

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATARYA DEPOLAMALI PV GÜNEŞ ENERJİ
SİSTEMLERİNDE İDEAL SİSTEM BÜYÜKLÜĞÜNÜN
GENETİK ALGORİTMA İLE TESPİT EDİLMESİ

Recep TUNA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı
Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATARYA DEPOLAMALI PV GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE
İDEAL SİSTEM BÜYÜKLÜĞÜNÜN GENETİK ALGORİTMA İLE
TESPİT EDİLMESİ

Recep TUNA tarafından hazırlanan tez çalışması 24.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI
Onsekiz Mart Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI, Danışman
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Dr. Muharrem MERCİMEK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Gökhan GELEN, Üye
Bursa Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Batarya Depolamalı PV Güneş Enerji Sistemlerinde İdeal Sistem Büyüklüğünün Genetik Algoritma İle Tespit Edilmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Recep TUNA

İmza

Aileme

ve

Dostlarıma



TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim hayatımı geçirdiğim Yıldız Teknik Üniversitesi'nde bir yandan derslerimi verdim, bir yandan da pek çok yarışma ekibine dahil olma şansı yakalım. Uluslararası yarışmalara katılıp ülkemizi temsil etme şansı yakaladım. Öte yandan araştırmacı bursiyer olarak da prestijli bir Tübitak projenin parçası oldum. Pek çok kişi kattım hayatıma ve ömrümün en kıymetli süreçlerinden birini yaşadım. Bu sebeple Yıldız Teknik Üniversitesi'ne, bana bu imkanları sunan ekosisteminden dolayı minnettarım. Ayrıca tez sürecimde, desteklerini esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI'ya da çok teşekkür ederim. Tez hazırlık döneminde nazımı çeken, beni idare eden aileme ve arkadaşlarıma da ayrıca minnettarım.

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	15
1.1 Literatür Özeti.....	15
1.2 Tezin Amacı	16
1.3 Hipotez	16
2 ŞEBEKE BAĞLANTI YAPISI VE ENERJİ AKIŞI	17
2.1 Elektrik Dağıtım Sistemi Kuralları ve Fiyatları.....	17
2.1.1. Türkiye'deki AG Elektrik Dağıtım Sistemi Yapısı.....	18
2.1.2. AG Seviyesi Elektrik Dağıtım Sistemine DES Bağlantısı.....	20
2.1.3. Şebeke Elektrik Fiyatları ve Tariferleri.....	21
2.2 Bağlantı Topolojileri.....	23
2.2.1. Şebeke Entegre (Ongrid) GES Bağlantı Topolojisi.....	23
2.2.2. Hibrit GES Bağlantı Topolojisi.....	24
2.3 Enerji Akışı ve Çalışma Modları.....	24
2.3.1. Hibrit PV Çalışma Modları.....	25
3 SİSTEM BİLEŞENLERİNİN İNCELENMESİ	27
3.1 PV Panel.....	27
3.1.1. PV Panellerin Tarihçesi.....	27
3.1.2. PV Paneller Nasıl Çalışır.....	29
3.1.3. PV Panellerin Türleri Nelerdir.....	31
3.1.3. PV Panellerin Fiziksel Yapısı.....	37
3.2 Güneşlenme ve Solar Radyasyon.....	40
3.3 Batarya.....	43
3.3.1. Batarya Tarihçesi.....	44
3.3.2. Bataryalar Nasıl Çalışır.....	46
3.3.3. Batarya Türleri Nelerdir.....	47

3.3.4. Batarya Parametreleri.....	47
3.3.4. Batarya Matematik Modeli.....	50
4 OPTİMİZASYON VE GENETİK ALGORİTMA	51
4.1 Optimizasyon Teknikleri	51
4.2 Genetik Algoritma Tarihçesi.....	51
4.3 Genetik Algoritma Tanımlar.....	52
4.3.1. Seçim Kuralları.....	53
4.3.2. Çaprazlama Kuralları.....	54
4.3.3. Mutasyon Kuralları.....	54
4.3.4. Durma Kuralları.....	54
4.4 Genetik Algoritmanın Avantajları ve Uygulama Alanları	55
4.5 “Birden Çok” Amaçlı Optimizasyon	55
4.6 Genetik Algoritmanın Çalışma Mantığı.....	56
4.7 Genetik Algoritmanın Bu Çalışmada Kullanımı	56
4.7.1. Yeni Fatura Sıfırlama.....	58
4.7.2. Amortisman Süresi.....	58
4.8 Algoritma ve Parametreler	59
4.9 Algoritma Sonuçları	63
5 DENEYSEL SONUÇLARIN PVSOL’DE SİMÜLASYONU	67
5.1 PVSOL Nedir	67
5.2 PVSOL Simülasyon Girdileri ve Çıktıları.....	67
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
6.1 Algoritma ve Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması	71
6.2 Genel Sonuçlar.....	71
KAYNAKÇA	72
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	75

SİMGE LİSTESİ

I	Akım
k_B	Boltzmann Sabiti ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K)
L	Cismin Radyasyon Spektrumu
E	Enerji
V	Gerilim
P	Güç
c	Işığın Boşluktaki Hızı ($2.998 \cdot 10^8$ m/s)
λ	Işığın Dalga Boyu
h	Plank Sabiti ($6.626 \cdot 10^{-34}$ m ² kg/s)
K_i	PV Panel Akım-Sıcaklık Düşümü Katsayısı
K_v	PV Panel Gerilim-Sıcaklık Düşümü Katsayısı
T	Sıcaklık

KISALTMA LİSTESİ

DES	Dağıtık Elektrik Santrali
EPDK	Enerji Düzenleme ve Denetleme Kurumu
GA	Genetik Algoritma
LÜY	Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
PCC	Point of Common Coupling – Bağlantı Noktası
POS	Point of Supply – Kaynak Noktası
PV	Fotovoltaik
SOC	Batarya Doluluk Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 AG Şebekeden Bağlantı Alternatifleri	19
Şekil 2.2 2021 İlk 10 Ayında Elektrik Üretim Kaynakları ve Miktarları[12]	19
Şekil 2.3 Şebeke Entegre Bağlantı Yapısı	23
Şekil 2.4 Hibrit Bağlantı Topolojisi	24
Şekil 2.5 Hibrit Bağlantı Topolojisi	25
Şekil 3.1 Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller ve Gerald L. Pearson	28
Şekil 3.2 Fotovoltaik Etkide Elektronların Hareketleri	29
Şekil 3.3 SQ Limiti ve Verimlilik	30
Şekil 3.4 Elektronların foton etkisinde kalarak hareketleri	31
Şekil 3.5 Solar Panel Türleri ve Nesilleri[15]	32
Şekil 3.6 Boron ve Fosfor Enjekte Edilmiş Silisyumun Elektron-Boşluk Yapısı ...	33
Şekil 3.7 Solda Polikristal sağda monokristal PV hücre.....	33
Şekil 3.8 İkinci Nesil PV hücrelerin yapısı	34
Şekil 3.9 DSSC PV panel.....	35
Şekil 3.10 Nanokristal PV Yapısı	36
Şekil 3.11 Tandem Polymer Solar Hücre	36
Şekil 3.12 Perovskite Paneller.....	37
Şekil 3.13 PV Panel Katmanları	37
Şekil 3.14 6000°K Sıcaklıktaki Karacismin Dalgaboyu-Radyasyon Spektrumu ...	41
Şekil 3.15 Dalgaboyu Sıcaklık İlişkisi.....	41
Şekil 3.16 AM0 Spektrumu ve AM1 Spektrumu	42
Şekil 3.17 Globalsolaratlas Arayüzünden Bir Kesit.....	43
Şekil 3.18 Çalışılacak lokasyonun Güneşlenme Verileri	43
Şekil 3.19 Redoks Akışlı Batarya Yapısı	45
Şekil 3.20 Enerji Yoğunluğu Grafiği.....	45
Şekil 3.21 Kurşun Asit Pil Yapısı	46
Şekil 3.22 Döngü Ömrü sıcaklık ile değişimi.....	49
Şekil 4.1 GA Akış Diyagramı[23]	56
Şekil 4.2 Tüketim Tesisinin Saatlik Elektrik Tüketimi	60
Şekil 5.1 PVSOL Üç Boyutlu Simülasyondan Bir Görüntü	68

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kurulu Gücü (MWh)[11]	18
Tablo 2.2 Tek Terimli, 3 Zamanlı Mesken Tarifesi, EPDK 1 Temmuz 2021[13].	23
Tablo 4.1 Solartürk STR-400W PV Panel Teknik Veriler[24]	60
Tablo 4.2 BYD-HVS Serisi Batarya Modülleri ve Teknik Özellikleri[25]	61
Tablo 4.3 Seçilen Coğrafik Konumun Yıllık Direkt Radyasyon Tablosu (W/m ²).61	
Tablo 4.4 Genetik Algoritmanın Pareto Sonuçları ve Uygunluk Değerleri	63
Tablo 5.1 Simülasyon Parametreleri	68
Tablo 5.2 Seçilen Verilerden Üretilen Simülasyon Çıktıları.....	69
Tablo 5.3 PVSOL Finansal Analiz Sonuçları	70

Batarya Depolamalı PV Güneş Enerji Sistemlerinde İdeal Sistem Büyüklüğünün Genetik Algoritma ile Tespit Edilmesi

Recep TUNA

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI

Bu çalışmada, genetik algoritma teknikleri ile ideal sistem büyüklüğü tespit etme problemi çalışılmıştır. Tüketim tesisinin olduğu yerde kurulacak batarya depolamalı PV güneş enerjisi sistemi konu edinmiştir. Bu tercihin yapılmasında günümüz pazar trendleri etkili olmuştur. Algoritmayla elde edilen sonuçlar, PVSOL yazılımında simüle edilerek başarısı sınanmıştır.

Literatürde benzer çalışmalar spesifik senaryolar ve bölgesel elektrik dağıtım kuralları çerçevesinde yapılmıştır. Bu çalışmada da ülkemizdeki elektrik dağıtım koşulları gözetilmiştir ve pazarda satışta olan gerçek ürünlerden hareketle gerçek sistem büyüklüğü tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın yapılmasındaki motivasyonlardan biri günümüzde bu optimizasyonu yapan bir uygulama olmamasıdır. Kurulan sistemler, mevzuatın güç sınırlaması olması sebebinden de hareketle genelde en yüksek kapasiteli sistem olmaktadır. Diğer motivasyon ise literatüre ülkemizin günümüz tekno-ekonomik verileriyle gerçekçi bir çalışma örneği kazandırmaktır.

Ortaya çıkan algoritma farklı marka model ürünlerle ve farklı lokasyonlar için kullanılabilecek niteliktedir. İhtiyaç duyulan veriler, tez çalışması içerisinde işlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Genetik algoritma, fotovoltaiik, batarya, enerji, optimizasyon



Determining The Ideal System Size In Battery Storage PV Solar Systems By Genetic Algorithm

Recep TUNA

Department of Control and Automation Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI

The aim of this study is to find the ideal size of the main components of the battery storage PV solar energy systems installed in the place of electricity consumption, using the "Genetic Algorithm" method, which is a kind of optimization technique. The results obtained were simulated in PVSOL software and performance evaluation was made. Similar studies have been carried out in the literature within the framework of specific scenarios and regional electricity distribution rules. In this study, the electricity distribution conditions in our country were observed and the actual system size was tried to be determined based on the real products on sale in the market. One of the main motivations for this study is that there is no application that makes this optimization today. The systems installed are generally the systems with the highest capacity, due to the power limitation of the legislation. The second main motivation is to bring a realistic study example to the literature with today's techno-economic data of our country.

The resulting algorithm can be used with different brand and model products and for different locations. The required data mentioned in the thesis study. Different models will change results and it can be observed easily via the model which presented in this study.

The result of optimisation problem were tested in PVSOL environment and assesments were made.

Keywords: Genetic algorithm, photo-voltaic, battery, energy, optimisation



1.1 Literatür Özeti

Bu tez çalışmasında, PV paneller ve bataryaların kullanıldığı, şebekeye bağlı ve iç tüketimin karşılanmaya çalışıldığı bir yapı üzerinde durulmuştur. Elektrik tüketicisinin elektrik tüketim rejimine bakılarak ihtiyaç duyduğu ideal büyüklükteki sistem bileşenleri tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Bu konuda literatürde benzer çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda, ülkelerin yenilenebilir enerjiye verdikleri teşvikler veya uyguladıkları mevzuatlar çerçevesinde farklılıklar oluşmaktadır. Buna benzer şekilde, dizel jeneratör veya rüzgâr türbinlerinin de dahil edilmesiyle enerji üretim kaynaklarının çeşitlendirildiği görülmektedir[1], [2]. Öte taraftan literatürdeki çalışmalar, elektrik tüketimi tercihleriyle de ayrılmaktadır. Bazı çalışmaların kapsamı ev tüketimiyle sınırlandırılmıştır, bazı çalışmalarda şehir ölçeğinde tüketimlerin dengelenmesi amaçlanmıştır[3], [4]. Diğer bir farklılık da optimizasyon tekniklerinde seçiminde görülmektedir[5]–[7]. Genetik algoritma kullanılan örnekler içinde farklılaşan konulardan biri de seçilen amaç fonksiyonlarıdır. Ayrıca kimi örneklerde limit fonksiyonları da kullanılmıştır[4], [8].

Bu tez çalışmasında konunun bu şekilde sınırlandırılmasındaki motivasyon, piyasada mevcut satılan ürünlerin kolaylıkla bulunabilirliği ve uygulanabilirliğidir. Hibrit sistem topolojisi altında değerlendirilen bu yapıların uygulanmasında mevzuat da etkili olmuştur. Bu doğrultuda üreticilerin ürün çeşitliliğinin de bu alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında 2. Bölümde ülkemizdeki elektrik dağıtım yapısı ve hibrit enerji santrallerinin elektrik şebekesine nasıl dahil olabilecekleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde sistem bileşenleri detaylarıyla açıklanmıştır. Dördüncü bölümde genetik algoritma detayları üzerinde durulmuştur ve bu tez kapsamında algoritmanın nasıl kurgulandığı açıklanmıştır. Beşinci bölümde PVSOL yazılımı tanıtılmış ve bu tez kapsamında algoritma çıktısına sadık kalarak simülasyon yapılmıştır. Altıncı

bölümde ise algoritma sonuçlarıyla simülasyon sonuçları kıyaslanmış ve değerlendirme yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı şebekeye bağlı elektrik tüketim tesislerinin bir günlük saatlik bazda elektrik tüketimini dikkate alarak kurulacak ideal büyüklükteki batarya depolamalı PV güneş enerji sisteminin PV sayısını ve batarya modülü sayısını bulabilmektir. Bu amaç doğrultusunda optimizasyon tekniklerinden biri olan Genetik Algoritma kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, PVSOL isimli uygulama üzerinde simüle edilerek doğruluğu değerlendirilmiştir.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasında hipotez, bir tesisin bir günlük elektrik tüketimi değerleri üzerinden genetik algoritma tekniğini kullanarak ideal batarya depolamalı PV sistem büyüklüğünün tespit edilebileceğidir.

2.1 Elektrik Dağıtım Sistemi Kuralları ve Fiyatları

Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarının da üretime dahil olmasıyla birlikte yeni mevzuatların ve düzenlemelerin üretilmesi ihtiyacı doğmuştur. Enerji Bakanlığı'nın ilgili birimlerince ilan edilen bu kurallar doğrultusunda elektrik dağıtım sistemi standardı bütünlüğü sağlanmaya çalışılmaktadır.

Tüketicinin olduğu yerde elektrik üretiminin sağlanması amacıyla kurulmakta olan ve bu tezin de inceleme konusu olan çatı üstü PV güneş enerji santralleri de, Enerji Bakanlığı'na bağlı mevzuatlarda “Dağıtık Enerji Santrali” (DES) türlerinden biri olarak kabul edilir. DES, tüketim noktalarında kurulan, kaynağı ne olursa olsun elektrik sistemine dağıtım sisteminden bağlanan, enerji santrallerine verilen isimdir[9].

Güneş enerjisinin kullanımına ilişkin mevzuat ise ilk olarak 2011 yılında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği (LÜY) adıyla yayınlanmıştır ve burada çift yönlü enerji akışının sağlanması için uyulması gereken kurallar ortaya konmuştur. 1 MW'tan küçük güçlü olan enerji santralleri, lisanssız elektrik üretim santralleri kategorisinde işletilirler ve “Lisanssız Elektrik Santrali” (LES) olarak adlandırılırlar[10].

2011 yılında yayınlanan bu mevzuatla beraber kurulacak tesislerin sınıflandırması, alçak gerilim seviyesinden dağıtım sistemine nasıl entegre olacakları, başvuru, kurulum ve onay süreçlerinin nasıl ilerleyeceği, enerji satışında birim fiyatların ne olacağı ve buna benzer pek çok sorunun cevabı verilmiştir. Bu mevzuat sonrasında da GES alanında yüksek ivmeyle kurulumlar – yatırımlar başlamıştır. Tablo 2.1'den de görülebileceği üzere kurulu güç artışı en çok güneş enerji santrallerinde yaşanmıştır.

Tablo 2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kurulu Gücü (MWh)[11]

Kaynak Yıllar	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021/9
HidroEl.	22289	23643	25868	26682	27273	28291	28503	30984	31447
Rüzgâr	2760	3630	4498	5751	6516	7005	7591	8832	10168
Güneş	0	40	310	833	3421	5063	5995	6667	7534
Biyokütle	224	288	345	467	575	739	1163	1485	1782
Jeotermal	311	405	624	821	1064	1283	1515	1613	1650
Toplam	25584	28006	31645	34554	38849	42381	44767	49581	52581

Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik (LÜY) ve Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ (LET), DES kurumları sürecinde başvuru ana kaynaklardır.

