıştır [35]. Verimler arasındaki bu büyük fark düşünüldüğünde kuantum nokta arabant oluşumlu güneş hücrelerinin önemi ön plana çıkmaktadır. Bu güneş hücrelerindeki temel prensip yarı iletkenlerin valans bantları ile iletim bantları arasına mevcut yarı iletken materyalinin nanometre boyutundaki tanecikleri ile bir dizi

oluşturularak ara bir bant oluşturulması ve güneşten gelen radyasyonun mümkün olduğunca büyük bir kısmının bu şekilde soğurulmasıdır.

2.2 Güneş Hücresinin Karakteristiği

Günümüzde kullanılan güneş hücrelerinin elektriksel karakteristikleri, p-n yarı iletken eklem bölgesinden oluşan bir elektriksel diyotun karakteristikleriyle benzerlik göstermektedir. P-n eklem bölgesi yerine p-i-n ya da çoklu eklem bölgelerinin kullanıldığı çalışmalar da literatürde mevcuttur [36-38]. Bu farklı çalışmalarda kullanılan eklem bölgelerinin farklılığı güneş hücresinin elektriksel karakteristiğini değiştirmemektedir, bu hücrelerin de çalışma prensipleri elektriksel açıdan bir diyotun çalışma prensipleriyle benzerlik göstermektedir [39].

Güneş hücresindeki tüm dirençlerin ihmal edildiği ideal durumda hücreden elde edilen akımı veren eşitlik Shockley diyot denklemiyle ifade edilir [40] ve denklem 2.1’de verilmiştir.

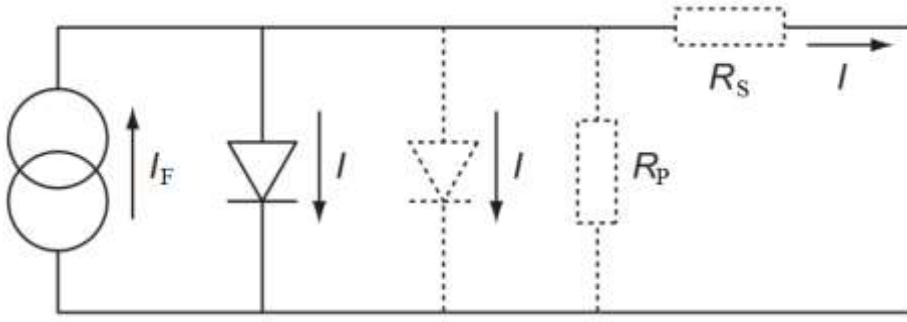
$$I_{pil} = I_0(e^{(qV / k_B T)} - 1) \quad (2.1)$$

Burada I_F solar radyasyonun hücrede oluşturduğu akım değeri, I_0 diyotun doyma akımı, q elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C), k_B Boltzmann sabiti ve T ise mutlak sıcaklığı (K) ifade etmektedir. I_F ve I_0 parametreleri güneş hücresinin karakteristik değişkenleridir ve hücreden hücreye değişkenlik gösterebilirler [39]. İdeal olmayan durumda, bir başka deyişle hücredeki kayıpların göz önünde bulundurulduğu durumda kullanılan eşitlik ise denklem 2.2’de verilmiştir.

$$I_{pil} = I_F - I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V_{yük} + I_{pil} R_S)}{k_B T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{yük} + I_{pil} R_S}{R_P} \quad (2.2)$$

Burada R_S seri dirençleri (iç dirençler), R_P ise paralel dirençleri (sızıntı akımı) ifade etmektedir ve birimleri ohm’dur.

Şekil 2.7’de güneş hücresinin ideal ve ideal olmayan durumlarda elektriksel devre eşleniği verilmiştir. I_F , solar radyasyonun hücrede oluşturduğu akım değeri, genellikle uygulanan gerilimden bağımsız olarak değişkenlik gösterir fakat bazı istisnalar bulunmaktadır [41-43].



Şekil 2.7 : Güneş hücresinin elektriksel devre olarak gösterimi (tam çizgiler – ideal durum, parçalı çizgiler – ideal olmayan durum) [43].

2.2.1 Kısa devre akımı

I_{sc} , kısa devre akımı, güneş hücresinin uçları kısa devre yapıldığında (direnç sıfır olduğunda) hücreden akan akım miktarıdır. Birimi Amper’dir. Bu akım miktarı solar radyasyon miktarıyla orantılıdır. Aynı zamanda I_{sc} hücre sıcaklığına bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir. Hücre sıcaklığındaki birim artış, kısa devre akımını kristal silikon hücrelerde hücrelerde amorf silikon hücrelere oranla daha fazla artırır. Sıcak yaz aylarında, hücre sıcaklığının büyük oranda arttığı durumlarda amorf ince film güneş hücrelerinden, kristal silikon hücrelere oranla daha iyi performans alınmasının da sebebi budur [11].

2.2.2 Açık devre gerilimi

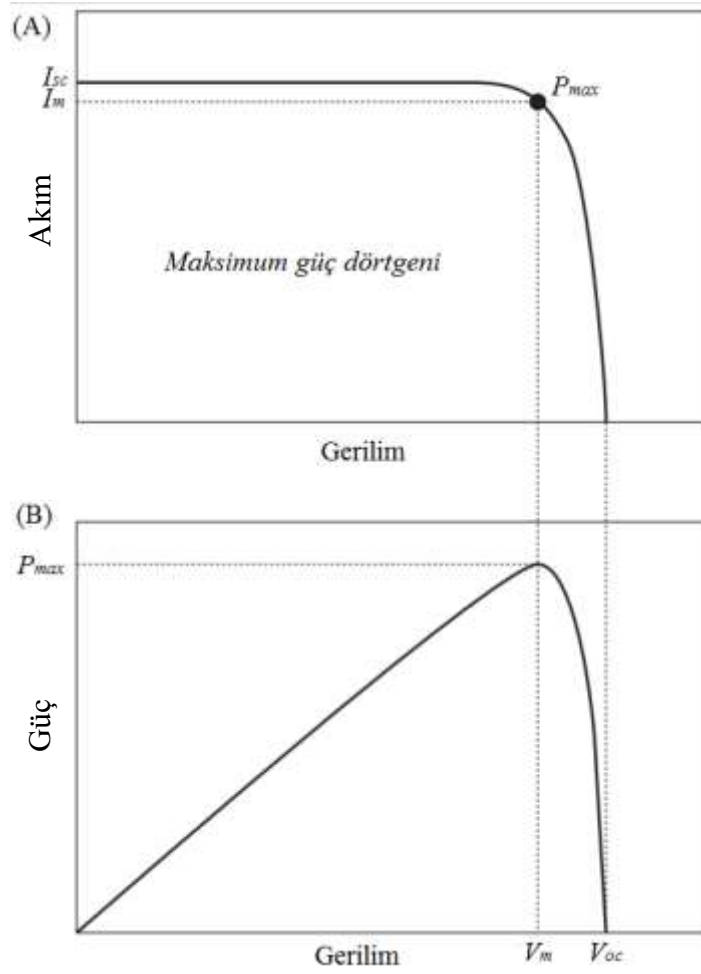
V_{oc} , açık devre gerilimi, solar radyasyonun hücrede meydana getirdiği akımın diyot üzerinden aktığı zaman diyodun uçlarında oluşan gerilime karşılık gelir. Bir başka deyişle açık devre gerilimi, hücrenin artı ve eksi uçları arasında herhangi bir yük yokken, herhangi bir akım akmazken ölçülen gerilim değeridir. Birimi Volt’tur. Kristal silikon pillerin karakteristik gerilimi 0,5-0,6V arasında iken, amorf silikon pillerde bu değer 0,6-0,9V arasındadır [11].

Şekil 2.8’de güneş hücresinin akım-gerilim (I-V) grafiği ve güç-gerilim (P-V) grafiği verilmiştir.

2.2.3 Güç

P, güneş hücresinden elde edilen güç miktarı, akım ve voltaj değerlerinin sayısal olarak çarpılmasıyla elde edilir. Birimi Watt’tır. Bu çarpım işlemi her bir akım ve voltaj değeri için gerçekleştirildiğinde elde edilen güç-gerilim (P-V) grafiği Şekil 2.8’de verilmiştir. Akımın maksimum değerini aldığı noktada (I_{sc}), gerilim ve güç değerleri

sıfırdır, gerilim değeri maksimum değerini aldığı anda ise bu durumda da akım ve güç değerleri sıfırdır.



Şekil 2.8 : Güneş hücresinin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri [43].

Bu iki nokta arasında kalan bölümde akım ve gerilim değerlerinin sıfırdan farklı olarak değişim gösterdikleri görülmektedir. Dolayısıyla güç değerinin maksimum noktada tutabilmek ve güneş hücresinden alınacak gücü maksimize etmek için güç değeri sürekli olarak izlenmelidir. Güç değeri, akım ve gerilim değerinin çarpımı maksimum değeri verecek şekilde sürekli kontrol edilerek bu işlem gerçekleştirilir ve bu noktanın adı Maksimum güç noktası (MPP)'dir.

2.2.4 Maksimum güç noktası (MPP)

Bir güneş hücresinden elde edilebilecek güç değerinin en yüksek olduğu nokta Şekil 2.8'de yer alan grafikte eğrinin eğiminin artmaya başladığı yere yakın bir noktadadır. Yaklaşık olarak bu noktadaki akım ve gerilim değerleri $V_m \sim (0,75-0,9)V_{oc}$ ve $I_m \sim (0,85-0,9)I_{sc}$ şeklindedir. Bu durumun böyle olmasının sebebi, güneş hücresinden elde

edilecek akımın ve hücre geriliminin sıcaklığa bağlı olarak düşüş göstermesi ve dolayısıyla hücreden alınacak gücün de azalmasıdır. Güçteki bu düşüş oranı kristal silikon hücrelerde 0,5%/K, amorf silikon hücrelerde ise 0,25%/K'dir [11].

Bir güneş hücresinin ya da modülünün gücü standart koşullar altında ölçümler yapılarak belirlenir ve bu değerler ilgili modülün etiketine işlenir. Ölçümlerin yapıldığı standart koşullar, 1000W/m² solar radyasyon yoğunluğu, 25°C güneş hücresi sıcaklığı ve AM 1,5 olarak belirlenmiştir.

Maksimum güç noktasını izlemenin bir çok yöntemi vardır. Bu yöntemlerin değerlendirildiği çalışmalar literatürde mevcuttur [44, 45].

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

3.1 Modül ve Diziler

Günümüzde kullanılan güneş hücrelerinin tek başına en iyi şartların sağlanması durumunda dahi üretebilecekleri elektrik enerjisinin miktarı oldukça azdır. En iyi verim alınan güneş hücrelerinden elde edilebilecek maksimum güç yaklaşık olarak $4,3W_p$ civarındadır. Dolayısıyla tek bir güneş hücresinin maksimum gücü ancak oyuncaklar, kol saatleri ve hesap makineleri için anlamlı bir büyüklük ifade edebilmektedir. Daha fazla güç ihtiyacı olan sistemler için ise birden fazla (günümüzde çoğunlukla 60 adet olmak üzere) güneş hücresinin çeşitli bağlantılar yapıp biraraya getirildiği bir güneş hücresi bütününe ihtiyaç duyulmaktadır.

Genel olarak güneş hücrelerinin biraraya getirilip, altına metal kontak ve üstüne anti reflektif cam yerleştirildikten sonra alüminyum bir çerçeve ile sabitlendiği yapıya modül veya panel denir. İnce film güneş panellerinde ise bütün bir modül üretimi yapılabildiğinden, panel oluşturabilmek için hücrelerin biraraya getirilmesi gibi bir zorunluluk bulunmamaktadır [11].

Güneş hücrelerinden modül/panel eldesi için seri ve paralel olmak üzere iki çeşit bağlantı şekli mevcuttur. Seri bağlantı hücrelerin birisinin ön yüzü ile diğerinin arka yüzü bağlanarak gerçekleştirilir, bu şekilde panelde kaç adet hücre kullanılıyorsa o oranda gerilim artışı sağlanmış olur ve bu durumda hücrelerden akacak akım eşittir. Paralel bağlantıda ise panellerin ön yüzleri ile ön yüzleri, arka yüzleri ile de arka yüzleri bağlanır, bu bağlantı ise hücreler arasındaki gerilimi sabit tutup hücrelerden alınacak olan toplam akım miktarını arttırmaktadır. Her iki bağlantı çeşidi de kullanılmaktadır. İki bağlantı şeklinin de farklı getirilerinin olması sebebiyle, hücreler arasında hangi tür bağlantının yapılacağı, elde edilecek modülün sahip olması istenen güç aralığı göz önüne alınarak belirlenmelidir.

