



GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN TASARIMI

VE PERFORMANS ANALİZİ

Erdem GÖNÜLTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hayrettin CAN

ARALIK-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN TASARIMI
VE PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem GÖNÜLTAŞ

(121129112)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 19.12.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 02.01.2018

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hayrettin CAN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müslüm ARKAN

Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

ARALIK - 2017

ÖNSÖZ

Her geçen gün artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi her geçen gün arttırmaktadır. Bu enerji kaynakları içerisinde en geniş kullanım alanına sahip olan ise güneş enerjisidir. Ülkelerin yatırımcılara sağladığı destekler, gelişen güneş paneli teknolojileri ile birlikte düşen birim maliyetleri bu alana yapılan yatırımların artmasına sebep olmuştur.

Bu tez çalışmasında kurulması planlanan güneş enerji sistemlerinin tasarımı ve performans analizi üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmanın temelinde, güneş açılarını ve buna bağlı olarak güneş ışınımını kullanarak sistemlerin üreteceği gücün tahmini yatmaktadır. Bu sayede yapılacak olan yatırımların ne kadar uygulanabilir olacağı konusunda fikir sahibi olunması amaçlanmaktadır. Hazırladığım tez çalışmasının, bu amaç doğrultusunda faydalı bir kaynak olmasını umuyorum.

Bu tez çalışmasında engin bilgi ve tecrübeleriyle desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Hayrettin CAN'a ve hayatım boyunca her konuda, hep yanımda ve destek olan değerli aileme çok teşekkür ederim.

ERDEM GÖNÜLTAŞ

ELAZIĞ-2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2 Tezin Yapısı	3
2. GÜNEŞ PİLLERİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	5
2.1 Güneş Pili ve Çalışma İlkesi	5
2.2 Güneş Pili Modeli	7
2.3 Yapısına Göre Güneş Pilleri.....	11
2.4 Fotovoltaik Modül.....	12
2.5 Fotovoltaik Dizi	13
2.6 Güneş Pili Performansının Arttırılması.....	14
3. GÜNEŞ AÇILARI VE IŞINIM HESAPLAMALARI	16
3.1 Güneş Açıları	16
3.2 Güneş Işınımı	21
3.2.1 Direkt Güneş Işınımı	22
3.2.2 Yayılı veya Difüz Işınımı	22
3.2.3 Yansıyan Işınım.....	22
3.2.4 Toplam Güneş Işınımı	22

3.3	Atmosfer Dışında Yatay Düzleme Gelen Güneş Işınımı	23
3.4	Yeryüzüne Düşen Güneş Işınımının Hesabı	24
3.4.1	Yatay Düzleme Düşen Güneş Işınımı	25
3.4.2	Eğik Düzleme Düşen Güneş Işınımı	28
4.	COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ.....	31
4.1	Raster Haritalar	31
4.2	PostgreSQL Veritabanı	32
4.3	Raster Haritaların İşlenmesi ve Veri Tabanında Depolanması	32
5.	GELİŞTİRİLEN UYGULAMALAR	37
5.1	Anlık Güç Hesaplama Uygulaması	38
5.2	Enerji Hesaplama Uygulaması.....	41
5.3	Gölgeleme Analizi Uygulaması	43
5.4	İzafi Güneşlenme Süresinin Yıllık Üretimlere Etkisi	47
6.	SONUÇ	50
	KAYNAKLAR.....	52
	ÖZGEÇMİŞ	56

ÖZET

Şebekeye bağılı fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşması ve bu sistemlerden üretilen enerjiye devlet tarafından alım garantisi verilmesiyle birlikte, bu sistemler bir yatırım aracına dönüşmüştür. Bütün yatırımlarda olduğu gibi güneş enerjisi yatırımlarında da bir fizibilite çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda kurulması planlanan güneş enerji santrallerinde üretilen enerji miktarının tahmin edilmesi büyük öneme sahiptir. Bu tahminlerin tutarlı olabilmesi için dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır.

Zemine monte güneş enerjisi santral yatırımlarında dikkat edilmesi gereken konuların başında sistemin kurulacağı arazinin seçimi gelmektedir. Bu konu kurulacak santralin performansında temel rol oynayacaktır. Seçilen arazinin bakı durumu, arazinin eğimi, çevresindeki yeryüzü şekillerinin gölgeleme etkisi detaylı olarak irdelenmelidir ve projelendirme aşamasına geçildiğinde göz önünde bulundurulmalıdır.

Çatı üzeri güneş enerji santrallerinde durum daha farklıdır. Bu sistemlerde, kurulum yapılması planlanan çatının eğimi ve yönünün projeden projeye farklılık göstermesi ve genelde maksimum performans için gereken değerlerden uzak olması nedeniyle kurulacak santralin üreteceği enerjinin kestirimi zor olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kurulması planlanan çatı veya arazi güneş enerji santrallerinin tasarımı ve performans analizi üzerine çalışılmıştır. Fotovoltaik hücrelerin karakteristikleri ve çalışma ilkelerine değinilmiş, Matlab ortamında geliştirilen uygulamalar ile panel açısındaki değişimin panel üzerine gelen ışınım ve sistem üzerindeki etkilerinin yanı sıra arazi seçimi sırasında yapılan hatalar sebebiyle oluşacak güç ve enerji kayıplarının analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sistemler, Güneş Enerjisi, Güneş Işınımı, Güneş Açıları, Gölgeleme Analizi

SUMMARY

Design And Performance Analysis Of Solar Energy Plants

The fact that photovoltaic systems which are connected to grid, become widespread and guarantee of purchase is provided by government to the energy produced from these systems have turned these systems into an investment tool. A feasibility study is needed for solar energy investment as it is needed for all other investments. In this sense, prediction of the amount of energy to be produced in power plant which is planned to be established has vital importance. There are some points to be taken into consideration in order to have consistent predictions.

The first important point for the investments in floor-mounted solar energy power plant is the selection of land in which the system is going to be established. This decision will play an important role of the performance of the power plant that is going to be established. Aspect of the selected land, inclination of the land, the shadowing effect of surrounding landforms need a detailed examination and need to be taken into consideration when getting to the phase of project design.

The situation in rooftop solar power plant is even more different. In these systems the inclination and direction of the roof on which the system is going to be established change from project to project and is generally far from the required rates for maximum performance. Thus, the prediction of the possible energy production of planned power plant becomes difficult.

In this thesis, the design and the performance analysis of the roof and land solar power plant which is planned to be established are studied. The characteristics of photovoltaic cells and their working principle are addressed. Along with the effect of the change in panel's angle upon radiation on the panel and system, analysis of power and energy loss that will happen because of the errors during land selection are carried out with the applications developed in Matlab environment.

Key words: Photovoltaic systems, Solar energy, Solar radiation, Solar angles, Shadowing analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 2.1. Saf silisyum kristalinin Fosfor ve Bor atomlarıyla katkılanması.....	6
Şekil 2.2. Güneş pilinin çalışma prensibi ve p-n jonksiyonu	6
Şekil 2.3. Tek diyot güneş pili modeli	7
Şekil 2.4. Standart bir hücrenin akım-gerilim grafiği	8
Şekil 2.5. Farklı ışınım değerlerine ait I-V ve P-V grafikleri.....	9
Şekil 2.6. Ortam sıcaklığının P-V eğrisine etkisi	10
Şekil 2.7. a)Baypass diyotsuz modül, b)Baypass diyotlu modül[44].....	13
Şekil 2.8. (a)Çift eksenli, (b)Doğu-Batı eksenli, (c)Kuzey-Güney eksenli izleyici sistemler [45]	14
Şekil 2.9. Sabit, Tek Eksen ve Çift Eksen izleyici sistemlerin anlık güce etkisi	15
Şekil 3.1. Güneş açıları	16
Şekil 3.2. Sapma açısının yıl boyunca değişimi.....	17
Şekil 3.3. Enlem açısı.....	18
Şekil 3.4. Yüzey Azimut Açısı.....	18
Şekil 3.5. Eğim açısı.....	19
Şekil 3.6. Zenit açısı.....	20
Şekil 3.7. Yükseklik açısı.....	21
Şekil 3.8. Yeryüzüne gelen güneş ışınımı	22
Şekil 3.9. Eğik bir yüzeye ekti eden ışınımın.....	23
Şekil 4.1. Raster haritalarda veri depolanması [50]	31
Şekil 4.2. Earth Explorer arayüzü	33
Şekil 4.3. Birleştirilmemiş DEM haritaları	34
Şekil 4.4. Birleştirilme işlemi sonucunda oluşturulan DEM harita.....	34
Şekil 4.5. Yeni veri tabanı oluşturma işlemi	35
Şekil 4.6. Sunucuya uzaktan erişim için izin verilmesi.....	36
Şekil 5.1. Anlık sistem gücünün hesaplanması	38
Şekil 5.2. Anlık ışınım ve anlık sistem gücün hesaplanması	39
Şekil 5.3. Çatı bakışının üretilen güç üzerindeki etkisi.....	40
Şekil 5.4. Enerji hesaplama ekranı	41
Şekil 5.5. Örnek sistemlere ait Güç-Zaman grafikleri.....	41

Şekil 5.6. (a) Doğu(Azimet=-90°), (b) Batı(Azimet=90°), (c) Güney(Azimet=0°), (d) Kuzey(Azimet=180°)	42
Şekil 5.7. Gölgeleme analizi uygulaması sonuçları	44
Şekil 5.8. İdeal arazinin için gölgeleme analiz sonuçları	45
Şekil 5.9. Sıra aralığı (d=toplam panel yüzey uzunluğu)	45
Şekil 5.10. Gölgeleme analizi sonuçları	46
Şekil 5.11. Meteoroloji verileri ile ölçüm istasyonu verilerinin karşılaştırılması	48
Şekil 5.12. Elazığ ilinde farklı berraklık indekslerine göre tahmini aylık üretim değerleri	49



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 3.1. Ayları temsil eden gün değerleri [47].....	17
Tablo 5.1. Elazığ ilinde farklı gün ve saatlere ait hesaplanan ışınım ve güç değerleri.....	39
Tablo 5.2. Örnek çatı üzeri sistem için hesaplanan ışınım ve güç değerleri.....	40
Tablo 5.3. Elazığ ilinde 21 Aralık tarihinde farklı kurulum senaryolarına ait analiz sonuçları	46



SEMBOLLER LİSTESİ

- G_{sc} : Güneş Sabiti
 I_D : Diyot saturasyon akımı
 R_s : Seri direnç
 R_p : Paralel direnç
 δ : Sapma açısı
 n : Ocaktan itibaren gün sayısı
 ϕ : Enlem açısı
 γ : Yüzey azimut açısı
 ω : Saat açısı
 θ : Güneş geliş açısı
 β : Eğim açısı
 α : Güneş yükseklik açısı
 θ_z : Zenit açısı
 G_o : Atmosfer dışında birim yatay düzleme herhangi bir anda gelen ışınım.
 H_o : Atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımı
 ω_s : Güneş batış saat açısı
 I_o : Atmosfer dışında yatay düzleme gelen belirli saat aralığındaki anlık güneş ışınımı miktarı
 \bar{H} : Yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarı
 \bar{H}_c : Bölgenin konumuna ve aya bağlı olarak havanın açık olduğu bir günde ortalama güneş ışınımı miktarı
 a',b' : Ampirik sabitler
 \bar{n} : Aylık ortalama günlük güneşlenme süresi
 \bar{N} : Aylık ortalama gün uzunluğu
 a,b : Bölgeye ait sabitler
 n/N : İzafi güneşlenme süresi
 Z : Konumun deniz seviyesinden yüksekliği
 H : Yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınımı
 K_T : Günlük berraklık indeksi
 k_T : Anlık berraklık indeksi

- H_d** : Günlük yayılı ışınım
- r_t** : Yatay yüzeye düşen anlık toplam güneş ışınımının, yatay yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınımına oranı
- I** : Yatay düzleme belirli saat aralığında gelen anlık toplam güneş ışınımı
- I_d** : Yatay düzleme düşen anlık yayılı ışınımın miktarı
- R_b** : Geometrik faktör
- I_{bT}** : Eğik yüzeye düşen anlık direkt ışınım miktarı
- I_b** : Yatay yüzeye düşen anlık direkt ışınım miktarı
- I_{dT}** : Eğik yüzeye gelen anlık yayılı ışınım miktarı
- I_d** : Yatay yüzeye düşen anlık yayılı ışınım miktarı
- I_T** : Eğik yüzeye düşen anlık toplam güneş ışınımı miktarı
- H_{bT}** : Eğik düzleme düşen günlük direkt ışınım miktarı
- H_b** : Yatay düzleme düşen günlük direkt ışınım
- $\overline{R_b}$** : Eğik düzleme düşen günlük direkt ışınımın, yatay düzleme düşen günlük direkt ışınımına oranı

KISALTMALAR LİSTESİ

PV	: Fotovoltaik Sistem
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
Si	: Silisyum
GS	: Güneş Saati
Gds	: Güneş doğuş saati
Gbs	: Güneş batış saati
GaAs	: Galyum Arsenit
CdTe	: Kadmilyum Tellürid
a-Si	: Amorf Silisyum

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte insanoğlunun enerji ihtiyacı sürekli olarak artmaktadır. Bu enerji ihtiyacı üzerine yapılan çalışmalar, 20.yüzyılın ortalarına doğru küresel enerji talebinin en az iki kat artacağı öngörüsünde bulunmaktadır[1,2]. Fosil yakıtların sonlu olma durumu ve çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, gelecekte bu artan enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması daha mantıklı olacaktır. Bu kaynaklar içerisinde, gelişen panel teknolojileri ve düşen birim maliyetleriyle güneş enerjisi ön plana çıkmaktadır.

Güneş enerjisi, çevreye zarar vermeyen ve bakım gerektirmeyen, yenilenebilir bir enerji türüdür. Gelişen panel teknolojileriyle birlikte artan verimlilik, ülkelerin gelecekteki enerji planlamalarını yaparken yenilenebilir enerjiye öncelik vermelerine sebep olmuştur. Ülkeler yaptıkları yasal düzenlemeler ve teşviklerle, toplam enerji üretimi içerisinde yenilenebilir enerjinin payını arttırmaya çalışmaktadırlar. Bu ve benzer sebepler fotovoltaik (PV) enerji piyasasında pazar payının artmasına neden olmuştur.

Güneşten elektrik üretiminin temelleri, 1839 yılında Alexandre-Edmond Becquerel'in fotovoltaik etkiyi keşfedip, ilk fotovoltaik hücreyi yapmasıyla atılmıştır[3]. Temel olarak bu etki silisyum gibi yarı iletken maddelerin fotovoltaik özelliği kullanılarak güneş ışınlarının elektrolit ve içerisine daldırılmış elektrotlar üzerine düşmesi sonucu elektrik enerjisinin açığa çıkması prensibine dayanır.

Fotovoltaik sistemler temelde ikiye ayrılmaktadır. Şebekeden bağımsız sistemlerde üretilen enerji, güneşin yetersiz kaldığı durumlarda ve gece saatlerinde kullanılmak üzere akülerde depolanır ve gereken enerji aküler üzerinden kullanılır. Bu sistemlerde ayrıca akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için aküye giden akım ve gerilimi kontrol eden bir denetim birimi bulunur. Şebekeye bağlı sistemlerde bir sistemin enerji gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji şebekeye verilir, enerjinin sisteme yetmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Fotovoltaik sistemden elde edilen enerji direkt tüketime harcanmakta veya şebekeyi beslemektedir. Bu tür sistemlerde enerji depolama sistemine gerek duyulmadığı için maliyet olarak şebekeden bağımsız sistemlere göre daha kârlıdır. Bu tarz sistemlerde kullanılan evirici cihazlar, panellerden gelen DC elektriği, şebekeye senkronize olarak uygun AC elektriğe çevirir. Böylece üretilen enerji şebekeye verilebilir.

Güneş enerji sistemleri sürekli güncelliğini koruyacak bir alan olduğundan, bu konu ile ilgili dünya çapında yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Literatürde, güneş enerji sistemlerinde üretilen enerjiyi doğrudan etkileyecek en önemli parametre olan güneş ışınımı üzerine yapılan çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Benzer bu çalışmalardan bazıları kısaca aşağıda verilmiştir.

Jiang, çalışmasında farklı birkaç hesaplama modeli kullanarak elde ettiği ışınım verilerini, geçmiş yıllara ait ölçülen güneş ışınım verileri ile karşılaştırmıştır [4].

Alsadi, kurduğu deney düzeneğiyle güneş enerji sahalarında panel sıraları arasındaki ışınım farklarını gözlemlemiş sonuçlarını paylaşmıştır [5].

Bhola, güneş enerji sistemlerinde üretilen toplam enerjiyi hesaplama tekniklerini karşılaştırmıştır. Çalışmalarında yapay sinir ağları, destek vektör makineleri (SVM), bulanık mantık ve istatistiğe dayalı modelleri temel almıştır [6].

Potnuru, dizi halinde bağlanmış fotovoltaik panellerde panel farklılıklarından kaynaklanan kayıpların azaltılması üzerine çalışmalar yapmıştır [7].

Paluch, uydu yükseklik haritaları ve meteorolojik veriler üzerinden ışınım hesaplamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır [8].

Gao, coğrafi bilgi sistemleri kullanarak aylık ortalama güneş ışınımı miktarının hesaplanması üzerine çalışmıştır [9]. Benzer şekilde Latif, yine coğrafi bilgi sistemi kullanarak çatı üzeri güneş enerjisi sistemlerinin potansiyelinin tespiti üzerine çalışmalar yapmıştır [10].

Li, güneş enerjisi sistemlerinde üretilen güce en fazla etki eden güneş ışınımı tipi olan direkt ışınım üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmasında uydu yükseklik haritaları ve meteorolojik ölçüm verilerini kullanarak engebeli yüzeylere etkiyen direkt ışınımı hesaplamak için dağıtık bir model önermiştir [11].

Güneş açılarına bağlı olarak optimum sabit güneş paneli açısının ve bu panellerin üzerine düşen ışınımın hesaplanması üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur [12-20].

Badescu ve arkadaşları, berraklık indeksine bağlı olarak, saatlik toplam güneş ışınımı hesaplaması için yeni bir model sunmuşlardır [21].

Kandırmaz, yer meteoroloji istasyonu verilerini kullanarak günlük güneşlenme süresi tespiti üzerine bir model geliştirmiştir [22-23].

Benzer şekilde literatürde güneş enerji sistemlerinde üretilen enerji tahmini, tek eksen ve çift eksen güneş takip sistemleri ve bu sistemlerin optimizasyonu üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur [24-42].

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Özellikle ülkemizde yapım aşamasında olan büyük ölçekli güneş enerji santrallerinde arazi seçiminin yanlış olduğu ve proje tasarlanırken arazi durumunun göz ardı edilmesinden kaynaklı sorunlar yaşandığı görülmüştür. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen uygulamalardan elde edilen sonuçlar ile zemine monte veya çatı üzeri güneş enerji santrallerinin fizibilite ve projelendirme aşamalarının daha doğru yapılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda yatırımcıya, doğru arazi seçimi ve seçilen araziye uygun projenin yapılması konusunda yardımcı olması amaçlanmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen uygulamalar kullanılarak yapılan analizler sonucunda, güneş enerji santrali yatırımlarında, yatırımcıya daha doğru bir projeksiyon sunulması amaçlanmaktadır.

1.2 Tezin Yapısı

Bu tez çalışması giriş bölümü ile birlikte altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tez çalışmasının amacına ve literatür araştırmalarının sonuçlarına yer verilmiştir.