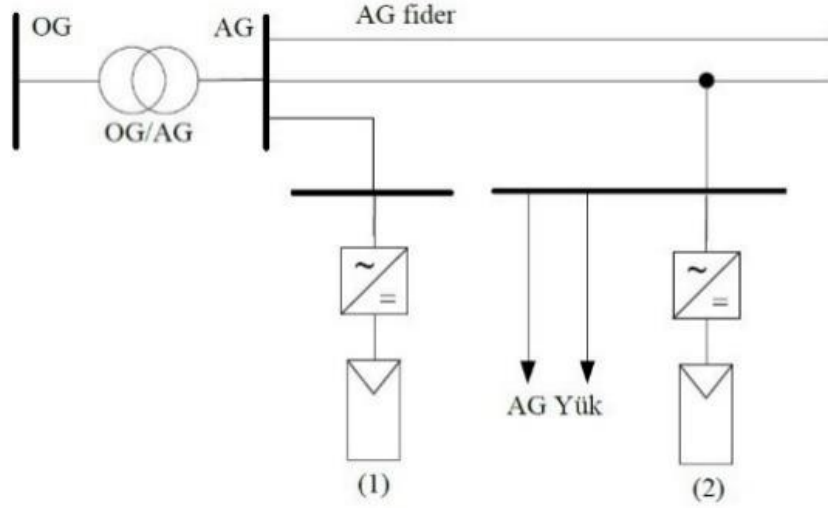
Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik'in en son revizyonu 17.01.2018 yılında yayınlanmıştır. Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliği Uygulanmasına Dair Tebliğ ise en son 15.05.2017 tarihinde EPDK tarafından yayınlanmıştır. Bu iki metinde de bazı maddelerde değişiklikler yapılmıştır ve EPDK'nı internet sitesinden yayınlanmaktadır.

Bu çalışmalar sayesinde enerjide fosil yakıt odaklı üretimin düşürülmesi ve dışa bağımlılığın azaltılması amaçlanmıştır. Ayrıca tüketimin olduğu yerde enerjinin üretilmesi felsefesi dağıtım kayıplarını da ortadan kaldırmayı sağlayacaktır.

2.1.1 Türkiye'deki AG Elektrik Dağıtım Sistemi Yapısı

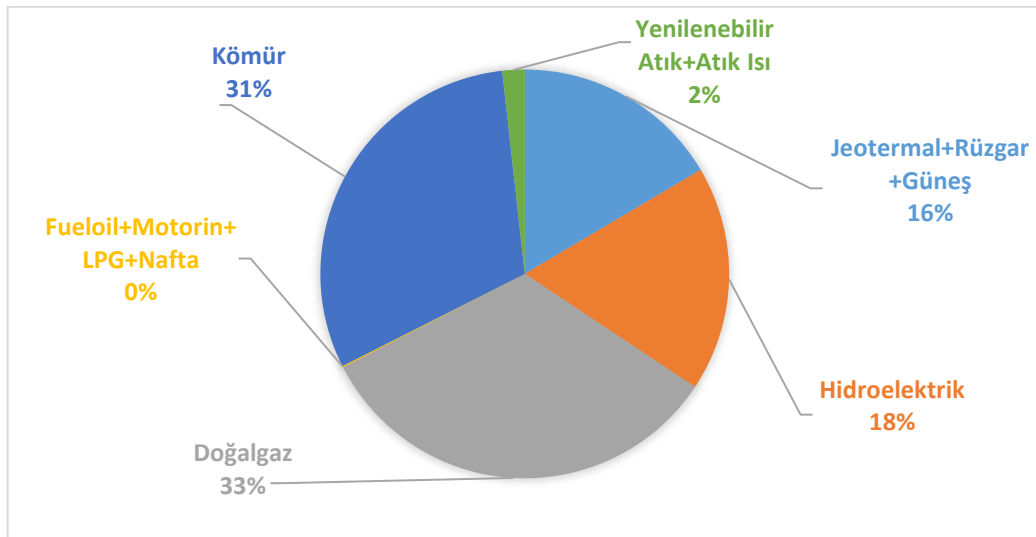
Türkiye'de elektrik dağıtım şebekesinde akış yüksek gerilimden alçak gerilime doğru olacak şekilde kurgulanmıştır. Ayrıca bütün AG şebekesi radyal topolojiye sahiptir. AG seviyesindeki tüm fiderler, yerleşim tipi ve fiziksel yapısı ne olursa olsun tek bir dağıtım transformatöründen beslenir. Dolayısıyla mevcut yapıya

zarar vermeyecek şekilde çift yönlü enerji akışını sürdürülebilir kılmak için ortaya konan kurallara uyulması hassas bir konudur. Aksi durumlarda elektrik dağıtım sistemine ciddi zararlar verilebilir.



Şekil 2.1 AG Şebekeden Bağlantı Alternatifleri

LÜY sayesinde, Türkiye’de AG seviyesinden yapılabilecek GES bağlantı alternatifleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu mevzuatta YG seviyesinde DES bağlantı esasları da açıklanmıştır fakat bu tez çalışmasında sadece AG seviyesinden bağlantılar konu edilmiştir.



Şekil 2.2 2021 İlk 10 Ayında Elektrik Üretim Kaynakları ve Miktarları[12]

2.1.2 AG Seviyesi Elektrik Dağıtım Sistemine DES Bağlantısı

DES'lerin elektrik dağıtım sistemlerine entegre olması sürecinde ilgili kaynaklar tarandığında, uyulması gereken kurallar aşağıdaki gibi belirtilmiştir. Bu süreci TEDAŞ görevlileri yürütmektedir.

- DES, bağlantı noktası itibariyle dağıtım sisteminin gerilim seviyesine ve frekans değerine uygun olmalıdır. Akım – gerilim harmonikleri ve fliker etkisiyle dağıtım sistemindeki diğer kullanıcılara olumsuz etki yapmasının önüne geçilmelidir.
- DES, şebeke kesintisinde (Elektrik kesintisi – LoM – Loss of Main) veya olağandışı şebeke koşulları oluştuğunda devreden çıkacak şekilde tasarlanmalıdır. Şebeke kesildiğinde DES'in üretime devam etmesine “adalanma” denir ve bu durum, dağıtım sisteminde can ve mal kaybına sebep olabilecek ciddi problemler yaratabilir.
- DES'in dağıtım sistemine bağlantısının, dağıtım sistemi topraklama sistemine uygun olarak yapılması gerekir. Bu konuda TEDAŞ gerekli bilgileri sağlamaktadır. Topraklama konusunda da uyulması gereken standartlar LÜY ve LET içerisinde belirtilmiştir.
- DES'in kurulduğu yer aynı zamanda tüketimin olduğu yer ise, yapılacak bağlantı binanın iç tesisat ile kolon hatlarına uygun ve akım taşıma kapasitesini aşmayacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Dağıtım şirketleri, ihtiyaç anında personelinin kolayca ulaşabileceği ve emniyeti arttırmak adına kontaklarının pozisyonunu belli eden kesici ve ayrıcılar isteyebilir.
- Kurulumun yapılacağı yapının kısa devre akım dayanma değeri, kurulacak DES ile birlikte yeniden hesaplanmalıdır. Sınırı aşmayacak şekilde tesis planlaması yapılmalıdır.
- Başvurusu yapılan DES kurulu gücü 11kWe ve altında olması durumunda AG, 11kWe'nin üzerinde olması halinde AG veya OG seviyesinden dağıtım sistemine bağlanabilir. Detaylar aşağıdaki gibidir:
 - a. DES gücü < 5kW: AG seviyesinden tek fazlı,
 - b. DES gücü > 5kW ve faz akımı < 16A: AG seviyesinden 3fazlı,
 - c. DES Faz akımı > 16A: AG veya OG 3 fazlı bağlantı mümkündür.

- AG seviyesinden bağlanacak toplam DES gücü, bağlı olduğu trafo gücünün %50'sini aşamaz. Buna ilave, bir kullanıcının bir yıl içerisinde kullanabileceği kapasite, trafo gücü (tg) 100kW'tan küçük ise 7,5kW; tg 100kVA ve 1000kVA aralığındaysa $tg \cdot 0,1$ kadar; tg 1000kVA'dan büyükse maks 100kW kadar olabilir. Eğer trafo bir şahsa aitse, kurulabilecek güç en fazla trafo gücü kadar olabilir[13].
- Kurulacak DES'ler güçlerine ve bağlantı noktası özelliklerine göre devreye alınırken, test edilirken ve işletilirken ilgili TSE standartlarına uymalıdır. Bu standartlar LEY içerisinde belirtilmektedir.

Bu kurallar, koruma fonksiyonlarının sağlanması için zaruridir. GES koruma sistemleri “Arayüz (irtibat) Koruması” ve “Generatör (ünite) Koruması” olarak ikiye ayrılır.

2.1.2.1 Arayüz (İrtibat) Koruması

Dağıtım Sistemi Operatörleri şebekeye bağlanacak DES'in güvenli işletimi için şebeke ile bütünleşik ve uyumlu bir sisteme ihtiyaç duyarlar. Bu sebeple de tüm DES'lerde ortak bağlantı noktalarında arayüz koruma sistemi şartı koşarlar. Koruma bölgelerinin sınırlarını İrtibat (PCC) Noktası ve Kaynak Noktası (POS) belirler.

Bu koruma sistemleri, dağıtım sisteminin bütünlüğünü bozan veya emniyetini riske atan olaylarda GES'in şebekeden ayrılabilmesi ve ters beslemenin önlenmesi için önemlidir. Şebeke düzeyinde rölelerle veya inverterlerin içindeki gömülü elektronik donanımlarla bu fonksiyonlar sağlanabilir.

Görevlerini üç başlık altında aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür:

- Elektriksel Koruma Sistemleri: Adalanmanın önlenmesi amaçlanır.
- Güç Kalite Gereksinimleri: DC akım enjeksiyonu problemleri, kırpışma problemleri ve harmonik problemlerinin önlenmesi amaçlanır
- Genel Gereksinimler: Senkronizasyon, haberleşme, ünite kontrolü, transfer, ölçüm/izleme, açma-kapama, gerilim-frekans kontrolleri ve topraklama kontrolleri yapılır.

2.1.2.2 Generatör (Ünite) Koruması

Şebeke bağlantı noktasında, generatörün PV sisteminden veya iç arızalardan gelecek zararlardan, anormal işletim koşullarından veya tekrar kapama işlemleri sırasında oluşabilecek arızalardan korunmasını amaçlayan sistemdir.

2.1.3 Şebeke Elektrik Fiyatları ve Tarifeleri

Günümüzde güncel elektrik fiyatları mesken tarifesinde 3 zamanlı ve tek zamanlı, tek terimli ve çift terimli olacak şekilde farklılaşabilir. 3 zamanlı tarife zaman aralıkları aşağıdaki gibidir[14]:

- Gündüz (T1) 06:00-17:00
- Puant (T2) 17:00-22:00
- Gece (T3) 22:00-06:00

Bu zaman aralıklarında tüketilen elektriğin birim fiyatları ise mesken kullanıcıları için aşağıdaki gibidir:

- Gündüz (T1) 48,3646 kr
- Puant (T2) 82,5687 kr
- Gece (T3) 21,0117kr

Mesken kullanıcısı tek terimli, tek zamanlı elektrik tarifi için elektrik birim fiyatı ise 47,4253kr olarak fiyatlandırılmıştır.

Aktif enerji kullanımına ilaveten aşağıdaki gibi vergiler de faturaya eklenir.

- Dağıtım Bedeli birim fiyatı 26,5120kr,
- Enerji Fonu Bedeli %0,7,
- Elektrik Tüketim Vergisi Bedeli %5

Bunların hepsine toplandıktan sonra ilaveten %18 KDV eklenir ve müşterinin ödeyeceği fatura ortaya çıkar.

Biz çalışmada 3 zamanlı tarife kullanımını öngörülmüştür. Kasım 2021 itibariyle TRT Payı vergisinin kaldırılması sebebiyle bu kalem hesaplarda kullanılmayacaktır. Sonuç olarak Tablo 2.2'deki gibi birim fiyatlar ortaya çıkar.

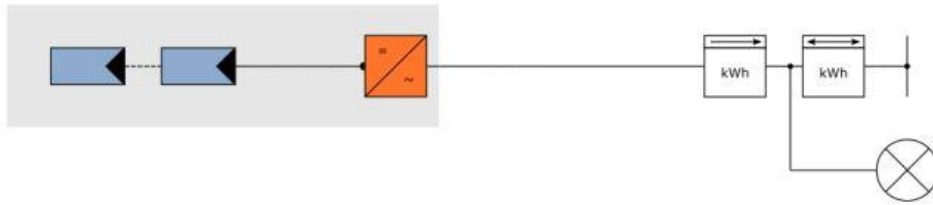
Tablo 2.2 Tek Terimli, 3 Zamanlı Mesken Tarifesi, EPDK 1 Temmuz 2021[14]

Tüm Vergiler Dahil Birim Fiyat (TL)	KDV	Elektrik Tüketim Vergisi Bedeli	Enerji Fonu Bedeli	Dağıtım Bedeli (TL)	Aktif Enerji Bedeli (TL)	Saatler	Kullanılan Aktif Enerji (kWh)
₺ 0,950804	18%	5%	0,70%	0,26512	₺ 0,483646	06-17	1
₺ 1,354412					₺ 0,825687	17-22	1
₺ 0,628040					₺ 0,210117	22-06	1

2.2 Bağlantı Topolojileri

2.2.1 Şebeke Entegre (Ongrid) GES Bağlantı Topolojisi

Şebeke entegre GES topolojisinde, mevcut bir şebeke hattı vardır ve PV panellerden üretilen elektrik inverter çıkışından sonra şebeke elektriğine bağlanır. Şebeke entegre inverterler, şebeke elektriğinin gerilim ve fazını ölçerek senkron şekilde üretim yaparlar[15]. Arada çift yönlü sayaçlar kullanılır. Bu sayaç sayesinde şebekeden alınan elektrik ve şebekeye satılan elektrik miktarı hesaplanarak mahsuplaşma yapılır ve yeni fatura oluşturulur. Tüketici, aldığından çok elektrik satışı yapmışsa bir sonraki ayın ortasında hakkettiği ödemeyi alır.

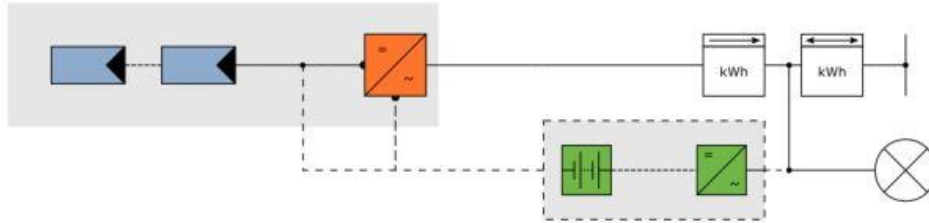


Şekil 2.3 Şebeke Entegre Bağlantı Yapısı

Şekil 2.3'teki gösterimde, solda mavi renkle çizilmiş kısım PV panelleri; turuncu renkle çizilmiş kısım ongrid inverteri; sağ altta yer alan daire sel gösterim ev yüklerini; onun üzerinde sağ kısımda yer alan dik düz çizgi, şebeke bağlantısını ve kWh ifadesi yazan gösterim de sayaçları temsil etmektedir.

2.2.2 Hibrit GES Bağlantı Topolojisi

Bu bağlantı yapısında, “şebeke entegre” yapıya ilave olarak batarya depolama sistemi dahil edilir. Hibrit bağlantı topolojisine, rüzgâr veya diğer enerji üretim metotları da eklenebilir fakat bu tez çalışmasında sadece güneşten üretim ve depolama sisteminin olduğu, şebekeye bağlı bir yapı kastedilmektedir.



Şekil 2.4 Hibrit Bağlantı Topolojisi

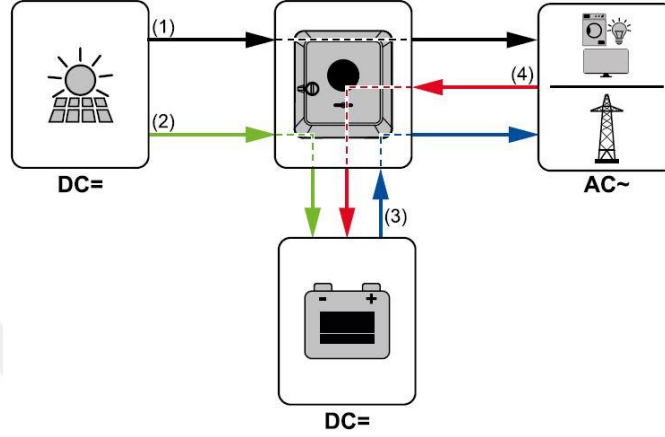
Şekil 2.4’teki gösterimde, solda mavi renkle çizilmiş kısım PV panelleri; turuncu renkle çizilmiş kısım ongrid inverteri; altta yeşil renkle çizilmiş kısım batarya depolama sistemini; sağ altta yer alan dairesel gösterim ev yüklerini; onun üzerinde, sağ kısımda yer alan dik düz çizgi, şebeke bağlantısını ve kWh ifadesi yazan gösterim de sayaçları temsil etmektedir.

Batarya depolamalı sistemlerde inverter DC barasına direkt bağlanabildiği gibi, inverter çıkışındaki AC baraya da bağlantısı yapılabilmektedir. Bu bağlantının ne şekilde yapılacağı seçilen ürünün teknik dökümanlarında belirtilir. Bu bilgilere bakarak uyumlu tercihler yapılmalıdır.

Hibrit topolojide, depolamanın getirdiği avantajlar özellikle elektrik kesintisi yaşandığında güneşten üretim varsa onun da kesilmesinin önüne geçilebilmesi, yani UPS gibi çalışma sağlanması, ayrıca yük kaydırmanın yapılabilmesidir. Yani güneşten üretilen fazla elektrik depolama sisteminde depolanır ve tüketimin yoğun olduğu saatlerde kullanılmak üzere saklanır. Bu sayede pahalı birim fiyattan elektrik tüketmekten kurtulmak mümkün olur. Buna karşın batarya kurulum maliyeti de yükselmektedir. Bu parametreleri gözетerek ideal nokta tespit edilmelidir.

2.3 Enerji Akışı ve Çalışma Modları

Bu tez çalışmasında “Fronius Symo Gen24” serisi inverter ve “BYD-HVS” serisi batarya modülleri ile sistem kurgulanmasına karar verildi. Kurulacak hibrit sistemde enerji akışları aşağıdaki görselde gösterildiği gibi mümkün olmaktadır. Bu akış yönleri ve TEDAŞ yönetmeliklerine uygun olarak algoritmamızda aşağıdaki çalışma modlarına sahip olacaktır.



Şekil 2.5 Hibrit Bağlantı Topolojisi

Şekil 2.5'teki 1 numaralı ok PV panellerden şebekeye ve iç tüketime doğru enerji akışını göstermektedir. 2 numaralı ok, PV panellerden batarya depolama sistemine doğru enerji akışını göstermektedir. 3 numaralı ok batarya depolama sisteminden iç tüketime ve şebekeye olan enerji akışını göstermektedir. 4 numaralı ok ise şebekeden bataryaya doğru enerji akışını göstermektedir.