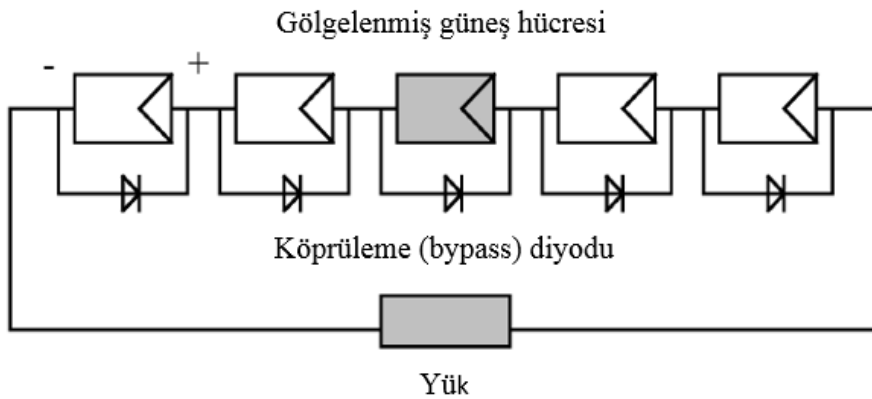
Oluşturulan modüllerin/panellerin biraraya getirilmesi ile meydana gelen yapıya ise güneş paneli dizisi denir.

3.1.1 Seri bağlantı

Bu bağlantı şeklinde her bir güneş hücresinden aynı miktarda akım akar ve toplam gerilim her bir hücrenin gerilimi toplamına eşittir. Şekil 3.1’de güneş hücrelerinin seri bağlantı şeması gösterilmiştir.

Seri bağlı güneş hücrelerinde ve dolayısıyla bu hücrelerden oluşan güneş panellerinde herhangi bir hücreye veya panelin bir bölümüne gölge düşmesiyle oluşan istenmeyen bir durum oluşmaktadır. Bu sebeple en az performansı sağlayan güneş hücresi, panel verimini de belirlemiş olur. Dolayısıyla seri bağlanmış güneş hücrelerinden oluşturulan paneller kullanılırken gölge etkisi yaratacak ağaç, kablolama gibi her türlü durum göz önüne alınmalıdır.

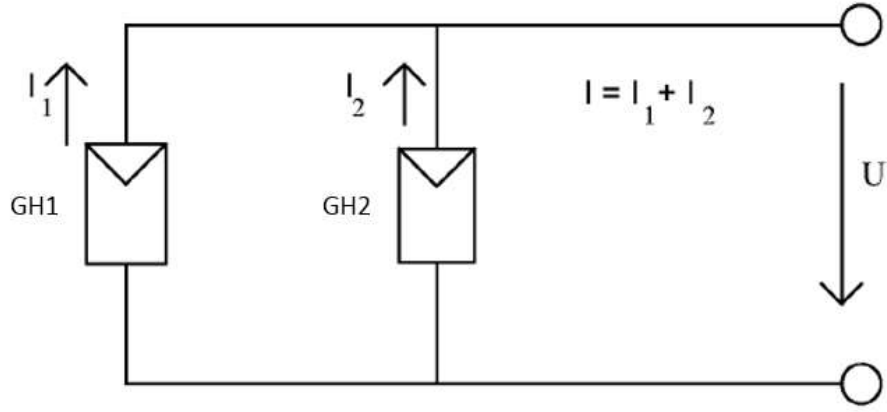
Bu etkiyi engelleyebilmek adına köprüleme diyotları denilen bir diyot kullanılır. Bu diyotlar güneş hücrelerine antiparalel olarak bağlanır ve böylece ters akım yönünde oluşabilecek yüksek gerilim farklarının önüne geçilmiş olur [11].



Şekil 3.1 : Seri bağlanmış güneş hücreleri [11].

3.1.2 Paralel bağlantı

Eğer bir güneş enerjisi panelinden daha fazla akım üretmesi bekleniyorsa panelde kullanılan güneş hücrelerinin bağlantılarının paralel yapılması gerekmektedir. Paralel bağlantı düzeninde tüm güneş hücreleri boyunca gerilim sabit iken toplam akım tüm hücrelerden akan akımın toplamıdır. Toplam akım hücrelerden gelen akımın toplamı olduğu için seri bağlantıya göre hücreler arası yapılan paralel bağlantı elde edilecek akım miktarı anlamında artış sağlayacaktır. Paralel bağlantının nasıl yapıldığı ve bu durumda hücrelerden gelen akımın nasıl oluştuğu ile ilgili şema Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Paralel bağlanmış güneş hücreleri [11].

3.2 Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler

Güneş enerjisinden fotovoltaik prensiple üretilen elektrik enerjisinin yerel şebekeye verildiği sistemlere şebeke bağlantılı sistemler denilmektedir. Bu sistemler genellikle elektrik şebekesinin bulunmadığı ya da şebekeye ulaşımın güç olduğu durumlarda kullanılır. Şebeke bağlantılı sistemlerde üretilen ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi şebekeye verilebilir, aynı zamanda üretilen elektriğin çeşitli sebepler dolayısıyla az ya da yetersiz olması durumunda ise ihtiyaç duyulan enerji şebekeden alınabilir. Sisteme monte edilecek çift yönlü sayaçlar ile elektrik alımının hangi yönde gerçekleştiği tespit edilip, gerekli faturalandırma yapılabilir.

Şebeke bağlantılı sistemlerin kullanılabilmesi için yerel bir şebekenin varlığı ve sistem kurulumu için yeterli alanın bulunması yeterlidir. Şebekeye bağlı oldukları için sahip olmaları istenen kurulu güç değeri gibi bir engel yoktur dolayısıyla bu sistemler küçük bir evin ihtiyacını karşılayacak güç değerlerinden, büyük bir güneş enerjisi santrali (GES)'e kadar geniş bir sistem yelpazesine sahiptir.

Elektrik şebekeleri gerilim seviyelerine göre alçak, orta, yüksek ve çok yüksek gerilim seviyeleri olmak üzere 4'e ayrılmaktadır. Üretim yapacak olan şebekeye bağlanacak güneş enerjisi sisteminin hangi şebekeye bağlanacağı kurulu gücüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Eğer sistemin kurulu gücü 11 kWe değerinden düşükse sistem şebekeye alçak gerilim seviyesinden, eğer kurulu güç 11 kWe değerinden büyükse şebeke bağlantısı alçak ve yüksek gerilim seviyelerinden yapılmalıdır [46].

Şebekeye bağlı sistemlerin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu sistemlerin olumlu yönleri aşağıdaki gibi verilebilir;

- Sistemde depolama amacıyla kullanılan akü gibi ekipmanlara ihtiyaç yoktur dolayısıyla sistem kurulurken depolama maliyeti gibi bir kalem oluşmaz,
- Tüketimin üretilen yerde olması ve depolama ekipmanlarının kullanılmamasıyla üretilen enerjinin çevrimi az sayıda gerçekleşir ve verim düşüşü azalmış olur,
- Sistem şebekeye bağlı olduğu için üretim az dahi olsa sistemin yükü şebeke tarafından sürekli beslenecektir.

Şebeke bağlı fotovoltaik sistemlerin olumsuz yönleri ise;

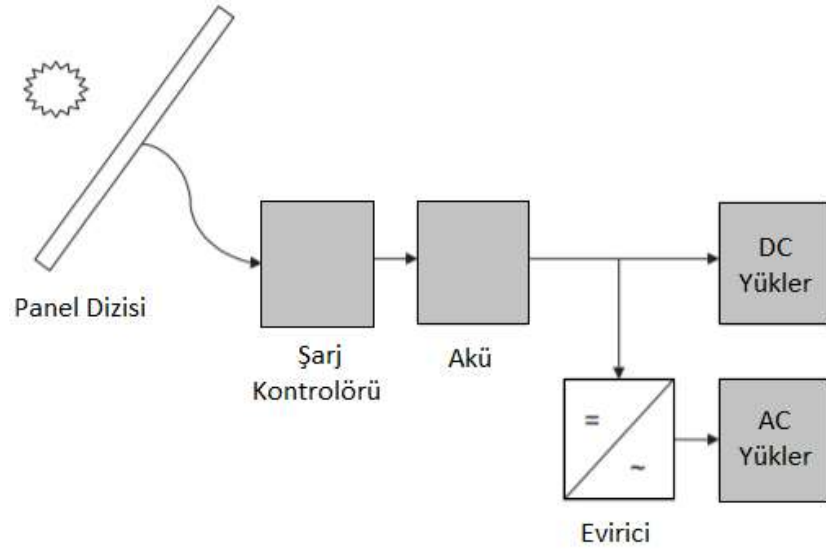
- Üretilecek olan elektrik enerjisinin şebekeye bağlanabilmesi için yerine getirilmesi gereken sistemsel standartlarının varlığı ve alınması gereken izinler,
- Üretilen enerjinin tüketildiği durumlarda, sistemde akü gibi depolama ekipmanı bulunmadığı için şebekenin devre dışı kalması halinde elektriksiz kalma riski,
- Şebeke devre dışıyken, şebekeye bağlı sistemin elektrik üretilip şebekeyi besleyip şebekeye bağlı tüm hatta enerjinin tamamen kesilmiş olmaması ve “adalanma” adı verilen istenmeyen durumun meydana gelmesi şeklinde belirtilebilir [47].

3.3 Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler

Şebekenin olmadığı dolayısıyla elektrik enerjisine ulaşımın oldukça güç olduğu bölgelerde şebekeden bağımsız sistemler kullanılmaktadır. Bu yüzden bu sistemlere ise şebekeye bağlı olmayan ya da şebekeden bağımsız sistemler denmektedir. Elektrik enerjisi üretilir ve eğer kullanılıyorsa bu enerji akülerde şarj kontrolörü vasıtasıyla depolanır (şarj kontrolörü; gerilim ve akım denetimi yaparak akü gerilimi belirli bir seviyeye geldiğinde panelden aküye gelen akımı keser), böylece ömrünü kısaltan tamamen şarj ve deşarj olması durumlarının önüne geçilir.

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin kullanım alanları oldukça geniştir. Güneş enerjisiyle çalışan hesap makineleri ve saatlerden, trafik ışıkları ve kırsal bölgedeki yapılara kadar birçok alanda bu sistemler kullanılabilir.

2 çeşit şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemden söz edilebilir. Bunlardan birincisi tek güç kaynağının PV panel olduğu sistemler, ikincisi ise destekleyici bir güç kaynağının (rüzgar türbini, jeneratör v.b.) bulunduğu hibrit sistemlerdir. Hibrit sistemlerle ilgili temel bilgilerin ve farklı çalışmaların yer aldığı makaleler literatürde mevcuttur.[48-50]. Hem doğru akım hem de alternatif akımla çalışan yüklerin yer aldığı şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem şeması Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 : Doğru akım ve alternatif akımla çalışan yüklerin bulunduğu şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem şeması [39].

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin olumlu yönleri;

- Şehir merkezinden uzak, kırsal bölgelerde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi için tek seçenek olması,
- Şebeke ile ilgili sorunların elektrik enerjisi eldesini etkilemeyecek olması,
- Gerekli enerjinin çevreye herhangi bir olumsuz etki yaratılmadan elde edilmesi olarak söylenebilir.

Bu sistemlerin sahip olduğu olumsuz yönler ise;

- Akü gerekliliği, dolayısıyla ek maliyet oluşumu,
- Şebekeye bağlı sistemlere göre daha fazla ekipmanın gerekli olması ve bu sebeple bakım maliyetinin de şebeke bağlantılı sistemlere göre fazla olması,
- Akülerin ömürleri sonunda değişmesi gerekliliği,

şeklindedir.

4. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE PERFORMANSI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Güneş enerjisinden enerji eldesinde mümkün olan en fazla verimi elde edebilmek için bu sistemlerin performansını olumlu ya da olumsuz olarak etkileyen tüm faktörler dikkate alınmalıdır. Tahmin edilebileceği gibi fotovoltaik güç sistemlerinin performansları birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler çevresel olabileceği gibi, yapısal veya işletimsel faktörler de olabilir. Bu başlık altında bu faktörlerin ne oldukları ve fotovoltaik sistemleri nasıl etkiledikleri ortaya konacaktır.

4.1 Çevresel Faktörler

4.1.1 Ortalama solar radyasyon yoğunluğu

Bir panelden alınacak elektrik enerjisi o panele gelen güneş ışıının yoğunluğu, panelin alanı ve panel verimiyle doğru orantılıdır. Panelden alınan DC güç hesaplamasında kullanılan eşitlik Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$P_{dc} = G_{eff} \eta_g A_g \quad (4.1)$$

Panelden alınan DC güç miktarı bu şekilde hesaplanır [51]. Burada G_{eff} efektif solar ışıının yoğunluğunu (W/m^2), η_g panel/modül verimini, A_g ise m^2 cinsinden modülün/panelin aktif yüzey alanını ifade etmektedir.

Dolayısıyla panele gelecek ışıının yoğunluğu ne kadar fazla olursa, panelden alınacak performans da o kadar fazla olacaktır. Bu sebeple fotovoltaik sistem kurulacak olan bölgeyle ilgili mümkün olduğunca uzun bir süreyi kapsayan ortalama solar radyasyon yoğunluğu verisi tutulmalı ve kurulacak sistemden alınacak performans bu veri ışığında hesaplanmalıdır.