İkinci bölümde, güneş pilleri ve fotovoltaik sistemlerle ilgili temel bilgiler verilmiştir. Fotovoltaik etki, fotovoltaik hücrenin yapısı ve çalışma prensibine değinilmiş, fotovoltaik modül ve dizi kavramları açıklanmış, farklı panel teknolojileri ile ilgili kısa bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, güneş enerjisi sistemlerinin temelini oluşturan güneş ışınımı ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Işınım hesaplamaları için kullanılan formül ve tekniklerin üzerinde durulmuştur. Güneş açılarının tanımı ve denklemlerine yer verilen bu bölüm tez çalışmasının temelini oluşturan bilgileri barındırmaktadır.

Dördüncü bölümde, coğrafi bilgi sistemleri hakkında temel bilgiler verilmiş, bu konulara ek olarak gölgelenme analizi için kullanılacak yükseklik haritalarının temini ve bu verilerin depolanacağı veri tabanının oluşturulması, uzaktan erişime açılması gibi işlemler

anlatılmıştır. Bu sayede yeryüzü şekillerinden kaynaklı gölgelenme analizi için altyapı oluşturulmuştur.

Beşinci bölümde, yapılan tez çalışması sonucunda geliştirilen uygulamalar anlatılmış, bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Altıncı bölümde ise tezde yapılan çalışmalar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



2. GÜNEŞ PİLLERİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik sistemler güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürebilen sistemlerdir. Güneş pilleri olarak da adlandırılan fotovoltaik sistemlerin çalışma mantığı, güneşten gelen ışınların yarı iletken malzemelerin üzerinde oluşturduğu fotovoltaik etki sonucu elektrik enerjisini açığa çıkarma prensibine dayanır. Sistemin en küçük biriminin hücre olduğu bu sistemlerde; hücrelerin birleşmesi ile panel, birden fazla panelin oluşturduğu yapıya da dizi adı verilmektedir.

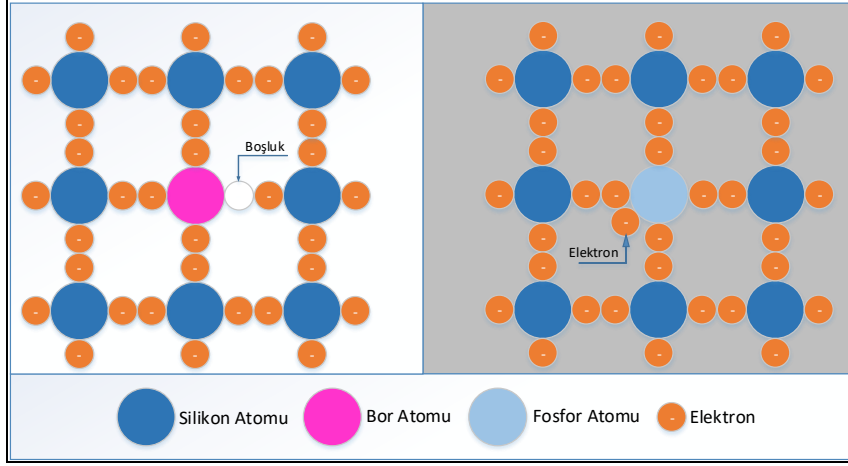
2.1 Güneş Pili ve Çalışma İlkesi

Güneş pillini oluşturmak için yüksek kristal kalitesinde saf silikon gereklidir. Silikon atomları yapıları gereği kendi aralarında kararlı bir kristal kafes oluştururlar. Bu kararlı yapıyı enerji üretmeye uygun hale getirmek amacıyla katkılama işlemi yapılır. Katkılama işlemi, saf yarı iletkenin özelliklerini bozmayacak miktarda ve denetimli bir şekilde yarı-iletken kristale yabancı atomların (safsızlık atomları) yerleştirilmesidir. Bu işlemden sonra yarı-iletkenin elektriksel özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir.

Örneğin saf silisyum kristali içerisinde değerlik elektron sayısı üç olan bor atomu katkılındığında, silisyum atomunun yerini alan bor atomu, silisyum kristalindeki üç atomla bağ yaparken dördüncü atomla paylaşacağı elektronu olmadığı için oluşan eksik bağ sebebiyle boşluklar oluşacaktır. Bu boşlukların çoğunluk taşıyıcısı olduğu bu tür malzemelere p-tipi yarı-iletken adı verilir.

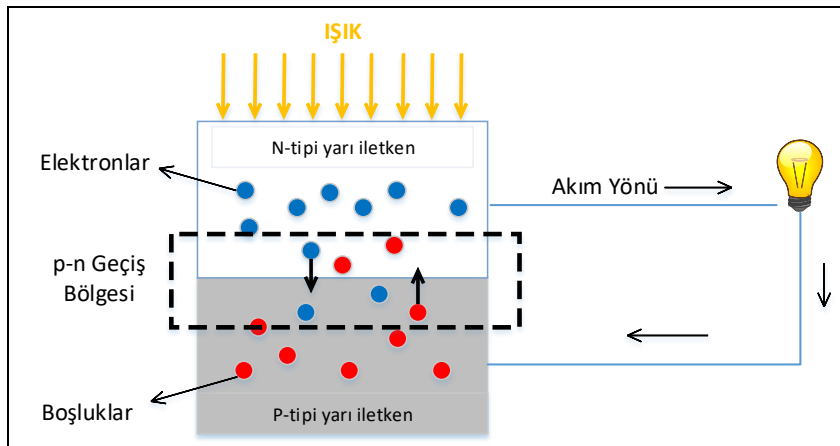
Benzer şekilde saf silisyum kristali içerisine değerlik elektron sayısı beş olan fosfor atomu katkılanırsa, fosfor atomu, silisyum atomunun yerine oturup dört değerlik elektronu ile silisyum daha önce kristal içerisinde yaptığı bağları sağlar iken, fosforun beşinci değerlik elektronu açıkta kalacaktır. Fosfor atomuna çok zayıf olarak bağlı olan bu elektron çok küçük bir enerji ile atomundan ayrılarak silisyum kristalinin iletkenlik bandına çıkacaktır.

Yukarıda belirtilen şekilde katkılanmış yarı-iletkenlerde elektriksel yük, elektronlar ile iletkenlik bandında taşınır ve bu nedenle bu yarı-iletkenler n-tipi olarak sınıflandırılır. Bu katkılama işlemleri sonucunda oluşan yapı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Saf silisyum kristalinin Fosfor ve Bor atomlarıyla katkılanması

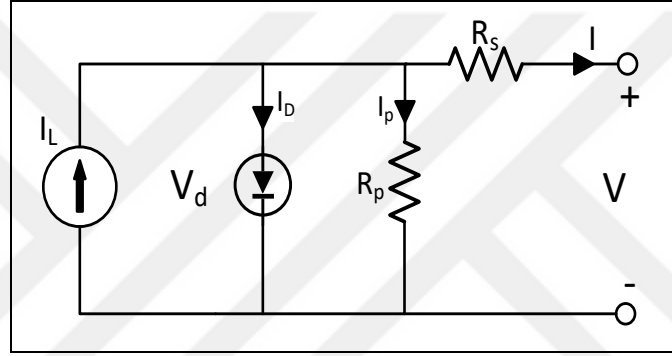
p-n tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır. Yarı iletken eklem güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaiik dönüşümün sağlanması gerekir. Fotonlar p-n jonksiyonundaki n tipi yarı iletkeni çarparak absorbe edildiklerinde n tipi yarı iletken üzerindeki daha fazla elektronun iletim bandına sıçramasına ve serbest olmasına sebep olurlar. Böylece jonksiyondaki elektrik alan barajı delinmeye başlar. Elektrik alan barajının delinmesi iki yarı iletken arasında voltaj farkı oluşturur ve bu doğrudan güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin kaynağıdır. Güneş pili olarak çalışan bir sistemin işleyişi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Güneş pilinin çalışma prensibi ve p-n jonksiyonu

2.2 Güneş Pili Modeli

Davranışları iyi bilinen elektriksel bileşenler kullanılarak fotovoltaik pilin elektriksel eşdeğer devresi çıkarılabilir. İdeal bir fotovoltaik pil, sadece bir diyot ve buna paralel bir akım kaynağıyla modellenir. Akım kaynağı solar ışık şiddeti G ile doğrudan orantılı olan fotoakımı I_L 'yi meydana getirir. Şekildeki diyot, fotovoltaik pilin p-n geçiş bölgesini temsil etmektedir. Ancak gerçek bir güneş pilinde harici kontaklar üzerinde gerilim düşümü oluşur. Buradaki gerilim kaybı modele bir seri R_s direnci eklenerek ifade edilir. Ayrıca paralel bir R_p direnci eklenerek sızıntı akımı gözlenebilir. Bu açıklamalar ışığında oluşturulan fotovoltaik pil modeli Şekil 2.3'te verilmiştir [43].



Şekil 2.3. Tek diyot güneş pili modeli

Şekil 2.3'te belirtilen akımlar ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

I_L : Fotovoltaik akımdır. Fotovoltaik pil üzerine düşen ışık radyasyonu ile doğru orantılıdır.

I_D : Diyot akımıdır. I_0 ile temsil edilen sızıntı akımına ve gerilime bağlıdır. (T :Kelvin cinsinden hücre sıcaklığı, q : $1.6 \times 10^{-19} C$, k : $1.38 \times 10^{-23} J/K$)

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

I_p : Paralel kol direncindeki eklem gerilimi etkisi ile oluşan akımdır. Paralel kol direnci R_p , n ve p eklemleri boyunca akan elektronlardaki kaybı simgeler.

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_g + I_g R_s}{R_p} \quad (2.2)$$

Hücreden akan çıkış akımını Denklem 2.3'te verilmiştir.

$$I = I_L - I_D - I_p \quad (2.3)$$

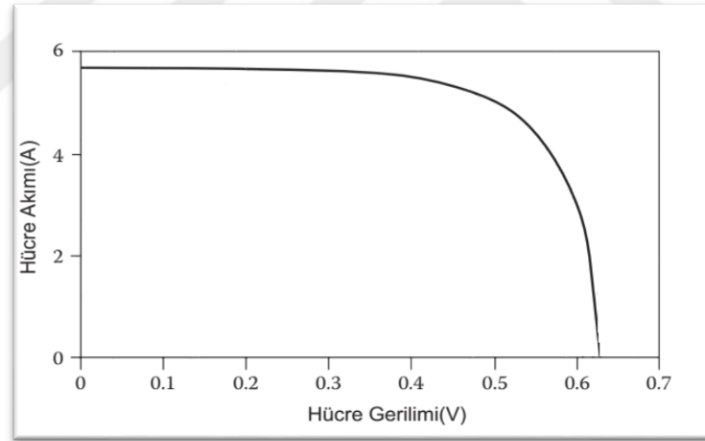
Ayrıca opak elektrot direncine, yarı iletken direncine ve bağlantı kayıpları temsil eden R_s direnci üzerinde oluşan gerilim düşümü;

$$V = V_d - IR_s \quad (2.4)$$

Denklem 2.1 ve Denklem 2.2, Denklem 2.3'te yerine koyulursa Denklem 2.5'te tek bir hücre için genel bir matematiksel model elde edilmiş olur.

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{kT} \right)} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te verilen model üzerinden önceki bilgiler ışığında tipik bir fotovoltaik hücrenin akım-gerilim grafiği Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Standart bir hücrenin akım-gerilim grafiği

Şekil 2.4, bir fotovoltaik hücrenin hem bir sınırlayıcı gerilime hem de sınırlayıcı bir akıma sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, hücrenin açık devre veya kısa devre koşullarında çalıştırılması hücreye zarar vermez [44].

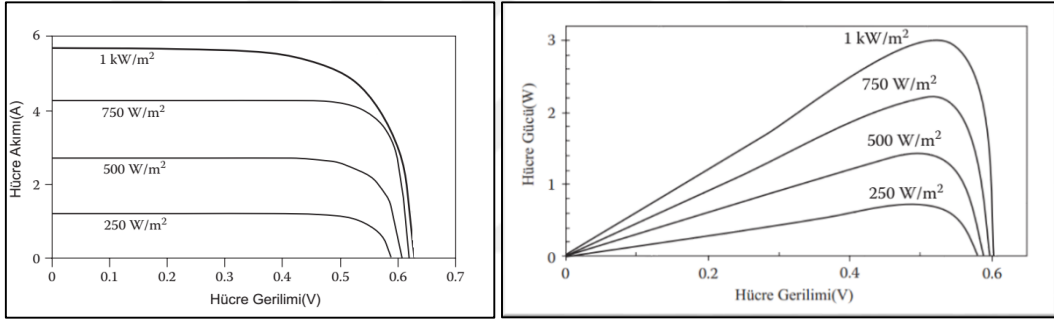
İdeal bir fotovoltaik hücrenin performans sınırlarını belirlenmesi için denklem ideal duruma uyarlanır. R_s ve R_p dirençleri ve bunlara bağlı kayıplar ihmal edilerek ideal hücre için Denklem 2.6 oluşturulur.

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

Hücreden elde edilebilen akım ve gerilim, hücrenin aydınlatılma seviyesine bağlıdır. İdeal bir fotovoltaik hücrede kısa devre akımını belirlemek için Denklem 2.6' da $V=0$ alınmalıdır. Böylece $I_{sc} = I_L$ olacaktır. Bu durumda hücre akımı hücre ışınımıyla doğrudan doğruya orantılıdır. Eğer standart test koşulları altında hücre akımı biliniyorsa ($G_0 = 1000W/m^2$), hücrenin diğer ışınımlardaki akımı Denklem 2.7 ile hesaplanabilir.

$$I(G) = (G/G_0)I(G_0) \quad (2.7)$$

Farklı ışınım değerlerine göre oluşan akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Farklı ışınım değerlerine ait I-V ve P-V grafikleri

Benzer şekilde hücrenin açık devre gerilimi (V_{oc}) hesaplanmak isteniyorsa Denklem 2.6'da hücre akımı sıfıra çekilir ve sonucunda oluşan Denklem 2.8 ile hesaplanır.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_L + I_0}{I_0} \cong \frac{kT}{q} \ln \frac{I_L}{I_0} \quad (2.8)$$

Örneğin, fotovoltaik akımın ters doyma akımına oranı 10^{10} , termal gerilim (kT/q) 26mV alınırsa açık devre gerilimi $V_{oc} = 0.6V$ olarak hesaplanır. Açık devre gerilimi hücreye düşen ışınım seviyesiyle logaritmik, kısa devre akımı ise doğru orantılıdır.

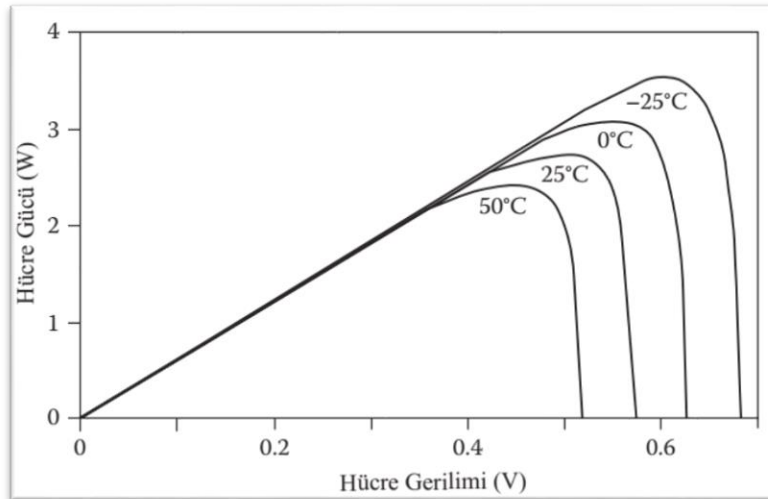
Hücre akımı ile hücre gerilimini çarpmak hücre gücünü verir. Herhangi bir aydınlatma seviyesinde hücrenin I-V karakteristiği üzerinde maksimum gücü ürettiği bir nokta vardır. Burada ışınımın gerilim üzerindeki etkisine kıyasla akım üzerindeki etkisi maksimum güç noktasını daha çok etkilemektedir [43].

Maksimum güç noktasındaki akım I_m , gerilim ise V_m olarak gösterilirse hücrenin maksimum gücü Denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$P_{max} = I_m V_m = FF I_{sc} V_{oc} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'te gösterilen FF , dolun faktörü (fill factor) olarak adlandırılır. Dolun faktörü hücrenin kalite ölçüsüdür. Bu değer 0 ile 1 arasında bir değerdir. Hücrenin kalitesi arttıkça dolun faktörü değeri 1'e yaklaşır. İdeal bir I-V karakteristiğine sahip hücrede yaklaşık 0,83 olan bu değer, gerçek hücrelerde, hücre teknolojisine göre değişmekle beraber, 0,5 ile 0,82 arasında değişmektedir. Dolun faktörünü maksimuma çıkarmanın yolu seri direnci düşürüp paralel direnci artırarak fotovoltaik akımın ters saturasyon akımına oranını maksimuma çıkarmaktır.

Fotovoltaik hücrenin I-V karakteristiği sıcaklığa duyarlıdır. İlk bakışta Denklem 2.8'te kısa devre geriliminin (V_{oc}) sıcaklıkla doğru orantılı olduğu görülse de, dikkatli incelendiğinde, ters saturasyon akımının sıcaklık değişiminden daha fazla etkilendiği görülmektedir. İdeal bir hücrede artan sıcaklık açık devre gerilimini yaklaşık olarak $\%0,5/^\circ\text{C}$ azaltırken, diğer taraftan kısa devre akımını neredeyse değiştirmez. Bunun sonucunda ise açık devre gerilimiyle birlikte güç de azalır. Hücre gücü ve geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Ortam sıcaklığının P-V eğrisine etkisi

2.3 Yapısına Göre Güneş Pilleri

Çoğu elektronik üründe olduğu gibi güneş pillerinin de yapısı yarı iletken maddelerden oluşmaktadır. Günümüzde güneş pili yapımında en yaygın kullanılan yarı iletken maddeler, silisyum (Si), kadmiyum tellür (CdTe), galyum arsenit (GaAs)'tir. Verimine ve maliyetine göre farklılıklar gösteren bu güneş pili türleri, maliyetin azaltılması ve verimliliğin artırılması amacıyla halen araştırılmaktadırlar.

Bu bölümde güneş pili yapılarından kristal silisyum, galyum arsenit ve kadmiyum tellür, güneş pilleri türlerinden tek kristal silisyum, çok kristal silisyum, ince film güneş pili ve amorf silisyum hakkında bilgi verilecektir.

2.3.1 Tek Kristal Silisyum

Atomik yapısı homojen olan tek kristal silisyum güneş pillerinin güneş enerjisini soğurma verimleri %20 civarlarındadır. Üretimlerinin zor olması ve üretim aşamalarının zaman gerektirmesi gibi sebeplerden dolayı bu tip güneş pili fiyatları diğer güneş pili fiyatlarından yüksektir. Ancak uzun süreli kullanımlar için düşünüldüğü zaman tek kristal güneş pilleri sağlamlık ve verim açısından daha çok tercih edilmektedir [44].

2.3.2 Çok Kristalli Silisyum

Çok kristalli silisyum güneş pilleri birçok tek kristalden meydana gelir ve atomik yapısı homojen değildir. Çok kristalli güneş pillerinin verimi yaklaşık %16'dır. Çok kristalli güneş pilleri verimlilikleri, tek kristal güneş pillerine göre düşüktür. Üretim maliyeti tek kristalli güneş pillerinden daha düşük olduğundan fiyatları da düşük ve en çok üretilen güneş pilleridir.