2.3.1 Hibrit PV Çalışma Modları

Çalışma modları önceki bölümde ifade edildi. Bu ifadeleri, aşağıdaki [1] numaralı eşitlik ile matematiksel olarak yazmak mümkündür.

$$\sum_{t=0}^{24} P_{PV}(t) + \sum_{t=0}^{24} P_{dbat}(t) + \sum_{t=0}^{24} P_{im}(t) = \sum_{t=0}^{24} P_{load}(t) + \sum_{t=0}^{24} P_{cbat}(t) + \sum_{t=0}^{24} P_{ex}(t) \quad (1)$$

Bu denklem, anlık elektrik tüketiminin herhangi bir kaynaktan sürekli karşılanması gerektiğini göstermektedir ve algoritma bu varsayım üzerine kurulmuştur. Bu ifade üzerinden hareketle, algoritmanın çalışma modları aşağıdaki gibi belirtilebilir.

2.3.1.1 Mod 1

PV panel üretimi, anlık elektrik ihtiyacından fazla üretim yapması durumunda; batarya boş ($SOC < 1$) ve batarya maks şarj gücü aşılmıyorsa aşağıdaki enerji akışı gerçekleşecektir.

$$P_{PV}(t) = P_{Load}(t) + P_{Bat}(t) \quad (2)$$

2.3.1.2 Mod 2

PV panel üretimi, anlık elektrik ihtiyacından fazla üretim yapması durumunda; batarya boş ($SOC < 1$) ve batarya maks şarj gücü aşılmıyorsa; bir miktar enerji şebekeye de gönderilecektir. Anlık elektrik akışı aşağıdaki gibi gerçekleşecektir.

$$P_{PV}(t) = P_{Load}(t) + P_{Bat}(t) + P_{Grid}(t) \quad (3)$$

2.3.1.3 Mod 3

PV panel üretimi, anlık enerji ihtiyacından az üretim yapması durumunda; batarya boş değilken ($SOC > minSOC$) ve maks batarya deşarj gücü aradaki farkı karşılamaya yetiyorsa, anlık elektrik akışı aşağıdaki gibi gerçekleşecektir.

$$P_{PV}(t) + P_{Bat}(t) = P_{Load}(t) \quad (4)$$

2.3.1.4 Mod 4

PV panel üretiminin hiç olmadığı durumda; batarya boş değilken ($SOC > minSOC$) ve maksimum batarya deşarj gücü anlık enerji ihtiyacını karşılamaya yetmiyorsa, aradaki fark şebekeden karşılanacaktır. Bu durumda, anlık enerji akışı aşağıdaki gibi gerçekleşecektir.

$$P_{Grid}(t) + P_{Bat}(t) = P_{Load}(t) \quad (5)$$

2.3.1.5 Mod 5

PV panel üretiminin hiç olmadığı durumda; batarya boş ($SOC < minSOC$) ise anlık enerji ihtiyacı şebekeden karşılanır. Bu durumda anlık enerji akışı aşağıdaki gibi gerçekleşecektir.

$$P_{Grid}(t) = P_{Load}(t) \quad (6)$$

Bu tezin amacının sistemin ideal batarya sayısını ve PV panel sayısını bulmak olduğundan bahsetmiştik. Bu kısımda da benzer şekilde bu iki sistem bileşenine odaklanılacaktır.

3.1 PV Panel

Güneş ışınlarının etkisi altında kaldığında elektrik üretebilen hücrelere fotovoltaiik (PV) hücre, bu hücrelerin bir araya getirilmesiyle üretilen panellere de “PV Panel” denir[16].

Fotovoltaiik modüller birçok farklı firma ve laboratuvar tarafından üretilmektedir. Ayrıca birçok farklı güneş pili teknolojisi araştırılmakta ve satılmaktadır. Bu nedenle, tüm farklı güneş pilleri ve PV modüllerinin karşılaştırılmasına izin veren koşulların tanımlanması son derece önemlidir. Bu koşullar, 1000 Wm²'lik bir ışıma, AM1.5 spektrumu ve 25°C'lik bir hücre sıcaklığı ile karakterize edilen Standart Test Koşullarıdır (STC). Standart IEC 60904-3. Bu spektrum, yataya 37° eğimli, güneşe bakan bir düzlem yüzeyinde alınan güneş ışınımına dayanmaktadır. Hem doğrudan güneş ışığı hem dağınık güneş ışığı hem de hafif çıplak toprağın dalga boyuna bağlı albedosu dikkate alınmaktadır. Albedo, güneş radyasyonunun Dünya yüzeyinden yansıyan ve çevrenin yansıtıcılığına bağlı olan kısmıdır. AM1.5 spektrumunun toplam ışıması 1000 Wm²'dir ve bulutsuz bir günde dünya yüzeyinde alınan maksimuma yakındır. Hem STC hem de AM1.5 spektrumu, tüm dünyada hem endüstri hem de (test) laboratuvarlarında kullanılmaktadır. Bir PV modülü tarafından STC'de üretilen güç böylece birim “watt tepe noktası” (Wp) olarak ifade edilir.

3.1.1 PV Panellerin Tarihçesi

Güneşin enerjisinden elektrik formuyla faydalanma konusundaki çalışmalar 1800'lü yıllarda Faraday'a kadar uzanmaktadır. Fotovoltaiik etkiyi günümüzdeki haliyle ilk kullanan bilim insanı ise 1839 yılında Fransa'da gerçekleştirdiği çalışmayla Becquerel olmuştur[17]. 1953'e gelindiğinde kimyager Dan Trivich

tarafından farklı bant aralıklarına sahip malzemeler için ilk kez güneş pili performansı teorik hesaplamaları yapılmıştır. 1950'li yıllara kadar ticarileşmeyen bu teorik çalışmalar, nihayet Bell Laboratuvarlarında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından silisyumun pozitif ve negatif iyonlarla zenginleştirilmesi sonucu ticari ürün haline dönmüştür. Bu üretilen hücrenin verimliliği yaklaşık %6 civarındadır. Sonrasında PV teknoloji sayesinde güneş enerjisi, 1950'li yıllardan günümüze kadar en hızlı gelişen elektrik kaynağı olmayı başarmıştır[17].

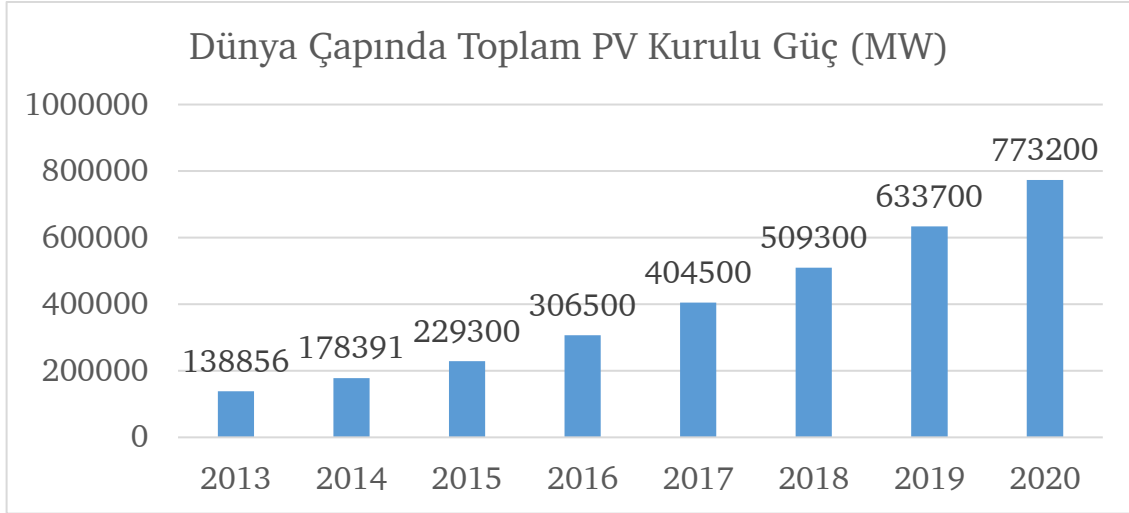


Şekil 3.1 Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller ve Gerald L. Pearson

1950'li yılların PV gelişimi için çok önemli olduğunu tekrar vurgulamak gerekir. D.C. Reynolds ve ekibinin, kadmiyum sülfürün (CdS) fotovoltaiik etkisi hakkında raporu da bu yıllarda yayınlanmıştır. 1950'lerin ortalarında ve sonlarında birkaç şirket ve laboratuvar, dünya yörüngesindeki uydulara güç sağlamak için silikon bazlı güneş pilleri geliştirmeye başlamıştır. Örneğin, 1958'de ABD donanması tarafından fırlatılan Amerikan uydusu "Vanguard 1", Hoffman Electronics'in ürettiği güneş pillerinden güç alıyordu. Dördüncü yapay dünya uydusuydu ve güneş pilleriyle çalışan ilk uyduydu.

1962'de Bell Telefon Laboratuvarları, ilk PV enerjili telekomünikasyon uydusunu fırlattı ve 1966'da NASA, 1 kW PV güneş dizisi ile çalışan ilk yörüngeli astronomik gözlem evi'ni başlattı. 1976'da Dave E. Carlson ve Chris R. Wronski, RCA Laboratuvarlarında amorf silikona dayalı ilk ince film fotovoltaiik cihazları geliştirdi. 1985 yılında, Avustralya'daki New South Wales Üniversitesi'nde %20'nin üzerinde verimliliğe sahip kristal silikon güneş pilleri gösterildi. İlk

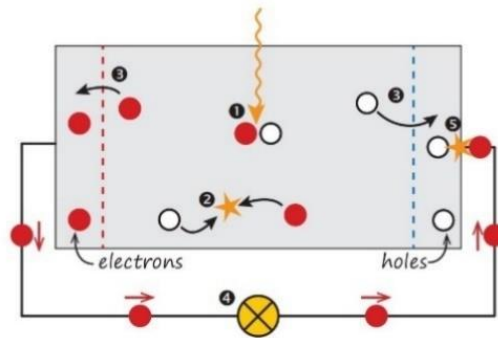
yüksek verimli boyaya duyarlı güneş pili, Michael Grätzel ve çalışma arkadaşları tarafından İsviçre'de “École Polytechnique Fédérale de Lausanne” tarafından yayınlandı. 1999 yılında, toplam küresel kurulu PV güç 1 GWp'yi geçti. 2012'de dünya çapındaki güneş enerjisi kapasitesi 100 GWp'lik müthiş bir noktaya ulaştı[18]. Bugünkü gelişimini ise Şekil 3.2'de görmek mümkündür[19].



Şekil 3.2 PV Kurulu Güç Grafiği

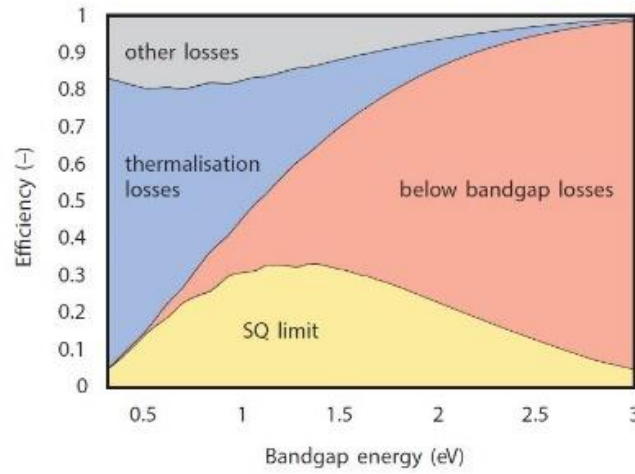
3.1.2 PV Paneller Nasıl Çalışır

Güneş pillerinin çalışma prensibi, fotovoltaiik etkiye, yani elektromanyetik radyasyona dayanır. Olay, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi elektromanyetik radyasyon etkisiyle ışığı emen bir malzemede, eşik frekansın aşılmasıyla elektron kopması şeklinde yaşanır. Fotovoltaiik etki, fotonun emilmesi, yük taşıyıcıların taşınması ve bağlantı terminallerinde elektronların toplanması şeklinde üç temel sürece ayrılabilir[16].



Şekil 3.3 Fotovoltaiik Etkide Elektronların Hareketleri

Shockley-Queisser SQ limiti, yarı iletken malzemesinin bant aralığına bağlı olarak tek eklemlili bir güneş pilinin maksimum verimliliğini tahmin etmeye yönelik termodinamik bir yaklaşımdır. Güneş pilinin sıcaklığının artmasına izin verilmez, fakat ortam sıcaklığının 300K'da tutulmasına çabalanır. Bu durum, güneş pili tarafından emilen tüm enerjinin, üretilen akım veya yük taşıyıcıların ışımsal yeniden birleşimi ile güneş pilinden kaçabileceği anlamına gelir. Bu varsayımlar altında verimlilik sınırı 1.0 eV ile 1.8 eV arasındaki bant aralığı aralığında yaklaşık %33'tür ve kayıplara ilişkin grafik Şekil 3.4'te görülebilmektedir.



Şekil 3.4 SQ Limiti ve Verimlilik

Şekil 3.3'teki grafikte yer alan başlıca kayıplar, bant aralığının altındaki absorbe edilmemiş fotonlar ve bant aralığının üzerindeki fotonların termal enerjileridir. Diğer kayıplar, termal radyasyon nedeniyle voltaj kaybından ve doluluk oranının %100'den farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

3.1.2.1 Fotonun Emilmesi

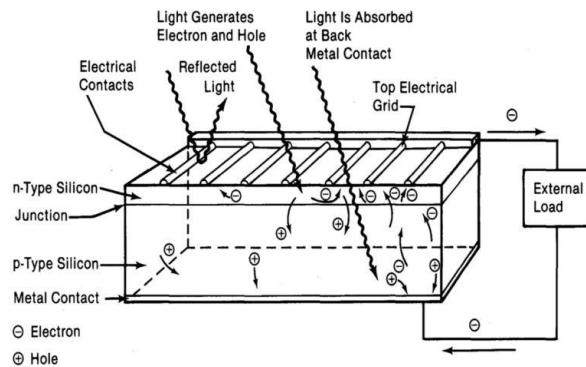
Fotonların enerjisi Silisyum bazlı hücrelerin temas yüzeyindeki “ E_i ” başlangıç enerji seviyesine sahip elektronların “ E_f ” bir üst enerji seviyesine çıkarılmasıyla bağı kopar. Fotonun enerjisi yeterli “ $E_f - E_i$ ” farkından küçükse, yani bir üst enerji seviyesine çıkaramıyorsa, serbest elektron soğurulmaz. Bir üst enerji seviyesine çıkan elektron serbest kaldığında, P-N yapısından kaynaklı oluşan elektrik alan etkisinde kalarak hareket etmeye başlar[17].

3.1.2.2 Yük Taşıyıcıların Taşınması

Fotonun etkisiyle bir üst enerji seviyesine çıkan elektronlar yeniden eski enerji seviyelerine ineceklerdir. Bunu ya foton yayarak ya titreşimle gerçekleştirirler. Öte yandan yarıiletken katmanların iki ucunu bir devreye bağlayarak elektronları o devre üzerinden akmasını sağlamak da mümkündür. PV hücrelerde bu yapılmaya çalışır ve burada devreyi tamamlaması için geçen sürenin elektronun ömründen kısa olması gereklidir. Bu sebeple, P ve N tipi yarı iletken katmanların kalınlığı doğru belirlenmelidir.

3.1.2.3 Bağlantı Noktası Terminallerinde Elektronların Toplanması

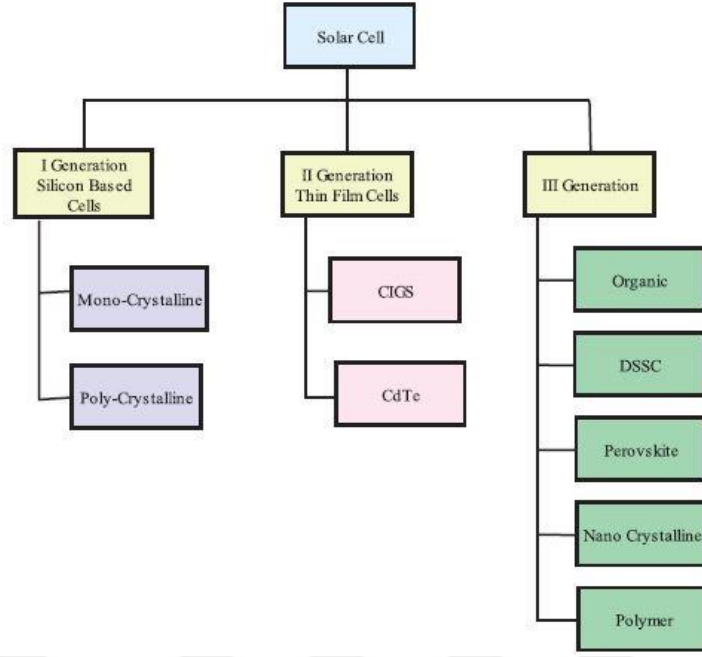
Kopan elektronlar bağlanılan dış devreyi tamamladıktan sonra geri dönerler ve pozitif yüklü davranış sergileyen boşluklara varıp yerleşirler. Bu şekilde devre tamamlanmış olur.



Şekil 3.5 Elektronların foton etkisinde kalarak hareketleri

3.1.3 PV Panellerin Türleri Nelerdir

İlk PV panel örneklerinin verimleri %1'ler mertebesindeyken daha sonra silikon, diyot ve transistörler kullanılarak verim, %4'lere kadar çıkarılabildiği [18]. Gelişmeler neticesinde fark edilmiştir ki, verimin artmasında seçilen malzemelerin önemi yüksektir. Bu durum beraberinde bir dizi yeni panel türleri ortaya çıkmasını hızlandırmıştır. Tüm bu panel türleri, literatürde 3 nesil altında sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Şekil 3.6'da görülebilmektedir.

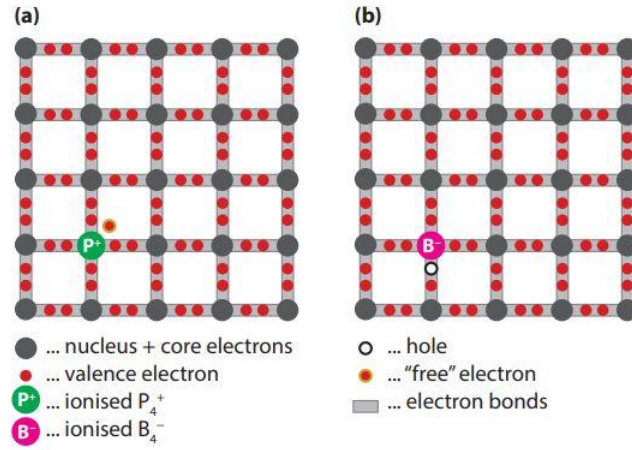


Şekil 3.6 Solar Panel Türleri ve Nesilleri[16]

Birinci nesil paneller orta verimli ve düşük maliyetli, tek silikon kristal yapısına sahip ürünlerdir. İkinci nesil panellerde, üretim tekniği olarak farklı yollara başvurulmuştur ve ince film paneller ortaya çıkmıştır. Bu panellerde, daha fazla katman vardır ve akım kayıpları düştüğü için verim artar. Üçüncü nesil panellerde ise nano gözenekli nano kristal malzemelerden üretilen hücreler vardır ve panelin elektrik üretim verimi daha da arttırılabilmektedir.