4.1.2 Hücrenin çalışma sıcaklığı

Güneş hücrelerinden elde edilebilecek gücün hesaplandığı standart koşullarda hücrenin çalışma sıcaklığı $25^\circ C$ olarak kabul edilmekte ve ilgili hesaplamalar bu

sıcaklığa göre yapılmaktadır. Kurulu bir fotovoltaik sistemin zamanla sıcaklığının artması beklenen bir durumdur fakat panelin sıcaklığı arttıkça panelden alınacak akım ve panel gerilimi dolayısıyla da panelin gücü düşüş göstermektedir. Sıcaklık düzeltilmeli güç hesabı Denklem 4.2’de verilmiştir [52].

$$P_m(T) = P_{m,SKA} [1 - m_p(T - 25)] \quad (4.2)$$

Burada, $P_m(T)$ T mutlak sıcaklığında panelin gücü, $P_{m,SKA}$ standart koşullar altında panelin gücü, μ_p panelin sıcaklığa bağlı güç düzeltme katsayısı ve T ise mutlak sıcaklık panelin çalışma sıcaklığını ifade etmektedir.

Dolayısıyla güneş panellerinin sıcaklığa bağlı bir güç düzeltme katsayısı bulunmaktadır. Bu katsayı ne kadar yüksek ise panelin gücü sıcaklıkla birlikte daha fazla düşecek ve panel performansı da benzer bir şekilde düşüş gösterecektir. Bu yüzden panel seçimi yapılırken sıcaklık artışına bağlı olarak güçteki azalmanın en az olduğu paneller tercih edilmelidir.

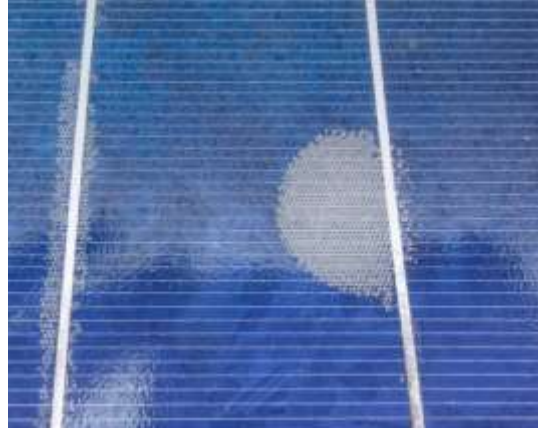
4.1.3 Panel yüzeyinin kirlenmesi

Fotovoltaik prensiple elektrik enerjisi üretiminin temelinde güneş ışınlarının yarı-iletken madde içerisindeki elektronlarla etkileşime girmesi ve enerjisinin tamamını ya da bir kısmını etkileşime girdiği elektrona aktarması yatmaktadır. Panellerin üzerine düşen yağmur damlalarının ve kar tanelerinin kuruyup panel yüzeyini kirlenmesi, nemli ortamlarda kurulu olan panellerin üzerinin aynı sebepten dolayı panel yüzeyinde kirlilik meydana getirmesi, üretim yapılan bölgede gerçekleştirilen tarımsal faaliyetler veya sanayi faaliyetleri dolayısıyla panel üzerinde kirlilik oluşması ve hava kirliliği gibi birçok sebep fotovoltaik panellerin optik geçirgenliğini etkilemekte ve bu da panellerden alınan verimi düşürmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar ile bu gibi kirliliklerin fotovoltaik panellerden elde edilen gücü ne oranda düşürdüğü ortaya konmuştur [53, 54]. Bu gibi kirliliklerin önlenmesi amacıyla geliştirilen panel temizleme teknikleri ve kendi kendini temizleyen paneller ile ilgili bilgi literatürde mevcuttur [55, 56].

4.1.4 Korozyon

Fotovoltaik panel içerisine koruyucu tabakanın (çoğunlukla EVA:etilen vinil asetat) ve panelin arka kontağının (çoğunlukla PVF:polivinil florür filmler) zamanla

koruyucu özelliklerinde yaşanan azalma sonucu sızan su buharının panel sıcaklığı nedeniyle buharlaşıp kontaklarda ve iletken metaryallerde iç direnç artışına sebep olur. Dolayısıyla modülün iç direnci artar ve performans düşüşü yaşanır. Koruyucu tabakanın yanlış uygulanması sonucu panel içine sızan su buharı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Panel içerisine sızan su buharı.

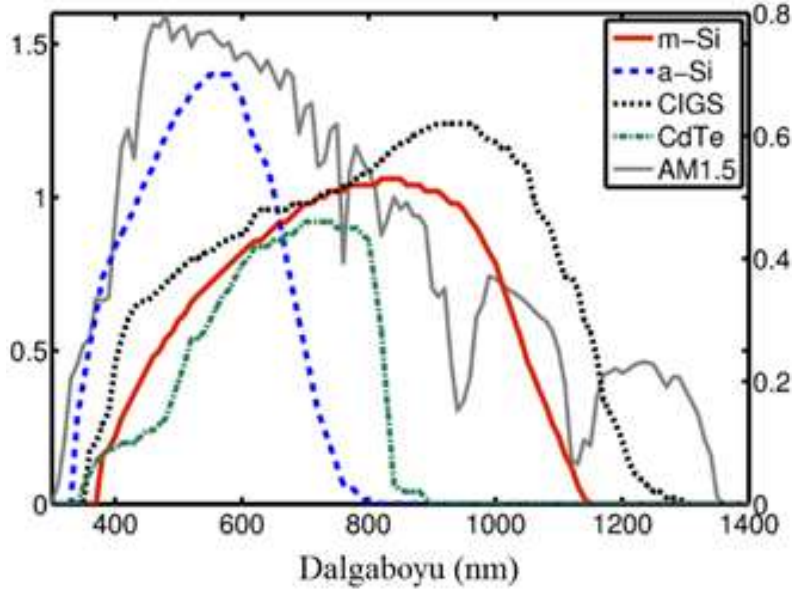
4.1.5 Gölge etkisi

Fotovoltaik güç sistemlerinde performansı etkileyen en önemli çevresel faktörlerden birisi de panelin üzerine gölge düşüp düşmediğidir. Genelde büyük ölçekte üretim yapan güneş enerjisi sistemlerinin açık alanlarda kurulu olduğu düşünülürse bu sistemler için değerlendirilmesi gereken en önemli gölge faktörü bulutlardır.

Eğer fotovoltaik sistemin kurulu olduğu bölgede çoğunlukla açık hava hakimse bu durumda kullanılması gereken fotovoltaik panel seçiminde net bir kısıt bulunmamaktadır. Sistemin kurulacağı yerin büyüklüğü, kurulum yapılacak olan bölgedeki yıllık ortalama radyasyon değeri, yıllık üretilmesi planlanan elektrik enerjisi değeri ve yatırım maliyeti gibi temel konular değerlendirilip uygun panel seçimi yapılır fakat eğer kurulum yapılması planlanan bölge genelde bulutluluk oranının yüksek olduğu, direkt radyasyon açısından zengin olmayan bir bölge ise bu noktada güneş hücrelerinin karakteristiklerinin bilinmesi ihtiyacı doğar.

Rayleigh saçılmasına göre ışık dalgaboyunun 4’üncü kuvvetine ters orantılı olarak saçılır ve çoğunlukla ışık saçılırken dalgaboyunda bir değişme olmaz [57]. Başka bir deyişle, kısa dalgaboyuna sahip radyasyonun saçılma olasılığı çok daha fazladır. Buradan hareketle tanımı gereği söylenebilir ki, difüze radyasyonun ortalama dalgaboyu tüm radyasyona oranla daha kısadır. Dolayısıyla difüze radyasyonun

ağırlıkta olduğu bir bölgede fotovoltaik sistemler ile üretim yapılacak ise kısa dalgaboylu ışığı soğurma kapasitesi yüksek güneş hücreleri seçilmelidir. Şekil 4.2’de bazı güneş hücrelerinin solar radyasyonu soğurma spectrumları verilmiştir.



Şekil 4.2 : Solar radyasyon ve güneş hücrelerinin soğurma spectrumları[78].

Şekilden de görüldüğü gibi özellikle amorf silisyum güneş hücrelerinin pik noktasının kısa dalgaboyunda olduğu görülmektedir. Bu noktadan hareketle, amorf silisyum pillerin difüze ışınlam altında diğer pillere oranla çok daha fazla performans sağladığı ve havanın çoğunlukla bulutlu olduğu ya da difüze ışınlamın yoğun olduğu bölgelerde amorf silisyum ince film güneş hücreli panellerin kullanılmasının anlamlı olduğu söylenebilir.

4.1.6 Yansıma önleyici kaplama

Fotovoltaik prensiple elektrik enerjisi üretiminde ışığın soğurulması ve mümkün olduğunca yarı-iletken malzeme içinde absorbe edilmesi aşamaları kilit rol oynadıkları için panel üzerine gelen fotonların mümkün olduğunca güneş hücresinin içinde kalması ve bu sayede fotonların enerjilerini herhangi bir elektrona aktarmasının olasılığının yüksek olması arzu edilir. Bu amaçla panellere yansıma önleyici kaplama uygulanır. Fakat bu kaplamalar tozlanma/kirlenme gibi sebepler dolayısıyla bir süre sonra işlevlerini yitirmeye ve ışığın enerjisini elektrona vermeden hücreyi terketmesine neden olmaya başlarlar. Bu durum da panel veriminin düşmesine ve elde edilen elektrik enerjisinin miktarında düşüşe sebebiyet verir. Konuyla ilgili çalışma literatürde mevcuttur [58].

4.2 Yapısal Faktörler

Fotovoltaik sistemlerin performansları çevresel faktörlerden etkilendiği gibi performansı belirleyen faktör kullanılan sistemdeki ekipmanlar olabildiği gibi güneş hücresinin yapısal özellikleri de olabilmektedir.

4.2.1 Güneş hücresi tipi

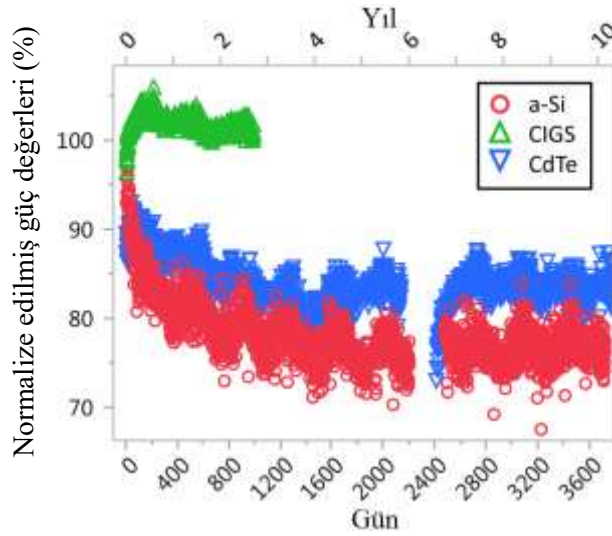
Günümüzde güneş enerjisinden elektrik üretimi yapan panellerin yapısını oluşturan güneş hücrelerinin çok sayıda çeşidi vardır ve bu hücrelerin yapıları birbirlerinden farklı olduğu için bu hücrelerin her birinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Seçilecek güneş hücresi kullanım alanının büyüklüğü, bölgedeki bulutluluk oranı, maliyet, güneş hücresinin verimi ve ömrü gibi bir çok parametreye göre değişiklik gösterebilmekte ve buna paralel olarak güneş hücresinden alınacak olan performans da değişmektedir. Bu yüzden tüm bu parametreler değerlendirilmeli ve üretim yapılacak bölgede kullanılacak olan en uygun güneş hücresine bu parametreler ışığında karar verilmelidir.

4.2.2 İlk çalışma

Çoğu güneş hücresi ilk çalışma zamanlarında performans olarak etiketlerinde yazan güç değerleriyle tutarlılık göstermemektedir. Özellikle ince film teknolojisine sahip güneş hücrelerinde bu değişkenlik çok belirgin düzeyde olmaktadır [59].

Şekil 4.3'te bazı ince film güneş hücrelerinden ilk çalışma safhalarında alınan güç değerleri ile etiketlerinde yer alan güç değerlerinin normalize edilmesiyle elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Amorf silisyum güneş hücrelerinin performansının başlangıç safhasında ani bir düşüş gösterdiği literatürdeki çalışmalar ile kanıtlanmıştır [17]. Başka bir deyişle a-Si güneş hücrelerinden ilk zamanlarda elde edilen güç değerlerinin, güneş panelinin etiketinde yazan değerlerden daha düşük olduğu gözlenmektedir. CdTe ince film güneş hücreleri de üzerine ışık düşmesinden itibaren geçen 1-3 sene içerisinde benzer bir düşüş sergilemektedir [60, 61]. Bu durumun aksine CIGS güneş hücresi (tüm CIGS film kombinasyonları için geçerli olmamakla birlikte) tamamen farklı bir davranış göstermektedir. Başlangıçta bu güneş hücresinin performansında bir artış olduğu ve sonrasında bu artışın zamanla düşüş göstermeye başladığı görülmektedir.