2.3.3 Galyum Arsenit (GaAs)

Silikona benzer kristalize yapıda galyum ve arsenit bileşiğinden oluşmuş bir yarı iletken malzemesi kullanan hücre tipleridir. Yüksek ışın toplama yeteneğine sahiptir. Bu maddelerden laboratuvar ortamında %25 ve %30 oranlarında verim elde edilmektedir. Bu maddeler daha çok uzay uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.3.4 Kadmiyum Tellür (CdTe)

Çok kristalli bir yapıya sahip olduğundan düşük maliyetle üretilen bu malzemeler güneş enerjisini soğurmada yüksek performansa sahiptirler. Laboratuvar ortamındaki verimleri %16, ticari ürünlerde ise %7 civarındadır.

2.3.5 İnce Film Güneş Pilleri

Güneş enerjisini soğurma katsayısı daha iyi olan amorf silisyum gibi maddeler kullanılarak tek kristalin 500 kat daha az kalınlığında üretilen güneş pilleridir. Amorf yapılı güneş pillerinde daha az malzeme kullanımı ve bu pillerin montaj kolaylığı gibi sebepler amorf yapılı güneş pillerini diğer güneş pillerine karşı avantajlı kılmıştır.

2.3.6 Amorf Silisyum (a-Si)

Kristalli pillere göre maliyetleri daha düşük olan amorf-silikonlu güneş pilleri, düzgün kristalli bir yapıda değildir. Standart kristal hücrelerden farkı, ışığı daha fazla absorbe edebilmesidir. Hassas yapıları sebebiyle fazla parlak güneş ışığına maruz kaldıklarında özelliklerini kaybedebilirler. Laboratuvar koşullarında %13 verim sağlamasına rağmen ticari ürünlerinde verim %5-7 civarındadır.

2.3.7 Bakır İndiyum Diselenür (CuInSe₂ veya CIS)

Çok kristalli ve karmaşık bir yapıya sahiptirler. Bu sebeple üretimleri maliyetli ve zordur. Buna karşın güneş ışınlarının neredeyse tamamını (%90) absorbe edebildiğinden %18 gibi yüksek bir enerji dönüşüm verimine sahiptir.

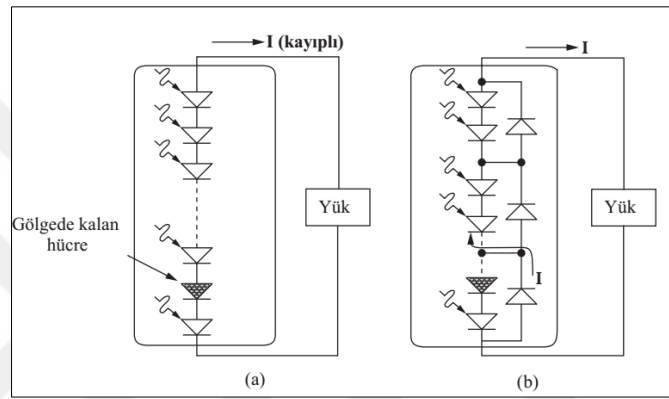
2.4 Fotovoltaik Modül

Fotovoltaik sistemlerde yeterli çıkış gerilimi veya akımı elde edebilmek için fotovoltaik hücreler seri veya paralel şekilde bağlanarak fotovoltaik modülleri oluşturur. Günümüzde pek çok fotovoltaik modül 54 ile 72 arasında değişen sayıda hücre içermektedir. Fotovoltaik modüllere olan ihtiyaç ilk olarak şebekeden bağımsız ve akülü sistemlerde etkin bir akü şarjı sağlamak için kendini göstermiştir. Fakat son 15-20 yılda şebekeye bağlı sistemler şebekeden bağımsız sistemlerden daha fazla yaygınlaşmıştır.

Gelişen hücre teknolojilerine bağlı olarak, artık fotovoltaik modüller daha yüksek açık devre gerilimlerine ve yüksek modül/güç oranlarına sahip olmaktadır. Benzer şekilde şarj kontrol cihazlarında sağlanan gelişme ile panel gerilimini akü gerilimiyle eşitleme ihtiyacı

ortadan kalkmıştır. Günümüzde modern şarj kontrol cihazları maksimum güç noktası izleme devresini içerdiğinden böylece dizi pil voltajını aşan maksimum güç geriliminde çalışabilir ve şarj kontrol cihazı yoluyla pillere doğru şarj gerilimini gönderilebilmektedir [43].

PV hücrelerinin seri bağlandığında ortaya bazı sorunlar çıkarabilir. Bu sorunlardan en önemlisi seri bağlı hücrelerden sadece bir veya birkaçının gölgede kalma durumudur. Şekil 2.7’de gösterilen durumda gölgede kalan hücre diğer hücreler tarafından ters beslenir ve yük gibi davranır. Bu durum o hücrenin aşırı ısınmasına bunun sonucunda üzerindeki lehimlerin ve modülün yapısının bozulmasına sebep olabilir.



Sistemi böyle bir arızaya karşı korumak için genellikle **bypass diyot** kullanılır. Bu diyotların kullanılması durumunda fotovoltaik akım bir veya birden fazla hücre üzerinden akamazsa bypass diyot üzerinden akacaktır.

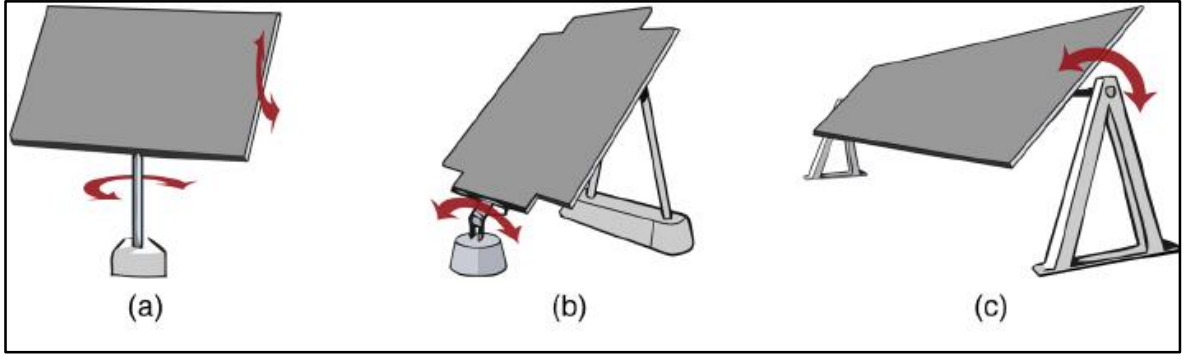
2.5 Fotovoltaik Dizi

Tek bir modüldekinden daha yüksek gerilimler veya akımlar elde edilmek isteniyorsa, modüller bir araya getirilerek dizi şeklinde bağlanmalıdır. Paralel bağlı diziler daha yüksek akımlar, seri bağlı diziler ise daha yüksek gerilim elde edilmesine imkân sağlar. Tıpkı hücreler için olduğu gibi, modüller de seri bağlandığında, her bir modülün maksimum güç üretiminin aynı akıma gelmesi arzu edilir [7]. Modüller paralel bağlandığında ise, her bir modülün maksimum güç üretiminin aynı gerilimde olması arzu edilir. Bu sebeple, panel dizileri oluşturulurken her bir panelin özelliklerini göz önünde bulundurmamak gerekir.

2.6 Güneş Pili Performansının Arttırılması

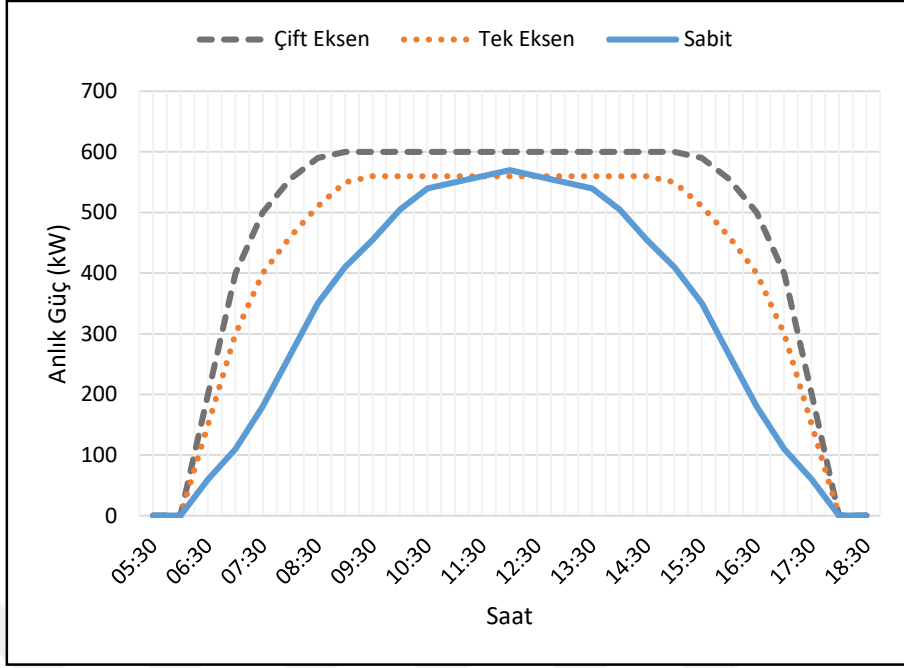
Güneş pillerinden maksimum verim sağlamanın değişik teknikleri vardır. Bunlardan en önemli ve uygulanabilir olanları ise tek veya çift eksenli güneş izleyici sistemler ve maksimum güç noktası izleyicilerdir(MPPT).

Güneşin konumu gün içerisinde sürekli değiştiğinden günün her saatinde sabit güneş paneli sistemlerinde kayıplar oluşacaktır. Bu kaybı azaltmak amacıyla panelin eğimini ve yönünü değiştirerek, panel yüzeyine gelen ışınım miktarını arttıran sistemlere ihtiyaç duyulmuştur. İzleyici sistem olarak adlandırılan bu yapılarla, güneş panel veya panelleri gelen güneş ışınımını mümkün olduğunca dik alacak şekilde konumlandırılabilir. Şekil 2.8’de izleme doğrultularına göre, tek ve çift eksenli izleyiciler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. (a)Çift eksenli, (b)Doğu-Batı eksenli, (c)Kuzey-Güney eksenli izleyici sistemler [45]

Tek ve çift eksenli izleyici sistemler panel yüzeyine gelen güneş ışınımını maksimize etmek için sürekli güneşi takip ederler. Bu durum sonucunda panel yüzeyine gelen ışınımın artmasıyla doğru orantılı olarak üretilen güç de artacaktır. Bu güç farkı Şekil 2.9’da verilen grafikte açıklanmıştır.



Şekil 2.9. Sabit, Tek Eksen ve Çift Eksen izleyici sistemlerin anlık güce etkisi

İzleyici sistemler küçük alanlarda verimi arttırmak amaçlı kullanılsa da, büyük arazi uygulamalarında kurulum maliyetlerini yükselttiği ve mekanik parçalar içermesi sebebiyle bakım gerektirdiğinden tercih edilmemektedir. Çoğu yatırımcı, düşük panel fiyatları sebebiyle izleyici sistem kullanmak yerine, sistemlerindeki panel sayısını artırma yoluna gitmektedirler.

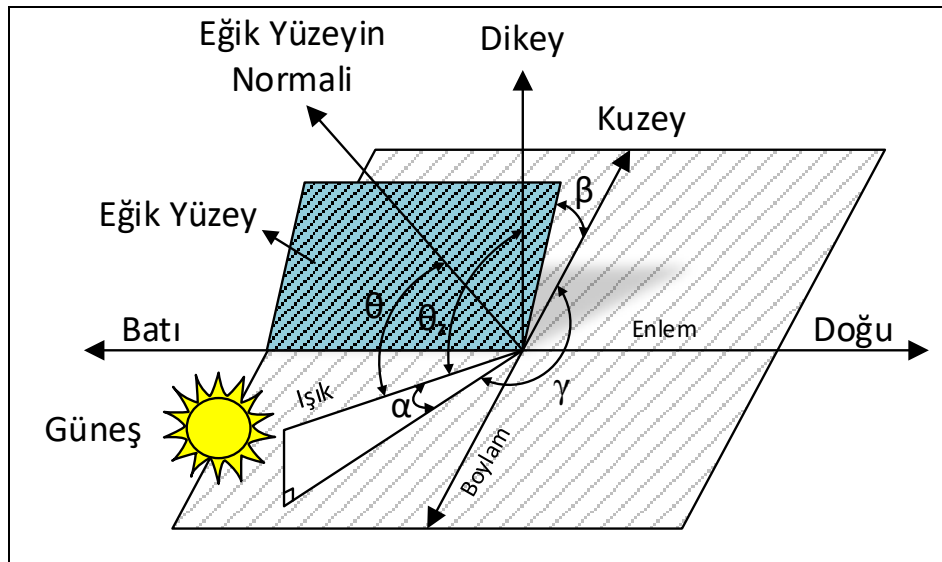
Bir diğer teknik, yüke maksimum gücü sağlamak için panelin karakteristiklerini ayarlayan karmaşık sistem devresi içeren maksimum güç noktası izleyicisi kullanmaktır. Bu cihazlar, paneli tepe güç değerini (%98 seviyelerinde verimle) sağlamaya zorlamaktadırlar [46].

3. GÜNEŞ AÇILARI VE IŞINIM HESAPLAMALARI

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen bir dizi reaksiyon sonucu hidrojen gazının helyuma dönüşmesiyle açığa çıkan enerjidir. Güneşten dünyaya yaklaşık sekiz dakikada ulaşan bu enerji, çeşitli dalga boylarındaki ışıklardan oluşur. Bu ışınların dalga boyları mor ötesinden kızılötesine kadar değişim göstermektedir. Bu ışınların yeryüzündeki miktarlarının hesaplanabilmesi için güneşin anlık konumunun ve buna bağlı açılarının hesaplanması gerekmektedir.

3.1 Güneş Açıları

Dünya üzerindeki herhangi bir noktanın, herhangi bir zaman dilimi içerisinde alacağı güneş ışınımı, güneşin yörüngedeki konumu, eksen eğikliği ve noktanın koordinatları gibi faktörler göz önünde bulundurularak formüle edilmiştir. Böylelikle güneş ışınımı hesaplamaları daha sağlıklı bir şekilde yapılabilmektedir. Bu açılar; Sapma açısı (δ), Enlem açısı (ϕ), Yüzey azimut açısı (γ), Eğim açısı (β), Saat açısı (ω), Güneş geliş açısı (θ), Zenit açısı (θ_z) ve Yükseklik açısı (α)'dır. Fotovoltaik sistemlerde güneş ışınım miktarlarının aylara, günlere ve saatlere göre hesaplanabilmesi için bu açılarının ve bazı hesaplamaların bilinmesi gerekmektedir. Bu açı ve hesaplamalar aşağıda detaylarıyla verilmiş olup Şekil 3.1'de bazı açılar gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Güneş açıları

a) Sapma Açısı (δ)

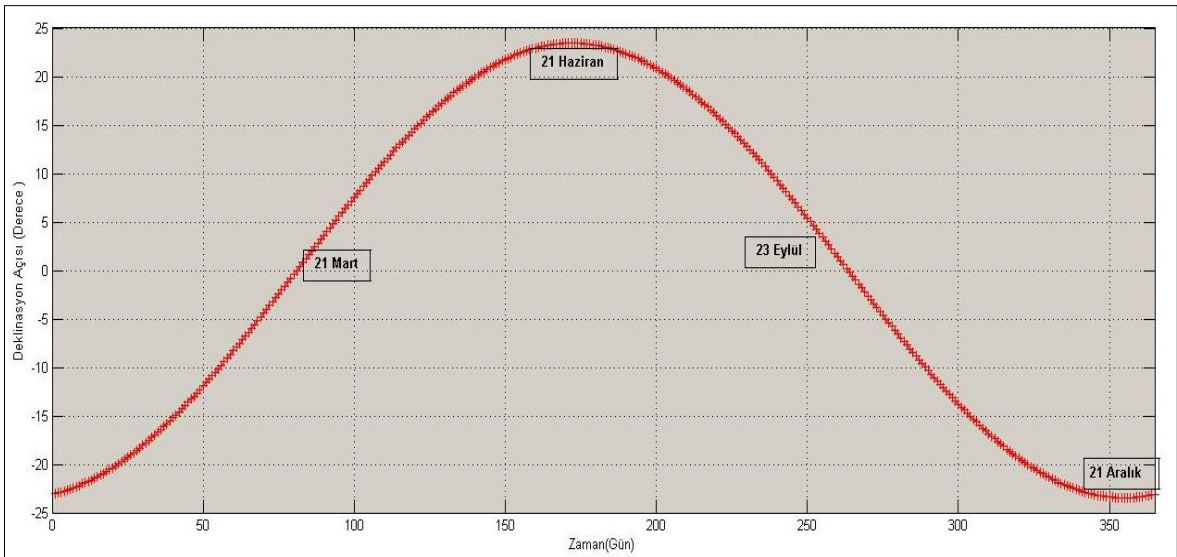
Sapma açısı dünyanın $23^{\circ}27'$ lık eksen eğikliğinden kaynaklanan, yeryüzüne gelen güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Sapma açısı $-23,45^{\circ}$ ile $+23,45^{\circ}$ arasında değişim göstermektedir. Ekinoks tarihlerinde (21 Mart, 23 Eylül) sapma açısı sıfır, 21 Haziran ve 21 Aralık tarihlerinde ise $\pm 23^{\circ},45'$ 'dir. Denklem 3.1'de n değeri 1 Ocaktan itibaren gün sayısı olmak üzere, belirlenen gün Tablo 3.1'de hangi aya ait ise o ayın "i" değeri yerine yazılarak bulunur. Sapma değeri deneye dayalı Cooper formülü ile Denklem 3.1'deki eşitlik ile hesaplanır [47].

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (3.1)$$

Tablo 3.1. Ayları temsil eden gün değerleri [47]

Ocak	i	Mayıs	i+120	Eylül	i+243
Şubat	i+31	Haziran	i+151	Ekim	i+273
Mart	i+59	Temmuz	i+181	Kasım	i+304
Nisan	i+90	Ağustos	i+212	Aralık	i+334

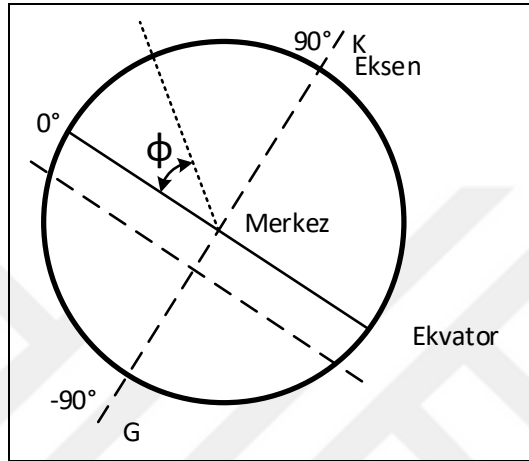
Dünyanın her yerinde aynı gün için bu açı aynı olmaktadır. Sapma açısının bir yıllık periyottaki değişimi Matlab ortamında çizdirilmiş ve oluşturulan grafik Şekil 3.2'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Sapma açısının yıl boyunca değişimi

b) Enlem Açısı (ϕ)

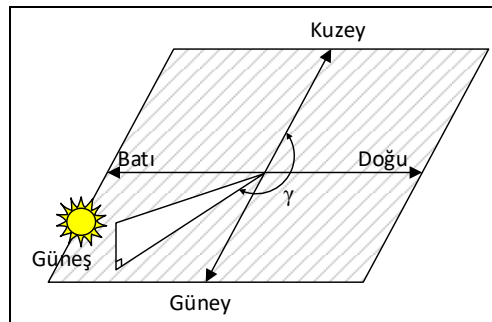
Kuzey yarım kürede pozitif (+) güney yarım kürede negatif (-) olmak üzere yeryüzündeki herhangi bir noktanın ekvator ile arasındaki açısal mesafe olarak kabul edilir. Enlem açısı $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ arasında değişim göstermektedir. Örneğin Türkiye $36-42^\circ$ enlemleri arasındadır. Bu çalışmada tüm il merkezlerinin enlem değerleri alınıp hesaplamalar bu değerler üzerinden yapılmaktadır. Enlem açısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Enlem açısı

c) Yüzey Azimut Açısı (γ)

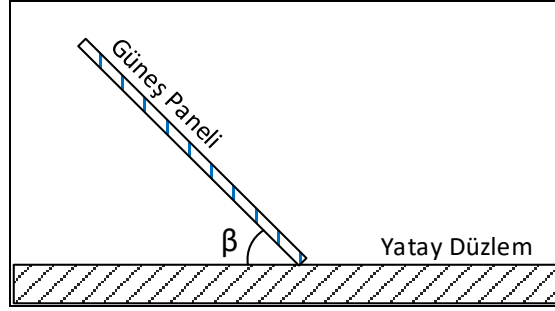
Yüzey azimut açısı Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, yüzey normalinin yatay düzlemdeki iz düşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıdır. Doğuya yönelen yüzeylerde artı (-), batıya yönelen yüzeylerde (+) olmak üzere tam güneyde sıfırdır. $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$ arasında değişim göstermektedir [47]. Bu değişim fotovoltaik sistemin bulunduğu yarım küreye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Güney yarım kürede kurulan sistemin yüzey azimut açısının (γ) 180° , kuzey yarım kürede kurulu sistem için bu değer 0° olması güneşten daha fazla faydalanabilmek için uygun değerlerdir.