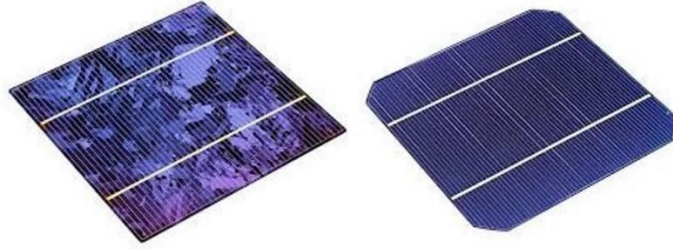
3.1.3.1 Birinci Nesil Paneller

Birinci nesil paneller, silikonun kolay bulunabilir olması, zehirli olmaması ve veriminin yüksek olması sebebiyle en çok tercih edilen ham madde olmuştur.



Şekil 3.7 Boron ve Fosfor Enjekte Edilmiş Silisyumun Elektron-Boşluk Yapısı

Czochralski üretim süreciyle elde edilen silikon wafer'lar, üretim sürecini pratikleştirmiştir. Temelde "Single/Mono kristal" ve "Poly/Multi" kristal hücre olarak ikiye ayrılırlar[20].



Şekil 3.8 Solda Polikristal sağda monokristal PV hücre

3.1.3.2 İkinci Nesil Paneller

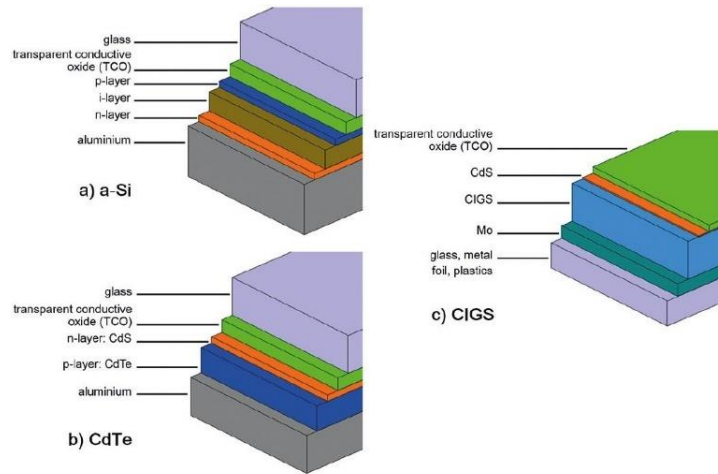
İkinci nesil güneş panelleri, cam metal plastik gibi çok katmanlı malzemelerin tabana yerleştirilmesiyle elde edilen ince film güneş panelleridir. Kullanılan örnek malzemelerin bazıları CIGS (Copper indium gallium selenide) ve CdTe (Cadmium Telluride) olarak gösterilebilir. Kristal güneş hücrelerine kıyaslandığında bazı avantajları vardır. Örneğin, Silisyumun kalınlığının düşürülmesi, alt tabakada daha uygun maliyetli çözümler üretilebilmesi ve tasarımda daha esnek olunabilmesi bu avantajların bazılarıdır.

- CIGS

Bakır, İndiyum, Galyum ve Selenyum (CIGS), dört bileşikten oluşan dörtlü bir yarı iletkenidir. Kadmiyum Telluride (CdTe) ince film güneş pili ile karşılaştırıldığında, CIGS yaklaşık %10-12 daha yüksek bir verime sahiptir. Yüksek verimliliği ve düşük maliyetli özelliği, CIGS tabanlı güneş pili teknolojisini en çok kullanılan ikinci nesil ince film güneş pillerinden biri haline getirdi.

- CdTe

Kadmiyum tellür (CdTe), bir p-tipi “II-VI” bileşik yarı iletkenidir ve diğer ince film fotovoltaiik teknolojilerine kıyasla en ucuz, en ekonomik güneş pili türlerinden biridir. CdTe'nin bant aralığı yaklaşık 1.5 eV'dir. Bu özellikler sebebiyle CdTe ince film güneş pilleri arasında geliştirilmeye en çekici malzemelerden biri haline gelmiştir. CdTe'nin ışık emme kapasitesi de yüksektir, dolayısıyla %9 ile %11 arasında verimliliğe ulaşabilir.



Şekil 3.9 İkinci Nesil PV hücrelerin yapısı

3.1.3.3 Üçüncü Nesil Paneller

Üçüncü nesil fotovoltaiik terimi, Shockley-Queisser (SQ) tek bant aralığı sınırını tercihen düşük bir maliyetle aşmayı amaçlayan tüm yeni yaklaşımları ifade eder. Tek eklemlili güneş pillerinde sadece bir bant aralığı malzemesi kullanılır. Bu nedenle, en enerjik fotonların enerjisinin büyük bir kısmı, ısı olarak kaybedilir. Yüksek bant aralığına sahip soğurucular kullanılırsa veya iletim bandında birden fazla uyarılmış elektron yaratılırsa, yüksek enerjili fotonların enerjisi daha iyi kullanılabilir. Daha yüksek ışınım, daha fazla akım üretimi ve ayrıca daha yüksek voltaj seviyeleri anlamına gelir, bu da daha yüksek bir genel verim ile sonuçlanır.

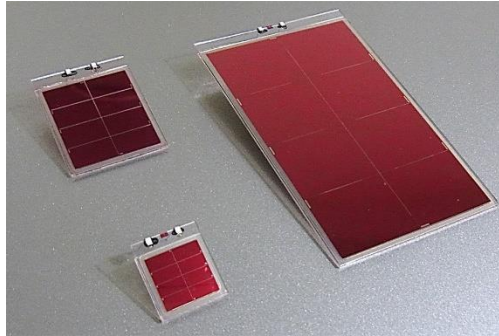
Üçüncü olarak, bant aralığının altındaki enerjilere sahip fotonlar emilmez. Bu nedenle, yük taşıyıcı uyarımı ile sonuçlanmazlar. Bu temel sınırlamalardan herhangi biri çözülebilirse, Shockley-Queisser sınırını aşan dönüşüm verimliliğine sahip PV kavramları geliştirilebilir. Bu kategori örneklerinden bazıları aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

- **Organik Hücreler**

Organik güneş hücreleri, ışığı emen ve elektrik üretebilen organik polimerlerden oluşmaktadırlar. Fotovoltaik etkiyi kullanabilen plastik güneş pili olarak da adlandırılırlar. OPV'ler, üretiminin basit olması, daha hafif, esnek ve ekonomik olmaları gibi avantajlara sahiptirler. Buna karşın verimleri daha düşüktür.

- **Dye-Sensitized Solar Hücre (DSSC)**

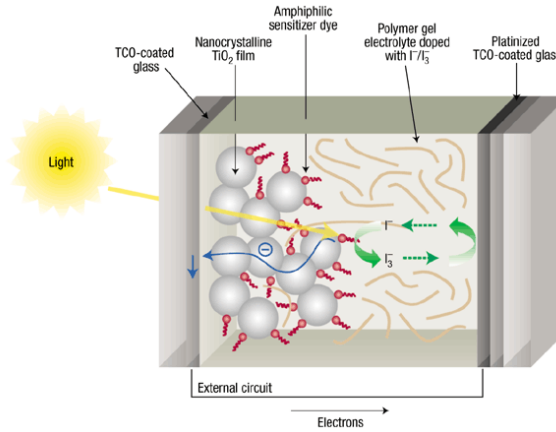
Boyaya Duyarlı Güneş Pili (DSSC), Michel Gratzel ve çalışma arkadaşları tarafından 1990'ların başında "İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü" nde tanıtılmıştır. Bu tip hücrelerde, elektrotlar arasında boya maddesi kullanılır. Bu teknik ekonomiktir ancak yakın kızılötesi bölgede düşük dönüştürme verimliliği sebebiyle zayıf optik emme özelliğine sahiptir. Üzerinde demir ve titanyum bazlı malzemelerle yeni üretim teknikleri denenmekte ve verimi arttırılmaya çalışılmaktadır. Bazı örnekleri Şekil 3.10'da görülebilmektedir.



Şekil 3.10 DSSC PV panel

- **Nanokristal Solar Hücre**

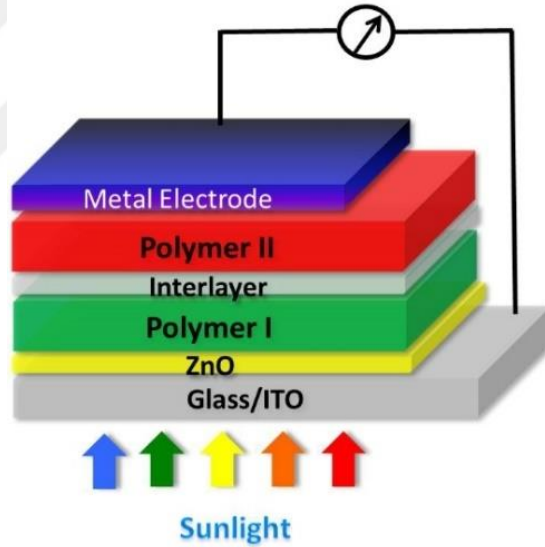
Bu hücreler, substrat üzerinde bir nanokristal tabaka yaratılarak oluşturulurlar. Substrat, silikon veya organik bazlı malzeme olabilir. Güneş panellerinin verimini arttıran kirliliği azaltan ve maliyeti düşüren bir teknik olsa da henüz seri üretime uygun olmaması sebebiyle yaygın değildir.



Şekil 3.11 Nanokristal PV Yapısı

- Polimer Solar Hücree

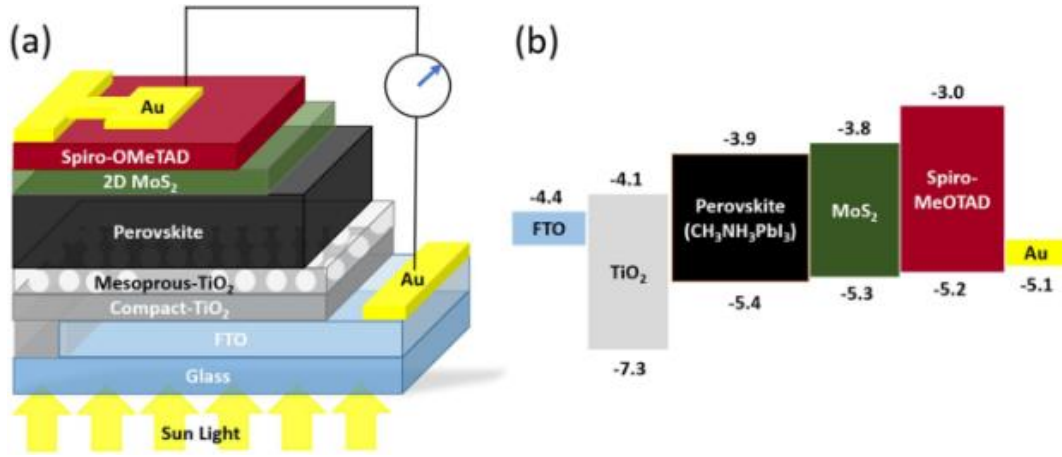
Polimer bazlı malzemelerin son yıllarda PV hücrelerde kullanımı artmaktadır ve bu alanda yeni polimerler incelenmektedir. Bu tip hücreler daha yüksek işleme kabiliyetine ve düşük malzeme maliyetine sahiptirler.



Şekil 3.12 Tandem Polymer Solar Hücree

- Perovskite Solar Hücree

Perovskite PV, hücre geliştirmede gelecek vadeden bir teknolojidir. Perovskiteler ABX₃ formülüyle temsil edilen bileşik sınıflarıdır. PV hücrelerde verimin artırılmasında farklı polimer hücrelerle hibrit paneller tasarlanmış ve daha yüksek ışık emme özellikleri gözlenmiştir. Bu da panellerde verimi artırıcı etkiler göstermektedir.

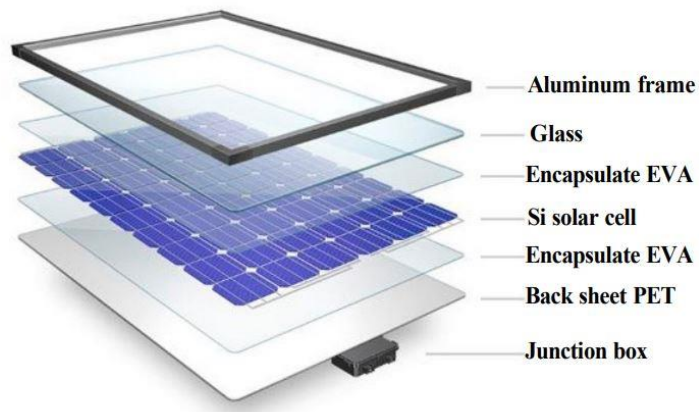


Şekil 3.13 Perovskite Paneller

3.1.4 PV Panellerin Fiziksel Yapısı

Genel olarak tüm panellerde ortak olan özellik yarı iletken bileşiklerden oluşmalarıdır. Silisyumun yarı iletken olarak en çok tercih edilen element olduğunu ve piyasada satılan paneller arasında dominant olduğunu değerlendirerek bu makalede silisyum bazlı mono kristal PV paneller üzerinde inceleme yapılacaktır.

Mono kristal PV hücrelerden panel üretiminde de bir dizi süreç vardır ve uzun ömürlü kullanılabilmesi, çevresel koşullardan en az derecede olumsuz etkilenmesi için dayanıklı hale getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçlar doğrultusunda üretilen panel yapısı Şekil 3.14'teki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.14 PV Panel Katmanları

3.1.4.1 PV Panel Üretimini Etkileyen Faktörler

- Solar Radyasyon

Solar radyasyon miktarı artışıyla panellerdeki yarı iletkenlerde çok daha fazla elektron koparılabilir ve elektrik üretimi artışı gözlenir[16]

- **Sıcaklık**

PV panellerin çalışabileceği optimum sıcaklık vardır. STC (Standart Test Condition) olarak teknik döküman üzerinde belirtilirler. Bu sıcaklığın üzerine çıkıldıkça “Ki” katsayısı etkisinde, panelin elektrik üretiminde bir düşüş yaşanır.

- **Rüzgar**

Rüzgarlar panellerin yüzeyindeki sıcaklığı düşürerek elektrik üretimine pozitif etki gösterirler.

- **Gölgelenme**

Üretilen panellerde solar hücreler genellikle seri bağlıdır. Fakat aralarda belirlenen sayılarda bypass diyotları bulunur. Panellerdeki seri bağlı olan hücrelerin birine gölge düşerse, o seriden elektrik çıkışı alınamaz. Bütün panelin verimini kaybetmemek için bypass diyotları kullanılır. Panelde yerleştirilmiş 3 bypass diyotu, 3 bağımsız grup gibi çalışmasına olanak tanır. Gölge düşen bir grup olursa diğer grupların üretimi, bypass diyot üzerinden devam edebilir.

- **Panel Yüzeyindeki Yansıma**

Panellerin yüzeylerindeki cam katman gelen ışığın bir kısmının yansımaya sebep olmaktadır ve bu yansıyan ışınım kayıp olarak değerlendirilir. Buradaki yansımada panel yüzeyindeki malzeme ve panelin güneşe hangi açıyla konumlandırıldığı önemlidir.

- **İklim ve Hava Koşulları**

Havanın bulutlu veya sisli olması gibi durumlarda panellere erişen foton miktarında azalma olur ve bu sebeple üretimi olumsuz yönde etkiler.

3.1.5 PV Panel Matematik Denklemleri

PV panelleri farklı yarı iletken teknolojilerinden üretilebilen ve güneş ışınımla orantılı olarak elektrik enerjisi üreten bir teknolojik üründür. Bu üretilen elektriğin matematiksel formülleri aşağıdaki gibi görülebilir.

$$P_{av.c} = FF(t) \cdot V_{oc}(t) I_{sc}(t) \quad (7)$$

$P_{av.c}$: Dizi çıkış gücü, $FF(t)$: Hücre doluluk oranı, $V_{oc}(t)$: Açık devre gerilimi, $I_{sc}(t)$: Kısa devre akımı ifadelerini temsil eder[20].

$$V_{oc}(t) = V_{oc.STC} + K_v(T_c(t) - 25) \quad (8)$$

$$I_{sc}(t) = I_{sc.STC} + K_i(T_c(t) - 25) \frac{G_T(t)}{1000} \quad (9)$$

$I_{sc.STC}$: Standart test koşullarındaki kısa devre akımı, $V_{oc.STC}$: Standart test koşulları altındaki açık devre gerilimi, K_v : Gerilim – sıcaklık düşümü katsayısı, K_i : Akım – sıcaklık düşümü katsayısı, $T_c(t)$: PV hücre sıcaklığı ifadelerini temsil eder[20].

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800} G_T(t) \quad (10)$$

$G_T(t)$: Solar radyasyon, $T_a(t)$: Çevre sıcaklığı ifadelerini temsil eder[20].

$$P_{av.pv}(t) = P_{av.c}(t) N_{c.p} N_{s.p} N_{p.p} \quad (11)$$

$N_{c.p}$: PV paneldeki hücre sayısı, $N_{s.p}$: Sistemdeki seri bağlı panel sayısı, $N_{p.p}$: Sistemdeki paralel bağlı panel sayısı $P_{av.pv}$: Sistemin toplam PV gücü ifadelerini temsil eder.

$$P_{disp.pv}(t) \leq P_{av.pv}(t) \quad (12)$$

$P_{disp.pv}(t)$: Sistemden aktarılan güç ifadesini temsil eder.

12 numaralı denklemde, sistemde kayıplar sebebiyle hiçbir zaman çıkış gücünün hesaplanan teorik güçten daha yüksek olamayacağını belirtmektedir. Paneller ile inverter arasında çekilmiş olan kabloların direnci olması ve solar inverterin çalışma verimi sebebiyle bu kayıplar yaşanmaktadır.

PV Panel matematik modelinde güneşlenme katsayısı G_T ile gösterilmiştir ve saatlik güneşlenme değerleri kullanılmıştır. Yani G_T matrisi 24x1 büyüklüğünde bir matristir. Diğer katsayılar skaler yapıdadırlar ve bu işlemler sonucunda ortaya

24x1 büyüklüğünde, birer saatlik elektrik üretim değerini gösteren matris çıkacaktır.