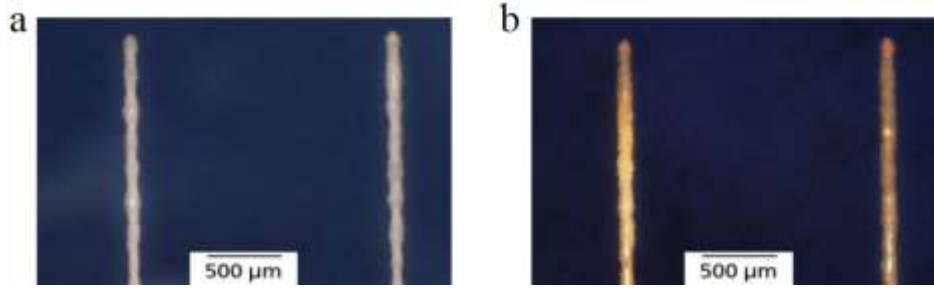
Şekil 4.3 : Bazı ince film güneş hücrelerinin ilk 10 sene içerisindeki normalize edilmiş performans değerleri [62].

4.2.3 Panel üzerinde oluşan izler (Snail trail-Salyangoz izi)

Uzun süre boyunca işlev gören ve bu süre boyunca güneş ışığına maruz kalan kristal silikon güneş panellerinde literatürde “salyangoz izi” (Snail trail) olarak bilinen lekelenmeler meydana gelmektedir [59]. Gözle görülebilen bu lekelenmeler küçük, koyu çizgiler halinde oluşabildiği gibi hücrenin bir kısmını hatta tamamını kaplayacak büyüklükte de oluşabilmektedirler [63]. Bu lekelenmeler hem hücre içerisindeki enerji dönüşüm verimini direkt olarak etkilemektedir. Salyangoz izi (snail trail) lekelerinin yer aldığı görseller Şekil 4.4 ve 4.5’te verilmiştir. Bu leke türü ile ilgili yapılan araştırmalardan bazıları bu lekelerin gümüş nanoparçacıklardan [64], bazıları gümüş oksit ya da gümüş karbonat nanoparçacıklardan [65], ve hücreleri birarada tutmaya yarayan barlarda bulunan gümüş elementinden [64, 65] oluştuklarını belirtmişlerdir. Panellerde ilk çalışma anından itibaren 3-5 ay sonrasında görülebilen salyangoz izi lekelerinin panellerden alınan çıkış gücünde %9,1’lik bir düşüşe neden olabileceği ortaya konmuştur [63].



Şekil 4.4 : Fotovoltaik panellerde gözlenen salyangoz izi lekesi [63].



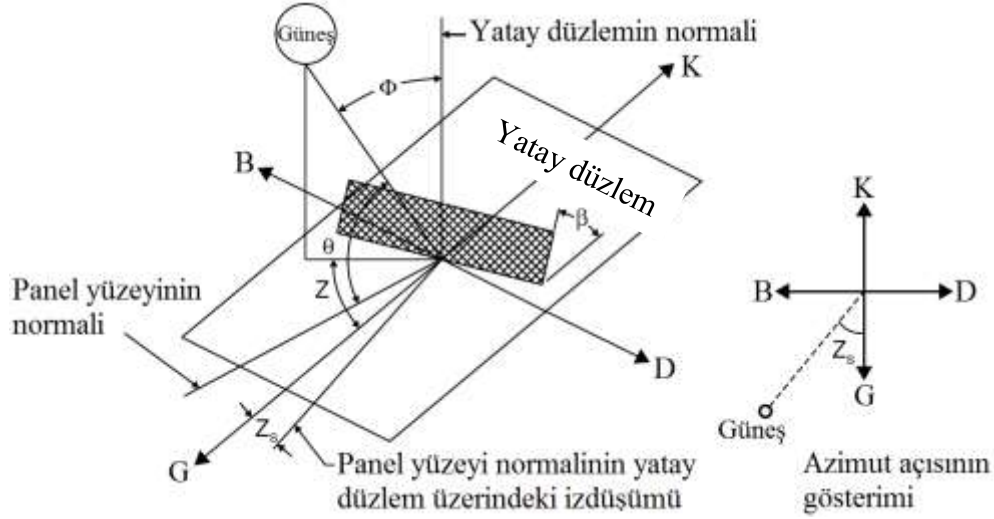
Şekil 4.5 : Kontakları salyangoz izine karşı dayanıklı malzemeden (a) ve salyangoz izine karşı hassas malzemeden (b) yapılmış hücrelerin mikroskopik görünümü [64].

4.3 İşletimsel Faktörler

İşletimsel faktör olarak üzerinde durulması gereken en önemli konu panellerin konumlandırılmasıdır. Bu kapsamda 2 farklı nokta değerlendirmeye alınmalıdır. Bu noktalar panelin yatay düzlemle yaptığı açı ve azimut açısıdır. Bu açıların şekil olarak gösterimi Şekil 4.6’de verilmiştir.

Panelin yatay düzlemle yaptığı açı değeri panelin kurulacağı yere göre değişkenlik göstermektedir. Güneş ışınlarının panele dik geldiği durumda panelden alınacak verimin maksimum olduğu bilinmektedir [11]. Bu sebeple paneller güneş ışınlarını mümkün olduğunca dik alacak şekilde konumlandırılmalıdırlar. Kuzey yarım küre için yaz aylarında panel açısının değerinin yüksek olmasına gerek yoktur çünkü güneş ışınları dünya yüzeyine daha dik gelmektedir fakat kış aylarında güneş ışınları yeteri kadar dik gelmediği için panel açısı arttırılıp verim yükseltilmeye çalışılır. Bu açı değerlerini, güneş ışınlarını sürekli olarak izleyip değiştiren ve paneli uygun şekilde konumlandıran izleyici’ler (tracker) bulunmaktadır fakat izleyicilerin kullanılmadığı durumlarda paneller için ortalama bir değer belirlenmelidir. Panel açısının önemi, hesaplanma yöntemleri ve bu açı değerlerinin dünya üzerindeki farklı bölgelere göre yaklaşık olarak hangi değerleri alması gerektiği konusunda farklı çalışmalar yapılmıştır [66, 67].

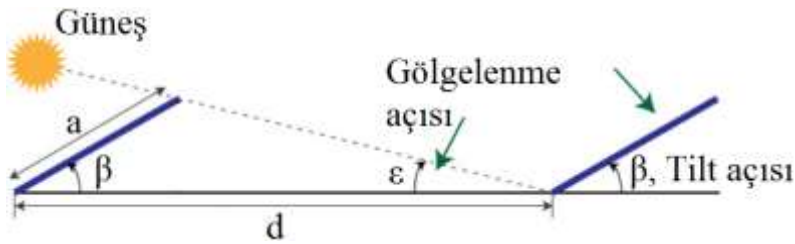
Azimut açısı ise panelden verim alınması anlamında dikkat edilmesi gereken bir başka noktadır. Kuzey yarım kürede yer alan paneller için güneş güneyde yer aldığından dolayı yine güneş ışınlarını dik almak için paneller güneye yönlendirilmelidirler. Kuzey yarım kürede yer alan ülkeler genelinde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler ışığında güney azimut açısının genellikle 10° ile -10° arasında olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [68-70]. Türkiye için ise azimut açısının optimum değerinin 0° olduğu gösterilmiştir [71].



Şekil 4.6 : Panel ve azimut açılarının gösterimi [72].

Özellikle 1’den fazla panel dizisinin oluşturulması gerektiği durumlarda dikkat edilmesi gereken bir başka önemli nokta ise bir dizinin diğer bir dizi üzerine gölge oluşturacak kadar yakın konumlandırılmaması gerektiğidir. Diziler arası mesafenin hesaplanmasında kullanılan formül Denklem 4.3’te, formül değişkenlerinin şekilsel gösterimi ise Şekil 4.7’de verilmiştir. Konumlandırma işlemi yapılırken bu mesafeye dikkat edilmez ise paneller üzerinde oluşacak gölge, büyüklüğüne bağlı olarak panel performansının düşmesine sebebiyet verecektir.

$$\frac{d}{a} = \cos \beta + \frac{\sin \beta}{\tan \varepsilon} \quad (4.3)$$



Şekil 4.7 : Diziler arası mesafe ve diğer ilgili parametrelerin şekilsel gösterimi.

Burada d metre cinsinden iki dizi arasında bırakılması gereken mesafeyi, a metre cinsinden panel genişliğini, ε ise gölgelenme açısını ifade etmektedir. Bir panelin gölgelenme açısının hesabı ise Denklem 4.4’te verilmiştir.

$$\varepsilon = 90^\circ - \delta - \varphi \quad (4.4)$$

Burada ise δ deklinasyon açısını, φ enlem derecesini ifade eder.

5. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ (WAVELET TRANSFORM)

Bu başlık altında sinyal dönüşümünün ve deneylerde kullanılacak olan Dalgacık Dönüşümü'nün (Wavelet Transform) temelleri üzerinde durulacak, ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılacak olan yöntem açıklanacaktır.

5.1 Fourier ve Dalgacık Dönüşümü İle İlgili Temel Bilgiler

Elektriksel işaret, bir fiziksel büyüklük ya da değişkenin özellikleri hakkında bilgi taşıyan ve matematiksel gösterimi fonksiyon biçiminde olan bir olgudur. Bir dalga ise genelde zamanda ya da uzayda salınan bir fonksiyon olarak tanımlanır [73].

Elektrik işaretinin bir genliği bulunduğu ve zamanla değişim gösterdiği için elektrik işaretler dalga özelliği gösterirler. Bu sebeple dalgaları tanımlamak için kullanılan genlik ve periyot gibi kavramlar bu işaretler için de kullanılabilirler. Fakat elektriksel işaretler yapay olarak üretilmektedirler ve fiziksel dalgalardan farklı olarak asıl amaçları enerji taşımak değil, elektriksel cihazlar arasında bilgi taşınmasına olanak sağlayarak iletişimin kurulması görevini üstlenmektir.

İşaretlerin ayırt edilebilmesi ve taşıdıkları bilgiye ulaşılabilmesi adına çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bunların başında Fourier analizi gelmektedir. Fourier analizi işaretleri ifade eden fonksiyonları trigonometrik seriler cinsinden (başka bir adıyla kompleks eksponansiyeller) ifade etmeye yarayan bir dalga analiz yöntemidir. Bu yöntem matematikte, bilimde ve mühendislikte özellikle periyodik ve zamandan bağımsız olguları inceleme konusunda oldukça başarılıdır [73]. Fourier dönüşümünün matematiksel ifadesi Denklem 5.1'de verilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (5.1)$$

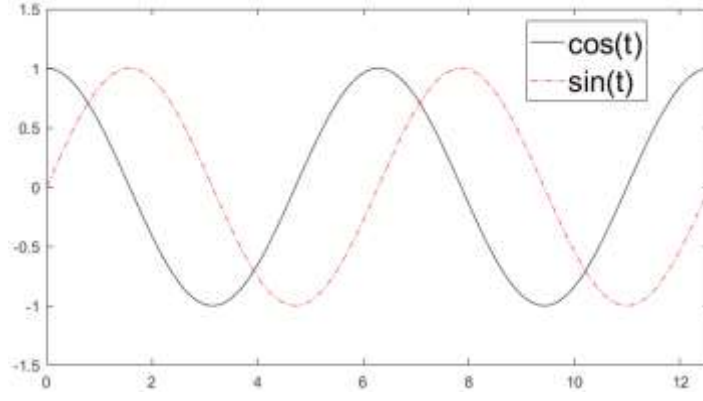
Burada $f(x)$, x değişkenine bağlı olarak değer alan ve periyodu $2L$ olan bir fonksiyon, a_0 , a_n , b_n sabit katsayılar ve $n=1,2,3...$ gibi pozitif tamsayıları ifade etmektedir. Bu dönüşüm her ne kadar günümüzde en çok kullanılan dönüşümlerden biri olsa da

Fourier dönüşümü temel olarak zaman üzerinden alınan bir integral olduğu için işlenen işaretteki tüm zaman bileşenleri bu dönüşüm uygulandığında kaybedilir. Bir başka deyişle bir işarete Fourier dönüşümü uygulandığında, işarete hangi frekansa sahip bileşenlerin bulunduğu konusunda bilgi sahibi olunmaktadır fakat bu bileşenlerin ne zaman oluştuğu konusundaki bilgiye ulaşamamaktadır. Bu nedenle Fourier dönüşümünün belli zaman aralıklarıyla uygulanması temeline dayanan Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD, Short-time Fourier transform) yöntemi kullanılır ve böylece dönüşüm uygulanan işaretten hem frekans bilgisi hem de zaman bilgisi alınabilir [74]. Fourier dönüşümlerinde kullanılan sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