Şekil 3.4. Yüzey Azimut Açısı

d) Eğim Açısı(β)

Yüzeyin yatay ile yaptığı açıdır. $0 < \beta < 180$ arasında değişim göstermektedir. Eğim açısı Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Eğim açısı

e) Güneş Doğuş ve Batış Saati

Güneş doğuş ve batış saatinin bulunabilmesi için güneş batış açısının (ω_s) bilinmesi gerekmektedir. Bu açı öğleden sonraki batış açısı değeridir. Bu açıyı veren eşitlik Denklem 3.2’de verilmiştir. Güneş batış açısının Denklem 3.3’te yerine koyulması ile güneş batış saati, güneş batış saatinin Denklem 3.4’te yerine koyulmasıyla da güneş doğuş saati bulunmaktadır.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (3.2)$$

$$Gbs = (\omega_s + 15 \times 12)/15 \text{ (saat)} \quad (3.3)$$

$$Gds = 24 - Gbs \text{ (saat)} \quad (3.4)$$

f) Saat Açısı(ω)

Dünyanın kendi eksenini etrafında saatte 15° dönmesi nedeniyle yerel meridyenin doğusu veya batısı yönünde güneşin açısal yer değiştirmesi olarak kabul edilir [44]. Güneşin tam tepede olduğu saat 12’de bu değer 0° ’dir. Saat açısı formülü Denklem 3.5’te gösterilmiştir. Formülde verilen (GS) güneş saatidir. Işınım hesaplamalarında kullanılan saat güneş saatidir. Bu yüzden çalışmamızda ölçüm istasyonundan alınan verilerdeki saat ulusal saat olduğundan güneş saatine çevrilmesi gerekmektedir.

$$\omega = 15(GS - 12) \quad (3.5)$$

g) Güneş Geliş Açısı (θ)

Eğik yüzeyin normali ile yüzeye gelen güneş ışınımı arasındaki açıdır. Bu açı Denklem 3.6'daki eşitlik ile hesaplanır [47].

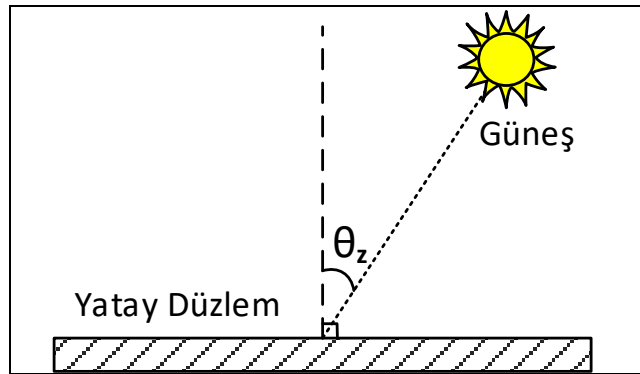
$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & [\sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega)) \\ & + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega)] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Güneş geliş açısının bilinmesi güneş enerjisi uygulamalarında güneşten daha iyi faydalanabilmemiz açısından önemlidir. Mevsimlerle birlikte değişen güneş açılarına göre panel eğim açısı optimum duruma getirilmelidir.

h) Zenit Açısı (θ_z)

Yatay yüzeye gelen güneş ışını ile yatayın normali arasındaki açıdır. Bu durum Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Bu açı güneş ışınlarının dik geldiği durumda sıfırdır. Güneşin doğuşu ve batışı esnasında bu açı 90° dir. Bu açı Denklem 3.8'de verilen eşitlik ile hesaplanır. Denklemde verilen α , "yükseklik açısı" olarak ifade edilir.

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (3.8)$$

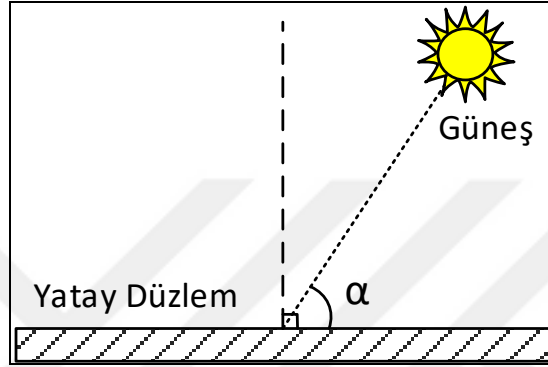


Şekil 3.6. Zenit açısı

i) Yükseklik Açısı(α)

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi güneş yükseklik açısı (α), doğrudan güneş ışını ile yatay düzlem arasındaki açıdır. Yükseklik açısı en yüksek değerini, bütün mevsimlerde güneş saatiyle saat 12’de alır. Bu açı Denklem 3.9’da ki eşitlik ile hesaplanır [47].

$$\alpha = \sin^{-1} (\cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\phi)) \quad (3.9)$$

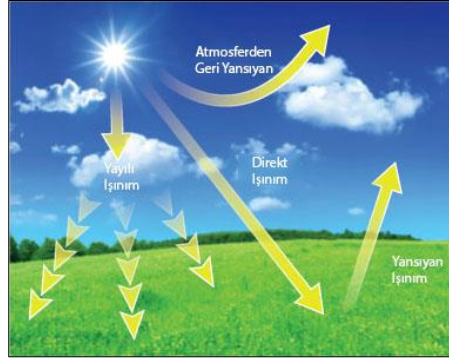


Şekil 3.7. Yükseklik açısı

3.2 Güneş Işınımı

Bu ışınların dağılımına bakıldığında; bunların %9’u mor ötesi bölgede, %45’i görünür ışık bölgesinde ve geri kalan %46’sı ise kızılötesi bölgede yer almaktadır [44]. Yapılan hesaplamalar sonucu atmosfer dışında, 1 m^2 alana dik olarak düşen saniyedeki ışınım miktarı 1367 W/m^2 ’dir. Yıl boyunca değişmediği varsayılan bu değer Güneş Sabiti (G_{sc}) olarak kabul edilir. Bu sabitin yeryüzündeki değeri atmosfere, iklimlere, coğrafyaya, hava kirliliğine bağlı olarak $5\text{-}1100\text{ W/m}^2$ arasında değişim göstermektedir [44].

Yeryüzüne gelen güneş ışınımını direkt güneş ışınımı (beam radiation) ve yayılı güneş ışınımı (diffuse radiation) olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Bu durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu kavramlar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.8. Yeryüzüne gelen güneş ışınımı

3.2.1 Direkt Güneş Işınımı

Atmosferden yeryüzüne hiçbir engelle karşılaşmadan gelen ışınımdır. Yeryüzüne ulaşan toplam ışınımın büyük bir kısmını oluşturur. Açık havada bu ışınım değeri yaklaşık olarak 1035 W/m^2 civarlarındadır. Direkt ışınım değerleri pirheliometre ile ölçülmektedir.

3.2.2 Yayılı veya Difüz Işınımı

Literatürde “sky radiation” olarak da geçen yayılı ışınım, atmosferde toz, bulut ve cisimlerden yansımaya uğrayarak farklı yönlerde dağılım gösteren güneş ışınıdır. Güneş dışında her yönden gelen bu ışınımın ölçümü gölgelendirilmiş payronometre ile yapılmaktadır. Sistemde kullanılan gölge topu sayesinde direkt ışınım engellenerek sadece yayılı ışınımın ölçülmesi sağlanmaktadır.

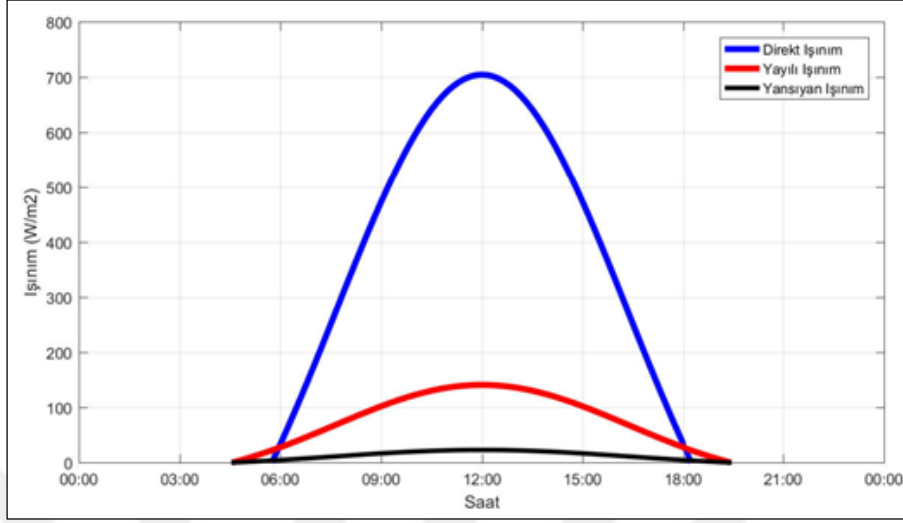
3.2.3 Yansıyan Işınım

Eğik yüzeylere gelen direkt ve yayılı ışınımın yeryüzü elemanlarından (toprak, çatılar, binalar vs.) yansımaya uğrayarak oluşan ışınımdır. Eğik yüzeye gelen toplam ışınım içerisinde direkt ve yayılı ışınımın karşılaştırıldığında oransal olarak en düşük miktara sahiptir.

3.2.4 Toplam Güneş Işınımı

Güneş ışınımının hava küre ile etkileşimleri sonucunda, yeryüzüne gelen toplam güneş ışınımı şiddeti bir takım enerji kayıpları yaşamaktadır. Bu enerji kayıpları güneş ışınlarının havada aldıkları yola bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak sabah saatlerinde eğik gelen güneş ışınları, öğle saatlerinde dik gelenlere kıyasla daha uzun yol alacakları için, bu ışınlardaki kayıplar daha fazla olacaktır. Yeryüzüne ulaşan toplam ışınım miktarı, yayılı ve

direkt ışınımlardan oluşmakta ve payronometre aracılığıyla tespit edilmektedir. Şekil 3.9’da 38° kuzey enleminde eğik bir yüzeye etkilen ışınım miktarları verilmiştir.



Şekil 3.9. Eğik bir yüzeye ekti eden ışınımlar

Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımından fotovoltaik sistemler aracılığıyla en iyi şekilde faydalanabilmek için bazı durumların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlar panelin yatayla yaptığı açı, panelin yönü ve sistemin kurulacağı noktanın coğrafi konumudur. Bu sistemler, bulunduğu yerin coğrafi konumuna göre yatayla belirli bir eğim yapacak şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Güneş geliş açısı mevsimlere ve zamana bağlı olarak değiştiğinden, bunun sonucunda güneşlenme miktarı da değişir. Bu durumda panel, güneşin hareketinden maksimum seviyede ışık alacak şekilde ayarlanıp, mevsimlere göre optimum bir eğim açısında yerleştirilmelidir. Örneğin Elazığ ili Temmuz ayı optimum panel açısı yaklaşık 17° civarındadır.

3.3 Atmosfer Dışında Yatay Düzleme Gelen Güneş Işınımı

Yeryüzünde birim yatay düzleme gelen güneş ışınımı ölçüm cihazlarıyla tespit edilebilirken atmosfer dışında birim yatay düzleme gelen güneş ışınımı, Denklem 3.10’da verilen matematiksel ifadeyle hesaplanır. “ G_{sc} ” güneş sabitini, “ n ” yılın kaçınıcı günü olduğunu ifade etmektedir [47].

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da verilen eşitlik ile günlük güneş ışınımı miktarı da hesaplanabilir. Bunun için denklem 3.10’da verilen eşitliğin gün doğumundan gün batımına kadar

integrasyonu ile atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımı (H_o) bulunabilir. Güneş sabiti G_{sc} 'nin birimi, metrekareye düşen güç (W/m^2) iken H_o 'ın birimi metrekareye düşen enerji (J/m^2)'dir. Birim çevrimiyle beraber H_o , Denklem 3.11'de verilen eşitlik ile hesaplanır. Denklemde geçen ω_s , enlem ve sapma açlarına bağlı güneş batış saat açısıdır. Bu açı Denklem 3.2'de verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] [\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \left(\frac{\pi\omega_s}{180}\right) (\sin(\phi) \sin(\delta))] \quad (3.11)$$

Atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımının yanında belli bir zaman aralığı içinde ışınım hesaplamaları yapılabilir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için belirlenen saatlerin saat açılarının (ω_1 ve ω_2) bilinmesi gerekir. Bunun için Denklem 3.12'deki eşitlik kullanılır. Denklemde yer alan GS güneş saatini ifade etmektedir. Belirlenen saatlerin saat açılarının hesaplanmasıyla Denklem 3.11'in bu saat açıları arasında integrasyonundan elde edilen bir saatlik periyot içerisindeki güneş ışınımını veren eşitlik Denklem 3.13'te verilmiştir. Denklemdeki ω_2 , büyük olan saat açısıdır.

$$\omega = 15(GS - 12) \quad (3.12)$$

$$I_o = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] [\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_2 - \omega_1) + \left(\frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180}\right) (\sin(\phi) \sin(\delta))] \quad (3.13)$$

3.4 Yeryüzüne Düşen Güneş Işınımının Hesabı

Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı hesaplamalarında ölçüm istasyonu ile elde edilen verilerin yanında bu verilerin ölçülemediği bölgelerde ampirik (deneye dayalı) ifadeler kullanılarak güneş ışınımı hesaplamaları yapılabilir. Ölçüm istasyonundan elde edilen güneş ışınımı verilerinden yola çıkarak bir dizi analiz ve hesaplamalar sonucu ortaya çıkan ampirik ifadelerle ışınım miktarları hesaplanabilir. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı miktarı, coğrafik, iklimsel ve dünya ile güneş arasındaki uzaklık gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Bu

bölümün alt başlıklarında yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı hesabında kullanılan bağıntılardan bahsedilecektir.

3.4.1 Yatay Düzleme Düşen Güneş Işınımı

Yatay düzleme düşen güneş ışınımı hesabı günlük ve anlık ışınım olarak ikiye ayrılır. Günlük ışınım hesabı, güneşin doğuş saatinden batış saatine kadar geçen süre içerisindeki güneş ışınımı miktarını ifade ederken anlık ışınım hesabı ise günün herhangi bir anında ölçülen ışınım miktarını ifade etmektedir.

a) Günlük Işınım Hesabı

Orijinal Angström tipi regresyonda belirli bir bölgenin yatay düzlemine gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımının havanın açık olduğu bir günde yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımına oranını veren izafi güneşlenme süresine bağlı eşitlik denklem 3.14'te verilmiştir [47].

$$\frac{\bar{H}}{H_c} = a' + b' \frac{\bar{n}}{N} \quad (3.14)$$

Burada,

\bar{H} = Yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarı

H_c = Uygulama bölgesinin konumuna ve aya bağlı olarak havanın açık olduğu bir günde ortalama güneş ışınımı miktarı

a' , b' = Ampirik sabitler

\bar{n} = Aylık ortalama günlük güneşlenme süresi

\bar{N} = Aylık ortalama gün uzunluğu

$\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$ = İzafi güneşlenme süresi olarak açıklanabilir.

\bar{H}_c değerinin tespiti zor olmasından dolayı bu değer yerine atmosfer dışında yatay yüzeye gelen güneş ışınımını kullanmak suretiyle Denklem 3.14 değiştirilerek Page tarafından 1964 yılında verilen ifade Denklem 3.15'te verilmiştir [49].

$$\frac{H}{H_o} = a + b \frac{n}{N} \quad (3.15)$$

Burada,

H_o = Aynı bölgede aylık ortalama atmosfer dışında yatay düzleme gelen güneş ışınımı

a, b = Bölgeye bağlı sabitler

$\frac{n}{N}$ = İzafi güneşlenme süresi olarak ifade edilebilir.

Denklem 3.15’de verilen a ve b katsayıları güneş ışınımı ve izafi güneşlenme süresi ölçümlerine bağlı olarak istatistiksel metotlar ile tespit edilmekte ve bu katsayıların alacağı değerler konuma bağlı olarak değişmektedir. Türkiye için bu değerler enlem açısı (ϕ), sapma açısı (δ) ve konumun deniz seviyesinden yüksekliğine (Z) bağlı olarak Denklem 3.16 ve Denklem 3.17’de verilmiştir [47].

$$a = 0.103 + 0.000017Z + 0.198\cos(\phi - \delta) \quad (3.16)$$

$$b = 0.533 - 0.165\cos(\phi - \delta) \quad (3.17)$$

Yeryüzünde yatay düzleme düşen günlük toplam güneş ışınımının direkt ve yayılı kısımlarının tespiti de ışınım hesaplamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Direkt ve yayılı ışınım değerleri genellikle berraklık indeksi (clearness index)’ne bağlı olarak hesaplanır. Günlük berraklık indeksi K_T , yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınımının (H) atmosfer dışına düşen günlük toplam güneş ışınımına (H_o) oranı şeklinde hesaplanır. Berraklık indeksi için kullanılan eşitlik Denklem 3.18’de verilmiştir [47].

$$K_T = H/H_o \quad (3.18)$$

Bu eşitlikte yatay yüzeye düşen günlük güneş ışınımı (H) payronometre vasıtasıyla ölçülebilir. Atmosfer dışına düşen günlük güneş ışınımı (H_o) ise Denklem 3.11 ’de verilen eşitlik ile hesaplanabilir.

Elde edilen günlük ışınım verileri, günlük yayılı ışınımın (H_d), günlük toplam ışınımına (H) oranının berraklık indeksine bağlı olduğunu göstermiştir [47]. Bu konuda Tübitak-

M.A.M. tarafından 1984-1992 yılları arasında Gebze’de yapılan ölçümlere bağlı olarak çıkarılan eşitlik Denklem 3.19’da verilmiştir.

$$\frac{H_d}{H} = 0.703 - 0.414K_T \quad (3.19)$$

b) Anlık Işınm Hesabı

Anlık ışınım hesabının yapılabilmesi için yatay yüzeye düşen günlük güneş ışınımına bağlı eşitlik Denklem 3.20’de verilmiştir. Bu eşitlikte yatay yüzeye düşen anlık toplam güneş ışınımının (I), yatay yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınımına (H) oranı r_t olarak tanımlanmıştır. Denklemde geçen ω hesaplamaların yapıldığı an için saat açısı, ω_s ise güneş batış saat açısıdır.