3.2 Güneşlenme ve Solar Radyasyon

Bir metal parçası ısıtılırsa, önce kırmızımsı bir renkte parlamaya başlar, daha sonra sıcaklığı daha da artırdıkça sararmaya başlar. Böylece termal radyasyon denen elektromanyetik radyasyon yayar. Bu fenomeni teorik olarak anlamak ve yayılan spektrumunu doğru bir şekilde tahmin etmek, 19. yüzyılın sonlarında fiziğin en önemli konularından biri olmuştur. Termal radyasyonu tartışmak için kara cisim kavramı önemlidir. Doğada bulunmayan bir kara cisim, dalga boyuna ve geliş açısına bakılmaksızın üzerine gelen tüm radyasyonu emer. Bu nedenle yansıtıcılığı 0'dır. Tabii ki, aynı zamanda denge sıcaklığına göre de ışık yayacağından, göze siyah görünmesine gerek yoktur. 1896'da Wilhelm Wien, spektral kara cisim parlaklığı için ampirik bir ifade önermiştir.

$$L_{e\lambda}^W(\lambda; T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (13)$$

λ : Işığın dalga boyu, T : Sıcaklık ifadelerini temsil eder.

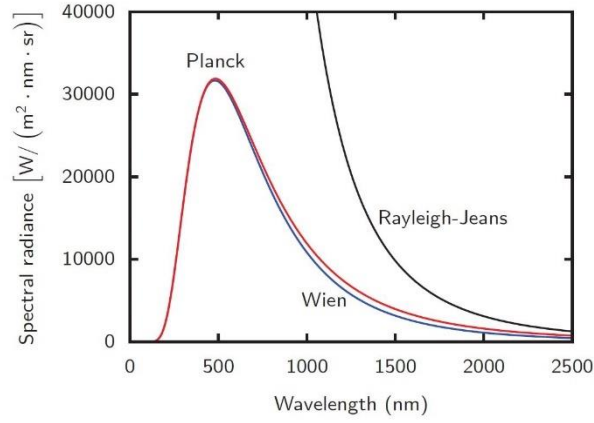
1900'de Max Planck, Wien yaklaşımı ile Rayleigh-Jeans yasası arasında enterpolasyon yapan bir denklem bulmuştur. Bu denklemlerin ne kadar yakın sonuçlar verdiği Şekil 3.15'teki grafikte görülebilir.

$$L_{ev}^{BB}(\nu; T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad (14)$$

$c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s. (ışığın boşluktaki hızı)

$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ m²kg/s. (Plank sabiti)

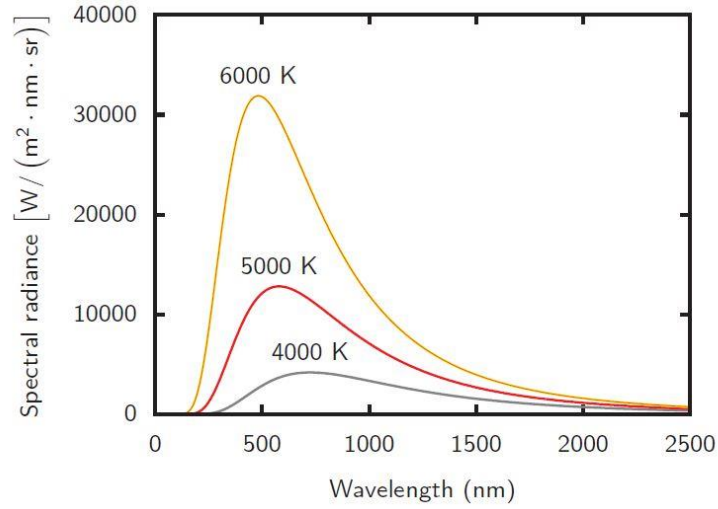
$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K. (Boltzmann sabiti) ifadelerini gösterir.



Şekil 3.15 6000°K Sıcaklıktaki Karacismin Dalgaboyu-Radyasyon Spektrumu

Güneş'in yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000°K'dir. Mükemmel bir kara cisim var olsaydı, denklemlerde tanımlandığı gibi bir spektrum yayardı.

Diğer önemli keşif de maksimum parlaklığın dalga boyunun sıcaklıkla ters orantılı olduğunu belirten Wien'in yer değiştirme yasası olmuştur.

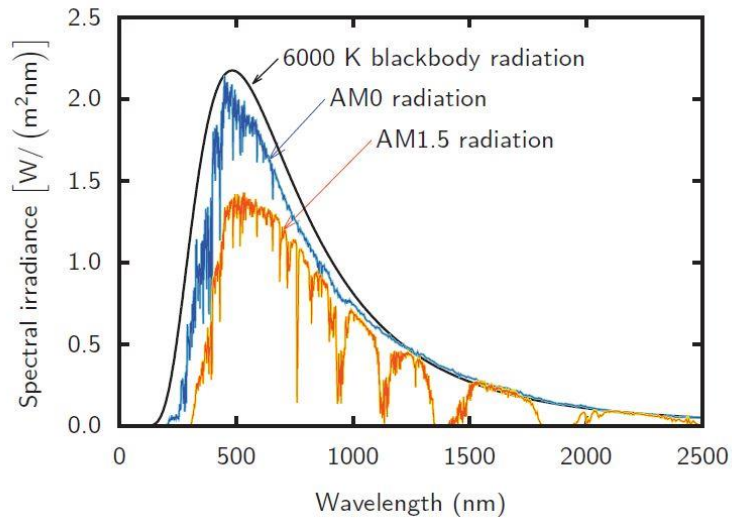


Şekil 3.16 Dalgaboyu Sıcaklık İlişkisi

Güneş'in boyutuna ve konumuna sahip bir kara cismin dünya üzerinde sahip olacağı spektral ışımayı hesaplamak için, tayfsal ışımayı, Güneş'in Dünya'dan görülen katı açısıyla çarpmamız gerekir. Dünya atmosferinin dışındaki spektrum AM0 spektrumu olarak adlandırılır.

Güneş radyasyonu, dünya atmosferinden geçtiğinde zayıflar. Açık gökyüzü koşullarında güneş ışımasını belirleyen en önemli parametre, güneş ışığının atmosferde kat etmesi gereken mesafedir. Bu mesafe, güneş zirvedeyken, yani

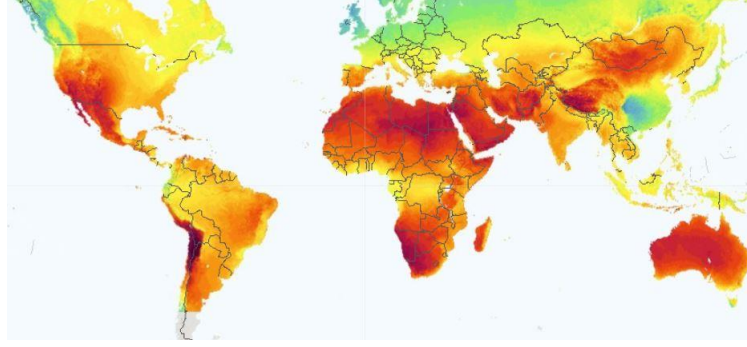
doğrudan tepedeyken en kısa mesafededir. Güneş ışığının gerçek bir yol uzunluğunun bu minimum mesafeye oranı, optik hava kütlesi olarak bilinir. Güneş zirvesindeyken optik hava kütlesi 1'dir ve tayf hava kütlesi 1 (AM1) tayfı olarak adlandırılır. Güneş, ufkun 30° üzerindeyken, bir AM2 spektrumu alınır. Dünya üzerindeki konumuna ve güneşin gökyüzündeki konumuna bağlı olarak, karasal güneş radyasyonu hem yoğunluk hem de spektral dağılım açısından değişir. Güneş radyasyonunun zayıflaması, atmosferdeki hava molekülleri, toz parçacıkları ve/veya aerosoller tarafından saçılma ve absorpsiyondan kaynaklanır.



Şekil 3.17 AM0 Spektrumu ve AM1 Spektrumu

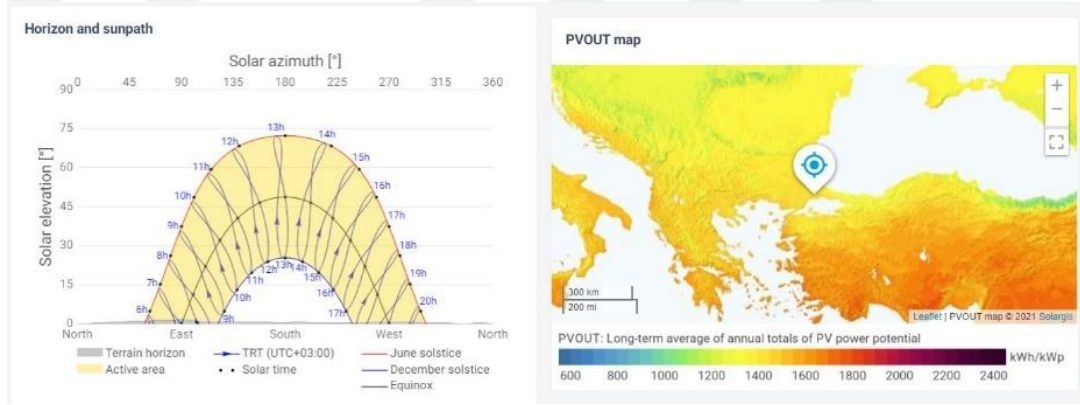
Dünya, geometrik yapısı ve güneş yörüngesindeki hareketi sebebiyle, yılın 365 günü ve 24 saati farklı açılardan güneş alır veya karanlıkta kalabilir. Ayrıca coğrafik koşullar da güneşlenmeyi etkileyebilmektedir. Yüksek dağların yamacındaki yerleşim yerlerinde, güneş ışınlarının gelmesi beklenen saatlerde gelemeyebilir. Şehir merkezleri özelinde de buna benzer bir duruma yüksek yapılar sebep olabilmektedir.

Kurulacak olan dağıtık enerji santralinin bulunduğu bölge koordinatlarını bularak o bölgenin bir yıl boyunca saatlik olarak ne kadar güneş ışınımına maruz kaldığını bulmak mümkündür. Bu konuda online ve ücretsiz bir şekilde web adresinden faydalanmak mümkündür.



Şekil 3.18 Globalsolaratlas Arayüzünden Bir Kesit

Bulunan solar radyasyon veya güneş ışıınım değerleri üzerinden panellerin üretebileceği elektrik miktarını hesaplamak mümkün olacaktır. Diğer bir deyişle bu hesabı yapabilmek için güneşlenme değerine saatlik olarak ihtiyaç vardır.



Şekil 3.19 Çalışılacak Lokasyonun Güneşlenme Verileri

Bu çalışmada Tekirdağ, Çorlu ilçesinde bulunan 41.19 kuzey paraleli ve 27.77 doğu meridyeni koordinatlarına sahip bölgenin 21 Mart güneşlenme verileri kullanılmıştır. Bu verilerin görselleştirilmesi Şekil 3.19’da mevcuttur.

3.3 Batarya

Piller, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Tek kullanımlık veya çok kullanımlık olarak pilleri sınıflandırmak mümkündür. Tek kullanımlık piller, kimyasal enerjiyi geri dönüşümsüz olarak elektrik enerjisine dönüştürür. Örneğin çinko karbon ve alkalın piller tek kullanımlık pillerdir. Çok kullanımlık piller veya yeniden şarj edilebilir piller, kimyasal enerjiyi geri dönüşümlü olarak elektrik enerjisine dönüştürür. Yani fazla elektrik enerjisi bu ikincil pillerde kimyasal enerji şeklinde depolanır. Şarj edilebilir piller için tipik

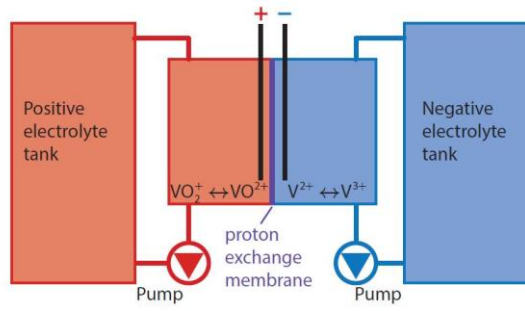
örnekler kurşun asit veya lityum iyon pillerdir. PV sistemleri için yeniden şarj edilebilir pillerin kullanılması daha uygundur.

3.3.1 Batarya Tarihçe

Kurşun asitli piller, mevcut en eski teknolojidir. Diğer örnekler nikel-metal hidrit (NiMH) ve nikel kadmiyum (NiCd) pillerdir. NiMH piller, lityum iyon pillerinkiyle karşılaştırılabilir olan yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, NiMH piller yüksek self deşarj özelliklerinden dolayı tercih edilmezler. Öte yandan NiCd piller, lityum iyon pillerden çok daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca, kadmiyumun zehirli olması sebebiyle NiCd piller Avrupa Birliği'nde tüketici kullanımı için geniş çapta yasaklanmıştır. Ek olarak, NiCd piller bellek etkisi sebebiyle de tercih sebebi değildir. Piller, yalnızca kısmen deşarj olduktan sonra tekrar tekrar şarj edilirlse, kullanılabilir enerji kapasitelerini kaybederler, bu durum bellek etkisi olarak isimlendirilir. Bu dezavantajlar, NiMH ve NiCd pilleri PV depolama sistemleri için uygun olmayan seçenekler haline getirir.

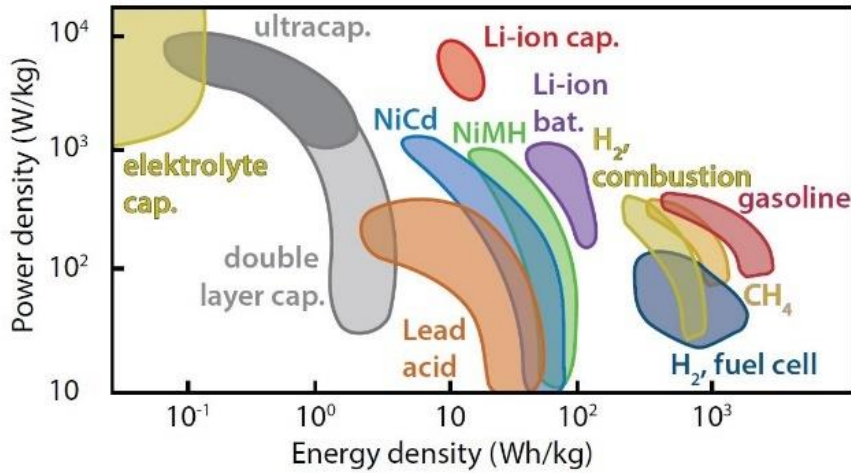
Genellikle lityum polimer (LiPo) piller olarak adlandırılan lityum iyon piller (LIB) ve lityum iyon polimer piller son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Yüksek enerji yoğunlukları, onları halihazırda örneğin cep telefonlarında hafif depolama uygulamaları için en sevilen teknoloji haline getirdi. Buna karşın, bu teknolojiler hala yüksek maliyetli ve tam olgunlaşmamış teknolojilerdir. Diğer bir pil teknolojisi ise en yeni pil teknolojilerinden biri olan redoks akışlı pillerdir. Kurşun-asit pillerin ve Lityum bazlı pillerin elektrotları zamanla bozulur ve pil kaçınılmaz olarak yaşlanır.

Buna karşılık, redoks akışlı piller hem pillerin hem de yakıt hücrelerinin özelliklerini birleştirir. İki sıvı, bir pozitif elektrolit ve bir negatif elektrolit, yalnızca protonlar için geçirgen olan bir zar tarafından bir araya getirilir. Böylece hücre, prensipte sıvıların yaşlanmasını önleyen reaktanlar karıştırılmadan doldurulabilir ve boşaltılabilir. Çalışma yapısı Şekil 3.20'de incelenebilir.



Şekil 3.20 Redoks Akışlı Batarya Yapısı

Redoks akışlı bataryadaki kimyasal enerji, iki ayrı tankta depolanan 2 elektrolitinde depolanır. Tankları büyütmek kolay olduğu için, böyle bir bataryada depolanabilecek maksimum enerji kısıtlanmaz. Ayrıca, maksimum çıkış gücü, örneğin aynı anda daha fazla hücre kullanılarak, zarın alanı artırılarak kolaylıkla artırılabilir. Başlıca dezavantajları, böyle bir pil sisteminin, pompalar gibi ek bileşenler gerektirmesidir, bu da onları diğer pil türlerinden daha karmaşık hale getirir.

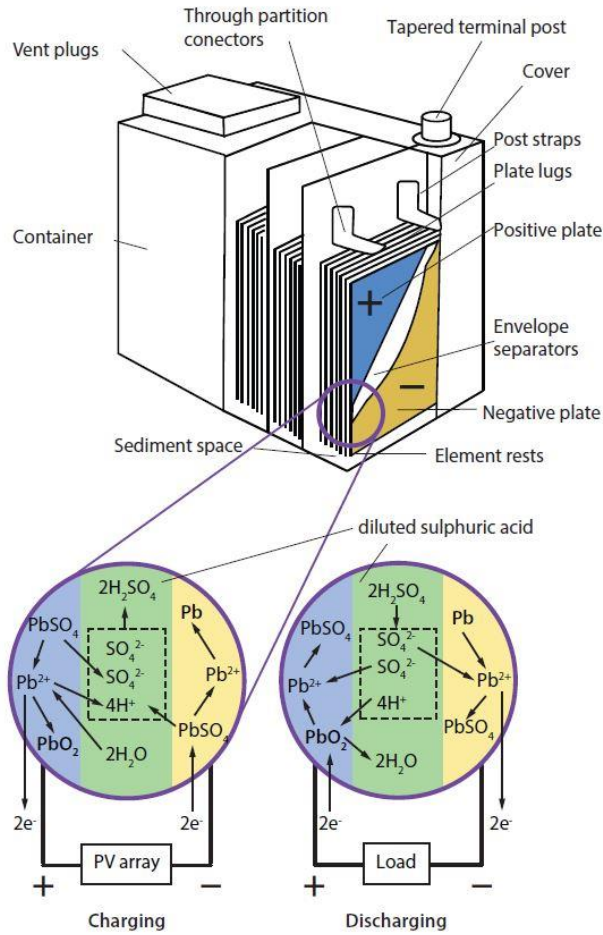


Şekil 3.21 Enerji Yoğunluğu Grafiği

Şekil 3.21’de, kurşun asitli pillerin, farklı pil teknolojileri arasında en düşük enerji yoğunluklarına sahip olduğunu göstermektedir. Lityum iyon piller, onları depolama aygıtı olarak kullanmak için ideal malzeme özellikleri gösterir. Redoks akışlı piller çok umut vericidir. Bununla birlikte hem LIB hem de redoks akışlı piller, bu teknolojileri hala çok pahalı hale getiren bir geliştirme aşamasındadır. Bu nedenle, kurşun-asit akülerin benzersiz olgunluğu ve dolayısıyla düşük maliyeti nedeniyle, PV sistemleri için hala tercih edilen depolama teknolojisidir.