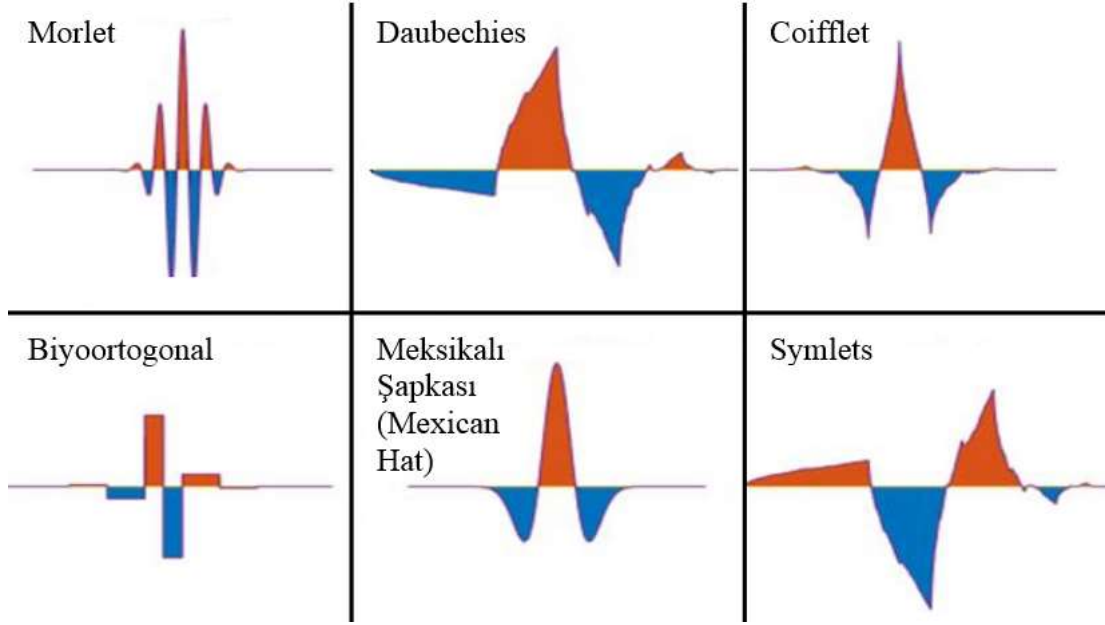
Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü’nün de Fourier dönüşümü gibi bazı kısıtları bulunmaktadır, bunlardan en önemlisi işlenen işaretteki yüksek ve düşük frekansa sahip bileşenlerin hem frekans uzayında hem de zaman uzayında aynı çözünürlük ile tespit edilememesidir. Bu durum da beraberinde çözünürlükte bir düşüklük getirmektedir. Dolayısıyla işaret işleme konusunda çözünürlüğü arttırmak ve frekans-zaman bileşenlerini aynı çözünürlükte elde edebilmek ihtiyacı doğmuştur.

Öncesinde konuyla ilgili çeşitli araştırmalar yapılmasına rağmen Dalgacık (Wavelet) konusunda geniş bir matematik bilimi çevresini etkisi altına alan çalışma Ingrid Daubechies tarafından gerçekleştirilmiştir [75]. Bu çalışma sonrasında sinyal işleme, istatistik ve numerik analiz alanlarında bu çalışmadan geniş çapta yararlanılmıştır. Kısaca dalgacık araştırması ve incelemelerinin amacı temel fonksiyon setleri ve dönüşümler oluşturmak ve bu oluşumların işlenen fonksiyon ya da işaret ile ilgili bilgi verici, verimli ve yararlı tanımlamalarının yapılabilmesine olanak sağlamaktır [73].

Dalgacık terimi küçük bir dalga parçasını ifade eder, kısıtlı süresi vardır ve ortalama değeri sıfırdır. Sinüs dalgası gibi dalgalardan farkı bir başlangıç ve bitiş noktasının olmasıdır. Bu dalga parçası işaret içindeki farklılıkları, oluşan impulsları ve sinyalin başlangıç ve bitiş noktasında gerçekleşen olayları tanımlamakta kullanılır. Dalgacıkların bir çok çeşidi bulunmaktadır ve her birinin kullanım alanı birbirlerinden farklı olabilmektedir. Bazı dalgacık ailelerinden sıklıkla kullanılan dalgacıkların görseli Şekil 5.2’de verilmiştir. Bununla birlikte dalgacık türleri, dalgacık dönüşümü ve Fourier dönüşümü ile karşılaştırması hakkında literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır [74, 76].



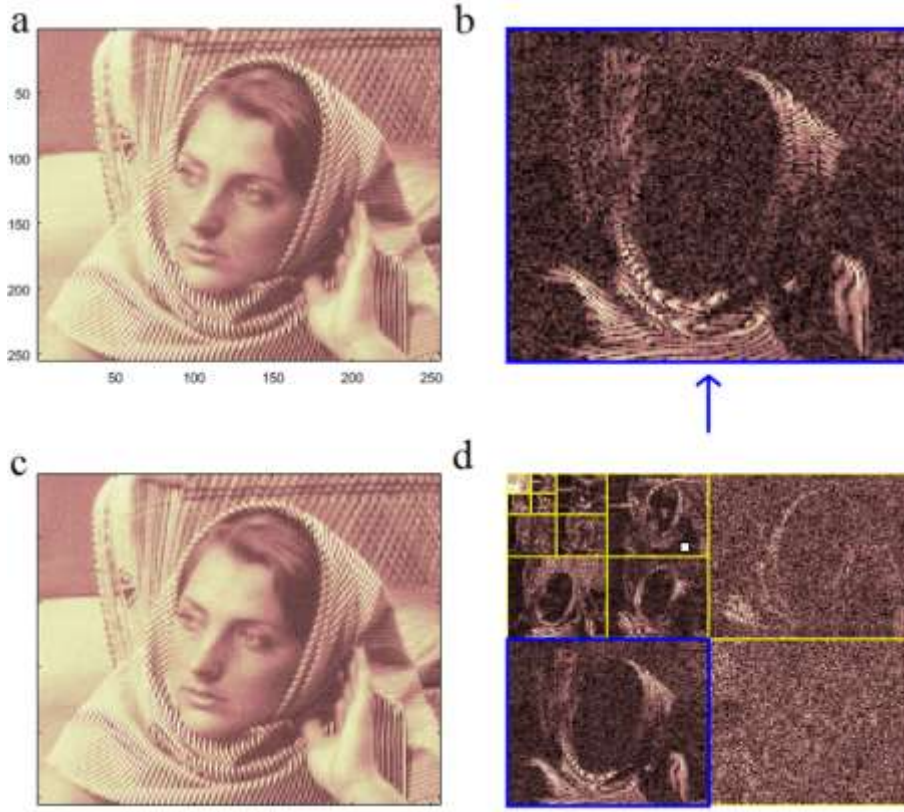
Şekil 5.1 : Sinüs ve kosinüs dalgaları.



Şekil 5.2 : Bazı dalgacık ailelerinden sıklıkla kullanılan dalgacıklar.

Dalgacık dönüşümü, dönüşüm uygulanan işareti yüksek ve alçak geçiren filtrelerden geçirilerek uygulanan her bir filtreye ait bir katsayı oluşturulur. Oluşturulan bu katsayılar ana işareti temsil etmektedir. Bu işlemler işareti her bir aşamada (kaç aşama boyunca ayrıştırma uygulandığına bağlı olarak) 2'ye bölüp filtreleri uygular. Yüksek geçiren filtrenin uygulandığı kısma detay, alçak geçiren filtrenin uygulandığı kısma ise yaklaşıklık adı verilir. Dalgacık dönüşümünün temeli bu filtrelerdir. Şekil 5.3'de, Daubechies-6 dalgacığı kullanılarak 4 kademede ayrıştırılmış örnek bir çalışma verilmiştir.

Ayrıca dalgacık dönüşümünde alçak geçiren filtreye ölçeklendirme fonksiyonu (scaling function, ϕ), yüksek geçiren filtrelere ise dalgacık fonksiyonları (wavelet function, ψ) denir.



Şekil 5.3 : 2 boyutlu ayrık dalgacık ayrıştırmasının (4 aşama) kullanıldığı örnek bir çalışma, a) Asıl fotoğraf, b) 1. Kademedeki dikey detay sabiti, c) Ters ayrıştırmayla sentezlenen fotoğraf, d) Ayrıştırmaların tümünün şematik gösterimi.

5.2 Dalgacık Dönüşümünün Kullanım Alanları

Dalgacıklar güçlü istatistiksel araçlardır ve bu yüzden kullanım alanları da oldukça fazladır. İşaret işleme, parmak izi doğrulama, fotoğraf yumuşatma ve gürültü giderme, DNA ve protein analizleri, kan basıncı, nabız ölçümleri, veri sıkıştırma, ses tanıma, finans sektöründeki çeşitli uygulamalar ve internet trafiği tanımlanması gibi bir çok alanda dalgacıklar ve ilgili dönüşümleri kullanılmaktadır [76].

6. YÖNTEM

Yapılan çalışmalar toplamda 4 aşamadan oluşacaktır. Bu aşamalar; fotoğrafların çekilmesi, fotoğrafların ön işleme tabi tutulması, dalgacık dönüşümünün uygulanması ve bulutluluk oranının hesaplanması şeklindedir.

6.1 Fotoğrafların Çekilmesi

Bu aşamada mümkün olduğunca yüksek kaliteli ve farklı bulutlanmaların ve bulut tiplerinin olduğu gökyüzü fotoğraflarının çekilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Nikon D80 marka ve model fotoğraf makinası kullanılmıştır. Çekilen fotoğraflar toplamda 8 adet olup bu fotoğrafların çözünürlüğü 2592x3872 piksel (10 Megapiksel), formatı ise JPEG'tir. Renk uzayı olarak RGB (Kırmızı-Yeşil-Mavi) kullanılmıştır ve fotoğraflar 8-bit'tir. Fotoğraflar İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nün çatısından çekilmiştir.

6.2 Fotoğrafların Ön İşleme Tabi Tutulması

Bu aşamada çekilen fotoğrafların formatı Bitmap (BMP)'ye dönüştürülmüştür. JPEG formatının bir sıkıştırma formatı olması sebebiyle, JPEG formatı çekilen fotoğraflar üzerinde gözle tespiti mümkün olmayan bazı değişiklikler yaparak fotoğrafın boyutunu düşürmektedir [77].

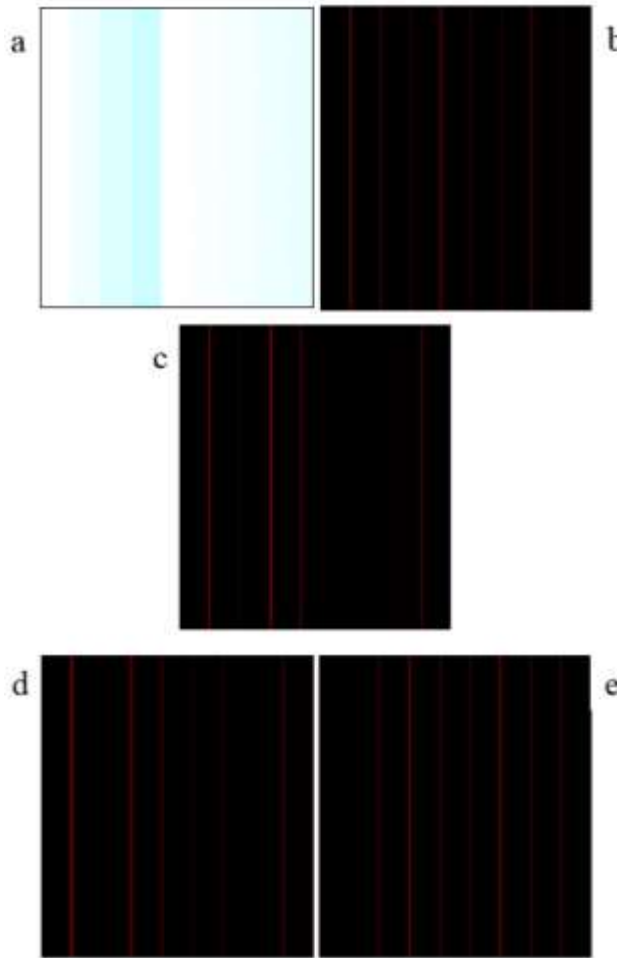
İmaj işleme konusunda BMP formatı daha çok tercih edilmektedir. Bu durumun sebepleri arasında BMP fotoğrafların çözünürlüklerinin daha yüksek olması ve bu sayede üzerinde yapılacak değişikliklerin daha kolay olması ve piksel skalasında her türlü bilgiyi bulundurması verilmektedir. Aksine JPEG formatına sahip bir fotoğrafta işlem/değişim yapıldığında fotoğrafın kalitesinde büyük bir düşüş yaşanmaktadır.

JPEG formatı daha çok dijital fotoğrafları depolamada (fotoğraf makineleri gibi) kullanılmaktadır. Aynı zamanda fotoğraflara gerektiği durumlarda kontrast düzeltilmesi uygulanarak, bulutların gözle görülebilmesi anlamında iyileştirme yapılmıştır.