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) (\cos \omega - \cos \omega_s) / (\sin \omega_s - (\pi \omega_s / 180) \cos \omega_s) \quad (3.20)$$

Denklem 3.20’deki a ve b katsayılarının hesaplanabilmesi için kullanılan eşitlikler Denklem 3.21 ve Denklem 3.22’de verilmiştir.

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.21)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.22)$$

Saat açısı ω için, hesaplama yapılan saatlerin tam ortası alınabilir. Yani saat 7 ile 8 arasındaki zaman aralığı için hesaplama yapılıyorsa hesaplanacak saat açısı için kullanılacak saat 7:30 olarak alınır.

Yatay düzleme düşen günlük toplam güneş ışınımının yayılı ve direkt kısımlarının tespitinde berraklık indeksi kullanıldığı gibi yatay düzleme düşen anlık toplam güneş ışınımının hesabında da berraklık indeksi kullanılmaktadır. Yatay düzleme düşen anlık yayılı ışınımın (I_d) anlık toplam ışınımına (I) oranını veren Orgill ve Hollands tarafından anlık berraklık indeksine bağlı korelasyon Denklem 3.23’deki eşitlikte verilmiştir [50].

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.249k_t, & k_t < 0.35 \\ 1.557 - 1.84k_t, & 0.35 < k_t < 0.75 \\ 0.177, & k_t > 0.75 \end{cases} \quad (3.23)$$

Denklem 3.23’de anlık berraklık indeksi (k_t), yatay düzleme düşen anlık toplam ışınımın (I), atmosfer dışında yatay düzleme düşen anlık toplam ışınımına (I_o) oranı şeklinde Denklem 3.24’de verilen eşitlik ile tanımlanmaktadır.

$$k_T = I/I_o \quad (3.24)$$

Anlık ışınım hesabında kullanılan bir diğer metot ise; uzun yıllar yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda yatay düzleme gelen anlık yayılı ışınımın (I_d) günlük yayılı ışınımına oranı ile atmosfer dışına düşen anlık ışınımın (H_d) atmosfer dışına düşen günlük ışınımına (H_o) oranının eşit olduğu tespitinden Denklem 3.25 ile yapılan hesaplamalardır.

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{I_o}{H_o} \quad (3.25)$$

Denklem 3.25 sadeleştirilerek r_d Denklem 3.26’deki eşitlik ile tanımlanabilir.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \left(\frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \left(\frac{\pi\omega_s}{180}\right) \cos\omega_s} \right) \quad (3.26)$$

3.4.2 Eğik Düzleme Düşen Güneş Işınımı

Yatay düzleme gelen güneş ışınımı kolaylıkla ölçülebilmemesine rağmen, eğik yüzeye gelen güneş ışınımı, yatay düzleme gelen ölçüm veya hesaplama değerleri kullanılarak farklı güneş ışınım modelleri yardımı ile hesaplanmaktadır. Eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışınımı direkt, yayılı ve yansıyan ışınımın toplanmasıyla elde edilir.

a) Eğik Düzleme Düşen Günlük Işınım Hesabı

Fotovoltaik sistem uygulamalarında eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarlarının hesaplanabilmesi için eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınımın (H_T), yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınımına (H) oranını veren \bar{R} değerine ihtiyaç vardır. Direkt (H_b), yayılı (H_d) ve yansıyan ışınım bileşenlerinin her birini içeren bu değer Denklem 3.27’deki eşitlikte verilmiştir. Denklemde geçen ρ , yerin yansıtma oranıdır. Yerde kar olması durumunda 0.7, yerde kar bulunmaması durumunda 0.2 olarak önerilmektedir.

$$\bar{R} = \frac{H_T}{H} = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) \bar{R}_b + \frac{H_d}{H} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (3.27)$$

Eğik yüzeye düşen günlük toplam ışınlım, Denklem 3.28'deki eşitlik ile hesaplanır [47].

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) \bar{R}_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + H\rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (3.28)$$

Burada \bar{R}_b eğik yüzeye düşen günlük direkt ışınlımın yatay yüzeye düşen günlük direkt ışınlıma (H_b) oranı olarak ifade edilir. Denklem 3.29'da bu eşitlik verilmiştir.

$$\bar{R}_b = H_{bT}/H_b \quad (3.29)$$

b) Eğik Düzleme Düşen Anlık Işınlım Hesabı

Eğik yüzeye gelen anlık ışınlım miktarı hesaplarının yapılabilmesi için yatay düzleme düşen güneş ışınlımını hesaplarının yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalar ile elde edilen günlük veya anlık toplam ışınlım verilerinin yanında yatay yüzeye düşen toplam ışınlımın yayılı ve direkt kısımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Eğik yüzey anlık ışınlım hesaplamalarında R_b değerine ihtiyacımız vardır. Geometrik faktör olarak adlandırılan R_b değeri, eğik yüzeye düşen anlık direkt ışınlımın (I_{bT}), yatay yüzeye düşen anlık direkt ışınlıma (I_b) oranıdır. R_b değeri denklem 3.30'da verilmiştir [47].

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.30)$$

Eğik yüzey direkt ışınlım hesaplamalarında R_b değerine bağlı Lui ve Jordan tarafından geliştirilen modelde eğik yüzeye gelen direkt ışınlımını (I_{bT}), geometrik faktör (R_b) ve yatay yüzeye düşen anlık direkt ışınlım (I_b) vasıtasıyla elde eden eşitlik Denklem 3.31'de verilmiştir. Eğik yüzey anlık yayılı ışınlım (I_{dT}) değeri ise yatay yüzeye gelen anlık yayılı ışınlım (I_d) aracılığıyla Denklem 3.32'deki eşitlik ile elde edilir. Eğik yüzeye düşen anlık toplam güneş ışınlımını (I_T) eşitliği ise Denklem 3.33'de verilmiştir [47].

$$I_{bT} = R_b I_b \quad (3.31)$$

$$I_{dT} = I_d \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (3.32)$$

$$I_T = I_{dT} + I_{bT} + I_{ref} \quad (3.33)$$



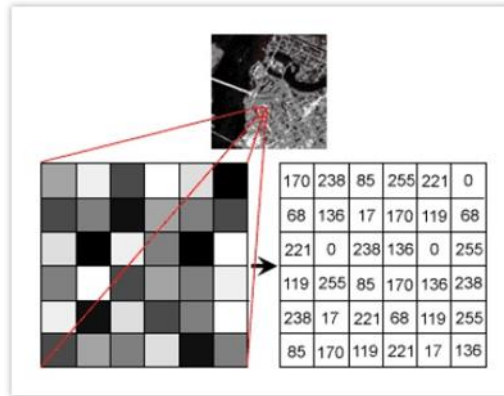
4. COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİ

Coğrafi bilgi sistemleri, mekansal ve mekansal olmayan verilerin belli standartlarda üretilmesi, ilişkisel veri tabanı yönetim sistemleri içerisinde depolanması ve depolanan verilerin amaç doğrultusunda yönetilmesi süreçlerini içeren, bilgiye dayalı karar destek sistemleridir. Bu sistemler, coğrafyayı formal konseptler, teoriler ve metodlarla şekillendirerek kontrol altına almamızı, önceden kestirim yapabilmeyi, modelleyebilmeyi ve yönetebilmeyi sağlar [50].

Bu tez çalışmasında coğrafi bilgi sistemleri yükseklik haritalarının kullanılması sebebiyle yer almaktadır. Bu yükseklik haritaları, uydulardan alınan bilgilerin raster formatında depolanmasıyla oluşturulmuştur.

4.1 Raster Haritalar

Raster veriler hücelere bağlı olarak (pikseller) temsil edilen mekânsal verilerdir; eşit ölçüdeki satır ve sütunlara sahip hücelerden oluşurlar, her bir hücre bir renk değeri depolar. Hava fotoğrafları, uydu görüntüleri, farklı özellik ve formatlarda taranmış kâğıt haritalar raster formatındadır. Raster verilerin hücre büyüklüğü ile çözünürlüğü arasında ters orantı vardır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bir raster verinin hücre büyüklüğü ne kadar küçük ise o raster verinin çözünürlüğü o kadar yüksektir. Yani üzerinden okunabilecek detay bilgisi o kadar fazladır.



Şekil 4.1. Raster haritalarda veri depolanması [50]

Raster veriler temelde vektör veri üretimi için altlık olarak kullanılırlar. Raster verilerin projelerde altlık olarak kullanılabilmesi için coğrafi referanslanmaları, yani koordinat düzlemi üzerinde bulunmaları gereken gerçek lokasyona taşınmış olmaları gereklidir.

Yönetilebilir raster veriler de raster veriler gibi hücrelere bağlı olarak temsil edilirler. Ancak raster verilerden farklı olarak yönetilebilir raster veriler hücrelerinde yalnızca bulunduğu renk değerini değil, yükseklik(z) değeri, arazi kullanım sınıf değeri, uzaklık değeri vb. gibi veri yönetimi sürecinde girdi sağlayan bilgileri de tutarlar.

Yönetilebilir raster veriler kendi raster özelliklerinde bilgi tutabilen yapıda olabileceği gibi, vektör verilerden de üretilmiş olabilirler.

Yönetilebilir rasterlar, normalize edilerek fonksiyonel ağırlıklarla birleştirilebilir, bu sayede çok çeşitli yöntemlerle coğrafi bilgi sistemleri analizleri gerçekleştirilebilmesine imkân tanırılır.

4.2 PostgreSQL Veritabanı

PostgreSQL, SQL standartlarına uygun, açık kaynak kodlu ve ücretsiz, ilişkisel bir veritabanı yönetim sistemidir. Hemen hemen bütün Unix türevi işletim sistemlerinde ve NT çekirdekli Windows sistemlerde çalışır.

PostgreSQL iyi performans veren, güvenlik ve özellik bakımından gelişmiş düzeydedir. PostgreSQL Postgres VTYS nin geliştirilmesiyle oluşturulmuştur. Zengin veri tiplerini destekler (Array,JSON,integer,boolean, vb.). Bulunan diğer eklentileriyle birlikte daha fazla veri tipini destekler. Bu tez çalışmasında kullanılan dijital yükseklik haritalarının depolanması ve sorgulanabilmesi yine bu veri tabanı yönetim sistemine eklenen PostGIS eklentisi ile sağlanmaktadır.

4.3 Raster Haritaların İşlenmesi ve Veri Tabanında Depolanması

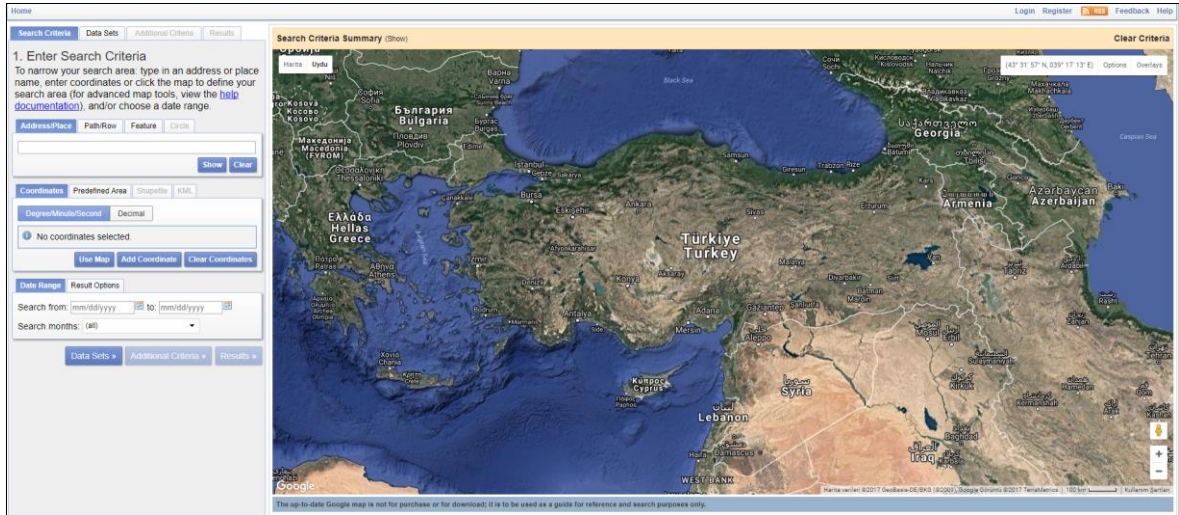
Bu tez çalışması kapsamında geliştirilecek uygulamalar için harita üzerinden seçilecek herhangi bir noktanın yükseklik bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yükseklik bilgisi için DEM (Digital Elevation Model) haritaları kullanılmıştır. DEM haritaları; LiDAR, Yersel, Fotogrametrik vb. alım yöntemleri ile yer yüzeyinin belirli noktalarından alınan yükseklik değerleri kullanılarak geri kalan yüzeyin bu değerler ile enterpole edilerek yüzey topoğrafyasının tanımlanması ve raster formatında depolanması ile oluşturulmaktadır. Raster formatında oluşturulan DEM verisi, çeşitli yazılımlar yardımıyla üç boyutlu olarak görselleştirilebilir ve bir bölgenin Sayısal Arazi Modeli oluşturulabilir.

DEM verileri ağırlıklı olarak “.img, .tiff” formatları başta olmak üzere pek çok şekilde oluşturulabilmektedir. Ayrıca raster veri formatında mekansal veri tabanları içerisinde de depolanabilmekte ve mevcutta bulunan CBS verilerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir.

Başlıca kullanım alanları;

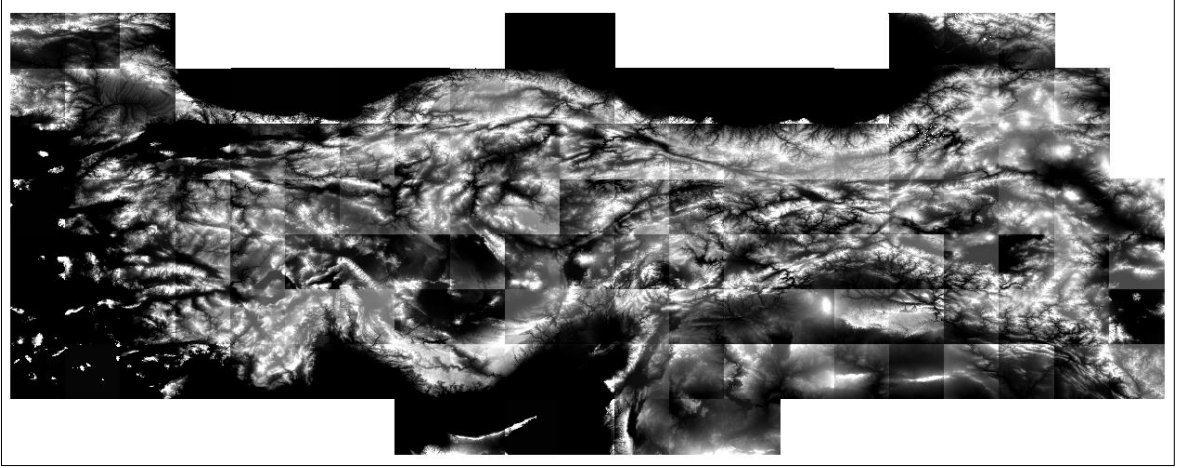
- Sayısal Arazi Modeli Oluşturulması
- Yüzey Analizleri
- Eğim / Bakı Hesapları
- Görünürlük Analizleri
- Sel / Taşkın Analizleri
- Hacim Hesaplamaları
- İki nokta arasındaki yüzey profilinin çıkarılması

Geliştirilen uygulamalarda kullanılan DEM haritalar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) radar uydularından elde edilen verilerle oluşturulmaktadır. Bu haritalar <https://earthexplorer.usgs.gov/> web sayfasındaki arayüz aracılığıyla indirilebilir. Bu uygulamanın ekran görüntüsü Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



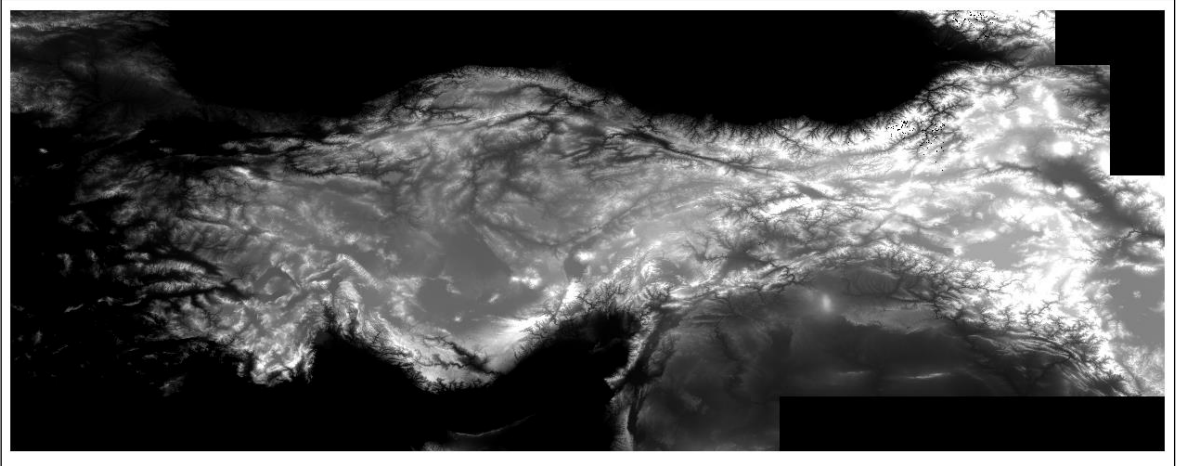
Şekil 4.2. Earth Explorer arayüzü

Bu uygulama aracılığıyla indirilen *.tiff formatındaki dosyalar QGIS programı aracılığıyla görselleştirildiğinde sonuç Şekil 4.3’te gösterildiği gibi olmaktadır. Şekil 4.3’te görülen kırılmaların sebebi verilerin yüksek boyutu sebebiyle parçalar (tile) haline getirilerek depolanmasından kaynaklanmaktadır.



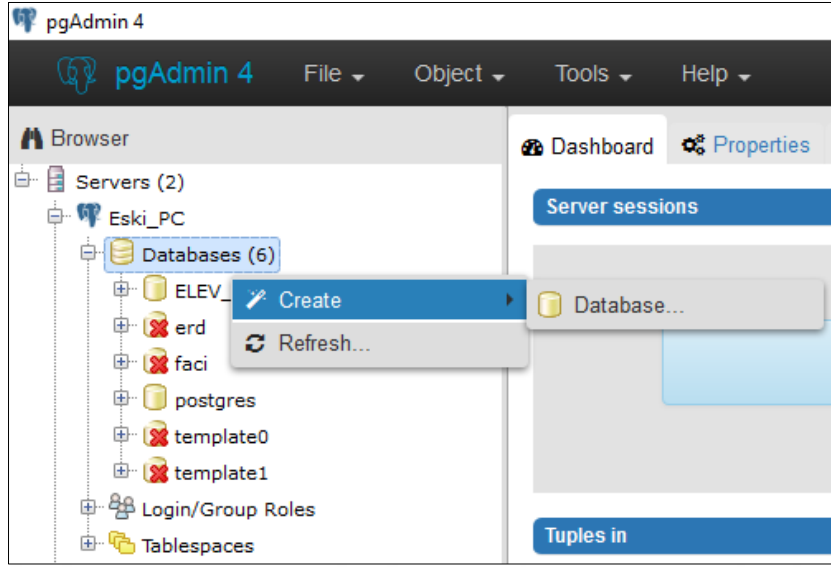
Şekil 4.3. Birleştirilmemiş DEM haritaları

Şekil 4.3'te görülen kırılmaları engellemek için parçalar QGIS programı içerisinde raster haritalar için özel olarak bulunan bir birleştirme komutuyla birleştirilerek oluşturulan yeni dosya Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Birleştirilme işlemi sonucunda oluşturulan DEM harita

Bir sonraki aşama, hazırlanan son raster haritanın üzerindeki değerlerin sorgulanmasıdır. Bu işlemin yapılabilmesi için bir ilişkisel veri tabanına bu verinin aktarılması gerekmektedir. Bu işlem için sunucu olarak seçilen Windows işletim sistemi yüklü bir bilgisayara öncelikle PostgreSQL Server ile birlikte PostGIS eklentisi kurulmalıdır. Kurulan bu eklenti sayesinde standart bir veri tabanına coğrafi bilgi sistemleri için gerekli haritalar depolanabilecek ve sorgulanabilecektir. Sunucu ve eklenti kurulduktan sonra pgAdmin 4 uygulaması açıldığında gelen ekranda Şekil 4.5'de gösterildiği gibi sistemde kurulu mevcut sunucular ve veri tabanları listelenecektir.