3.3.2 Bataryalar Nasıl Çalışır

Şekil 3.22, bir kurşun-asit akünün taslağını göstermektedir. Tipik bir pil, her biri 2 V civarında bir nominal hücre voltajına sahip olan birkaç ayrı hücreden oluşur. Farklı montaj yöntemleri kullanılır. Blok düzeneğinde, bireysel hücreler mahfazayı paylaşır ve dahili olarak birbirine bağlanır.



Şekil 3.22 Kurşun Asit Pil Yapısı

12 V'luk tipik akü voltajını elde etmek için altı hücre seri olarak bağlanır. Adından da anlaşılacağı gibi, kurşun asitli piller asidik bir elektrolit yani seyreltilmiş sülfürik asit H_2SO_4 kullanır. Elektrot olarak işlev gören elektrolit çözeltisine iki zıt kutuplu plaka yerleştirilir. Elektrotlar, ızgara şeklinde kurşun taşıyıcı ve gözenekli aktif malzeme içerir. Bu gözenekli aktif malzeme, elektrokimyasal reaksiyon için yeterli yüzey alanı sağlayan sünger benzeri bir yapıya sahiptir. Negatif elektrottaki aktif kütle kurşundur (Pb), pozitif elektrotta ise kurşun dioksit (PbO_2) kullanılır. Şekilde ayrıca pili şarj etme ve boşaltma kimyası da

gösterilmektedir. Pil boşaldığında, elektronlar harici bir devre aracılığıyla negatif elektrottan pozitif elektrotta akar ve plakalar ile elektrolit arasında kimyasal bir reaksiyona neden olur. Bu ileri reaksiyon ayrıca elektroliti tüketerek şarj durumunu (SOC) etkiler. Aküye gerçek akü voltajından daha yüksek voltajlı bir kaynak bağlandığında, ters reaksiyon etkinleştirilir. Ardından elektron akışı tersine çevrilir ve pil yeniden şarj edilir.

3.3.3 Batarya Türleri Nelerdir

- Kurşun asit (Sıvı Elektrolit)
- Kuru Tip (Gel)
- Closed (AGM) (AGM: absorbant glass mat)
- Lityum-İyon
- Lityum Demir-Fosfat (LiFePO₄)

3.3.4 Batarya Parametreleri

- Gerilim

Bataryanın çalışacağı anma gerilimidir. Bataryanın doluluk oranıyla gerilimi arasında doğru orantı vardır. Şarj deşarj süreçlerinde bataryanın o anki gerilimine göre bataryanın sağlığı için devre kapatılabilir veya açılabilir.

- Kapasite

Pik kapasitesi terimi, pilin nominal voltajda sunabileceği şarj miktarını ifade eder. Kapasite, pildeki elektrot malzemesi miktarı ile doğru orantılıdır. Bu, hücre boyunca açık devre voltajının her iki hücre için aynı olmasına rağmen, küçük bir hücrenin aynı kimyaya dayanan büyük bir hücreden neden daha düşük bir kapasiteye sahip olduğunu açıklar. Böylece hücrenin voltajı daha çok kimyaya dayalıdır, kapasite ise daha çok kullanılan aktif maddelerin miktarına bağlıdır. Kapasite C_{bat} , amper-saat (Ah) cinsinden ölçülür. Yük, genellikle coulomb (C) cinsinden ölçülmektedir. Elektrik akımı, elektrik yükünün akış hızı olarak tanımlandığından, Ah başka bir yük birimidir. $1C=1As$ (amper saniye) olduğundan, $1Ah=3600C$. Piller için Ah daha uygun birimdir, çünkü elektrik alanında enerji miktarı genellikle watt-saat (Wh) olarak ölçülür. Bir pilin enerji

kapasitesi, volt cinsinden ölçülen nominal pil voltajının Amp-saat cinsinden ölçülen pil kapasitesiyle çarpılmasıyla verilir; bu, pilin enerji kapasitesini watt-saat olarak verir.

$$E_{bat} = C_{bat}V \quad (15)$$

- C-Oranı

Teorik olarak 10 Ah kapasiteli bir akü, oda sıcaklığında 10 saat boyunca 1 A akım verebilmektedir. Bu nedenle, pilin kapasitesine göre boşalma hızının bir ölçüsü olan C oranı kullanılır. Akünün bir saatten fazla dayanabileceği deşarj akımının katları olarak tanımlanır. Örneğin, 10 Ah akü için 1'lik bir C oranı, 1 saatte 10 A'lık bir deşarj akımına karşılık gelir. Aynı pil için 2'lik bir C oranı, yarım saatte 20 A'lık bir deşarj akımına karşılık gelir. Benzer şekilde, 0,5'lik bir C oranı, 2 saat boyunca 5 A'lık bir deşarj akımı anlamına gelir. Genel olarak, n'lik bir C-oranının, pil kapasitesinden bağımsız olarak pilin 1/n saatte tamamen boşalmasına karşılık geldiği söylenebilir.

- Pil Verimliliği

Depolama sistemleri için, genellikle toplam depolama çıktısının toplam depolama girdisine oranı olarak verilen gidiş-dönüş verimliliği kullanılır.

$$\eta_{bat} = E_{out}/E_{in} \quad (16)$$

Örneğin, şarj sırasında depolama sistemine 10 kWh pompalanıyorsa, ancak boşaltma sırasında sadece 8 kWh geri alınabiliyorsa, depolama sisteminin gidiş-dönüş verimliliği %80'dir. Pillerin gidiş-dönüş verimliliği iki etkinliğe bölünebilir: ilki, ortalama deşarj voltajının ortalama şarj voltajına oranı olan voltaik verimlilik.

$$\eta_V = V_{disc}/V_{charge} \quad (17)$$

Bu verimlilik, aküde ters kimyasal (şarj) reaksiyonunu sürdürmek için şarj voltajının her zaman nominal voltajın biraz üzerinde olmasını kapsar. İkinci olarak, aküden çıkarılan toplam şarjın, tam şarj döngüsü boyunca aküye konan toplam şarja oranı olarak tanımlanan kulombik verim (veya Faraday verimliliği) var.

$$\eta_c = Q_{disc}/Q_{cahrge} \quad (18)$$

Pil verimliliği daha sonra bu iki verimliliğin ürünü olarak tanımlanır.

$$\eta_{Bat} = \eta_v \eta_c = (V_{disc}/V_{cahrge})(Q_{disc}/Q_{cahrge}) \quad (19)$$

Farklı depolama aygıtlarını karşılaştırırken, genellikle bu gidiş-dönüş verimliliği dikkate alınır. Pilde meydana gelen farklı kimyasal ve elektriksel idealsizliklerin tüm etkilerini içerir

- SOC (Şarj Durumu) ve DOD (Deşarj Derinliği)

SOC, Bataryanın kullanılabilir şarj durumunu yüzdelik olarak ifade eder.

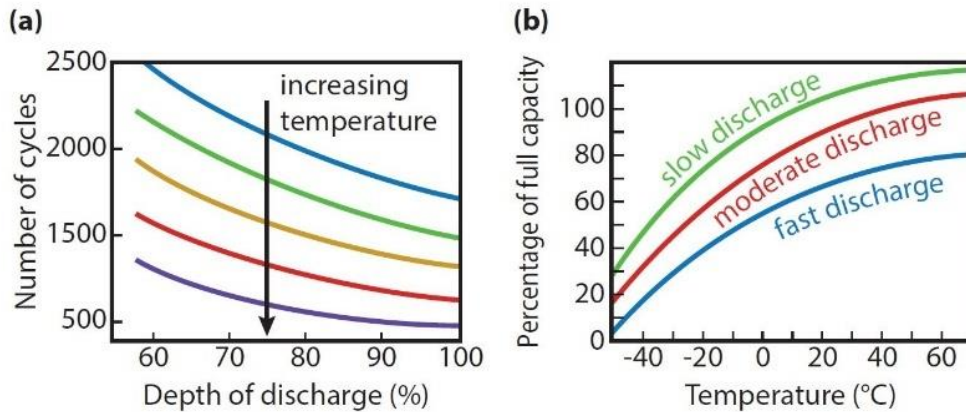
$$SOC = E_{bat}/C_{bat}V \quad (20)$$

DOD ise pilin boşluğunun yüzdesel ifadesidir. SOC ve DOD toplamı %100 olmalıdır.

$$DOD = (C_{bat}V - E_{bat})/C_{bat}V \quad (21)$$

- Şarj-Deşarj Döngü Ömrü

Döngü ömrü, pil kapasitesinin nominal değerin %80'inin altına düşmesinden sonraki şarj ve deşarj döngülerinin sayısı olarak tanımlanır. Genellikle döngü ömrü, pil üreticisi tarafından mutlak bir sayı olarak belirtilir.



Şekil 3.22 Döngü Ömrünün Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 3.22, farklı sıcaklıklar için DOD'nin bir fonksiyonu olarak çevrim ömrünü gösterir. Açıkça, daha düşük çalışma sıcaklıkları, daha uzun çevrim ömürleri

anlamına gelir. Ayrıca, çevrim ömrü büyük ölçüde DOD'ye bağlıdır. DOD ne kadar küçükse, çevrim ömrü o kadar yüksek olur. Böylece, pil ömrü boyunca ortalama DOD azaltılabilirse, pil daha uzun süre dayanacaktır.

- Yaşlanma

Pilin yaşlanmasının en büyük nedeni sülfatlanmadır. Pil deşarj olduktan sonra yetersiz şarj edilirse, tamamen kurşun veya kurşun okside dönüştürülemeyen sülfat kristalleri büyümeye başlar. Böylece pil, aktif madde kütlesini ve dolayısıyla deşarj kapasitesini yavaş yavaş kaybeder. Elektrottaki kurşun ızgarasının korozyonu, başka bir yaygın yaşlanma mekanizmasıdır. Kurşun-asit piller söz konusu olduğunda, antimon zehirlenmesi, hızlandırılmış yaşlanmanın başlıca nedenidir. Farklı kimyasal bileşimlere sahip pillerin de kimyasal süreçlerinde benzer olaylar yaşanır ve sonuç olarak pilin kullanılabilir kapasitesinde düşüş yaşanır.

3.3.5 Batarya Matematik Modeli

$$SOC(t + 1) = SOC(t) \pm \left(\frac{P_{bat}}{E_{bat}} \right) \quad (22)$$

SOC(t): Bataryanın t anındaki doluluk oranı (%), SOC(t+1): Bataryanın t+1 anındaki doluluk oranı (%), P_{bat}: Bataryanın şarj-deşarj olma gücü [W], E_{bat}: Bataryanın Enerji Kapasitesi [Wh] ifadelerini temsil eder.

Yukarıdaki denklem şarj deşarj döngüsü sürecinde bataryanın doluluk oranının nasıl hesaplanacağını göstermektedir.

4.1 Optimizasyon Teknikleri

Literatürde, optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan teknikler aşağıdaki gibi sıralanmıştır[21].

- Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon
- Parçacık sürü optimizasyonu,
- Genetik algoritma
- Uyum arama algoritması
- Karınca kolonisi algoritması
- Benzetimli tavlama
- Guguk kuşu arama
- Yapay arı kolonisi algortması
- Hibrit algoritma
- Çok amaçlı optimizasyon

Bu tez çalışmasında ise genetik algoritma tekniği kullanılması planlanmıştır.

4.2 Genetik Algoritma Tarihçesi

Doğadan esinlenerek teknolojik gelişmeler üretme “Biomimicry” olarak adlandırılır ve bu başlık altında incelenebilecek konuların biri de genetik algoritmadır. Genetik algoritma biyolojik evrim modelinden yararlanmıştır. Charles Darwin tarafından ortaya atılan, “biyolojik yaşamda güçlü bireyin hayatta

kalması ve genlerini yeni nesillere aktarması (doğal seleksiyon)” prensibinden etkilenmiştir[22].

1950li ve 1960lı yıllarda pek çok bilim insanı evrimsel sürecin bilgisayarlı hesaplamalara uyarlanabilmesi konusu üzerinde durmuştur. Bu çalışmalar evrimsel strateji (Evolutionstrategie) ismiyle anılmaktadır ve ilk kez Rechenberg tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır[22].

Evrimsel stratejinin ilk örnekleri, tek bireyden oluşan nüfus yapısına sahiplerdi ve genetik operatör anlamında sadece mutasyon işlemi kullanılmaktaydı. Bu birey mutasyon işlemi sonrasında uygunluk değeri daha iyi sonuç vermesi durumunda yeni birey oluşturulur ve bu birey tekrar işlemlere sokularak amaca ulaşmaya çalışılırdı. Sürekli ebeveyn – çocuk veya (eski nesil – yeni nesil) kıyaslamasından kaynaklı bu işleyişe “iki üyeli evrimsel strateji” ismi verilmiştir.

Rechenberg’ten sonra bu fikir Schwefel (1975, 1977) tarafından geliştirilmiştir. Aynı yıllarda John Holland ve öğrencisi, Michigan Üniversitesi’nde 1975 yılında çıkardıkları “Adaptation in Natural and Artificial Systems” kitabında doğadaki evrimsel işleyişten esinlenerek bilgisayar tabanlı herhangi bir problemin nasıl çözülebileceğinin tekniklerini açıklamıştır. Popülasyon tabanlı algoritmasında crossover, mutasyon ve inversiyon gibi teknikleri ortaya atmasıyla döneminde çalışan diğer bilim adamlarından ayrılmıştır. Bu doğal süreçleri algoritmasına katabilmesi sayesinde de bir sonraki nesiller oluşturularak ve o nesillerin en iyi üyeleri seçilip benzer işlemler tekrar edilerek kelimenin tam anlamıyla doğadan esinlenmiştir ve daha iyi sonuçlar elde edebilmiştir[21].

Daha sonraları, Hoffmeister ve Schwefel’in 1990’lardaki Genetik Algoritma araştırmaları daha da hız kazanmış ve ilgi çekmiştir. Yine 1990’larda Fogel ve Atmar’ın evrimsel programlama çalışmalarıyla birlikte tüm bu çalışmalar evrimsel hesaplamanın omurgasını oluşturmuştur[23].

4.3 Genetik Algoritma Tanımlar

Genetik algoritma başlığı altında kullanacağımız terimler ve açıklamaları bu bölümde anlatılacaktır. Bu terimlerin hepsi biyolojik kökenlidir ve algoritmalarda bunların karşılıklarının ne olduğundan bahsedilecektir

- Nüfus: Problem çözümü için kullanılan tüm bireylerin oluşturduğu en geniş kümeye nüfus denir.
- Birey: Nüfus içindeki işlemlere giren elemanlardır. Uygunluklarına göre yeni nesilleri oluştururlar
- Nesil: Bireyler nüfus içerisinde seçilirler ve genetik işlemlere sokulurlar. Daha uygun olan bireyler bir araya gelirler ve genetik işlemler sonrasında yeni bireyleri oluştururlar ve bu sayede yeni bir nesil oluşur.
- Çocuk ve Ebeveyn: Genetik işlemlere giren neslin bireyleri ebeveyn; genetik işlemlerden çıkan yeni bireyler ise çocuk olarak isimlendirilirler.
- Uygunluk: Çözölmek istenen probleme yönelik bireylerin işlevsellikleri bilinmelidir. Bu amaçla uygunluklarına bakılır. Uygunluğu yüksek olan bireyler ile yeni nesiller oluşturulur.
- Çaprazlama: Bir tür genetik işlemdir. Aynı nesildeki iki bireyin özelliklerinin bir şekilde karıştırılarak yeni bireyler oluşturulması işlemini tarif eder.
- Mutasyon: Bir tür genetik operatördür. Tek bireyin bazı özellikleri üzerinde yapılan değişiklikleri ifade eder.
- Çeşitlilik: Aynı nesil içindeki bireylerin birbirlerine uzaklığıdır. Bireylerin birbirlerine mesafeleri büyükse çeşitlilik yüksektir.
- Genetik Operatörler: Yeni nesillerin oluşturulmasında bireylerin üzerinde uygulanan kurallardır. Bu operatörler, seçim, çaprazlama, mutasyon olarak 3'e ayrılırlar.
- Çalıştırılan algoritmanın sonsuza kadar çalışmaması için hangi koşulda durması gerektiği belirtilmelidir. Bu konuda kurallar ortaya konmalıdır.

4.3.1 Seçim Kuralları

Belirli bir nesildeki genetik işlemlere uğrayacak bireylerin seçilme şekilleri farklılık gösterebilir. En sık kullanılan yöntemler aşağıdaki gibidir:

- Rulet çarkı seçim yöntemi
- Stokastik evrensel örnekleme seçim yöntemi
- Turnuva seçim yöntemi
- Normalize geometrik seçim yöntemi

4.3.2 Çaprazlama Kuralları

Belirli bir nesildeki bireylerin seçilmelerinden sonra yeni bireyler oluşturmalarında kullanılan genetik operatörlerden biridir. İki bireyin genleri belirli şekillerde karıştırılır ve yeni bireye bu özellikler aktarılır. En sık kullanılan çaprazlama kuralları aşağıdaki gibidir.

- Tek noktadan çaprazlama
- Çift noktadan çaprazlama
- Çok noktadan çaprazlama
- Karıştırılmış (shuffle) çaprazlama

4.3.3 Mutasyon Kuralları

Belirli bir nesildeki bireylerin üzerinde yapılan genetik işlemlerden biri de mutasyon işlemidir. Çaprazlamadan farklı olarak sadece bir bireyin bazı özelliklerinde değişiklikler yapılarak gerçekleştirilir.

- İkilik sayı mutasyonu
- Sınırsal mutasyon
- Uniform mutasyon
- Çoklu-uniform mutasyon
- Uniform olmayan mutasyon
- Çoklu uniform olmayan mutasyon

4.3.4 Durma Kuralları

Çalıştırılan algoritmanın sonsuza kadar çalışmaması için hangi koşulda durması gerektiği belirtilmelidir. Bu konuda bazı kriterler aşağıdaki gibi listelenebilir[24].