6.3 Dalgacık Ayırıştırmasının Uygulanması

Çekilmiş ve formatı değiştirilmiş olan fotoğraflar Matlab (R2016b) programında yer alan Dalgacık Çözümleyici (Wavelet Analyzer) uygulaması kullanılarak işlenecektir. Fotoğrafların 2 boyutlu olmalarından dolayı ise 2 boyutlu Ayırık Dalgacık Ayırıştırma yöntemi kullanılacaktır.

Hangi dalgacığın daha iyi sonuç vereceğiyle ilgili ön bilgi sahibi olmak için beyaz renkten (bulut rengi) başlayarak mavi renge (gökyüzü rengi) doğru giden bir renk skalası oluşturulmuştur ve bu skalaya farklı dalgacıklar kullanılarak dönüşüm uygulanmıştır. Sonrasında ise elde edilen yaklaşıklıklardan (approximation) en uygun olanları seçilmiştir. Bunun sebebi gürültüyü oluşturan bileşenlerinin yüksek frekansa sahip olması ve alçak geçiş filtresi uygulanıp elde edilen yaklaşıklıklarda gürültü bileşenlerinden arınmış olmasıdır. Şekil 6.1’de bu çalışma verilmiştir.



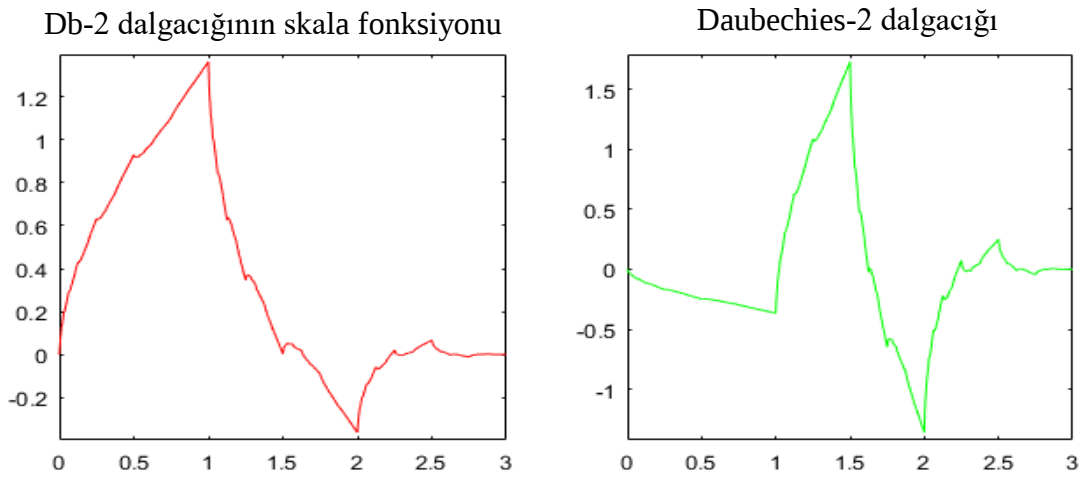
Şekil 6.1 : Kullanılan renk skalası (a), 2.aşama dikey detayı db-2 (b), 1.aşama dikey detayı db-6 (c), 1.aşama dikey detayı db10 (d) ve 3.aşama dikey detayı haar (e).

Dalgacık dönüşümü dikeyde, yatayda ve çaprazda olmak üzere her aşamada 3 detay vermektedir, karar vermek adına bu detaylardan birisinin incelenmesi yeterli olduğu için sadece dikey detaylara bakılacaktır. Bu noktadaki amaç dalgacık dönüşümünün gürültü bileşenlerini ne kadar doğru tespit edebildiğini ortaya koymaktır.

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi Daubechies-2 (db2) dalgacığı kullanılarak yapılan dönüşüm, diğer dönüşümlere kıyasla daha fazla renk geçişini ayırabilmiştir. Bununla birlikte haar dönüşümü ile elde edilen detayda çoğu renk geçişi daha net bir şekilde görülebilmesine rağmen bu dönüşüm ilk renk geçişini ayırt edememiştir. Dolayısıyla db2 dalgacığı kullanılan skalayı dikey detaylarına ayırmada diğer dalgacıklara oranla daha başarılı olmuştur.

Bu bilgiler ışığında çalışmada kullanılacak dalgacık olarak Daubechies-2 dalgacığı belirlenmiştir ve ayrıştırma 4 aşama boyunca uygulanacaktır. Şekil 6.2’de kullanılacak Daubechies-2 dalgacığının ve bu dalgacığın skala fonksiyonunun görseli verilmiştir.

Ayrıştırma tamamlandıktan sonra elde edilen yaklaşımlardan ve detaylardan asıl fotoğraftaki bulutluluk desenine en yakın olan seçilecek ve üzerinde son işlemler ve hesaplamalar gerçekleştirilecektir.



Şekil 6.2 : Daubechies-2 dalgacığı ve skala fonksiyonu.

Bununla birlikte dalgacık dönüşümünün fotoğraflardaki gürültü bileşenlerini ne ölçüde filtreleyebildiğinin anlaşılması için yaklaşıklıklara dalgacıklar kullanılarak gürültü arındırma (denoise) işlemi uygulanmıştır. Sonrasında ise bu işleme tabi tutulan yaklaşıklıklar ile işlem uygulandıktan sonraki fotoğraflar, PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) adı verilen bir gürültü ve kalite karşılaştırma yöntemi kullanılarak

karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuç çerçevesinde dalgacık dönüşümünün fotoğrafları ne ölçüde gürültüden arındırabildiği tartışılmıştır. Birimi desibel (dB) olan PSNR'ın hesabı Denklem 6.1'de verilmiştir.

$$PSNR = 20 \cdot \log(MAX / \sqrt{MSE}) \quad (6.1)$$

Bu formül özelinde *MAX* fotoğraf piksellerinin alabileceği en yüksek değerdir. Bu değer $2^{\text{bit}} - 1$ formülüyle elde edilir ve 8 bitlik fotoğraflar için *MAX* değeri 255'tir. *MSE* (Mean Square Error) ise hataların karelerinin ortalaması'dır. Bu değerın hesaplanması için 2 farklı değer gerekeceğinden *PSNR* hesaplamasında 2 adet fotoğrafın verileri girdi olarak kullanılmaktadır. Bu değerın belirli bir maksimum değeri yoktur fakat fotoğraflar için 48 dB değeri iyi olarak kabul edilmektedir. Bunun anlamı *PSNR* değeri 48 dB ve üzeri olarak hesaplanan fotoğrafın gürültü bileşeninin ihmal edilecek kadar az düzeyde olduğudur.

PSNR hesaplaması MATLAB programında “psnr” fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algoritma “PSNR_değeri = psnr(A, ref)” şeklindedir (A ve ref eşit boyutlu matrisler olmak üzere) ve ref matrisinin değerleri baz alınarak PSNR değeri hesaplanmaktadır ve bu değer ne kadar yüksekse A ve ref matrislerinin gürültü ve kalite bakımından o kadar benzedikleri anlaşılır. Bu yüzden “ref” matrisi olarak yaklaşıklıklara gürültü arındırma (denoise) işlemi uygulanmasıyla elde edilen fotoğraflar, “A” matrisi olarak ise yerine denoise işlemine tabi tutulan yaklaşıklıklar kullanılmıştır.

6.4 Bulutluluk Oranının Hesaplanması

Seçilen detay üzerinde ilk önce fotoğraftaki pikselleri 0 ya da 1 şeklinde kodlamaya olanak sağlayan ikilileştirme (binarization) işlemi gerçekleştirilip, siyah ve beyaz renklerden oluşan fotoğraf elde edilecektir. Siyah renkler bulut olmayan, beyaz renkler ise bulut olan bölgeleri ifade edecektir. Sonrasında ise beyaz renkli piksellerin sayısı fotoğraftaki tüm piksel sayısına oranlanarak çekilen fotoğraftaki bulutluluk oranı yüzde olarak hesaplanacaktır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

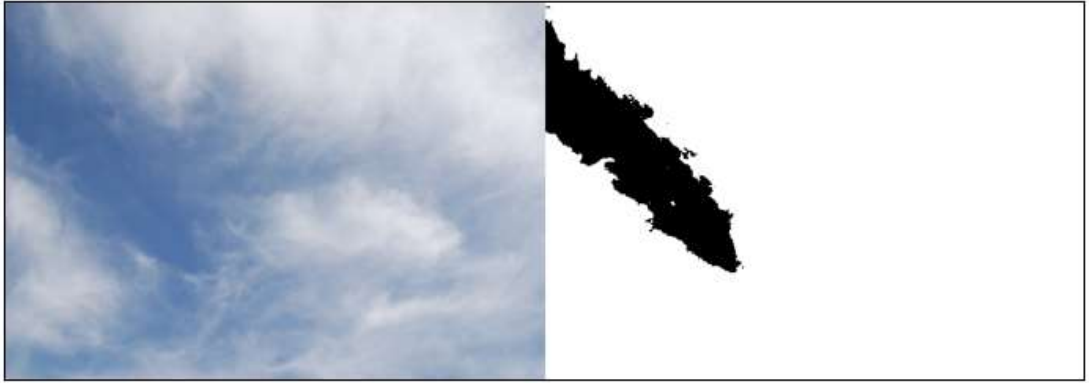
Bu bölümde çekilen fotoğraflardaki bulutluluk oranı bir önceki konu başlığında anlatılan adımlar izlenerek hesaplanmaya çalışılacaktır.

İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü çatısından çekilen fotoğraflarda mümkün olduğunca farklı hava şartlarının, farklı bulut tiplerinin ve farklı bulutluluk oranının olmasına dikkat edilmiştir. İlk fotoğraf ve analizi Şekil 7.1’de verilmiştir.

Aşama aşama çekilen her bir fotoğraf, analizleriyle birlikte verilecektir.



Fotoğraf-1



4.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.1 : Fotoğraf-1’in ve analiz sonuçlarının görselleri.

Fotoğraf-1’e dönüşüm uygulandığında elde edilen detaylardan gürültüden en fazla arındırılmış olan ve kalitesinde bozulma gözlenmeyen yaklaşıklıklardan 4.sü seçilmiş ve ikilileştirme işlemi bu yaklaşıklık üzerinden gerçekleştirilmiştir. İkilileştirme

işleminde dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi ikilileştirme eşik değeri (binarization threshold value)'dur. İkilileştirme işlemi için Matlab programı içerisindeki Görüntü İşleme Aracı (Image Processing Toolbox)'ta yer alan imbinarize kodu kullanılmıştır. Bu kod Otsu metodunu kullanarak bir eşik değeri belirlemekte ve ikilileştirme işlemini bu eşik değere göre gerçekleştirmektedir. Fakat bu eşik değeri bu çalışma için yetersiz kalmaktadır, bu yüzden eşik değeri her analiz için ayrı olarak elle belirlenmiştir. Fotoğraf-1'in analizi için kullanılan eşik değeri 0.35'tir. İkinci fotoğraf ve analizi ise Şekil 7.2'de verilmiştir.



Fotoğraf-2



4.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.2 : Fotoğraf-2'nin ve analiz sonuçlarının görselleri.

Fotoğraf-2'nin sağ tarafında güneş ışığının yoğun olması sebebiyle oluşan parlaklığın, Otsu metodu tarafından belirlenen ikilileştirme eşik değerinin fazla olmasına neden olması sebebiyle bir önceki analizde kullanılan 0.35 eşik değeri bu fotoğraf için kullanıldığında bulutluluk oranı gerçeğe yakın değerden sapma gösterdiği için bu analizde eşik değeri 0.25 olarak belirlenmiştir.

Üçüncü fotoğraf ve analizi Şekil 7.3'te verilmiştir.



Fotoğraf-3



4.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.3 : Fotoğraf-3'ün ve analiz sonuçlarının görselleri.

Önceki 2 fotoğrafta büyük oranda kalın bulutlar bulunması sebebiyle ikilileştirme işlemi sorunsuz gerçekleşmişti fakat Fotoğraf-3'te hem kalın hem de ince bulutların bulunması uygun bir eşik değeri belirlemenin bu yöntem için ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Otsu metodunun belirlediği adaptif eşik değeri ile bu analiz yapıldığında kalın bulutların beyaz olarak görüldüğü fakat ince bulutların beyaz renge çevrilmediği görülmüştür. İnce bulutları tespit etmek için bir eşik değeri belirlendiğinde ise bu sefer kalın bulutlar tespit edilememiştir. Bu nedenle her iki bulut tipinin de belli bir noktaya kadar tolere edilebildiği bir eşik değeri olarak 0,47 belirlenmiş ve belirlenen eşik değeri ile ikilileştirme uygulanmış yaklaşıklık Şekil 7.3'teki gibi gerçekleşmiştir. Dördüncü fotoğraf ve analizi Şekil 7.4'te verilmiştir.