Şekil 4.5. Yeni veri tabanı oluşturma işlemi

Oluşturulan veri tabanına CBS özelliği kazandırmak için *postgis*, *postgis_topology*, *fuzzystrmatch*, *postgis_tiger_geocoder* uzantıları eklenmelidir. Aksi halde raster veriler yüklenmeye çalışıldığında sunucu ve veri tabanı bu isteği anlayamayacak hata mesajı döndürecektir.

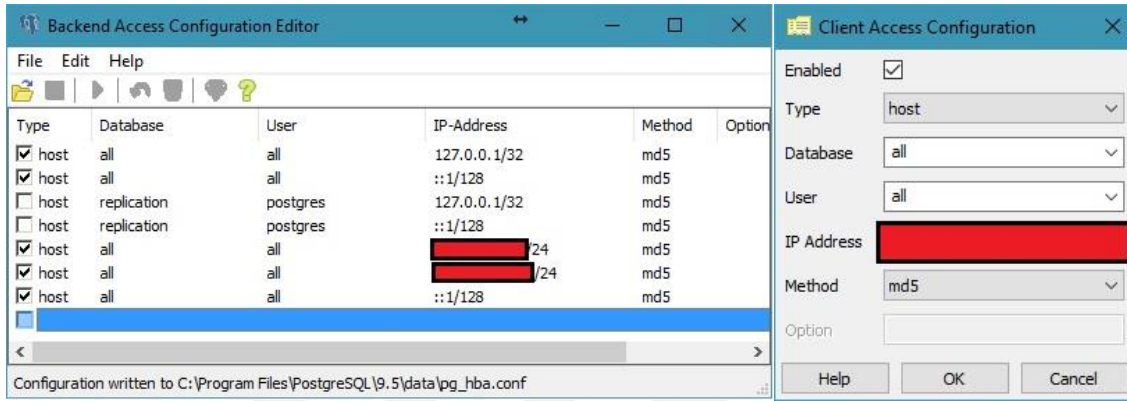
Raster haritanın veri tabanına aktarılması işlemi komut sistemine aşağıdaki komutun girilmesi ile gerçekleştirilir.

```
>raster2pgsql -I -C -F -s 4326 -t 50x50 <aktarılabacak dosyaların konumu>
public.<oluşturulacak tablo adı>| psql -U postgres -d ELEV_DATA -h localhost -p 5432
```

“-I”, alınan verilerin indekslenmesini sağlar (İndekslenmiş verilerden sorgular daha hızlı yapılabildiğinden önemlidir). “-C”, raster kataloglarına dosyadaki bilgilerin işlenmesini sağlar (srid, piksel boyutu vs.). “-F”, oluşturulacak tabloya dosyanın adını taşıyan bir sütun ekler. “-s”, SRID (spatial reference identifier), işlemin hangi spatial referans sistemine göre uygulanacağını belirten integer tipinde bir değerdir ve geometry veri tipinde 0, geography veri tipinde ise 4326’dır. “-t”, sorgu performansını doğrudan etkileyen bir parametredir. Depolanacak verinin belirtilen ebatlarda kesilerek depolanmasını sağlar. Bu boyut ne çok büyük ne de çok küçük seçilmelidir. “-U”, kullanıcı adı parametresidir. “-d”, verilerin aktarılacağı veri tabanının adıdır. “-h ve -p”, sırasıyla sunucu adresi ve port numarasıdır.

Yukarıdaki komutun çalıştırılmasıyla veriler artık belirtilen veri tabanına kaydedilmiş olacaktır. Bu aşamada bu sunucu sadece yüklü olduğu bilgisayar üzerinden gelen sorgulara cevap verebilecek durumdadır. Geliştirilecek olan uygulamaların bu veri tabanına uzaktan

erişimi için gerekli ayarlamalar yapılmalıdır. Sunucunu çalıştığı bilgisayarın bağlı olduğu bilgisayara ve modeme statik ip verildikten ve gerekli port yönlendirme işlemleri yapıldıktan sonra *pg_hba.conf* dosyası düzenlenmelidir. Şekil 4.6’da bu dosyanın düzenlendiği ekranlar gösterilmiştir. Bu dosya sunucuya gelen bağlantıların ayarlarını içermektedir. Bu ayarlar ile bir ip aralığından yahut tüm ip adreslerinden gelen bağlantılara izin verilebilir. Bu ayarlar haricinde, sunucunun bağlı olduğu modem ve kurulu olduğu bilgisayardaki güvenlik duvarı ayarlarının yapılmış ve gerekli izinlerin verilmiş olması gerekmektedir.



Şekil 4.6. Sunucuya uzaktan erişim için izin verilmesi

Bu bölümde verilen bilgiler ışığında Türkiye’ye ait yükseklik haritasını içeren bir veri tabanı oluşturulmuştur.

5. GELİŞTİRİLEN UYGULAMALAR

Bu tez çalışmasının temelini oluşturan hesaplama ve analizler için önceki bölümlerde verilen bilgiler ve formüller ışığında Matlab ortamında uygulamalar geliştirilmiştir. Bu uygulamalar ile;

- Koordinatları bilinen her hangi bir noktanın herhangi bir anda aldığı anlık ışıyım miktarı tahmin edilebilir.
- Tahmin edilen ışıyım miktarı üzerinden güneş enerjisi sisteminin üreteceği güç hesaplanabilir.
- Arazi uygulamalarında panel sıra genişliği (row pitch) analizi yapılarak panel gölgelenmesi minimize edilebilir.
- Arazi ve çatı uygulamalarında çevredeki yeryüzü şekillerinden kaynaklı yükseltilerin gölgeleme durumu incelenerek hatalı arazi seçimi yapılmasının önüne geçilebilir.
- Çatı üzerine kurulması planlanan sistemlerde, çatının bakı durumundan ve eğiminden kaynaklı kayıplar analiz edilebilir.

İlk uygulama, anlık güç hesaplama uygulamasıdır. Bu uygulama kendi içerisinde iki farklı menüden oluşmaktadır. İlk menüde analiz yapılacak konum için daha önce payronometre ile ölçülmüş yatay düzlem ışıyım verileri kullanılarak eğik düzlem ışıyımı tahmini yapılmıştır. İkinci menüde ise girilen konum, tarih ve saat verileri üzerinden anlık olarak yatay ve eğik düzleme gelen ışıyım miktarları hesaplanmıştır.

İkinci uygulama enerji hesaplama uygulamasıdır. Bu uygulama bir önceki uygulamada olduğu gibi iki farklı menüden oluşmaktadır. İlk menüde seçilen konum, tarih, zaman aralığı, sistem kurulu gücü ve panel açıları gibi parametreler kullanılarak üretilen enerji hesaplanmaktadır. İkinci menüde, belirli bir güne ait önceden payronometre ile ölçülmüş yatay düzlem ışıyım verileri kullanılarak, eğik düzlemde üretilebilecek enerji miktarı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Üçüncü uygulama ise iki farklı tip gölgelenme analizi için kullanılmaktadır. Bunlardan gölgelenme tiplerinden ilki, yeryüzü şekillerinden (doğal yükseltilerden) kaynaklı gölgelenmedir. İkincisi ise arazi uygulamalarında panel sıra aralıklarının doğru ayarlanamamasından kaynaklı gölgelenmelerdir.

5.1 Anlık Güç Hesaplama Uygulaması

Güç hesabı uygulaması iki ayrı menüden oluşmaktadır. İlk menü, o konumda önceden ölçülmüş yatay ışınlam verilerini temel almaktadır.

Büyük ölçekli güneş enerji santralleri kurulmadan önce, genellikle kurulması planlanan bölgeye geçici bir ölçüm istasyonu kurularak, o bölgeye ait meteorolojik veriler toplanır. Şekil 5.1’de gösterilen Menü-1, bu meteorolojik verilerden, yatay düzlem ışınlamını kullanarak, eğik düzleme düşen ışınlam miktarını ve buna bağlı olarak üretilen gücü hesaplamaktadır.

Güç Hesaplamaları

Menu 1

Lokasyon: ELAZIĞ Haritadan Seç

Tarih: 21 Aralık

Saat: 12 00

Kurulu Güç: 100 kWp

Panel Eğimi: 62 ° Güç Kaybı %: 5

Azimuth: 0 °

Anlık Işınlam: 244.795 W/m2

Güneş Saati= 11 : 39

Hesapla

Yatay Düzlem Toplam: 244.79 W/m²
Yatay Düzlem Yayılı: 43.33 W/m²
Yatay Düzlem Direkt: 201.47 W/m²
Eğik Düzlem Toplam: 477.05 W/m²
Eğik Düzlem Yayılı: 31.84 W/m²
Eğik Düzlem Direkt: 432.23 W/m²
Eğik Düzlem Yansıyan: 12.99 W/m²

Yatay Anlık Sistem Gücü: 23.26 kW
62 ° Anlık Sistem Gücü: 45.32 kW

Enlem: 38.681
Boylam: 39.233
Rakım: 1015

>>>
<<<

Şekil 5.1. Anlık sistem gücünün hesaplanması

Tablo 5.1’de, Elazığ (Enlem:38.681°, Boylam:39.223°, Rakım:1015m) ilinde 100 kWp kurulu gücünde güney bakılı bir sistemin, farklı gün, saat, panel eğimi ve bilinen yatay ışınlam değerlerine karşılık gelen anlık güç değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca tabloya o güne ait optimum panel açısı ve bu açığa karşılık gelen güç eklenerek analizin daha doğru yapılması amaçlanmıştır.

Tablo 5.1. Elazığ ilinde farklı gün ve saatlere ait hesaplanan ışınlım ve güç değerleri

Tarih	Saat	Işınım (W/m ²)	Optimum Panel Açısı	Optimum Açıda Güç(kW)	Panel Açısı	Eğik Sistem Gücü (kW)	Yatay Sistem Gücü (kW)
21 Haziran	12:10	700	15	68,51	23°	68,02	66,50
21 Haziran	12:10	700	15	68,51	60°	52,39	66,50
8 Ocak	10:25	177	61	34,94	23°	26,95	16,82
8 Ocak	10:25	177	61	34,94	50°	33,95	16,82

Elazığ ili için optimum panel açısı yıl içerisinde 15° ile 62° arasında değişmektedir. Bu durumun temel sebebi, kuzey yarım kürede güneş geliş açısının yaz aylarında yüksek, kış aylarında düşük olmasıdır. Tablo 5.1 incelendiğinde, panel açısı sabit olan sistemlerde, yıl içerisinde optimum panel açısından uzaklaşıldığından üretilecek olan güçte kayıplar oluşacaktır. Sabit panel açısı ideal durumdan ne kadar uzaklaşırsa kayıp o kadar fazla olacaktır. Örneğin, 8 Ocak tarihinde 23° ile yerleştirilen paneldeki kayıp yaklaşık %30 olurken, 50° ile yerleştirilen panelde yaklaşık %3 olmaktadır.

Anlık güç hesaplama uygulamasındaki ikinci menüde ise, bölüm 2 ve 3'te verilen formül ve denklemler kullanılarak, harita üzerinden seçilen herhangi bir noktaya kurulacak olan sistemin üreteceği anlık güç tahmin edilmektedir. Burada asıl amaç, özellikle bina ya da fabrika çatılarının farklı bakı ve eğime sahip olmasından kaynaklı güç değişimlerini incelemektir. Örnek hesaplama ile birlikte bu menü, Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Menu 2

Enlem: 38.681
Boylam: 39.233
Rakım: 1015

Tarih: 26 Aralık
Saat: 11:10
Kuru Güç: 100 kWp
Panel Eğimi: 23° * İzaflı Güneşlenme: 1
Azimuth: -50° * Güç Kaybı %: 5

Hesapla

Güneş Saati= 10 : 46
Hesaplanan Anlık Işınım: 338.198 W/m²

Yatay Düzlem Toplam: 223.069 W/m²
Yatay Düzlem Yayıl: 39.483 W/m²
Yatay Düzlem Direkt: 183.586 W/m²
Eğik Düzlem Toplam: 338.198 W/m²
Eğik Düzlem Yayıl: 37.914 W/m²
Eğik Düzlem Direkt: 296.737 W/m²
Eğik Düzlem Yansıyan: 3.547 W/m²

Yatay Anlık Sistem Gücü: 21.19 kW
23° Anlık Sistem Gücü: 32.13 kW

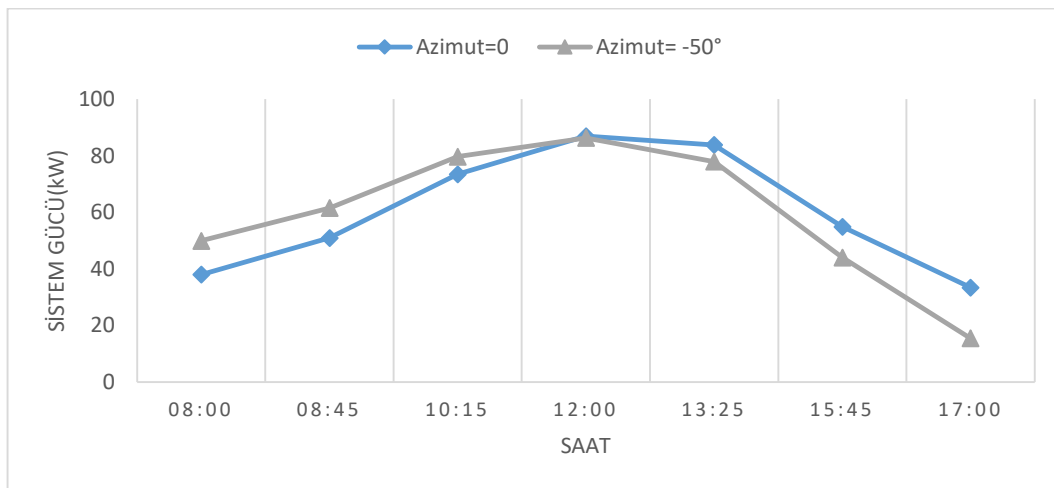
Şekil 5.2. Anlık ışınlım ve anlık sistem gücün hesaplanması

Tablo 5.2’de, Elazığ ilinde, 8 Haziran tarihinde, sabit eğimli (17°), güney ve güneydoğu bakılı iki farklı senaryo için 100kWp kurulu gücünde bir sistemin belirli saatlerde ürettiği güç değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Örnek çatı üzeri sistem için hesaplanan ışıınım ve güç değerleri

Tarih: 8 Haziran			Güney Bakı (Azimut=0)		Güney Doğu Bakı (Azimut=-50°)	
Saat	Yatay Işıınım (W/m2)	Sistem Gücü-Y (kW)	Eğik Işıınım (W/m2)	Sistem Gücü-E (kW)	Eğik Işıınım (W/m2)	Sistem Gücü-E (kW)
08:00	425	40,37	400	37,96	526	49,92
08:45	546	51,89	536	50,90	647	61,47
10:15	757	71,88	773	73,43	838	79,60
12:00	882	83,78	914	86,86	908	86,25
13:25	853	81,03	882	83,75	820	77,89
15:45	583	55,39	578	54,85	463	43,99
17:00	315	29,92	351	33,37	163	15,49

Tablo 5.2’de hesaplanan veriler Şekil 5.3’te görselleştirildiğinde bakı durumunun ışıınım ve beraberinde anlık güce olan etkisi daha net görülmektedir. Çatı eğimi ve yönü dikkate alındığında sabah saatlerinde sağlanan güç artışı öğleden sonra yerini güç kaybına bırakmıştır. Gün sonunda güney-doğu(50°) bakılı sistemin güney bakılı sisteme göre %2 daha az enerji ürettiği görülebilir.



Şekil 5.3. Çatı bakışının üretilen güç üzerindeki etkisi

5.2 Enerji Hesaplama Uygulaması

Anlık ışınım ve buna bağlı güç hesaplamalarını kullanarak geliştirilen bu uygulama ile girilen konum, tarih, panel eğimi ve bakı durumu bilgileriyle birlikte seçilen zaman aralığında üretilecek enerji tahmini amaçlanmıştır. Şekil 5.4'te günlük ve saatlik enerji üretiminin hesaplandığı menü gösterilmiştir.

Menu 1

Lokasyon: ELAZIĞ Haritadan Seç

Kurulmuş Güç: 100 kWp

Panel Eğimi: 23°

Azimuth: 60°

Tarih: 10 Aralık

Güç Kaybı %: 5

Enlem: 38.681

Boylam: 39.233

Rakım: 1015

Hesaplanacak Zaman Aralığı

Başlangıç: 05:05 Bitiş: 20:00

Hesapla

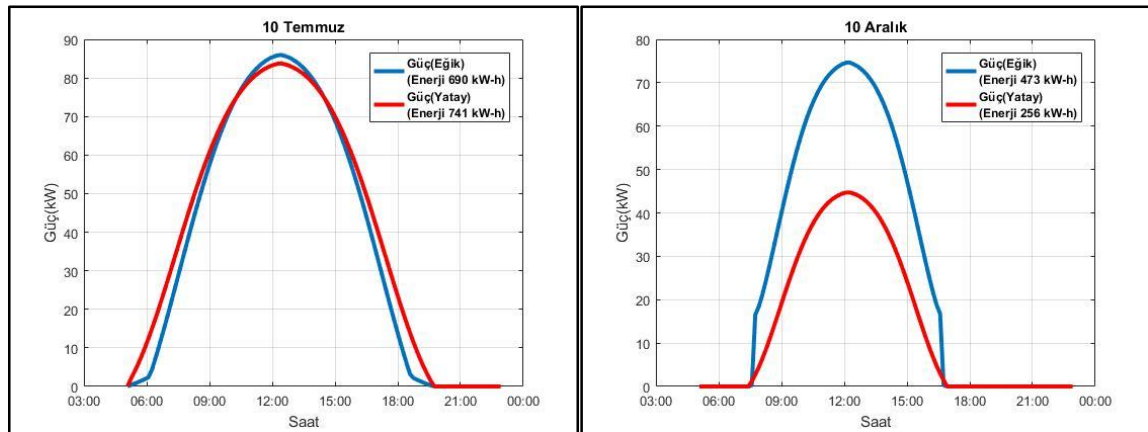
Üretilen Enerji (Yatay): 255.905 kW-h

Üretilen Enerji (Eğik): 338.033 kW-h

Gölgeleme Dosyası Yükle

Şekil 5.4. Enerji hesaplama ekranı

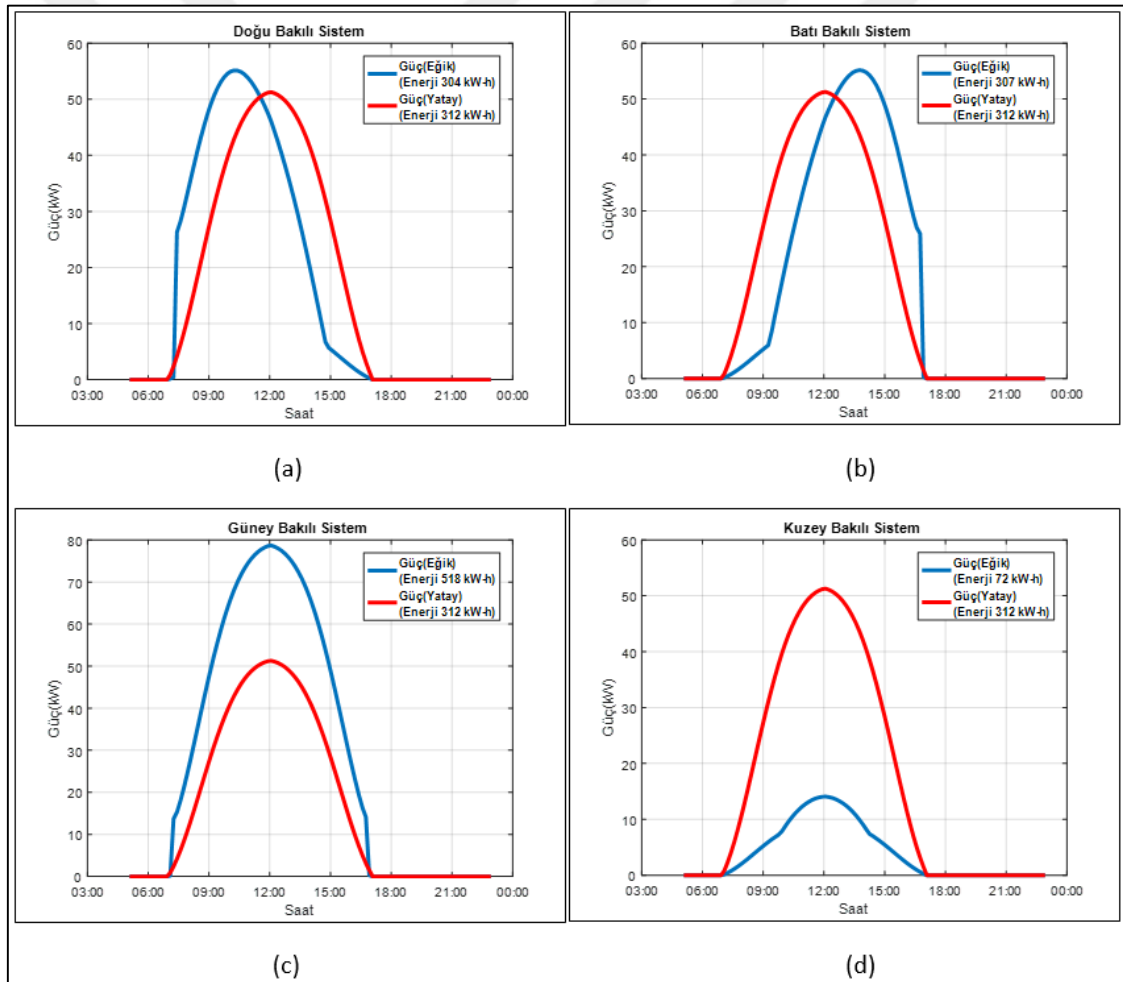
Şekil 5.4'te verilen uygulama ile 10 Temmuz ve 10 Aralık tarihlerinde ve aynı konum(Elazığ), panel açısı(30°) ve bakı durumunda(Güney) 100 kWp gücündeki bir santralin güç grafikleri ve bununla bağlantılı olarak ürettikleri enerji miktarları Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5. Örnek sistemlere ait Güç-Zaman grafikleri

Bu modülde yapılan hesaplamalar ile bakı durumu ve panel açısının üretilen gücü nasıl doğrudan etkilediği görülebilir. Şekil 5.5 incelendiğinde 30° açıyla yerleştirilmiş panellere sahip bir sistemin iki farklı tarihte ürettikleri güç ve buna bağlı olarak enerjide ciddi değişimler olduğu görülmektedir. Bu değişimin temel nedeni seçilen tarihlerdeki optimum panel açıları (10 Temmuz için 17° ve 10 Aralık için 62°) ile sabit panel açısı arasındaki farkın artmasıdır.

Aynı modül kullanılarak yapılan bir başka analizde, panel yönünün, üretilen enerji üzerindeki etkileri incelenmiştir. 11 Kasım tarihinde panelleri 30° açıyla, sırasıyla doğu, batı, güney, kuzey yönlerinde yerleştirilen, her biri 100 kWp'lik dört sistemin güç-zaman grafikleri ve ürettikleri enerji miktarları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. (a) Doğu (Azimut= -90°), (b) Batı (Azimut= 90°), (c) Güney (Azimut= 0°), (d) Kuzey (Azimut= 180°)

Şekil 5.6 incelendiğinde, özellikle çatı üzeri sistemlerde bakı durumunun üretilen enerji üzerindeki etkisi daha net şekilde görülmektedir. Güney bakılı durumda üretilen toplam günlük enerji 518 kW-h olarak hesaplanırken, doğu bakılı sistemde 304 kW-h olup

fark yaklaşık %41 olmaktadır. Ancak yaz aylarında güneş geliş açısının artmasıyla bu iki durum arasındaki fark yaklaşık %2 civarına düşmektedir.

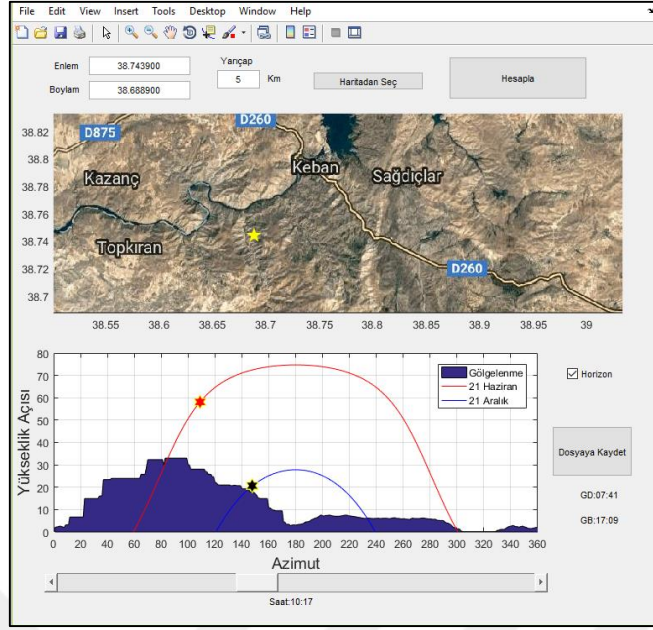
5.3 Gölgeleme Analizi Uygulaması

Geliştirilen bu uygulama, güneş enerjisi santrallerinde oluşan iki farklı gölgeleme durumu için analiz imkânı sağlamaktadır. Bu gölgeleme durumlarından ilki, santralin kurulacağı bölgedeki yeryüzü şekillerinden kaynaklanan durumdur. İkincisi ise panel sıraları arasındaki gölgeleme durumudur.

Projelendirme aşamasında, yukarıda bahsedilen durumların gözden kaçırılması, kurulacak güneş enerji santralinde sabit miktarda ve sürekli bir enerji kaybına sebep olacaktır.

a) Yeryüzü Şekillerinden Kaynaklanan Gölgeleme Analizi

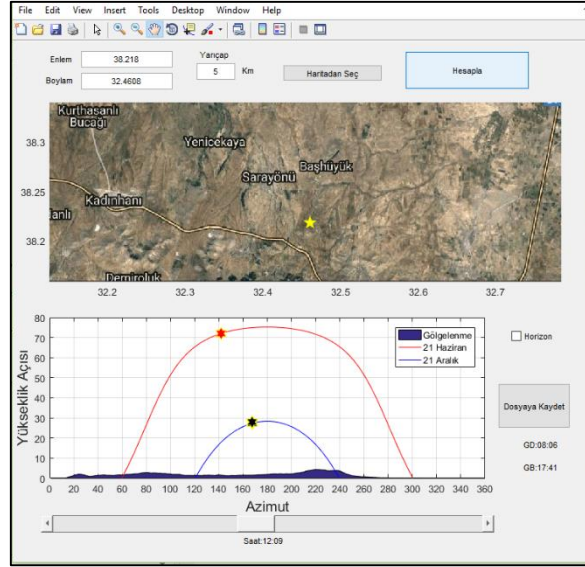
Bu gölgeleme şekli, güneşin doğduğu noktadan, battığı noktaya kadar, ufukta izlediği yol üzerinde bulunan yükseltilerin güneş ışınlarını engellemesiyle oluşur. Özellikle güneş yükseklik açısının düşük olduğu kış aylarında daha da önemli hale gelir. Bu gölgeleme, detayları Bölüm 3'te verilen ışınım türleri içerisinde, en fazla enerji barındıran direkt ışınımı kestiğinden enerji üretimini ciddi şekilde azaltır. Bu sebepten güneş enerji santrali için arazi seçimi yapılırken analizin doğru yapılması gerekir. Geliştirilen uygulamanın temelini, Bölüm 4'te bahsedilen yükseklik haritaları oluşturmaktadır. Bu haritalar temel alınarak Türkiye üzerinde seçilen herhangi bir nokta için gölgeleme analizi yapılabilir. Şekil 5.7'de Elazığ ili, Keban ilçesinde (Enlem: 38.7439, Boylam: 38.6889) seçilen bir konum için gölgeleme analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.7. Gölgeleme analizi uygulaması sonuçları

Analiz uygulamasından çıkan sonuca bakılarak seçilen noktanın etrafının oldukça engebeli olduğu ve arazinin doğu tarafında kalan bölgede yüksek tepelerin bulunduğu sonucuna varılır. Bu durumda, 21 Haziran için, güneş doğuş ve batış saatleri göz önüne alındığında, güneş saat 05:30'da doğmasına rağmen, incelenen alan saat 08:39'a kadar gölgede kalmaktadır. Bu durum üretilen enerjide kayıplara sebep olacaktır. Örneğin, 21 Haziran tarihinde, bu alanda kurulacak bir güneş enerji santralinde yaklaşık %2 oranında enerji kaybına sebep olacaktır. Benzer şekilde, 21 Aralık tarihinde bu kayıp oransal olarak artarak %11 değerine yaklaşmaktadır. Kayıp oranlarındaki fark, gün uzunluğundaki değişimden kaynaklanmaktadır. Kış aylarında günler kısa olduğundan, kayıp oransal olarak fazla olacaktır.

Şekil 5.8'de Konya ilinde(Enlem: 38.2177, Boylam: 32.4607) seçilen nokta için yapılan analiz sonucu verilmiştir.

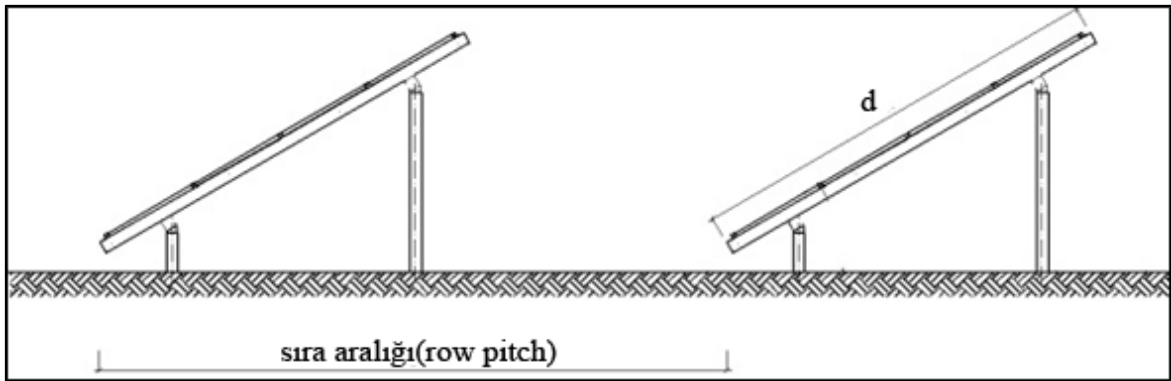


Şekil 5.8. İdeal arazinin için gölgelenme analiz sonuçları

Şekil 5.8’deki analiz incelendiğinde arazinin ideale yakın bir düzlükte olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, bu noktaya kurulacak bir güneş enerjisi santralinde, bahsedilen yeryüzü şekillerinden kaynaklı gölgelenmenin sistem performansına etkisi minimum seviyede olacaktır.

b) Sıra Aralığı (Row Pitch) Analizi

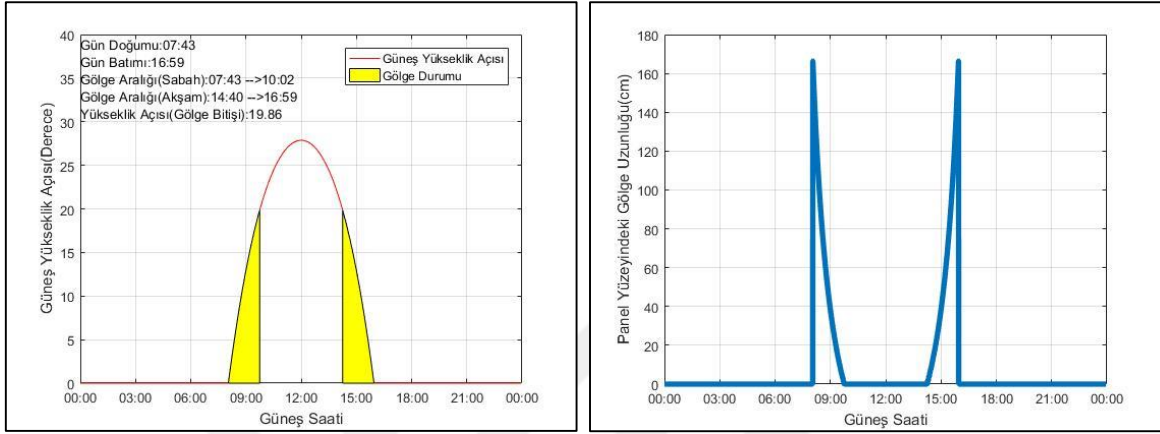
Güneş enerji santrallerinde karşılaşılan problemlerden biri de panel sıraları arasındaki mesafenin doğru ayarlanamaması sonucunda meydana gelen kayıplardır. Sıra Aralığı (row pitch) Şekil 5.9’da gösterildiği üzere, güneş enerjisi santrallerinde iki panel sırası arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir.



Şekil 5.9. Sıra aralığı (d =toplam panel yüzey uzunluğu)

Bu analiz yapılırken referans alınacak gün kuzey yarım kürede 21 Aralık’tır. 21 Aralık, güneş yükseklik açısının gün boyu en düşük olduğu ve gölge uzunluğunun en fazla olduğu tarihtir. 21 Aralık tarihinde Elazığ’da (Enlem:38.681°, Boylam:39.223°) 1x1,65m

boyutlarındaki panellerin dikey 2'li yerleşimi ve diğer parametreler (Toplam panel yüzey uzunluğu 330cm, arazi güney yönlü eğimi 0°, panel eğimi 23°, sıra aralığı 600cm) dikkate alınarak yapılan analiz sonuçları Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü üzere saat 07:43 – 10:02 zaman aralığında, arka sıradaki paneller gölgede kalmaktadır. Bu gölge uzunluğu sabah saatlerinde, kısa süreliğine dahi olsa, bir panel boyuna yakın uzunluktadır.



Şekil 5.10. Gölgeleme analizi sonuçları

Bu konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, genel olarak kurulum yapılacak arazinin düz olduğu varsayılmıştır. Bu noktada güney yönlü arazi eğimi kilit rol oynadığı gözden kaçırılmaktadır. Güney yönlü arazi eğimi arttıkça, panel sıraları arasındaki mesafe azaltılabilir ve sisteme daha fazla panel konularak birim alandaki sistem gücü artırılabilir. Elazığ'da (Enlem:38.681°, Boylam:39.223°) farklı kurulum senaryoları için yapılan analiz sonuçları Tablo 5.3'de verilmiştir. Tablo incelenirken, Elazığ'da 21 Aralık tarihinde gün uzunluğunun 9 saat 20 dakika olduğu dikkate alınmalıdır.

Tablo 5.3. Elazığ ilinde 21 Aralık tarihinde farklı kurulum senaryolarına ait analiz sonuçları

Senaryo	Panel Yerleşimi	Panel Eğimi(°)	Arazi Eğimi(°)	Sıra Aralığı(cm)	Panellerin Gölgesiz Kaldığı Süre(s:dk)
1	Dikey 2'li	30	0	600	2:10
2	Yatay 4'lü	30	0	600	0:00
3	Yatay 4'lü	30	0	800	4:50
4	Dikey 2'li	20	0	700	7:06
5	Yatay 4'lü	20	0	700	5:12
6	Dikey 2'li	30	2	600	4:26
7	Yatay 4'lü	30	6	600	1:02
8	Dikey 2'li	23	6	650	8:12
9	Yatay 4'lü	23	6	750	7:58

Tablo 5.3 incelendiğinde arazi ve panel eğiminin güneşlenme süresine etkisi daha net görülmektedir. Burada kullanılan “güneşlenme süresi” tanımı, arka sıradaki panellerin

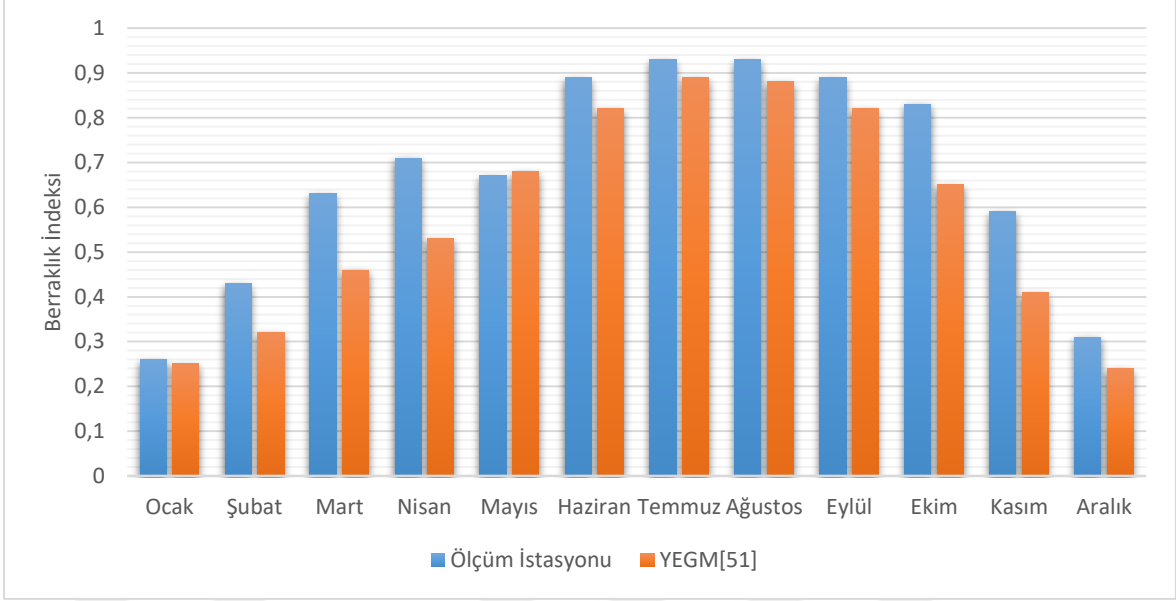
tamamen gölgesiz olduğu süreyi ifade etmektedir. Örneğin, 2 numaralı senaryodaki gibi tasarlanan bir sistemde, 21 Aralık tarihinde, gün boyu arka sıradaki panellerde gölgeleme durumu oluşacaktır. Benzer şekilde, 8 numaralı senaryoda, yaklaşık 8 saat 12 dakika güneşlenme süresine ulaşılabilirken, 9 numaralı senaryoda bu süreye ulaşabilmek için sıra aralığını 7,5 metrenin üzerine çıkarmak gerekmektedir.

Arka sıradaki paneller gölgedeyken direkt ışınım alamayacaktır. Bu panellerin yüzeyine etkiyen toplam yatay düzlem ışınımı hesaplanırken sadece yayılı ışınım bileşeni alınır. Benzer şekilde eğik düzlem toplam ışınımı hesaplanırken, sadece yayılı ve yansıyan ışınım bileşenleri toplanır. Sistemlerde üretilen günlük enerji miktarının %80'den fazlasını direkt ışınım tarafından sağlandığı düşünüldüğünde bu analizin önemi daha net anlaşılmaktadır.

5.4 İzafi Güneşlenme Süresinin Yıllık Üretimlere Etkisi

İzafi güneşlenme süresi (berraklık indeksi), günlük güneşlenme süresinin aylık ortalamasının aylık ortalama gün uzunluğuna oranıdır. Berraklık indeksi, 0 ile 1 arasında değişen bir değer almaktadır. Aylık berraklık indeksinde 0 değeri havanın ay boyunca kapalı olduğunu, 1 değeri havanın hep açık olduğunu belirtir. Bu parametre her ne kadar günlük üretimler hesaplanırken dikkate alınmasa da aylık bazda hesaplamalar yapılırken önemli bir parametredir.

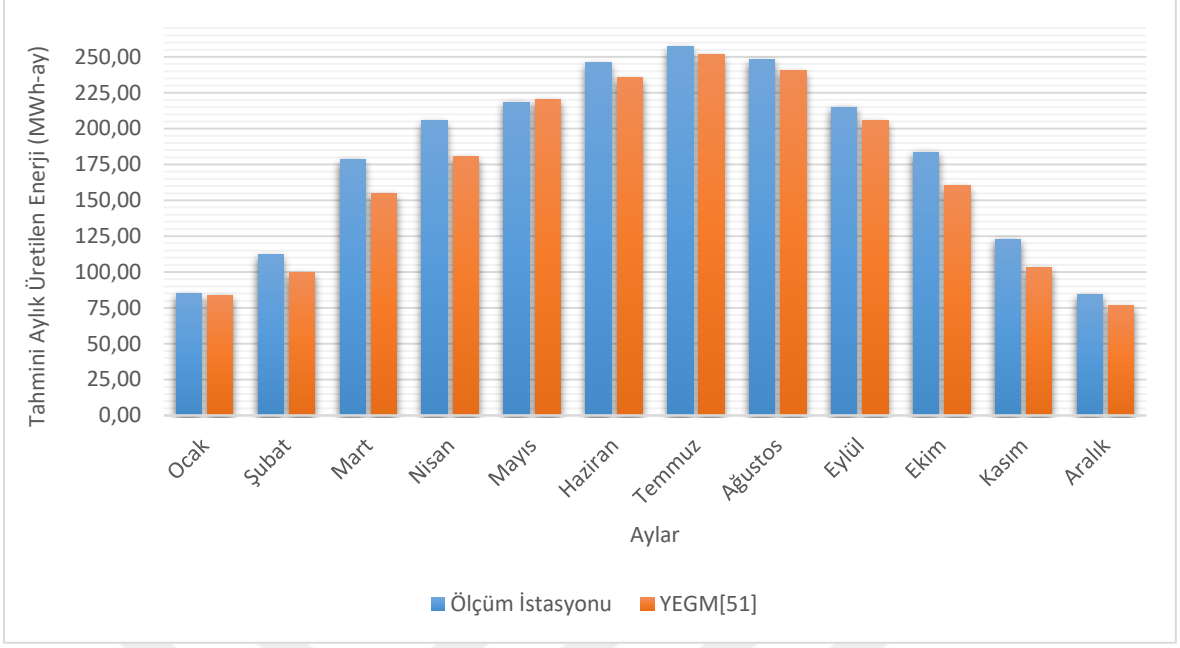
Bu çalışma kapsamında, Elazığ'ın güneş potansiyelini belirlemek amacıyla kurulan ölçüm istasyonunda toplanan veriler göz önüne alınarak, Elazığ iline ait güncel berraklık indeksleri hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmanın amacı yakın tarihli veriler kullanılarak güneş enerjisi santrallerinde aylık üretim tahminlerinin daha doğru yapılmasıdır. Bu bağlamda, ölçüm istasyonu verilerine göre hesaplanan ve Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nden alınan [47] güneşlenme verileri üzerinden hesaplanan berraklık indekslerinin karşılaştırması Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Meteoroloji verileri ile ölçüm istasyonu verilerinin karşılaştırılması

Veriler incelendiğinde, berraklık indeksinin özellikle yaz aylarında yüksek olduğu, yani bulutlu gün sayısının az olduğu görülmektedir. Burada önemli bir nokta gözden kaçırılmamalıdır. Optimum sabit güneş paneli açısı hesaplanırken bölgenin berraklık indeksi dikkate alınmalıdır. Her ne kadar bu optimum açı matematiksel olarak kolaylıkla hesaplanabiliyor olsa da, bu hesaplama, sabit açılı sistemler için uygun değildir.

Berraklık indeksinden yola çıkılarak, Ocak ayında yaklaşık 8 gün, Temmuz ayında ise yaklaşık 28 gün havanın açık olacağı öngörülebilir. Bu sebeple kurulması planlanan sabit panel açılı sistemlerde, panel açısı, berraklık indeksinin yüksek olduğu ayların optimum açısına yakın seçilmelidir. Şekil 5.11'deki veriler ışığında sabit panel açılı sistemlerin özellikle yaz aylarında yükselme eğiliminde olduğu görülmüştür. Küresel ısınma ve buna bağlı olarak mevsimlerdeki değişimin etkisiyle özellikle yaz aylarında gökyüzü daha açık olmaktadır. Berraklık indeksi güneş ışıınımı hesaplamalarında kullanılan önemli bir parametredir. Şekil 5.11'de verilen değerlere göre, Elazığ (Enlem:38.681°, Boylam:39.223°) ilinde, güney bakılı, panelleri 23° açıyla yerleştirilmiş 1000 kWe (1144kWp) tesisin aylara göre hesaplanan enerji üretimi Şekil 5.12'te verilmiştir.



Şekil 5.12. Elazığ ilinde farklı berraklık indekslerine göre tahmini aylık üretim değerleri

6. SONUÇ

Ekolojik dengenin korunması ve kurulum maliyeti açısından yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en çok tercih edilen türler güneş ve rüzgar enerjisidir. Rüzgâr enerjisi, kaynağı sebebiyle belirli alanlarda uygulanabilir iken, güneş enerjisi sistemlerinde tek kaynak güneş ışınımı olduğundan, alan sınırı yoktur. Ayrıca ülkemizde lisanssız güneş santrallerinde üretilen enerji için 10 yıl boyunca 0.133 \$/kWh birim fiyatından alım garantisi vermesi güneş enerji santrallerine olan ilgiyi arttırmış ve bir yatırım aracına dönüştürmüştür.

Güneş enerji santralleri tasarlanırken özellikle arazi seçimi, kurulan sistemin geleceği açısından büyük öneme sahiptir. Arazi seçiminde yapılacak hatalar, yapılan güneş enerji santrali yatırımının geri dönüş süresini ciddi şekilde arttıracaktır. Bu sebeple, arazi seçimi yapılırken güneşin doğuşundan batışına kadar çevredeki yükseltilerden kaynaklı bir gölgelenme durumu olmamasına dikkat edilmelidir. Özellikle kış aylarında gündüz süreleri kısa, güneşin yükseklik açısı daha düşük olduğundan çevredeki yükseltiler sistem üzerinde gölgelenme durumuna sebep olacaktır.

Kurulum yapılması düşünülen arazinin bakı durumu ve eğiminin incelenmesi de bir başka önemli konudur. Arazinin güney yönlü eğimi ideal olmalıdır. Fazla eğimli arazi santralin inşası sırasında zorluklara sebebiyet verip, kurulum ve işçilik maliyetlerini yükseltecektir. Her ne kadar bu eğim arttığında paneller arası mesafeyi düşürerek birim alana daha fazla panel bağlanmasına ve toplam santral gücünün artırılmasına imkân sağlasa da ilk kurulum maliyetini ciddi şekilde arttıracaktır. İstenilen, ideal güney yönlü eğimin pozitif yönde %7 - %20 arasında olmasıdır.

Eğim konusunda bir başka istenmeyen durum ise arazinin kuzey yönlü eğime sahip olması (ters eğim) durumudur. Bu durumda arkada kalan panel sırası kot olarak daha aşağıda kalacaktır. Eğer panel sıraları arasındaki mesafe bu parametre dikkate alınıp doğru ayarlanamaz ise ön panel sırasının gölgesinin arka sıradaki panellerin üzerine düşme durumu oluşacaktır. Bu durumun engellenmesi için panel sıraları arasındaki mesafe artırılabilir. Mesafenin artması birim alandaki panel adedini düşürecek, araziye kurulabilecek maksimum panel gücünü aşağıya çekecektir. Bir başka durum yönetmelikte belirtilen alan sınırını aşma durumudur. Bu sınır bakanlık tarafından megawatt başına 20.000 m² olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda güneş enerji santrallerinin tasarımında karşılaşılan problemler irdelenmiş, çözüm önerileri sunulmuştur. Santral için yer seçimi yapılırken dikkat edilmesi

gereken noktalar belirtilmiştir. Güneş santrallerinin performansında temel parametre olan güneş ışınımı bilgileri üzerinden, gerekli güç hesaplamaları ve üretilen enerji analizleri yapılmış, sonuçları tartışılmıştır. Çatı uygulamalarında çatı eğimi ve yönünün üretilen enerji üzerindeki etkileri incelenmiştir. Arazi uygulamalarında arazi eğiminin öneminden bahsedilmiştir. Arazi eğiminin panel sıra aralığı ile olan ilişkisi açıklanmıştır. Panel sıra aralığının hatalı belirlenmesi durumunda oluşacak enerji kaybı incelenmiştir. Güneş enerji santrallerinde yeryüzü şekillerinden kaynaklı gölgelenme analizi yapılmış ve sebep olduğu enerji kayıpları incelenmiştir. Sabit panel açılı sistemlerde doğru panel açısı tespiti için berraklık indeksinin bir parametre olarak kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] **Robyns B., Davigny A., Francois B., Henneton A., Sprooten J.,** 2012, Electricity Production from Renewable Energies, London (UK): ISTE Ltd.
- [2] **Perez R., Zweibel K., Hoff T.E.,** 2011, Solar power generation in the US: Too expensive, or a bargain?, *Energy Policy*, Vol. 39, No. 11, pp. 7290-7297
- [3] **Loránd, S,** The History of Using Solar Energy, The 7th International Conference on Modern Power Systems, *The 7th International Conference on Modern Power Systems*.
- [4] **Jiang Y.,** 2010, Calculation of daily global solar radiation for Guangzhou, China, *International Conference on Optics, Photonics and Energy Engineering*, Vol: 1, 41-43
- [5] **Alsadi S. Y., Nassar Y. F.,** 2017, Estimation of Solar Irradiance on Solar Fields: An Analytical Approach and Experimental Results, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 4
- [6] **Bhola P., Bhardwaj S.,** 2016, Solar Energy Estimation Techniques: A Review, *7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*.
- [7] **Potnuru, S.R., Pattabiraman, D., Ganesan, S. I.,** 2015, Positioning of PV panels for reduction in line losses and mismatch losses in PV array, *Renewable Energy*, 78, pp.264-275
- [8] **Paluch M., Fasuga R., Bilek T.,** 2011, Tool for Calculation of Solar Radiation and Solar Systems Design, *UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation*.
- [9] **Gao Z., Tian Y., Chen J., Chen H.,** 2013, A GIS-Based Study of Monthly Average Global Solar Radiation, *21st International Conference on Geoinformatics*
- [10] **Latif Z. A., Zaki N. A. M., Salleh S. A.,** 2012, GIS-based Estimation of Rooftop Solar Photovoltaic Potential using LiDAR, *IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*.
- [11] **Li W., Xinfu Q.,** 2009, Distributed Modeling of Direct Solar Radiation of Rugged Terrain Based on GIS, *1st International Conference on Information Science and Engineering*.
- [12] **Xianping L.,** 2012, Calculation and Analysis of Optimal Tilt Angle for PV/T hybrid Collector, *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*. 792-795.
- [13] **Zhen Z., Zengwei Z., Li S., Jun W., Wuchun P., Zhikang L., Lei W., Wei C., Yunhua S.,** 2017, The Effects of Inclined Angle Modification and Diffuse Radiation on the Sun-Tracking Photovoltaic System, *IEEE Journal Of Photovoltaics*, Vol. 7, No. 5

- [14] **Tang R., Liu X., 2010**, Installation Design Of Solar Panels With Seasonal Adjustment Of Tilt-Angles, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*.
- [15] **Daut I., Irwanto M., Irwan Y.M., Gomesh N., Ahmad N. S., 2011**, Clear Sky Global Solar Irradiance on Tilt Angles of Photovoltaic Module in Perlis, Northern Malaysia, *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering Pahang, Malaysia*.
- [16] **Tang, R. and Wu, T., 2004**, Optimal tilt-angles for solar collectors used in China, *Applied Energy*, 79 pp.239-248
- [17] **Koçer A., Şevik S., Güngör A., 2016**. Ankara ve İlçeleri İçin Güneş Kolektörü Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, Sayı 1
- [18] **Mansouri E., Pirsalami M., Nasiri N., Farrizi M., Hashemizadeh M., Alihosseini H., 2016**, Optimum Tilt Angle for Fixed-Array Solar Panels at a Constant Latitude of 29° to Receive the Maximum Sunlight *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*[Spl. Issue 1] 2016: 26-30.
- [19] **Şenpınar, A., 2006**. Güneş Açılarına Bağlı Olarak Optimum Sabit Güneş Paneli Açısının Hesaplanması, *Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Endüstriyel Elektronik Programı*, Elazığ.
- [20] **Handoyo E. A., Ichsani D., Prabowo P., 2013**, The Optimal Tilt Angle Of A Solar Collector *Energy Procedia International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application* 166 – 175
- [21] **Badescu, V., and A. Dumitrescu. 2013**. New models to compute solar global hourly irradiation from point cloudiness. *Energy Conversion and Management* 67:75–91.
- [22] **Kandirmaz, H. M. 2006**. A model for the estimation of the daily global sunshine duration from meteorological geostationary satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 27(22):5061–71.
- [23] **Kandirmaz, H.M., L. Yegingi, V. Peştimalci, and N. Emrahoglu. 2004**. Daily global solar radiation mapping of Turkey using Meteosat satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 25(11):2159–68.
- [24] **Aksoy, B. 2011**. Solar radiation over Turkey and its analysis. *International Journal of Remote Sensing* 32(21):6261–72.
- [25] **Belcher, B. N., and A.T. DeGaetano. 2007**. A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations. *Solar Energy* 81:329–45.

- [26] **Chen, L., G. Yan, T. Wang, H. Ren, J. Calbó, J. Zhao, and R. McKenzie.** 2012. Estimation of surface shortwave radiation components under all sky conditions: Modeling and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment* 123:457–69.
- [27] **Weinstock, D. and Appelbaum, J.,** 2004, Optimal solar field design of stationary collectors, *Journal of Solar Energy Engineering*, 126, pp. 898-905
- [28] **Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E.,** 2012, A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels, *Solar Energy*, 86, pp.2695-2706
- [29] **Moharil, R.M., Kularni, P.S.,** 2010, Reliability analysis of solar photovoltaic system using hourly mean solar radiation data, *Solar Energy*, 84, 691-702
- [30] **Gonal V. S., Sheshadri G. S.,** 2016, Solar Energy Optimization using MPPT Controller by Maximum Conductance Method, *7th Power India International Conference (PIICON)*.
- [31] **Gheisa R. T. E., Igor M. S. L.,** 2017, Solar Energy for Decentralized Energy Supply: a Real Option Approach, *14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*.
- [32] **Boualit S. B., Melit A.,** 2016, SARIMA-SVM Hybrid Model For The Prediction Of Daily Global Solar Radiation Time Series, *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) International*.
- [33] **Sánchez C. B., Váry M., Perný M., Janíček F., Šály V., Packa J.,** 2017, Prediction And Production Of Small Pv Power Plant, *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*.
- [34] **Azzouzi M., Mohammedi B., Popescu D., Bouchahdane M.,** 2013, Performances Optimization from Solar Radiation to Photovoltaic Cell, *3rd International Conference on Systems and Control*.
- [35] **Cao Z., O'Rourke F., Lyons W.,** 2017, Performance Modelling Of A Small-Scale Wind And Solar Energy Hybrid System, *Signals and Systems Conference (ISSC)*.
- [36] **Yodkhuanga A., Ngaopitakkul A.,** 2015, Performance Evaluation of Solar Rooftop System, *The Institute of Industrial Applications Engineers-Japan*, 288-293.
- [37] **Schubert G.,** 2012, Modeling Hourly Electricity Generation From PV And Wind Plants In Europe, *9th International Conference On The European Energy Market*
- [38] **Sahu C. K., Patel S.,** 2014, Improvement of Conversion Efficiency and Enhancement in Output Power of Solar Panel, *International Journal of Science and Research (IJSR)*.
- [39] **Gursoy G., Baysal M.,** 2014, Improved Optimal Sizing of Hybrid PV/Wind/Battery Energy Systems, *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications*.

- [40] **Diantari R. A., Pujotomo I., 2016**, Calculation Of Electrical Energy With Solar Power Plant Design, *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pp:443-446.
- [41] **Paul D., Mandal S. N., Mukherjee D., Chaudhuri B. S. R., 2008**, Artificial Neural Network Modeling for Efficient Photovoltaic System Design, *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*. 50-56.
- [42] **Vass A., Kádár P., 2014**, Analysis of annual production of a multi-tilted PV system, *IEEE 12th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*. 125-130.
- [43] **Messenger Roger A., Ventre J., 2010**, Photovoltaic Systems Engineering Third Edition, CRC Press.
- [44] (01/12/2017), Photovoltaic research. Available: <https://www.nrel.gov/pv/>
- [45] **Duerr F., Meuret Y., Thienpont H., 2013**, Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics, *Optics Express* Vol. 21, Issue S3, pp. A401-A411.
- [46] **Mahmoud Y., 2017**, Toward a long-term evaluation of MPPT techniques in PV systems, *IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*.
- [47] **Yiğit, A., Atmaca, I., 2010**. Güneş Enerjisi, Alfa Akademi Yayım, Bursa.
- [48] **Lealea T., Tchinda R., 2013**, Estimation Of Diffuse Solar Radiation in The North And Far North Of Cameroon, *European Scientific Journal*, vol.9, No.18
- [49] **Orgill J. F., Hollands K. G. T., 1977**, Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation On A Horizontal Surface, *Solar Energy*, vol:19, pp:357-359.
- [50] (01/12/2017), Temel Bilgiler. Available: <http://portal.netcad.com.tr/>
- [51] (19/11/2017), Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası. Available: <http://www.eie.gov.tr/>

ÖZGEÇMİŞ

Erdem GÖNÜLTAŞ 31.10.1989 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamlayarak 2006 yılında mezun oldu. 2008 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü kazandı. 2012 yılında Bilgisayar Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği (donanım) anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve eğitime burada devam etmektedir.