- Algoritma belirtilen maksimum nesil sayısına geldiğinde durabilir.
- Algoritmanın çalışması istenen süre sona erdiğinde durabilir.
- Algoritma istenen uygunluk limitleri içerisine girdiğinde durabilir.
- Oluşan nesiller arasındaki fark, bir süreden sonra fonksiyon toleransına eşit veya ondan küçük olduğunda algoritma durdurulabilir.
- Seçilen süre içerisinde uygunluk değerinde ortalama değişim gerçekleşmediğinde algoritma durdurulabilir.

4.4 Genetik Algoritmanın Avantajları ve Uygulama Alanları

Genetik algoritmanın diğer optimizasyon tekniklerine göre avantajlı olduğu bazı durumlar vardır ve bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir[23].

- Kullanılan terminoloji ve işleyiş basittir.
- Çok sayıda geleneksel optimizasyon teknikleri ile bütünleşebilirler.
- Çözüm değerlendirmeleri paralel yapılır fakat seri işlemlerden geçmektedir.
- Dinamik değişikliklere karşı geleneksel optimizasyon metotlarına kıyasla daha esnek ve etkilidirler.

Genetik algoritmaların yaygın olarak kullanıldığı alanları iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

- Planlama (güç, finansal portföy, üretim, zaman)
- Dizayn (araç rotalama, anten yerleşimi, network dizaynı, ürün tasarımı, mimari tasarım, acil servis yerleşimi)

Bunun dışında matematiksel ifadeye dönüştürülebilen tüm fonksiyonların çözümünde çalışabilen bir tekniktir. Bu yönüyle pek çok alanda uygulamaya müsait bir teknik olduğu belirtilebilir.

4.5 “Birden Çok” Amaçlı Optimizasyon

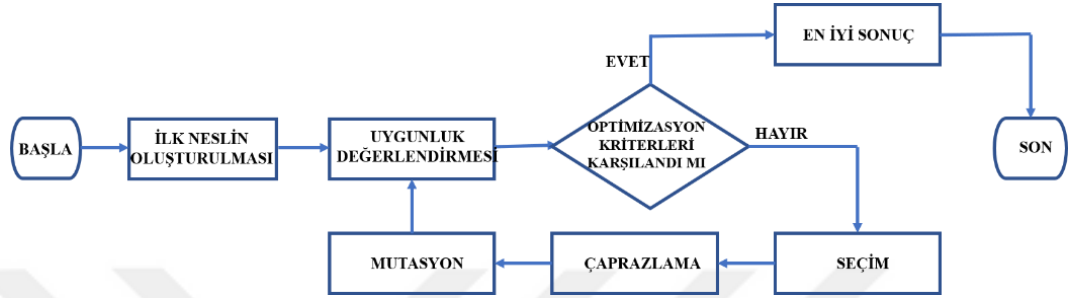
Problemin yapısı gereği, birden fazla minimizasyonu veya maksimizasyon fonksiyonunun aynı anda çözülmesi istenebilir. Bu gibi durumlarda önceki başlıklarda belirtilen genetik algoritma prensipleri iki fonksiyon için de aynı anda çözülerek sonuca gidilebilir. Algoritma yapısı elbette değişecek ve elde edilecek sonucun yapısı da değişecektir.

Tek amaçlı genetik algoritma ile çözdürülen bir problemde direkt sonuç elde edilirken çok amaçlı genetik algoritma çıktısı tüm problem sonuçlarının bir arada olduğu bir sonuç kümesi şeklinde olur. Bu kümeye de “pareto optimal” küme ismi verilmiştir. Bu sonuç kümesi, ilgili amaç fonksiyonlarının birlikte ne kadar minimize olabildiklerini gösterir. Amaç fonksiyonlarından biri diğer(ler)inden daha baskın şekilde minimize edilmek isteniyorsa bu doğrultuda sonuçları seçip uygulamak mümkündür.

MATLAB bu konuda “Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II” (NSGA-2) yöntemini uygulayarak çözümler üretebilmektedir[24], [25]. Bu tezde de bu yöntem kullanılmıştır.

4.6 Genetik Algoritmanın Çalışma Mantığı

Genetik algoritmanın çalışmasının adımları Şekil 4.1’deki gibidir[26]:



Şekil 4.1 GA Akış Diyagramı

- 1 Rastgele bir başlangıç nüfusuyla algoritma başlatılır.
- 2 Yeni nesiller üretilmeye başlar. Her yeni nesilde, istenen ideal sonuca yaklaşılması beklenir. Bunun gerçekleşmesinde gerçekleşen işlemler aşağıdaki gibidir.
 - Her bireyin uygunluk skoru hesaplanır. Bu skorlar kaydedilir.
 - Skorlara göre bireyler sıralanır.
 - Amaca en yakın sonucu veren bireyler tespit edilir.
 - Seçilen bireylerden genetik operatörlerle yeni nesiller üretilir. İki bireyin çaprazlanmasıyla, mutasyonla veya başka genetik operatörlerle bu işlemler gerçekleştirilebilir.
 - Yeni nesil eski neslin yerine kaydedilir.
- 3 Durma kriterleri karşılanıyorsa algoritma durur.

4.7 Genetik Algoritmanın Bu Çalışmada Kullanımı

Bu tezde amaç, elektrik tüketen bir kullanıcının elektrik tüketim rejimine bakarak, bulunduğu bölgenin güneşlenme değerlerini gözeterek ve kullanılmak istenen panel ve batarya teknik özelliklerine göre ihtiyaç duyulacak sistemde kaç adet PV panel ve kaç adet batarya kullanılacağı sonucuna varmaktır. Gerçekçi sonuçlar ile

alışılmış ve buradan elde edilen değerler ile PVSOL programında ile simölasyon yapılmıştır. Bu sayede algoritma başarısı ölçölmüştür.

Algoritmanın yazılmasında temel program parçaları enerji döngüsü alt programı ve genetik algoritma parametreleri alt programından oluşmaktadır.

Enerji döngüsü alt programı içerisinde, kullanılacak sistem bileşenlerinin teknik verileri, şebeke fiyatları, saatlik tüketim verileri, güneşlenme verileri gibi parametreler girilmiştir. Hesaplamak istediğimiz ve genetik algoritmanın da amaç fonksiyonu olan iki fonksiyon burada tarif edilmiştir. Genetik algoritmanın değişken sayısı, nüfus büyüklüğü, alt ve üst sınırlar, durma koşulları da diğer alt program içerisinde tanımlanmıştır.

Kullanılacak PV paneller konusunda bir engel yoktur. Sadece seçilen PV panelin teknik klavuzuna bakarak, ilgili parametrelerin algoritmada değiştirilmesi gereklidir. Bu algoritmada amaçlardan biri de bu esnekliği sunmaktır. Aynı esneklik batarya modöllerini için de geçerlidir. İlgili parametrelerin değiştirilmesiyle birlikte algoritma o ürünlerle çözüm üretmeye hazır olacaktır.

Elektrik tüketim rejimi, enerji döngüsünün yazılmasında önemli parametrelerden diğeridir. Saatlik bir enerji döngüsü yazılmıştır, saatlik güneşlenme verileri elde edilmiş ve kullanılmıştır. Aynı şekilde saatlik tüketim bilgileri de sağlandığında bu döngü kurgulanabilir hale gelecektir. Tüketim rejiminin diğer önemi ise tüketim saatleriyle üretim saatleri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Tüketime hangi saatlere kaydığı, ihtiyaç duyulacak batarya depolamasını belirleyecektir. Batarya depolamasının büyümesi kurulum maliyetini çok arttırırsa da ideal noktada durulması gerekecektir.

Yılın 365 günü saatlik elektrik tüketim datası elde edebilme ihtimalinde Genetik algoritmanın değerlendirdiği amaç fonksiyonundaki enerji döngüsü buna göre revize edilebilir elbette. Fakat buradaki amaç genetik algoritma ile yukarıda bahsedilen amaç fonksiyonlara ulaşmak için temel bir algoritma yazmak ve çıktıları değerlendirmek yönünde olacaktır.

Bu çalışmada iki farklı amaç fonksiyonu yazılmıştır. Bunların ilki “yeni fatura sıfırlama” ikincisi de “amortisman süresi minimizasyonu” fonksiyonlarıdır.

4.7.1 Yeni Fatura Sıfırlama

Algoritmamız 24 saatlik döngü sonunda 1 günlük eski fatura ve 1 günlük yeni fatura değerleri çıktısı vermektedir. Sistem kurulumu sonrası şebekeye elektrik satışı çok yüksek olduğunda yeni fatura negatif değerler almaya başlar. Bu durum kullanıcının para kazanacağı anlamında gelir. Fakat GES'lerin elektrik satışı fiyatları düşük olması sebebiyle kazanç aynı oranda yükselmemektedir. Bu sebeple faturanın sıfırlanması, finansal anlamda ideal koşulları tarif eder.

Dolayısıyla bu tez çalışmasında amaçlardan biri yeni faturaların sıfırlanması olarak seçilmiş ve yazılmıştır. Yazılırken kullanılan matematiksel ifade de mutlak değer içinde minimizasyon problemi şeklindedir. Aşağıdaki denklem, yeni faturanın algoritma içerisindeki gösterimidir.

$$YeniFatura = \sum AlinanEnerji * birim fiyat - \sum SatilanEnerji * birim fiyat \quad (23)$$

4.7.2 Amortisman Süresi

Amortisman süresi, kurulacak sistemin toplam maliyetinin yıllık kazançlara oranıdır. Yani yapılan yatırımın ne kadar sürede kazanılacağına ifadesidir. Aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Amortisman Süresi = \frac{Toplam Maliyet}{12 * (EskiFatura - Yeni Fatura)} \quad (24)$$

Amortisman süresi, GES yatırımı yapmak isteyen kullanıcıların finansal anlamda öncelikle dikkat ettiği konulardan biridir. Bu sebeple, amaç fonksiyonlarından biri olarak seçilmiş ve yazılmıştır.

Birden fazla amaç fonksiyonunun çözümü için “çok amaçlı genetik algoritma” tekniğinden faydalanmak gerekir. Bu çalışmada da NSGA-II tekniği ile MATLAB ortamında çözüme gidilmiştir. Alınan sonuç ise ideal sonuçların gösterildiği “pareto optimum” denen bir sonuç kümesidir. Yani ideal sonuçlar burada listelenmiştir. Bir küme şeklinde çıktı almanın bir avantajı da istenen amaç fonksiyonların bir tanesine daha yakın olan değerlerin tercih edilebilme ihtimali oluşmasıdır. Bu küme hem istenen sonucu oluşturacak değişkenlerin kümesi hem de o değişkenlerin sonuçları kümesi olarak iki adettir.

4.8 Algoritma ve Parametreler

Amaç fonksiyonun yazılabilmesi için 24 saatlik enerji akışının sonucuna ihtiyaç duyulur. Bunun sebebi her saatteki güç değerine göre elektriğin akış yönünün değişecek olması ve bu doğrultuda bir günlük enerji faturası veya kazancının ortaya çıkacak olmasıdır.

$$C_g = \sum_{t=0}^{24} P_{im}(t) * C_{im} - \sum_{t=0}^{24} P_{ex}(t) * C_{ex} \quad (25)$$

Bir gündeki şebekeden alınan ve şebekeye basılan enerji ve birim fiyatı karşılığındaki kazanç formülü.

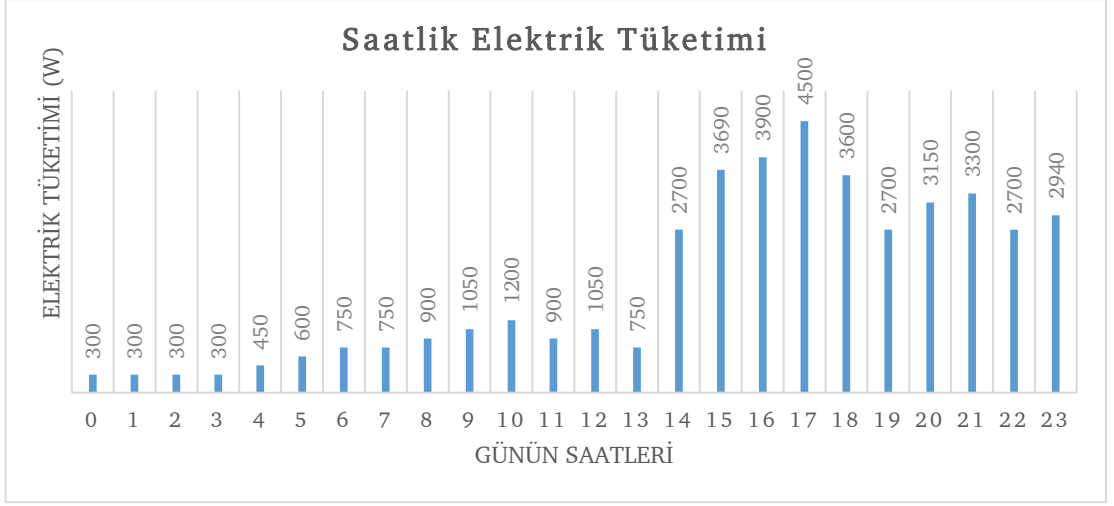
$C_{im} = [C_1, C_2, C_3]$ şeklinde 3 farklı değere sahipken, C_{ex} ise tek bir değere sahiptir. C_g , burada günlük elektrik enerjisi için ödenmesi gereken parayı gösterir. Negatif çıkarsa mahsuplaşmayla para kazanılacağı anlamına gelir.

Algoritmada, tesisin saatlik yükü öncelikle güneş enerjisinden karşılanması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda algoritma, PV üretim değerinin tüketimden büyük veya küçük olması koşulunu inceler. Daha sonra PV üretim fazlası varsa bunu öncelikle bataryayı şarj etmek için kullanır. Bataryanın dolu olması veya maks şarj gücünü aşıyor olması durumlarında ise fazla enerji şebekeye satılır. Bu satıştan gelecek kazanç da satış birim fiyatıyla çarpılarak bulunur.

PV üretiminin yükten düşük olması durumunda ikincil enerji kaynağı batarya olarak seçilmiştir ve algoritmada bu doğrultuda kodlanmıştır. Eğer batarya maks deşarj gücü anlık yükten küçük kalırsa veya batarya bitmişse, şebekeden elektrik çekilmesi gerekecektir. Elektrik çekildiği saate göre tarifieden birim fiyat seçilir ve ona göre hesaplanır.

Yukarıda bahsedilen bu enerji akışları, hibrit enerji akış yönleri başlığında da bahsedilen yönlerdir. İzin verilmeyen doğrultularda enerji akışları mümkün kılınmamıştır.

Bu tez çalışmasında, mesken tarifesine sahip bir ev için ideal sistem büyüklüğü bulunmaya çalışılmıştır. Bu evin saatlik elektrik tüketim verileri Şekil 4.2'deki gibidir.



Şekil 4.2 Tüketim Tesisinin Saatlik Elektrik Tüketimi

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi 400W gücündeki Solartürk markalı mono kristal PV paneller kullanılmıştır. Bu panelin teknik verileri Tablo 4.1’te görülmektedir.

Tablo 4.1 Solartürk STR-400W PV Panel Teknik Veriler[27]

72 Hücreli - Monokristal PV Panel	STR-400W
Nominal Güç (Wp)	400
Nominal Güç Gerilimi (V)	41,1
Nominal Güç Akımı (A)	9,75
Açık Devre Gerilimi (V)	49,83
Kısa Devre Akımı (A)	10,38
Modüle Verimliliği (%)	20
Sıcaklık Katsayısı (Pmax) (%/°C)	-0,39
Sıcaklık Katsayısı (Voc) (%/°C)	-0,32

Tablo 4.1 Solartürk STR-400W PV panel teknik veriler (devamı)

Sıcaklık Katsayısı (Isc) (%/°C)	0,05
Nominal İşletim Hücre Sıcaklığı (°C)	45

Kullanılacak batarya modülü için daha önce de belirtildiği üzere BYD markasına ait HVS serisi modüller ile bağlantı yapılması öngörülmüştür. Bu bataryanın teknik özellikleri Tablo 4.2’de görülmektedir.

Tablo 4.2 BYD-HVS Serisi Batarya Modülleri ve Teknik Özellikleri[28]

Batarya Modülü	BYD-HVS (5,56kWh, 102,4V)		
Modül Sayısı	2	3	4
Kullanılabilir Enerji	5,12 kWh	7,68 kWh	10,24 kWh
Maksimum Çıkış Akımı	25A	25A	25A
Geçici Maks Akım	50A, 5s	50A, 5s	50A, 5s
Nominal Gerilim	204V	307V	409V
Çalışma Gerilimi	160-240V	240-360V	320-480V

Bu tez çalışmasına konu olan tüketim merkezi evin koordinatları 41.193 kuzey paraleli ve 27.770 doğu meridyeni üzerindedir. Bu lokasyona ait güneşlenme verileri Tablo 4.3’te görülebilir[29].

Tablo 4.3 Seçilen Coğrafik Konumun Yıllık Direkt Radyasyon Tablosu (W/m²)

Saat	Ock	Şub	Mart	Nis.	May	Haz.	Tem	Ağs	Eyl	Ekm	Kas	Arlk
5-6				7	52	115	80	14				

Tablo 4.3 Seçilen coğrafik konumun yıllık direkt radyasyon tablosu (devamı)

6-7			14	128	223	296	317	226	115	18		
7-8	9	55	159	256	328	409	448	403	308	181	62	8
8-9	141	202	261	344	413	505	541	502	415	296	200	127
9-10	234	276	329	411	478	573	617	577	476	357	266	213
10-11	275	314	380	451	515	593	650	611	499	391	297	250
11-12	290	333	394	456	524	577	649	609	487	384	310	363
12-13	289	333	390	448	512	540	621	593	469	375	322	262
13-14	284	327	384	439	500	513	600	573	439	365	314	250
14-15	259	311	363	410	478	495	577	547	410	341	287	227
15-16	197	269	310	353	432	462	539	506	368	276	208	158
16-17	48	185	253	299	363	417	489	443	306	131	28	18
17-18		20	112	191	280	351	411	342	114	4		
18-19				16	92	203	226	62				
19-20						9	2					
Toplam	2026	2627	3348	4208	5189	6057	6765	6010	4408	3118	2296	1777

Genetik algoritmanın detaylarının yazıldığı alt programda nüfus büyüklüğü “100” olarak seçilmiştir. Alt sınır için [0,2], üst sınır için de [100,100] girilmiştir. Bunun anlamı PV panel için 0 ve 100 aralığındaki değerler içerisinde tarama yapması, batarya için ise 2 ve 100 aralığında değerler için tarama yapması şeklindedir.

Batarya modülünün 2'den başlatılmasının sebebi, en az iki modüller satılıyor olmasından kaynaklıdır. Değişken sayısı 2'dir ve optimizasyonun durması için maksimum nesil sayısı "100" olarak belirtilmiştir.

4.9 Algoritma Sonuçları

Belirtilen ürünler, belirtilen şekillerde algoritmaya girdikten sonra ortaya çıkan sonuç pareto optimum küme sonucudur. Bu küme, iki amaç fonksiyonu olması sebebiyle 2 boyutludur. Bu çıktıları veren değişkenlerle birlikte sonuçlar Tablo 4.4'te aşağıdaki gibi görülebilir.

Tablo 4.4 Genetik Algoritmanın Pareto Sonuçları ve Uygunluk Değerleri

Sonuç	Amortisman Süresi yıl	Yeni Fatura (TL)	PV Panel Sayısı	Batarya Sayısı
1	15,22	0,0014	29,25	3,7359
2	13,21	0,0034	32,65	2,7548
3	34,67	0,0000	27,66	11,1022
4	11,60	0,0967	34,62	2,0236
5	11,53	22,2652	35,62	2,0028
6	11,45	61,1320	37,28	2,0030
7	11,44	111,7050	39,43	2,0014
8	11,52	27,4596	35,84	2,0010
9	11,38	181,2350	42,39	2,0005
10	11,38	173,3437	42,05	2,0009

Tablo 4.4 Genetik algoritmanın pareto sonuçları ve uygunluk değerleri (devamı)

11	11,53	16,1205	35,36	2,0060
12	11,38	167,8607	41,82	2,0070
13	11,42	55,4314	37,03	2,0015
14	13,20	0,0222	32,65	2,7544
15	11,41	142,1557	40,72	2,0014
16	11,51	35,6553	36,19	2,0011
17	11,47	80,9765	38,12	2,0010
18	15,22	0,0011	29,25	3,7362
19	11,43	118,8295	39,73	2,0005
20	11,5	42,5314	36,48	2,0015
21	11,44	106,8493	39,22	2,0020
22	34,38	0,0005	27,66	10,9962
23	11,5	47,7947	36,71	2,0012
24	11,41	136,3933	40,48	2,0005
25	11,41	144,9801	40,84	2,0005
26	11,47	76,1291	37,91	2,0012

Tablo 4.4 Genetik algoritmanın pareto sonuçları ve uygunluk değerleri (devamı)

27	11,44	100,9784	38,97	2,0005
28	11,4	149,6747	41,04	2,0009
29	11,57	2,7407	34,76	2,0110
30	11,53	12,2252	35,17	2,0094
31	11,42	123,8837	39,95	2,0009
32	11,49	56,3917	37,07	2,0014
33	11,39	163,5040	41,63	2,0008
34	11,48	67,7457	37,56	2,0013
35	11,41	136,3703	40,48	2,0005

Bu bölümde Tablo 4.4'teki sonuçların değerlendirmesi yapılacaktır. Tablo 4.4'e bakıldığında batarya sayısı ve panel sayılarına karşılık bunların amortisman süresi ve yeni fatura değerleri görülür. Panel sayısı ve batarya sayısının artışıyla yeni fatura değeri 0'a daha da yaklaştığı görülmekte fakat buna karşın amortisman süresi yükselebilmektedir. Bu çözümler içerisinde kullanıcı kendisine uygun olan optimum "ikili çözümü" seçerek sistemini kurgulayabilir. Elbette seçilen panel ve batarya sayısı ile uyumla şekilde çalışabilecek inverter seçimi de yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında 1 nolu sonuçtan hareketle simülasyon yapılmasına karar verilmiştir. Sonuçların ondalık değerlerini de yuvarlayarak PV panel sayısını 30, batarya modülü sayısını 4 seçerek simülasyon yaptırılacaktır. Bu sayede iki amaç fonksiyonu için de ortalama iyi bir durum elde edilmeye çalışılmıştır.

Kullanıcılar eğer isterlerse bu çözüm kümesi içerisinde amaç fonksiyonlarından birine öncelik veren sonuçları da tercih edebilirler. Fakat bu durumlarda diğer amaçtan uzaklaşıldığını tekrar ifade etmek gerekir.

PVSOL’de simülasyon yaparken kullanılacak marka model PV panel ve batarya konusu daha önceden belirlenmişti. Genetik algoritma ile sayılar da belirlendi. Bu ürünler uyumlu çalışacak inverter olarak Fronius Symo Gen24 serisi inverter kullanılması öngörülüyordu. Bu inverterin 10kW gücündeki modeli kullanılması teknik açıdan uygundur. 2 MPPT için 15’er adet panel bağlantısı yapılacaktır. Batarya bağlantı güç değerlerinin de uyumlu olduğu kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır [30].

BYD marka 10,24kWh kapasiteli batarya modülünün de bu inverterle uyumlu olup olmadığı da kontrol edilmiştir ve doğrulanmıştır [28], [30].

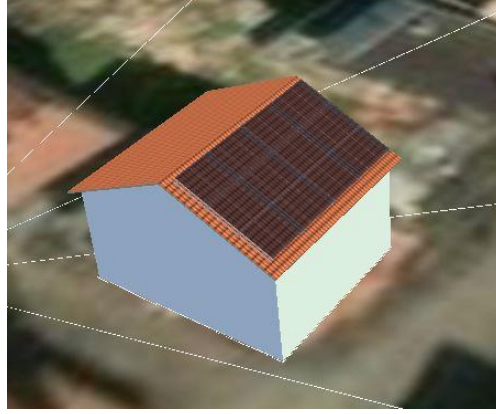
5.1 PVSOL Nedir

PVSOL yazılımı güneş enerjisiyle ilgili detaylı simülasyonların yapılabilmesini sağlayan profesyonel bir yazılımdır. Valentine Software şirketinin bir ürünüdür ve zengin bir veri setine sahiptir. Bu sayede yapılması istenen çalışmalarda tüm detaylar girilerek gerçeğe en yakın sonuçlar elde edilebilmesi sağlanmaktadır. Kütüphanesinde yer almayan, yeni üretilen ürünlerle çalışılmak istenirse, bu ürünlerin kütüphaneye eklenmesine ve sonra tekrar kullanılmasına imkân sunmaktadır. Sadece teknik değil, aynı zamanda finansal analiz konusunda da gerçekçi hesaplamalar yapmayı sağlar. Tüm bu detaylar sonrasında oluşacak raporda kendi öncelediğiniz parametreler doğrultusunda bir rapor oluşturmaya da imkân tanır.

PVSOL yazılımında iklim verileri İsviçre merkezli Meteotest şirketinin ürünü olan Meteonorm yazılımında çekilmektedir. Meteonorm'un Avrupa'da 1640, Kuzey Amerika'da 1910, Orta-Güney Amerika'da 630, Asya'da 1840, Afrika'da 600 ve Avusturalya'da 1700 hava durumu istasyonu ve dünya çapında 5 uydusu vardır[31].

5.2 PVSOL Simülasyon Girdileri ve Çıktıları

PVSOL'de yapılacak simülasyonda kullanılacak tüm parametreler önceki bölümlerde belirtilmiştir. Şekil 5.1'de görülebileceği gibi 3 boyutlu yapı modeli de kurulmuş, tüm ürünlerin bağlantıları da yapılmıştır. Tüketim verileri de saatlik olarak girilmiştir. Tüm yıl aynı tüketim olduğu varsayılmıştır, Lokasyon bilgileri de girilmiştir, dolayısıyla güneşlenme verileri de kendi veri setlerinden elde edilmiştir. Tarife bilgileri önceki bölümlerde belirtildiği gibi detaylı şekilde oluşturulmuştur. Toplam sistem maliyeti, PV panel ve batarya sayısına göre ortaya çıkan değer olarak girilmiştir.



Şekil 5.1 PVSOL Üç Boyutlu Simülasyondan Bir Görüntü

PVSOL simülasyonunda kullanılacak ürünler önceki bölümlerde belirtilmiştir ve sayıları genetik algoritma ile tespit edilmiştir. Tüm bu bilgiler aşağıdaki gibi Tablo 5.1’de görülebilir.

Tablo 5.1 Simülasyon Parametreleri

PV Panel	Solartürk STR400W	30	Adet
Batarya	BYD-HVS	4	Adet
İnverter	Fronius Symo Hybrid 10kW	1	Adet
Tarife	Tek Terimli, 3 Zamanlı, Mesken		
Bağlantı Şekli	Şebeke Bağlantılı, Batarya Depolamalı PV		
Lokasyon	Kuzey Paraleli	41,193	Derece
	Doğu Meridyeni	27,700	Derece
Tesisin Fiyatı	257142	TL	
Enflasyon	36,08%		
Elektrik Satışı	Aylık Mahsuplaşma, 0.32TL		

Simülasyonda girilen tesise ait tüketim bilgileri genetik algoritmada kullanılan tüketim verileriyle aynıdır ve Şekil 4.2'deki gibidir.

PVSOL'de belirtilen tüm detaylar girilerek üretilen simülasyon Tablo 5.2'deki gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.2 Seçilen Verilerden Üretilen Simülasyon Çıktıları

	Tüketim (kWh)	Enerji Üretimi (kWh)	Eski Elektrik Faturası (TL)	Yeni Elektrik Faturası (TL)
Ocak	1326,12	666,74	1397,83	841,04
Şubat	1197,79	728,73	1262,56	717,64
Mart	1326,12	1099,19	1397,83	691,52
Nisan	1283,34	1531,34	1352,74	505,16
Mayıs	1326,12	1793,85	1397,83	440,23
Haziran	1283,34	1748,41	1352,74	405,74
Temmuz	1326,12	1904,06	1397,83	397,07
Ağustos	1326,12	1696,58	1397,83	478,35
Eylül	1283,34	1383,49	1352,74	562,61
Ekim	1326,12	993,19	1397,83	733,06
Kasım	1283,34	743,28	1352,74	781,55
Aralık	1326,12	588,81	1397,83	866,75

Genetik algoritma sonucu ve PVSOL simülasyon sonuçları arasında bir fark olduğu görülmektedir. Buradaki fark, temel anlamda çalışmaya başlarken yapılan varsayımlardan ve veri seti farklılığından kaynaklanmaktadır. Genetik algoritma içinde güneşlenme verisi 21Mart tarihindeki verilerdir fakat PVSOL 365 günün verilerine erişerek simülasyon yapmaktadır. Benzer şekilde algoritma içinde kullanılan sabit bir sıcaklık verisi vardır fakat PVSOL simülasyonda 365 günün saatlik verilerinden hareketle hesaplamalar yapabilmektedir. Bu tez çalışmasında sadece bir günlük verilerden hareketle ideal sistem büyüklüğü tespit edilmeye çalışılmıştır ve başarılı bir sonuç alınmıştır.

Tablo 5.3 PVSOL Finansal Analiz Sonuçları

Toplam Yatırım Maliyeti (TL)	257142,86
Amortisman Süresi (Yıl)	8
Elektrik Üretim Maliyeti (TL)	0,92

Tablo 5.3'te yer alan finansal analizde de aynı parametrelerin etkisi görülmektedir. PVSOL programının sahip oldu veri tabanlarından çektiği verilerin genetik algoritma içerisinde kullanılabilmesi durumunda elde edilecek sonuçların çok daha iyi olacağı aşikardır.

Dolayısıyla bu çalışma, bir günlük tüketim ve üretim verilerinden hareketle gerçeğe yakın sonuçları üretmeyi başarmıştır. Çalışılan algoritma, hesapladığı veri setleri genişledikçe çok daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Ayrıca, farklı elektrik üretim yöntemleri ile de genişletilebilir. Farklı depolama teknikleri de eklenerek zenginleştirilebilir.

6.1 Algoritma ve Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması

Genetik Algoritma çıktıları ve PVSOL simülasyonu çıktıları arasında bir fark olduğu görülmektedir. Bu farkında sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sıcaklık verisinin hesaplanma şekli
- Elektrik tüketim verisi hesaplanma şekli
- Güneşlenme verisi hesaplanma şekli
- Enflasyon

PVSOL programı sahip olduğu veri tabanlarından bu verileri yılın 365 günü 24 saat olarak çekebilmesi sayesinde çok daha detaylı bir hesaplama yapabilme şansına sahiptir. Bu verileri toplu bir şekilde elde etme şansımız olmaması sebebiyle algoritma içerisinde bir günlük verilerden hareketle sonuçlar üretilmiştir.

Öte yandan bu çalışmada görülmüştür ki, bu düzeyde sınırlı verilerden hareketle istenen ideal sistemin büyüklüğü hakkında yakın bir değer elde etmek mümkündür.

6.2 Genel Sonuçlar

Bu tez çalışmasında genetik algoritma tekniği kullanılarak bir optimizasyon problemi çözülmüştür. Seçilen bir hanenin elektrik tüketim değerleri alınarak bulunduğu bölgede PV güneş panelleriyle üretim değerleri tespit edilmiştir. Bu değerlerden hareketle ideal sistem büyüklüğü tespit edilmiştir. Bu değerler ile PVSOL'de simülasyon yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Görülmüştür ki bu algoritma ile herhangi bir tesise ait bahsedilen parametreler bilindiğinde ideal sistem büyüklüğü tespit edilebilmektedir. Pareto optimum sonuç kümesiyle de amaç fonksiyonlarından biri önceleniyorsa ona yakın değerler seçimi mümkün olmaktadır.

- [1] E. M. Ocampo, W. C. Chang, ve C. C. Kuo, “Optimal Sizing of PV-Diesel-Battery System Using Different Inverter Types,” *IEEE Access*, sayı. 9, sayfa 133561–133573, 2021.
- [2] A. Gupta, R.P. Saini ve M.P. Sharma, “Computerized Modelling of Hybrid Energy System-Part I: Problem Formulation and Model Development”, *ICECE*, sayı. 5, 2008.
- [3] A. Elmouatamid, R. Ouladsine, M. Bakhouya, N. el Kamoun, M. Khaidar, ve K. Zine-Dine, “Review of control and energy management approaches in micro-grid systems,” *Energies*, sayı. 14, Ocak 2021.
- [4] I. Alsaidan, A. Khodaei, ve W. Gao, “A Comprehensive Battery Energy Storage Optimal Sizing Model for Microgrid Applications,” *IEEE Transactions on Power Systems*, sayı. 33, sayfa 3968–3980, Temmuz 2018.
- [5] L. Zhou, Y. Zhang, X. Lin, C. Li, Z. Cai, ve P. Yang, “Optimal sizing of PV and bess for a smart household considering different price mechanisms,” *IEEE Access*, sayı 6, sayfa 41050–41059, Haziran 2018.
- [6] I. Hussain vd., “Optimizing energy consumption in the home energy management system via a bio-inspired dragonfly algorithm and the genetic algorithm,” *Electronics (Switzerland)*, sayı. 9, Mart 2020.
- [7] C. Yang, “*Development of Intelligent Energy Management System Using Natural Computing*,” Toledo, Ağustos 2012.
- [8] U. Akram, M. Khalid, ve S. Shafiq, “An Improved Optimal Sizing Methodology for Future Autonomous Residential Smart Power Systems,” *IEEE Access*, sayı 6, sayfa 5986–6000, Ocak 2018.
- [9] T. Ackermann, G. Ran Andersson, ve L. Söder, “Distributed generation: a definition”, *Electric Power Systems Research*, sayı. 57, 2001.
- [10] EPDK, “ELEKTRİK PİYASASINDA LİSANSSIZ ELEKTRİK ÜRETİM YÖNETMELİĞİ,” 2018.

- [11] TEİAŞ, “Yenilenebilir Enerji Kurulu Güç Gelişimi,” 2021.
- [12] TEİAŞ, “Aylık Enerji Üretim Raporları,” 2021.
- [13] EPDK, *Bir Dağıtım Transformatöründe Ag Seviyesinden Bir Kişiyeye Bir Yıl İçerisinde Tahsis Edilebilecek Kapasite*. Türkiye, 2021.
- [14] EPDK, “1 Temmuz 2021 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler,” 2021.
- [15] Fronius,
“<https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Operating%20Instructions/42,0426,0315,EN.pdf>,” 2021.
- [16] Z. Şen, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*, Springer, 2008.
- [17] A. Goetzberger ve Volker. U. Hoffmann, *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Berlin, Springer, 2005.
- [18] T. Bradford, *Solar Revolution*, Cambridge, MIT Press, 2006.
- [19] Statista, “<https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/#:~:text=Global%20cumulative%20solar%20photovoltaic%20capacity,installed%20in%20that%20same%20year.>,” 2021.
- [20] S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2009.
- [21] David. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Alabama, Addison-Wesley, 1953.
- [22] M. Mitchell, *An Introduction To Genetic Algorithms*, 5. Baskı, MIT Press, 1999.
- [23] K. Çakar, “Genetik Algoritmalar Yardımıyla Acil Servis İstasyonu Yerleşiminin Optimizasyonu,” Erzurum, 2009.
- [24] The MathWorks, “User’s Guide Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox,” 2004. [Online]. Bağlantı: www.mathworks.com

- [25] H. Pohlheim, "GEATbx com Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox for Matlab GEATbx Tutorial," 2016. [Online]. Bağlantı: www.geatbx.com
- [26] J. J. Roberts, A. M. Cassula, J. L. Silveira, P. O. Prado, ve J. C. F. Junior, "GAtoolbox: A Matlab Based Genetic Algorithm Toolbox for Function Optimization," *CLAGTEE*, 2017.
- [27] Solartürk, "https://www.solarturk.com.tr/uploads/FILE-20210127-09314CQWHUWFGS3M.pdf," 2021.
- [28] BYD, "https://www.bydbatterybox.com/uploads/downloads/210311%20BYD%20Battery-Box%20Premium%20HVS_HVM%20Datasheet%20V1.5%20EN-604b0e985751f.pdf," 2021.
- [29] GlobalSolarAtlas, "https://globalsolaratlas.info/map?c=41.193074,27.770005,11&s=41.193074,27.770005&m=site," 2021.
- [30] Fronius, "https://www.fronius.com/tr-tr/turkey/guenes-enerjisi/kurulumcular-ve-partnerler/teknik-veri/t%C3%BCm-%C3%BCr%C3%BCnler/inverter/fronius-symo-gen24-plus/fronius-symo-gen24-10-0-plus," 2021.
- [31] Meteonorm, "https://meteonorm.com/en/," 2021.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Ö. T. Kaymakçı ve R. Tuna, “Şebekeye Bağlı Batarya Depolamalı PV Güneş Enerji Santrallerinde Genetik Algoritmayla Sistemin İdeal Gücünün Belirlenmesi”, *Avrasya Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, sayı 5, sayfa 34-48, 2022.