Şekil 7.4'te görüldüğü üzere Fotoğraf-4'teki bulutları gözle seçebilmek zor olduğundan dolayı ilgili fotoğrafa kontrast düzeltilmesi uygulanmıştır. Bu şekilde ikilileştirme aşamasında en uygun eşik değeri belirlenirken yapılacak gözlemin kolaylaştırılması ve bu sayede bulutlu bölgelerin tespit edilebilmesi kolaylaştırılmıştır.



Fotoğraf-4 (solda) ve kontrast düzeltilmesi yapılmış Fotoğraf-4 (sağda).



3.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.4 : Fotoğraf-4'ün ve analiz sonuçlarının görseli.

Fotoğraf-4'ün analizinde önceki analizlerde olduğu gibi 4.seviye yaklaşıklık yerine 3.seviye yaklaşıklık kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü sırasında uygulanan filtrelerin belli bir aşamadan sonra görüntü kalitesinde düşüşe sebebiyet vermesi ve bu nedenle çözünürlüğün gözle görülür oranda düşmesi sebebiyle 4.seviye yaklaşıklık kullanılmamıştır. 1. ve 2.seviye yaklaşıklıkların kullanılmama sebebi ise bu yaklaşıklıklarda gürültü bileşenlerinin yeterince filtrelenmiş olmamasıdır. Bu noktada çözünürlük ile görüntü bileşenlerinin miktarı arasında bir trade-off söz konusu olduğu için çözünürlüğün korunması ve bu sırada gürültü bileşenlerinin mümkün olduğunca fazla oranda filtrelenmesi arasında değerlendirme yapılarak en uygun yaklaşıklık kullanılmalıdır. 3.seviye yaklaşıklığın kullanılmasının sebebi budur. Kullanılan eşik değeri ise bu fotoğraf için 0.25'tir. Eşik değerin bu kadar düşük olmasının sebebi ise fotoğraftaki parlaklık seviyesinin diğer fotoğraflara oranla düşük olması ve Otsu metodu ile belirlenen eşik değerin düşük olarak gerçekleşmesidir.

Beşinci fotoğraf ve analizi Şekil 7.5'te verilmiştir.



Fotoğraf-5

4.seviye yaklaşıklık



0,35 eşik değeri (a) ile 0,55 eşik değeri (b) ile ikilileştirilmiş fotoğraflar

Şekil 7.5 : Fotoğraf-5'in ve analiz sonuçlarının görselleri.

Fotoğraf-5'te, eşik değeri 0.35 olarak kullanıldığında fotoğraftaki kalın bulutların net bir şekilde görüldüğü fakat fotoğrafın üst tarafında bulunan ince bulutların tespit edilemediği görülmektedir. Bu durum fotoğraftaki parlaklık seviyesinin nispeten homojen olarak dağılmamasından kaynaklanmaktadır. Piksel analizi yapıldığında fotoğrafın alt orta bölgesinde bulunan bulutsuz piksellerin değerlerinin fotoğrafın sağ-orta kısmında yer alan bulutsuz piksellerin değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu da her iki bölgenin de aynı eşik değeri uygulandığında bulutsuz olarak sınıflandırılmamasına yol açmıştır. Eşik değeri 0.55 olarak belirlendiğinde ise ince bulutların büyük bir kısmı net olarak görülmekte fakat bu sefer ise fotoğrafın alt tarafında yer alan bulutsuz bölgeler bulut olarak görülmektedir. Bu durumda tek bir bulutluluk oranına ulaşılabilmesi adına her iki durumun da bulutluluk oranı hesaplanacak ve bu iki değerin ortalaması alınarak ortalama bir bulutluluk oranı elde edilecektir.

6. fotoğraf ve analizi Şekil 7.6'da verilmiştir.



Fotoğraf-6



4.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.6 : Fotoğraf-6 ve analiz sonuçlarının görselleri.

Fotoğraf 6’da bir önceki fotoğrafta olduğu gibi kapalı hava durumunun analizi yapılmıştır. Bu noktada sözü edilmesi gereken önemli bir durum, fotoğrafın hangi bölgelerinin bulutlu, hangilerinin ise bulutsuz olduğunun diğer fotoğraflara oranla net bir şekilde görülememesidir. Bulutların genel hatları belli olmaktadır fakat bulutlu bölgelerin tespiti görsel incelemeye ancak belli bir noktaya kadar mümkün olabilmektedir. Bu yüzden bir bulutluluk oranı verisinin elde edilebilmesi adına fotoğraftaki açık gri renkli piksellerde ince bulutların varlığı (eğer varsa) ihmal edilmiştir. Ayrıca Fotoğraf-5’te homojen olarak dağılmayan parlaklık seviyesinin Fotoğraf-6’da homojen olarak dağılmasına özen gösterilmiş ve ilgili fotoğraf bu durum göz önünde bulundurularak çekilmiştir. Eşik değeri olarak 0,56 kullanıldığında Fotoğraf-6’daki bulutların yüksek doğrulukla tespit edildiği gözlemlenmiştir.

Fotoğraf-7 ve analiz sonuçları Şekil 7.7’de verilmiştir. Görüldüğü gibi bu fotoğrafta yer alan hava durumu büyük oranda kapalıdır. Ayrıca analizi yapılan diğer

fotoğrafların aksine bu fotoğrafta önceki analizleri zorlaştıran gri renkli bulut oluşumu ile birlikte mavi renkteki gökyüzü birlikte görülebilmektedir.



Fotoğraf-7



4.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.7 : Fotoğraf-7 ve analiz sonuçlarının görselleri.

Buna rağmen fotoğraftaki parlaklık seviyesi (brightness) fotoğraf genelinde nispeten homojen olarak yayıldığından dolayı ikilileştirme aşamasında Fotoğraf-5'teki gibi bir sorun yaşanmamıştır. Analizinde 4.seviye yaklaşıklık kullanılan fotoğraf için belirlenen eşik değeri ise 0.35'tir.

Fotoğraf-8'de görülen hava durumu büyük oranda Fotoğraf-7 ile benzerlik göstermektedir. Bu fotoğrafta bulutsuz bölgeler Fotoğraf-7'de olduğu gibi fotoğrafın sağ kenarında değil üst kenarında yer almaktadır. Bununla birlikte fotoğraflar arasındaki bariz farklardan bir diğeri, Fotoğraf-8'deki ortalama parlaklık seviyesinin Fotoğraf-7'den yüksek olmasıdır. Fotoğrafın bu durum göz önünde bulundurularak çekilmesinin sebebi Fotoğraf-5'in analizinde yaşanan zorluğun parlaklık seviyesindeki farklılıktan mı yoksa aynı fotoğraf içerisinde farklı parlaklık seviyelerinin bulunmasından mı kaynaklandığını ortaya koymaktır. Bu fotoğraf için kullanılan eşik

değeri ise Fotoğraf-7'dekiyle aynı olup 0.35'tir. Fotoğraf-8'in analizi Şekil 7.8'de verilmiştir.



Fotoğraf-8



4.seviye yaklaşıklık

İkilileştirme uygulanmış yaklaşıklık

Şekil 7.8 : Fotoğraf-8 ve analiz sonuçlarının görselleri.

Fotoğrafların analizlerinin sonuna gelindikten sonraki aşama bulutluluk oranının hesaplanması aşamasıdır. Bu aşamada daha önce de belirtildiği gibi bulutları ifade eden beyaz piksellerin sayısı, fotoğraftaki tüm piksellerin sayısına oranlanıp elde edilen ifade 100 ile çarpılarak bulutluluk oranı verisi elde edilmiştir.

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Analizleri yapılan 8 adet fotoğrafta elde edilen bulutluluk oranları ve başarı dereceleri Çizelge 8.1’de verilmiştir. Fotoğraflardaki toplam piksel sayısı fotoğrafların boyutlarının sayısal çarpılmasıyla $2592 \times 3872 = 10036224$ piksel olarak belirlenmiştir ve hesaplamalar bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 8.1 : Bulutluluk oranları ve elde edilen başarı dereceleri.

	Beyaz Piksel Sayısı	Siyah Piksel Sayısı	Bulutluluk Oranı	Başarı Derecesi
Fotoğraf-1	9211236	824988	91,72%	İyi
Fotoğraf-2	9932153	104071	98,93%	İyi
Fotoğraf-3	4255556	5810668	42,40%	Orta
Fotoğraf-4	3927169	6109055	39,15%	İyi
Fotoğraf-5a	7785438	2250786	77,60%	Kötü
Fotoğraf-5b	3072340	6963884	30,60%	Kötü
Fotoğraf-6	9226132	810092	91,92%	Orta
Fotoğraf-7	9345129	691095	93,11%	İyi
Fotoğraf-8	9247731	788493	92,14%	İyi

Bu veriler ışığında Dalgacık Dönüşümü’nün açık, parçalı bulutlu ve parlaklık seviyesinin homojen dağıldığı kapalı havalarda iyi performans gösterdiği fakat parlaklık seviyesinin önemli miktarda değişkenlik gösterdiği kapalı hava fotoğraflarında ve bulut ile gökyüzü ayrımının kolayca yapılamadığı durumlarda başarısız olduğu sonucuna varılmıştır. Renk uzayı olarak Kırmızı-Yeşil-Mavi (RGB) kullanıldığı için özellikle açık ve parçalı bulutlu havalarda fotoğrafın 3.katmanı olan mavi katmandaki renk değerleri kapalı havalara oranla oldukça fazladır. Kapalı havalarda ise bu değer yaklaşık olarak tüm renk katmanları için aynıdır ve düşüktür. Bununla birlikte fotoğraf genelinde parlaklık seviyesi de değişkenlik gösterdiğinde bulut ve gökyüzü ayrımı yapılamamaktadır. Bu nedenle Dalgacık Dönüşümü’nün açık ve parçalı bulutlu havalarda çekilen fotoğraftaki gürültüyü iyi bir şekilde ayırarak ikilileştirme işleminin verimli bir şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunduğu fakat kapalı havalarda dönüşümün bu ayrımı net yapamaması sebebiyle ikilileştirme işleminde sorunların yaşandığı görülmüştür.

Dalgacık dönüşümünün fotoğraflardaki gürültüyü ne miktarda filtreleyebildiği anlamında yapılan çalışmadan elde edilen veriler ise Çizelge 8.2’de verilmiştir.

Çizelge 8.2 : Fotoğrafların PSNR değerleri.

	PSNR (dB)	PSNR-d (dB)
Fotoğraf-1	42,12	54,87
Fotoğraf-2	44,19	54,61
Fotoğraf-3	44,33	55,18
Fotoğraf-4	41,96	51,88
Fotoğraf-5	41,35	52,82
Fotoğraf-6	43,42	56,21
Fotoğraf-7	42,16	54,72
Fotoğraf-8	41,68	55,34

Çizelge 8.2 verilerine bakıldığında PSNR değerlerinin (denoise uygulanmamış yaklaşıklıklar ile asıl fotoğrafların karşılaştırılması sonucu elde edilen değerler) ortalamasının yaklaşık 43 dB olması gürültü bileşenlerinin miktarları açısından asıl fotoğraflar ile yaklaşıklıklar arasında belli bir farkın olduğunu belirtmektedir. PSNR-d değerlerine dikkate alındığında ise 54 dB olan ortalama PSNR-d değeri, hataların karelerinin ortalaması (MSE) değerinin yaklaşık 0,20 olduğu göstermektedir ve bu da dönüşümle elde edilen yaklaşıklıklar ile denoise uygulanmış yaklaşıklıklar arasında neredeyse gürültü açısından hiçbir fark olmadığını (piksellerin sadece tamsayı değerlerini alabildiği düşünülecek olursa) belirtmektedir. Başka bir deyişle dalgacık dönüşümünün fotoğraflardaki gürültüyü çok büyük bir oranda filtrelediği ve böylece fotoğrafların işlenmesini kolaylaştırdığı görülmüştür.

Bu çalışmadan elde edilen veriler kapsamında ileride benzer çalışmalarda;

- Fotoğrafların uzun menzile sahip bir termal kamera ile çekilmesi,
- Kamera kullanılacak ise, fotoğrafların analizi sırasında değişken parlaklık seviyelerinden kaynaklanan sorunların yaşanmaması için fotoğraf kamerasının önüne filtre yerleştirilerek çekimlerin yapılması,
- Fotoğraflarda düşük ISO değerlerinin tercih edilmesi,
- Fotoğrafların çekimi sırasında enstantane hızının düşürülmesi,
- Fotoğraf kalitesinin düşmemesi amacıyla 4 seviyeden daha fazla ayrıştırma yapılmaması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Koç, E. & Kaya, K.** (2015). Enerji Kaynakları - Yenilenebilir Enerji Durumu. *Engineer & the Machinery Magazine*, 56 (668),
- [2] **Korkmaz, Ö. & Develi, A.** (2013). Türkiye'de Birincil Enerji Kullanımı, Üretimi ve Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) Arasındaki İlişki. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 27 (2),
- [3] **Karagöl, E.T. & Kavaz, İ.** (2017). Dünya'da ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji. *Analiz*, (Sayı: 197).
- [4] **International Energy Agency.** (2016). *Renewable Energy Medium Term Market Report, Market Analysis and Forecasts to 2021*. France: International Energy Agency.
- [5] **World Energy Council.** (2013). *World Energy Resources Survey*. London: World Energy Council.
- [6] **Bilgen, S.** (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38. pp. 890-902.
- [7] **International Energy Agency.** (2017). *Renewables, Analysis and Forecasts to 2022*. International Energy Agency.
- [8] **Başlar, İ.** (2012). Tüm Gökyüzü Kamerasından Alınan Görüntüler Kullanılarak Bulutluluk Ölçümü Yapılması. *Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu*,
- [9] **Zhen, Z., Wang, Z., Wang, F., Mi, Z., & Li, K.** (2017). Research on a cloud image forecasting approach for solar power forecasting. *Energy Procedia*, 142 pp. 362-368.
- [10] **Öztürk, H.H. & Kaya, D.** (2013). *Güneş enerjisinden elektrik üretimi: fotovoltaiik teknoloji*. Umuttepe Yayınları.
- [11] **Goetzberger, A. & Hoffmann, V.U.** (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer Series.
- [12] **Goetzberger, A. & Hebling, C.** (2000). Photovoltaic Materials, Past, Present, Future. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62. pp. 1-19.
- [13] **Friedrich, J., von Ammon, W., & Müller, G.** (2015). Czochralski Growth of Silicon Crystals, in *Handbook of Crystal Growth*. pp. 45-104.
- [14] **Green, M.A., Hishikawa, Y., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J., & Ho-Baillie, A.W.Y.** (2018). Solar cell efficiency tables (version 51). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26 (1), pp. 3-12.

- [15] **Sterling, H.F. & Swann, R.C.G.** (1965). Chemical Vapour Deposition Promoted by r.f. Discharge. *Solid-State Electronics*, 8 (8), pp. 653-654.
- [16] **Lee, T.D. & Ebong, A.U.** (2017). A Review of Thin Film Solar Cell Technologies and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 pp. 1286-1297.
- [17] **Staebler, D. & Wronski, C.** (1977). Reversible Conductivity Changes In Discharge-Produced Amorphous Si. *Applied physics letters*, 31 (4), pp. 292-294.
- [18] **Romeo, A.**, *CdTe Solar Cells*, in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*. 2018. pp. 309-369.
- [19] **Zanio, K. & Pollak, F.H.** (1978). Semiconductors and Semimetals, Vol. 13 (Cadmium Telluride). *Physics Today*, pp. 31 53.
- [20] **Bonnet, D. & Rabenhorst, H.** (1972). New results on the development of a thin-film p-CdTe-n-CdS heterojunction solar cell, *Photovoltaic Specialists Conference, 9 th, Silver Spring, Md*, (pp. 129-132).
- [21] **Shen, K., Li, Q., Wang, D., Yang, R., Deng, Y., Jeng, M.-J., & Wang, D.** (2016). CdTe solar cell performance under low-intensity light irradiance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144. pp. 472-480.
- [22] **Tammaro, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., & Manzo, S.** (2016). Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *J Hazard Mater*, 306. pp. 395-405.
- [23] **Vellini, M., Gambini, M., & Prattella, V.** (2017). Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTe-panels. *Energy*, 138. pp. 1099-1111.
- [24] **Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A.L., & Yang, C.** (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Manag*,
- [25] **Peace, B., Claypoole, J., Sun, N., Dwyer, D., Eisaman, M.D., Haldar, P., & Efsthadiadis, H.** (2016). Characterization of Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) films with varying gallium ratios. *Journal of Alloys and Compounds*, 657. pp. 873-877.
- [26] **Hahn, H., Frank, G., Klingler, W., Meyer, A.D., & Störger, G.** (1953). Untersuchungen über ternäre Chalkogenide. V. Über einige ternäre Chalkogenide mit Chalkopyritstruktur. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 271 (3-4), pp. 153-170.
- [27] **Wagner, S., Shay, J., Migliorato, P., & Kasper, H.** (1974). CuInSe₂/CdS heterojunction photovoltaic detectors. *Applied Physics Letters*, 25 (8), 434-435.
- [28] **Han, G., Zhang, S., Boix, P.P., Wong, L.H., Sun, L., & Lien, S.-Y.** (2017). Towards high efficiency thin film solar cells. *Progress in Materials Science*, 87. pp. 246-291.
- [29] **Ferhati, H. & Djefal, F.** (2018). Graded band-gap engineering for increased efficiency in CZTS solar cells. *Optical Materials*, 76 . pp. 393-399.
- [30] **Wang, D., Zhao, W., Zhang, Y., & Liu, S.** (2017). Path towards high-efficient kesterite solar cells. *Journal of Energy Chemistry*,

- [31] **Ansari, M.I.H., Qurashi, A., & Nazeeruddin, M.K.** (2018). Frontiers, opportunities, and challenges in perovskite solar cells: A critical review. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 35 pp. 1-24.
- [32] **Green, M.A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H.J.** (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8 (7), pp. 506-514.
- [33] **Kim, H., Lim, K.-G., & Lee, T.-W.** (2016). Planar heterojunction organometal halide perovskite solar cells: roles of interfacial layers. *Energy & Environmental Science*, 9 (1), pp. 12-30.
- [34] **Martí, A., Cuadra, L., & Luque, A.** (2000). Quantum dot intermediate band solar cell, *Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, (pp. 940-943).
- [35] **Shockley, W. & Queisser, H.J.** (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of applied physics*, 32 (3), pp. 510-519.
- [36] **Yang, R., Lee, C.-H., Cui, B., & Sazonov, A.** (2018). Flexible semi-transparent a-Si:H pin solar cells for functional energy-harvesting applications. *Materials Science and Engineering: B*, 229 pp. 1-5.
- [37] **Heo, Y.H., You, D.J., Lee, H., Lee, S., & Lee, H.-M.** (2014). ZnO:B back reflector with high haze and low absorption enhanced triple-junction thin film Si solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 122 pp. 107-111.
- [38] **Kamat, P.V.** (2018). Hybrid Perovskites for Multijunction Tandem Solar Cells and Solar Fuels. A Virtual Issue. *ACS Energy Letters*, 3, pp. 28-29.
- [39] **Pearsall, N.** (2017). *Introduction to photovoltaic system performance*, in *The Performance of Photovoltaic (PV) System*. 2017, Elsevier. pp. 1-19.
- [40] **Shockley, W.** (1949). The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell Labs Technical Journal*, 28 (3), pp. 435-489.
- [41] **Hishikawa, Y., Imura, Y., & Oshiro, T.** (Year). Irradiance-dependence and translation of the IV characteristics of crystalline silicon solar cells, *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, (pp. 1464-1467).
- [42] **Hegedus, S.S.** (1997). Current–Voltage Analysis of a-Si and a-SiGe Solar Cells Including Voltage-dependent Photocurrent Collection. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 5 (3), pp. 151-168.
- [43] **Markvart, T. & Castañer, L.** (2018). *Principles of Solar Cell Operation*, in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*. 2018. pp. 3-28.
- [44] **Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R.** (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 pp. 1-18.
- [45] **Syedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T.K., Rahmani, R., Than Oo, A.M., Mekhilef, S., & Stojcevski, A.** (2016). State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64 pp. 435-455.

- [46] **Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik.** (2013). *T. C. Resmi Gazete*, 28783, 2 Ekim 2013.
- [47] **Çalıköğlu, S., Özdemir, E., & Uçar, M.** Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinin Güç Kalitesine Etkileri.
- [48] **Mahmoudimehr, J. & Shabani, M.** (2018). Optimal design of hybrid photovoltaic-hydroelectric standalone energy system for north and south of Iran. *Renewable Energy*, 115 pp. 238-251.
- [49] **Silva, S.B., Severino, M.M., & de Oliveira, M.A.G.** (2013). A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. *Renewable Energy*, 57 pp. 384-389.
- [50] **Kaabeche, A. & Ibtouen, R.** (2014). Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy*, 103 pp. 171-182.
- [51] **Perpinan, O., Lorenzo, E., & Castro, M.** (2007). On the calculation of energy produced by a PV grid-connected system. *Progress in Photovoltaics: research and applications*, 15 (3), pp. 265-274.
- [52] **Boztepe, M.** Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Verimliliği Etkileyen Parametreler.
- [53] **Mejia, F.A. & Kleissl, J.** (2013). Soiling losses for solar photovoltaic systems in California. *Solar Energy*, 95 pp. 357-363.
- [54] **Fraga, M.M., Campos, B.L.d.O., Almeida, T.B.d., Fonseca, J.M.F.d., & Lins, V.d.F.C.** (2018). Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil. *Solar Energy*, 163, pp. 387-397.
- [55] **Deb, D. & Brahmabhatt, N.L.** (2018). Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 3306-3313.
- [56] **Syafiq, A., Pandey, A.K., Adzman, N.N., & Rahim, N.A.** (2018). Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels. *Solar Energy*, 162, pp. 597-619.
- [57] **Miller, D.H.** (1981). *Diffuse Solar Radiation*, in *International Geophysics*. Academic Press. pp. 56-70.
- [58] **Jorgensen, G.J., Brunold, S., Koehl, M., Nostell, P., Oversloot, H., & Roos, A.** (1999). Durability testing of antireflection coatings for solar applications, *Solar Optical Materials XVI*, (pp. 66-77).
- [59] **Kumar, M. & Kumar, A.** (2017). Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp. 554-587.
- [60] **Ngan, L., Strevel, N., Passow, K., Panchula, A.F., & Jordan, D.** (2014). Performance characterization of cadmium telluride modules validated by utility-scale and test systems, *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE 40th*, (pp. 1957-1962).
- [61] **Strevel, N., Trippel, L., & Gloeckler, M.** (2012). Performance characterization and superior energy yield of First Solar PV power plants in high-temperature conditions. *Photovoltaics International*, 17 (3), pp. 148-154.

- [62] **Jordan, D.C., Silverman, T.J., Sekulic, B., & Kurtz, S.R.** (2017). PV degradation curves: non-linearities and failure modes. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25 (7), pp. 583-591.
- [63] **Yang, H., Chang, J., Wang, H., & Song, D.** (2016). Power Degradation Caused by Snail Trails in Urban Photovoltaic Energy Systems. *Energy Procedia*, 88 pp. 422-428.
- [64] **Meyer, S., Timmel, S., Gläser, M., Braun, U., Wachtendorf, V., & Hagendorf, C.** (2014). Polymer foil additives trigger the formation of snail trails in photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, pp. 64-70.
- [65] **Peng, P., Hu, A., Zheng, W., Su, P., He, D., Oakes, K.D., Fu, A., Han, R., Lee, S.L., & Tang, J.** (2012). Microscopy study of snail trail phenomenon on photovoltaic modules. *Rsc Advances*, 2 (30), pp. 11359-11365.
- [66] **Hafez, A.Z., Soliman, A., El-Metwally, K.A., & Ismail, I.M.** (2017). Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, pp. 147-168.
- [67] **Jain, D. & Lalwani, M.** (2017). A review on optimal inclination angles for solar arrays. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 7 (3), pp. 1053-1061.
- [68] **Rowlands, I.H., Kemery, B.P., & Beausoleil-Morrison, I.** (2011). Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, 39 (3), pp. 1397-1409.
- [69] **Lave, M. & Kleissl, J.** (2011). Optimum fixed orientations and benefits of tracking for capturing solar radiation in the continental United States. *Renewable Energy*, 36 (3), pp. 1145-1152.
- [70] **Talebizadeh, P., Mehrabian, M., & Abdolzadeh, M.** (2011). Determination of optimum slope angles of solar collectors based on new correlations. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33 (17), pp. 1567-1580.
- [71] **Kaçan, E. & Ülgen, K.** (2012). Güneş Enerjisi Toplayıcılarında Eğim ve Yönlendirmenin Yararlanabilirliğe Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (4),
- [72] **Kalogirou, S.A.** (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- [73] **Primer, A., Burrus, C.S., & Gopinath, R.A.** (1998). *Introduction to wavelets and wavelet transforms*, Prentice Hall.
- [74] **Demren, E.** (2015). Dalgacık Dönüşümünün Fourier Dönüşümü İle Karşılaştırılması ve Uygulama. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [75] **Daubechies, I.** (1988). Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on pure and applied mathematics*, 41 (7), pp. 909-996.
- [76] **Sifuzzaman, M., Islam, M., & Ali, M.** (2009). Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform.

- [77] **Wallace, G.K.** (1992). The JPEG still picture compression standard. *IEEE transactions on consumer electronics*, 38 (1), pp. xviii-xxxiv.
- [78] **Url-1** < https://www.researchgate.net/post/How_does_a_thin_film_solar_module_perform_well_under_low_radiation_diffused_radiationst/How_does_a_thin_film_solar_module_perform_well_under_low_radiation_diffused_radiation>, erişim tarihi 25.02.2018.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Uğur Berkay KAHVECİ
Doğum Tarihi ve Yeri : 08.04.1990 İstanbul
E-posta : ugurkahveci15@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği