

GÜRSU-BURSA
FOTOVOLTAİK GÜÇ SANTRALİNİN SİMÜLASYONU;
TEKNOEKONOMİK VE ÇEVRESEL OPTİMİZASYON

SIMULATION OF GÜRSU-BURSA PHOTOVOLTAIC
POWER PLANT; TECHNO-ECONOMIC AND
ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION

KIVILCIM MERVE GÜLTUNA

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2015

“Gürsu-Bursa Fotovoltaik Güç Santralının Simülasyonu; Teknoekonomik ve Çevresel Optimizasyon” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 06/02/2015 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Tahir Yavuz

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Levent Çolak

Üye : Prof. Dr. Birol Kılış

ONAY

..../02/2015

Prof. Dr. Emin AKATA

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı ve çalışma sırasında bilimsel katkıları ile bana yardımcı olan, eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım ve hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Levent ÇOLAK'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teőekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Sencer Gültuna, annem Aysun Aksungur, babam Erdal Aksungur ve kardeşim Güzin Aksungur'a teőekkür ederim.

ÖZ

GÜRSU-BURSA FOTOVOLTAİK GÜÇ SANTRALİNİN SİMÜLASYONU; TEKNOEKONOMİK VE ÇEVRESEL OPTİMİZASYON

Kıvılcım Merve Gültuna

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tezin amacı, Gürsu Bursa Bölgesinde bulunan fotovoltaik güç santralının teknoekonomik ve çevresel optimizasyonuna yönelik bir simülasyon modeli geliştirilmesidir. Yenilenebilir enerji yatırımcılarının daha az zaman harcamaları ve tasarruf elde etmesi için simülasyon yazılımlarının kullanımı önemlidir. Bu çalışmada teknik, ekonomik ve çevresel açıdan matematiksel bir model oluşturulmuş ve geliştirilen simülasyon programıyla eğik düzleme gelen ışınım, PV panel verimi, santralin elektrik üretim değeri, yıllık kazancı, salımı önlenen karbon miktarı ve amortisman süresi hesaplanmıştır. Geliştirilen simülasyon programında elde edilen sonuçlar, piyasada ticari olarak yaygın biçimde kullanılan RetScreen simülasyon yazılımından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Elektrik üretimi ve karbon salım miktarında azalma yönünde 1,8 %, amortisman süresinde ise artış yönünde 2,7 % sapma olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilen simülasyon kullanılarak yapılan duyarlılık analizleriyle etkin parametreler belirlenmiş ve eğim açısı, PV tipi ve üretim miktarlarının değiştirildiği farklı senaryolar oluşturulmuş ve teşvik alınması ve alınmaması durumları da göz önüne alınarak her senaryo için amortisman süresi hesaplanmıştır. Sonuç olarak, devletin karbon teşviği ve yerli malı PV modül kullanım teşviği vermesi durumunda, Polikristalin tipi PV panellerin 25° eğim açısıyla yerleştirilmesi, tüketim talebinden % 80 fazla oranda elektrik üretimi yapılabilecek bir santral kurulması gerektiği teknoekonomik ve çevresel açıdan optimum çözüm olduğu tespit edilmiştir. En iyi senaryo için amortisman süresi mevcut durumda 10,4 yıl olup, geliştirilen simülasyonda 6,7 yıl, RetScreen simülasyonunda ise 5,9 yıl olarak bulunmuştur.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Güneş Enerjisi, Fotovoltaik Güç Santrali, Fotovoltaik, Teknoekonomik, Optimizasyon

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Levent Çolak, Başkent Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

SIMULATION OF GÜRSU-BURSA PHOTOVOLTAIC POWER PLANT; TECHNO-ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION

Kıvılcım Merve Gültuna

Başkent University, Institute of Science, Department of Energy Engineering

The goal of this thesis is to develop a simulation model intended to the techno-economic and environmental optimization of photovoltaic power plant in the region of Gürsu Bursa. Usage of simulation software is significant to spend less time and save appropriations for investor of renewable energy. In this study, mathematical model has been developed by considering economical, technical, and environmental issues. In addition to that radiation on the inclined panel, PV panel efficiency, the power output of the plant, annual earnings, the amount of inhibited carbon emission, and the duration of amortization are calculated with the help of this simulation software. The results which are obtained from the developed simulation software are verified by comparing RetScreen simulation results used widely on the trading market. % 1.8 of decrease is determined in the amount of carbon emission and power generation; On the other hand, % 2.7 of decrease is determined in the duration of amortization. Effective parameters are determined by using the sensitivity analysis that are performed with the improved simulation. Moreover different scenarios are formed where the inclination angle, the type of PV and the amount of production are changed. The duration of amortization has been figured out for each scenario considering the case of being encouraged or not. As a result, the usage of Polycrystalline type panels with an inclination angle of 25° is determined as the optimum solution when the production rate is % 80 more than power demand, in the presence of governmental incentives for carbon emission and the usage of local PV models. Although amortization period is 10,4 years for Gürsu Bursa solar power plant at current situation, it was as 6,7 years for the developed simulation and 5,9 years for RetScreen simulation.

Key Words: Solar Energy, Photovoltaic Power Plant, Photovoltaic, Techno-economic, Optimization

Supervisor: Assistant Prof. Levent Çolak, Başkent University, Mechanical Engineering Department

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER	v
ÇİZELGELER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması	2
1.2 Tezin Amacı ve Yöntemi	7
1.3 PV Çeşitleri ve Özellikleri	8
2 GÜRSU BURSA GES ÖZELLİKLERİ	14
2.1 Gürsu Güneş Potansiyeli.....	15
3 MATEMATİKSEL MODEL	16
3.1 Teknik Yönden Modelleme	17
3.1.1 Işınım hesaplamaları	17
3.1.2 PV panel veriminin hesaplanması	24
3.1.3 Elektrik üretimine yönelik hesaplamalar	26
3.2 Çevresel Yönden Modelleme	27
3.3 Ekonomik Yönden Modelleme	29
3.4 Matematiksel Model Sınır Koşulları	32
4 SİMÜLASYON YAZILIMI VE DOĞRULAMASI	35
4.1 Doğrulamaya Yönelik Hesaplamalar	36
4.1.1 Mevcut santral için geliştirilen simülasyon sonuçları	37
4.1.2 Mevcut santral için retscreen simülasyonu sonuçları	40
4.2 Simülasyon yazılımının doğrulanması	47
5 DUYARLILIK ANALİZLERİ	51
6 OPTİMİZASYONA YÖNELİK SENARYOLAR	57
6.1 Eğim Açısı Değişimi Senaryosu	57
6.1.1 Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi	57
6.1.2 Tüketim talebinin üzerindeki değişken üretim oranları için eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi	59
6.2 Farklı Çeşit PV Hücre Tipi Kullanılması Senaryosu	62
6.2.1 İnce film PV hücre kullanımı	63

6.2.2 Monokristalin PV hücre kullanımı	65
6.3 Farklı PV Tipleri için Karbon Teşviği Olması Durumunda Amortisman Süresi Değişimi	70
6.4 En Uygun Senaryo için Retscreen ve Geliştirilmiş Simülasyon Karşılaştırması	72
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	74
7.1 Bulgular	74
7.2 Öneriler	77
KAYNAKLAR LİSTESİ	78
EKLER LİSTESİ	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 RetScreen aşamaları	6
Şekil 1.2 Monokristalin fotovoltaik panel	9
Şekil 1.3 Polikristalin fotovoltaik panel	9
Şekil 1.4 İnce film fotovoltaik panel	10
Şekil 1.5 Esnek panel	10
Şekil 1.6 PV tiplerine göre m ² başına düşen enerji miktarı	12
Şekil 2.1 Santral görünümü	14
Şekil 2.2 Gürsu Bursa Güneş potansiyeli atlası	15
Şekil 2.3 Gürsu Bursa Güneş ışınım değerleri	15
Şekil 3.1 Gürsu GES'in teknik şeması	16
Şekil 3.2 Zenit açısı	19
Şekil 3.3 Güneş geliş açısı	20
Şekil 4.1 Bursa iline ait eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışınımı	37
Şekil 4.2 Aylara ve saatlere göre panel yüzey sıcaklığı değişimi.....	38
Şekil 4.3 Aylara ve saatlere göre panel verimi değişimi	38
Şekil 4.4 RetScreen başlangıç ekranı	42
Şekil 4.5 RetScreen yük ve şebeke ekranı	43
Şekil 4.6 RetScreen enerji modeli ekranı	44
Şekil 4.7 RetScreen maliyet analizi ekranı	45
Şekil 4.8 RetScreen emisyon analizi ekranı	46
Şekil 4.9 RetScreen finansal analiz ekranı	47
Şekil 5.1 PV Panel verimi -amortisman süresi duyarlılık analizi	52
Şekil 5.2 Eğim açısı-amortisman süresi duyarlılık analizi	53
Şekil 5.3 Yakıt maliyeti -amortisman süresi duyarlılık analizi	54
Şekil 5.4 Yatırım maliyeti-amortisman süresi duyarlılık analizi	55
Şekil 6.1 Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi	59
Şekil 6.2 Talebin üzerinde farklı oranda elektrik üretimi olması durumunda co ₂ önleme teşviği ve yerli malı kullanım teşviği verilmesi ve verilmemesi için eğim açılarına göre amortisman süreleri	61
Şekil 6.3 25° eğim açısında elektrik üretimi artış oranlarına göre amortisman süresi değişimi	62

Şekil 6.4	25° eğim açısında, devlet teşviği verildiği ve verilmediği durumlarda elektrik üretim değerlerine göre amortisman süresi değişimi	69
Şekil 6.5	25° eğim açısında farklı pv hücre tipleri için devlet teşviği verilmesi ve verilmemesi durumlarında amortisman süresi değişimi....	70
Şekil 6.6	25° eğim açısında talep üzerinde artan elektrik üretimine göre, karbon teşviği verilmesi durumunda, farklı pv hücre tipleri için amortisman süresi değişimi	72

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Simülasyon programları karşılaştırması	3
Çizelge 1.2 PV tiplerine göre elektrik çevrim oranları	11
Çizelge 3.1 Gürsu Bursa GES'in teknik özellikleri	17
Çizelge 3.2 Bursa iline ait yatay yüzeye gelen ortalama güneş ışınım değerleri	18
Çizelge 3.3 Bursa iline ait eğimli yüzeye gelen saatlik ortalama güneş ışınım değerleri	23
Çizelge 3.4 Bursa iline ait eğimli yüzeye gelen aylık toplam güneş ışınımı değerleri	23
Çizelge 3.5 Gürsu Bursa GES'de kullanılan PV panel özellikleri	25
Çizelge 3.6 1993-2013 yılları arası 21 yıllık saatlik ortalama sıcaklık değerleri ...	26
Çizelge 3.7 Yakıt tiplerine göre emisyon faktörü	28
Çizelge 3.8 Mevcut santral değişken parametreleri	33
Çizelge 4.1 Geliştirilen simülasyon programı girdileri, ara çıktıları ve çıktıları	35
Çizelge 4.2 Gürsu Bursa GES'de kullanılan parametreler	36
Çizelge 4.3 Santralde üretilen aylık elektrik enerjisi	39
Çizelge 4.4 Gürsu Bursa GES için geliştirilen simülasyon çıktısı	40
Çizelge 4.5 Gürsu Bursa GES için RetScreen simülasyon yazılımı girdileri	41
Çizelge 4.6 İki simülasyon yazılımı girdilerinin aynı alınması durumunda program çıktıların karşılaştırılması ve doğrulanması	48
Çizelge 4.7 Retscreen ve geliştirilen simülasyon programı çıktıları karşılaştırması	48
Çizelge 4.8 Retscreen ve geliştirilen simülasyon girdi karşılaştırması	49
Çizelge 4.9 Retscreen ve geliştirilen simülasyon çıktı karşılaştırması	50
Çizelge 5.1 Duyarlılık oranları	56
Çizelge 6.1 Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi	58
Çizelge 6.2 Tüketim talebinin üzerindeki değişken üretim oranları için eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi durumu	60
Çizelge 6.3 İnce film fotovoltaik panel özellikleri ve birim fiyatı	63
Çizelge 6.4 İnce film PV kullanımı durumunda 25° eğim açısı için aylık elektrik üretim değerleri	64
Çizelge 6.5 İnce film PV panel kullanımı simülasyon çıktısı	65
Çizelge 6.6 Monokristalin PV panel özellikleri ve birim fiyatı	65
Çizelge 6.7 Monokristalin PV kullanımı durumunda 25° eğim açısı için aylık elektrik üretim değerleri	66
Çizelge 6.8 Monokristalin PV panel kullanımı simülasyon çıktısı	67

Çizelge 6.9	25° eğim açısında talep üzerinde değişken artan elektrik üretimine göre, devlet teşviği verildiği ve verilmediği durumlarda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişimi	68
Çizelge 6.10	25° eğim açısında talep üzerinde artan elektrik üretimine göre, Karbon teşviği verilmesi durumunda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişimi.....	71
Çizelge 6.11	Gürsu Bursa GES için mevcut durum ve en iyi senaryo karşılaştırması	72
Çizelge 6.12	En iyi senaryo için RetScreen ve geliştirilen simülasyon çıktıları.....	73

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

G_{sc}	Güneş Sabiti (W/m^2)
HNÇS	Hücre Normal Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
I_s	Yatay Düzleme Gelen Saatlik Toplam Işınım (kWh/m^2)
$I_{O,s}$	Atmosfer Dışı Yatay Düzleme Gelen Saatlik Güneş Işınımı (kWh/m^2)
$I_{b,s}$	Yatay Düzleme Gelen Saatlik Direkt Güneş Işınımı (kWh/m^2)
$I_{be,s}$	Eğik Düzleme Gelen Saatlik Direkt Işınım (kWh/m^2)
$I_{d,s}$	Yatay Düzleme Gelen Saatlik Difüz Güneş Işınımı (kWh/m^2)
$I_{de,s}$	Eğik Düzleme Gelen Saatlik Difüz Işınım (kWh/m^2)
$I_{re,s}$	Eğik Düzleme Gelen Saatlik Yansıyan Işınım (kWh/m^2)
$I_{TE,s}$	Eğik Düzleme Gelen Saatlik Toplam Güneş Işınımı (kWh/m^2)
k_t	Berraklık İndeksi
n	1 Ocak'tan İtibaren Gün Sayısı (gün)
R_b	Direkt Işınım Dönüşüm Katsayısı
s	Saat
T_a	Ortam Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_c	Fotovoltaik Hücre Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_r	Fotovoltaik Hücrenin Test Edildiği Sıcaklık ($^{\circ}C$)
β	Eğim Açısı ($^{\circ}$)
δ	Deklinasyon Açısı ($^{\circ}$)
η_c	Fotovoltaik Modül Verimi (%)
η_r	Test Değerlerinde Bulunan Fotovoltaik Modül Verimi (%)
η_o	Optik Verim (%)
η^*	Güneşten Gelen Işıma Göre Panelin Elektrik Üretim Verimi
θ	Güneş Geliş Açısı ($^{\circ}$)
θ_z	Zenit Açısı ($^{\circ}$)
μ	Fotovoltaik Hücre Sıcaklık Katsayısı

ρ	Yansıtma Oranı
ϕ	Enlem Açısı (°)
ω	Saat Açısı (°)
A_k	Toplam kollektör alanı (m^2)
E_s	Saatlik Elektrik Üretimi (kWh)
$E_{gün,n}$	Günlük Elektrik Üretimi (kWh)
$E_{ay,i}$	Aylık Elektrik Üretimi (kWh)
$E_{yıl}$	Yıllık Toplam Elektrik Üretimi (kWh)
$E_{tük.tal.}$	Tüketim talebinde elektrik üretimi (kWh)
i	Bir Yılda Ay Sırası
y	Bir Aydaki Gün Sayısı
$T_{önlünen-CO_2}$	Toplam Önlünen Miktarı (kg CO ₂)
n_{CO_2}	CO ₂ Emisyon Faktörü (kg CO ₂ /kWh)
n_{PV-CO_2}	PV Modül Üretiminde Ortaya Çıkan CO ₂ Emisyon Faktörü (kg CO ₂ /kWh)
T_{PV-CO_2}	PV Modül Üretiminde Ortaya Çıkan CO ₂ Salım Miktarı (kgCO ₂)
T_{CO_2}	Önlünen Net CO ₂ Salım Miktarı (kgCO ₂)
P_g	Toplam Kurulu Güç (kW)
F_{CO_2}	CO ₂ Salımı Önleme Teşviği (\$/ton)
K_{CO_2}	CO ₂ Teşviği Kazancı (\$)
t	Amortisman Süresi (yıl)
G	İlk Kurulum Maliyeti (\$)
G_{PV}	Toplam PV Maliyeti (\$),
G_{arsa}	Toplam arsa bedeli (\$)
G_{top}	Toplam Kurulum Maliyeti (\$)
F_{arsa}	m^2 'deki Arsa Bedeli (\$)
$A_{k,1kW}$	1 kW Santral Kurulumu İçin Gerekli Toplam Alan (m^2)
$K_{ay,i}$	Aylık Santral Kazancı (\$)
$K_{yıl}$	Toplam Santral Kazancı (\$)

$K_{top-leüy}$	Toplam LEÜY Kazancı (\$)
$F_{k-1,i}$	Elektrik Toptan satış fiyatı (\$)
$K_{top-yerli}$	Toplam Yerli Malı Kazancı (\$)
$F_{k,i}$	İstenilen Ay İçin Elektrik Satış Fiyatı (\$)
k	Yıl Sayısı
z	Tahmin Edilen Amortisman Süresi (yıl)
m	Elektrik Fiyatı Artış Oranı
F_{i-ort}	Her Ay İçin Tahmin Edilen Amortisman Süresince Yıllık Hesaplanan Elektrik Kazancı Ortalaması (\$)
$F_{leüy}$	Şebekeye Satılan Her kWh Enerji İçin Devlet Tarafından Ödenen Ücret (\$)
F_{yerli}	Yerli Malı PV Modülü Kullanılması Durumunda Her kWh Enerji için Devlet Tarafından Ödenen Ücret (\$)
K_{top}	Toplam kazanç (\$)
GES	Güneş Enerjisi Santrali

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında, enerji kaynağı olarak güneşin kullanımı ile elektrik üretimi yapan bir santralin hem teknik hem ekonomik hem de çevresel açıdan optimizasyonu yapılmıştır. Yerkürede bulunduğu konum açısından güneşlenme alanı ve süresi oldukça iyi olan ülkemizde güneş enerjisi alternatif enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, ülkemizde yılda m² başına 1100 kWh'lik güneş enerjisi potansiyelinin olduğunu göstermektedir [1]. Bu açıdan bakıldığında güneş enerjisi gelecek yıllar için ülkemizde yerli enerji kullanımının yaygınlaşması açısından önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Güneş enerjisinin alternatif bir enerji kaynağı olarak çekiciliğinin artmasındaki diğer faktörler güneş pillerinin yüksek güvenilirliği, kararlı performans artışı, üretim masraflarının azaltılması ve diğer bir husus olarak güneş pillerinin yakıt giderine sahip olmamasıdır.

Güneş enerjisi kullanımının birçok avantajına karşılık güneş panellerinin kurulum maliyetlerinin oldukça yüksek ve kendilerini amorti edebilme süreleri ise oldukça uzun olma gibi dezavantajları da vardır.

2023 yılında elektriğin en az %30'unun yenilenebilir kaynaklardan sağlanması amaçlanıyor. Ülkemizin kurulu gücünün 2023 yılında 120.000 MW'a ulaşması hedefleniyor. Türkiye enerji kullanımı bakımından dışa bağımlı olup, enerji giderleri bütçemizde büyük bir paya sahiptir. Ayrıca dışa bağımlı olduğumuz konvansiyonel enerji kaynakları çevre için tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının henüz yeni sayılabilecek teknolojiler ile mümkün olduğundan maliyetli olabilmektedir. İyi bir fizibilite analizi ve modelleme, üreticiyi deneme yanılma yapmadan yüksek maliyetlerden kurtarıırken zaman kaybını da azaltır [2].

Bu tez için pilot proje olarak Gürsu Bursa Belediyesinin yapmış olduğu Güneş enerjisi santrali seçilmiştir. Gürsu Bursa GES 'in şebekeye bağlı ilk Güneş enerjisi sistemi olması, bu çalışma için pilot proje olarak seçilmesinde etkili olmuştur.

1.2 Literatür Taraması

Bu çalışma kapsamında öncelikle ulusal ve uluslararası tezler, yayınlar ve bildiriler incelenmiş olup, Türkiye'de benzer bir tez çalışması yapılmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada bir simülasyon yazılımı geliştirilmesi hedeflendiğinde ticari olarak kullanılan benzer simülasyon yazılımları incelenmiştir. Buna göre,

Lalwani ve arkadaşları [3] "Simulation of Photovoltaic Systems Electricity Generation Using Homer Software in Specific Locations in Serbia" isimli makalesinde solar fotovoltaik simülasyon yazılımları araştırmasında farklı simülasyon programları hakkında karşılaştırmalar yapmıştır. Bu makaleden RetScreen simülasyon programının bu tezde geliştirilecek simülasyonun doğrulamasında kullanılabilecek en iyi program olduğu görülmüştür. Bu makale, Bölüm 4'de matematiksel model ile karşılaştırma yapılmasını sağlayacak simülasyon programının seçilmesi için yol gösterici ve daha uygun bir yazılımın seçilmesi açısından faydalı olmuştur. Çizelge 1.1 de Simülasyon programları karşılaştırması yapılmıştır.

Çizelge 1.1 Simülasyon programları karşılaştırması [3]

Program	RetScreen	Homer	Trnsys	Pvsyst
Maliyet	Ücretsiz	Ücretsiz	\$ 2.100	963 \$
Temel Prensip	Karar destek aracı olması	Maliyetin minimize edilmesi	Simüle edilecek ekipmanların bulunduğu kütüphaneyi içermesi	Boyutlandırma, simülasyon ve veri analizi için bir yazılım paketi olması.
Pozitif Yönleri	Enerji üretimini, tasarruflarını, maliyetlerini, emisyon indirimlerini ve finansal canlılığı tahlil etmesi	Hibrit Sistemler için tercih edilmesi	Analiz, boyutlandırma, bina kontrol şemaları, yenilenebilir enerji tasarımlarında kullanılması	Teknik anlamda inceleme yapması
Negatif Yönleri	Farklı senaryolara ve duyarlılık analizlerine cevap verememesi.	Tekil sistemler için hibrit sistemler kadar verimli sonuç vermemektedir.	Optimizasyon anlamında geridir.	Optimizasyon anlamında geridir.
Girdiler	Proje yeri bilgileri, yatırım bedeli, elektrik baz fiyatları, emisyon faktörü,	Maliyet, güneş ışınım değerleri, PV ve invertör değerleri, yatırım bedeli,	Boyutlar, sıcaklık, nicel parametreler	PV ve invertör tipi, proje yeri parametreleri
Çıktılar	Amortisman Süresi, emisyon miktarı	Maliyet Hassasiyeti, performans değerleri, hassasiyet analizler	Güç üretim miktarı, enerji oranı	Güç üretim miktarı, gölgelenme faktörü hesaplama, kayıp analizleri

Bu çalışmanın konusuyla direkt ilişkili olmasa da bir simülasyon geliştirilmesine yönelik farklı çalışmalar incelenmiştir. Buna göre,

Sivrioğlu ve arkadaşları [4]; Ankara'daki bir alış-veriş merkezi için kojenerasyon sisteminin ekonomik açıdan kabul edilebilirliği incelenmiştir. Elektrik maliyeti için, kojenerasyon yakıt maliyeti için, ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresi için özet tablosu yapılmıştır. Hassasiyet ve duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada elektrik fiyatları % 8 düşerse ve elektrik fiyatları % 15 artarsa durumları için senaryolar oluşturulmuş ve geri ödeme süresi hesaplamaları yapılmıştır. Bu makale Bölüm 6'da geri ödeme sürelerinin karşılaştırılması ve geri ödeme süreleri ile elektrik fiyatları arasında bir kıyaslama yapılması, senaryo oluşturulması ve simülasyon programı ile analiz yapma konusunda yol göstermektedir.

Canan [5], yaptığı araştırmada fotovoltaik hücre çeşitlerini ve fotovoltaik hücrelerin karakteristik özelliklerini incelemiştir. Bu araştırmada, fotovoltaik panellerin çevrim oranlarını, 1 kW için gerekli panel alanlarını ve PV tiplerine göre m² başına düşen enerji miktarını incelenmiştir. Bu çalışma Bölüm 4'de geliştirilen simülasyon programında, girdi olarak kullanılan, fotovoltaik panellerin 1 kW için gerekli panel alanlarının kullanımı için fayda sağlamıştır.

Jordan [6], yaptığı çalışmada yatay düzleme gelen güneş ışınım değerlerinden, eğik düzleme gelen güneş ışınım değerlerinin hesaplanması için bir metod geliştirmiştir. Yatay düzleme gelen ışınım değerleri ile eğik düzleme gelen difüz, direk ve yayılı ışınım hesaplamaları yapmış, bu üç ışınım hesabının toplamı ile eğik düzleme gelen saatlik toplam güneş ışınım değerlerine ulaşmıştır. Bu metod Bölüm 3'de Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan saatlik yatay güneş ışınım değerleri ile saatlik eğik düzleme gelen ışınım değerleri hesaplanmasında faydalı olmuştur.

Orgill ve arkadaşları [7] yaptıkları çalışmada yatay düzleme gelen difüz güneş ışınım modeli geliştirmiştir. Modelde saatlik berraklık indeksi ve difüz ışınım oranı kullanılarak yatay düzleme gelen saatlik difüz güneş ışınım şiddeti hesaplanır. Bu çalışma Bölüm 3'de matematiksel modelin yatay düzleme gelen saatlik difüz ışınım hesaplaması yapılmasında oldukça faydalı olmuştur.

Kacira ve diğeri [8], fotovoltaik panellerin performans araştırmasında, eğik düzleme gelen saatlik yansıyan güneş ışınımı değerleri hesaplamasında yüzey yansıtma oranının 0,2 olarak alınması gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışma Bölüm 3'de ışınım hesaplamaları yapmada yüzey yansıtma oranının 0,2 olarak alınmasında fayda sağlamıştır.

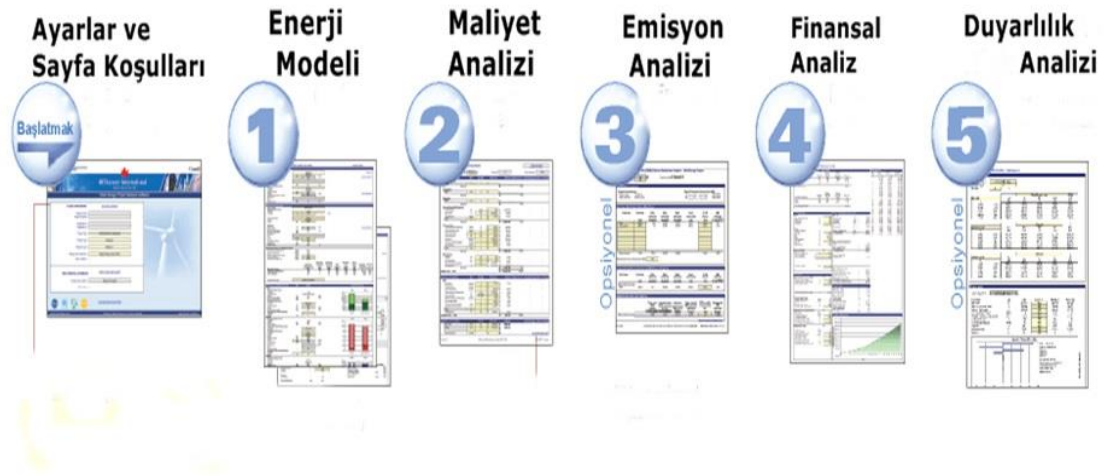
Deniz [9], güneş enerjisi santrallerinde kayıplar çalışması kapsamında GES'lerde görülmesi muhtemel kayıplar sınıflandırılmış ve incelenmiştir. Bu kayıpların muhtemel sonuçları ve GES'in performansına etkileri açıklanmıştır. PV sistemlerin binalarda kullanılmasında performansı etkileyen parametrelerden bahsedilmiş, Türkiye ve dünyadaki uygulamalardan seçilen PV sistem örneklerini incelemiştir. Fotovoltaik sistemlerde performansı etkileyen konum, yönlendirme ve eğim açısı, gölgelenme, panel tipi, modüllerin arkasında oluşan sıcaklık ve panel yüzey temizliği gibi etmenler göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışma Bölüm 3'de panel verimi hesaplamaları yapmada faydalı olmuştur.

Aslanoğlu ve arkadaşları [10] Elektrik üretimine bağlı Karbon emisyonu hesaplama çalışmalarında CO₂ emisyonlarının belirlenmesi için mevcut ve planlanan santrallerin elektrik üretimi ve yakıt tüketim verileri, emisyon faktörleri, yakıt alt ısı değerleri, ortalama termodinamik verimleri ve elektrik talep tahmin değerleri kullanılmıştır. Mevcut santrallere ait yakıt tüketimine bağlı CO₂ emisyonu ve yakıt bazında özel emisyon faktörleri belirlenmiştir. Daha sonra planlanan santrallere ait CO₂ emisyonu belirlenmiştir. Bu çalışma Karbon emisyon faktörlerinin bilinmesi ve yakıt tüketimine bağlı CO₂ emisyonu hesaplamaları yapılması için yardım sağlamaktadır. Bu çalışma Bölüm 3'de çevresel faktörlerin değerlendirilmesinde faydalı olmuştur.

Varınca ve arkadaşları [11], yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları arasında hem sahip olduğu mevcut potansiyel hem de üretim teknolojileri bakımından farklı ve önemli bir yeri olan güneş kaynaklı enerji üretim sistemleri ve bu sistemlerin muhtemel çevresel etkilerini incelemiş, muhtemel olumsuz etkilerinin minimize edilmesi veya ortadan kaldırılmasına yönelik bazı değerlendirme ve önerilerde bulunmuşlardır.

Bu çalışma Bölüm 3'de fotovoltaik panellerin üretiminden kaynaklanan emisyonlar elektrik üretim emisyonlarına nazaran önemsiz de olsa fotovoltaik modül kullanımı ile hesaplanan emisyonların hesaplamasında faydalı olmuştur.

Bu çalışmada doğrulama amaçlı kullanılması planlanan RetScreen simülasyon yazılımı daha ayrıntılı incelendiğinde, bu çalışma için diğer enerji yazılım programlarından daha uygun olduğu belirlenmiştir. RetScreen aşağıda bahsedilen birçok özelliği sayesinde piyasa tarafından kabul edilmiş başarılı bir yazılım programıdır. Kanada Hükümeti tarafından hazırlanan RetScreen simülasyon yazılımı hem teknik hem ekonomik hem de çevresel açıdan en uygun optimizasyon aracıdır. Santrallerin üretim miktarlarını, çevreye etkilerini, teknik ve ekonomik uygulanabilirliklerini değerlendirmek üzere kullanılmaktadır ve ön değerlendirmeleri kolaylaştırır. Beş adımda standart bir analiz sağlar. Aşağıda RetScreen'in şekilsel olarak sayfalarını görülmektedir. Şekil 1.1'de RetScreen aşamaları verilmiştir.



Şekil 1.1 RetScreen aşamaları

Ayarlar ve sayfa koşulları kısmında proje tipi olarak, elektrik üretimi, kombine sistemler gibi yapılacak proje seçilir. Projede kullanılan yenilenebilir enerji tipi ve projenin uygulandığı bölge seçilir. Proje yerinin seçilmesi ile veri bankasında bulunan enlem, boylam, hava sıcaklığı, güneş radyasyonu değerleri çıktıları alınır.

Simülasyonun yük ve şebeke kısmında elektrik yükü hesaplaması yapılır. Aylık elektrik kullanım miktarı ve elektrik satın alış fiyatı girilerek, simülasyon girdileri bu sayfada oluşturulmaya devam edilir.

RetScreen enerji modeli kısmında sistemde kullanılan ekipmanların kullanım değerleri girilir ve işletme stratejisi belirlenir. İnvvertör ve fotovoltaik özellikleri ile santralden şebekeye elektrik satışı olması durumunda ihracat fiyatı girilerek elektrik üretim değeri hesaplaması yapılır.

Simülasyonun maliyet analizi kısmında finansal analiz kısmındaki çıktıları alabilmek için santral kurulumu için yapılan ya da öngörülen maliyetler girilmektedir.

Emisyon analizinde kısmında, santralin yaptığı elektrik üretimi sayesinde önlenen Karbon emisyon miktarı verilmektedir. Bu kısımda emisyon faktörü yakıt tipine göre değiştirilebilmektedir.

Finansal analiz kısmında, maliyet analizi kısmında santralin kurum maliyeti, yük ve şebeke kısmında elektrik alış fiyatı, enerji modeli kısmında santralde kullanılan teknik ekipman özellikleri girdileri ile amortisman süresi hesaplanır.

RetScreen programı ile duyarlılık analizleri sınırlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. RetScreen simülasyon yazılımı duyarlılık oranı vermemektedir. Duyarlılık analizleri sadece simülasyon programının belirlediği kalemler olabilmektedir. Kullanıcı farklı bir parametreyi değiştirerek duyarlılık analizi gerçekleştirememektedir [12].

1.2 Tezin Amacı ve Yöntemi

Bu tez kapsamında fotovoltaik güç santrallerinin teknoekonomik ve çevresel yönden optimizasyonunun yapılarak, simülasyon yazılımı yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda aşağıda adımları verilen bir metodoloji uygulanmıştır.

- PV güç santrallerinin optimizasyonuna yönelik amaç fonksiyonunun belirlenmesi için bir matematiksel model oluşturulmuş,
- Matematiksel model kullanılarak Excel'de bir simülasyon programı geliştirilmiş,

- Modelin ve geliştirilen simülasyonun doğrulanması için bu çalışma kapsamında belirlenen Gürsu Bursa santrali verileri ile hem geliştirilen simülasyonda hem de piyasada ticari olarak yaygın kullanılan RetScreen yazılımında sonuçlar elde edilmiş,
- Sonuçların karşılaştırılması ile model doğrulanmış,
- Doğrulan modelde optimizasyon senaryolarının belirlenebilmesi için etkin parametrelerin tespitine yönelik duyarlılık analizleri yapılmış,
- Etkin parametrelere göre senaryolar oluşturulmuş ve simülasyon yazılımı ile optimum teknik ve ekonomik koşulların belirlendiği bir sistem tasarlanmıştır.

1.3 PV Çeşitleri ve Özellikleri

Fotovoltaik (PV) hücreler daha yüksek akım, gerilim veya güç seviyesi elde etmek için elektriksel olarak seri veya paralel bağlanırlar. Fotovoltaik modüller çevre etkilerine karşı sızdırmazlık sağlayacak şekilde birbirine eklenmiş fotovoltaik hücreler içerirler. Fotovoltaik paneller elektrik kabloları ile birbirine bağlanmış iki veya daha çok sayıda Fotovoltaik modül içerirler. Fotovoltaik diziler ise belli sayıda Fotovoltaik modül veya panel içeren enerji üretim ekipmanlarıdır.

Monokristalin: Endüstriyel olarak kullanılan en yaygın fotovoltaik hücrelerden bir tanesidir. Kalite ve verimlilik açısından monokristalin güneş pilleri yüksek verimli mono kristalin hücrelerden oluşmuşlardır. Bu Paneller aynı gücü üreten Polikristalin fotovoltaik hücrelere göre daha yüksek verimlilikle çalışmaktadır [5].

Buna karşın üretiminde kullanılan teknoloji sebebiyle üretim süreci uzun sürmektedir. Yinede monokristalin güneş pilleri uzun vadeli yatırım için en iyi seçenektir. Güneş pilinin monokristalin olması demek tüm hücrenin sadece kristalinden oluşması ve materyalin atomal yapısının homojen olması demektir. Doğada bulunan tüm kristalin bileşimler aslında polikristalindir. Sadece elmas, neredeyse mükemmel monokristalin özelliğe sahiptir [5]. Şekil 1.2'de monokristalin fotovoltaik panel örneği görülmektedir.



Şekil 1.2 Monokristalin fotovoltaiik panel

Polikristalin: Kalite ve verimlilik açısından Polikristalin güneş pilleri monokristalin olanlardan biraz daha düşük verimli hücreler ile üretilmiştir. Ancak buna rağmen kullanım alanı daha yaygındır. Bunun en büyük nedeni ise daha kolay ulaşılabilir ve buna bağlı olarak daha uygun fiyatla bulunabilmesidir. Bu nedenle verimlilik/maliyet oranı hayli yüksektir. Yaklaşık 90 yıl ömürleri vardır. Polikristalin fotovoltaiik hücre, materyalin monokristalin fotovoltaiik hücreye göre tek kristalinden oluşmaması, materyalin tam olarak homojen olmaması demektir [5]. Şekil 1.3'de Polikristalin fotovoltaiik panel örneği verilmiştir.



Şekil 1.3 Polikristalin fotovoltaiik panel

İnce film: Işık yutma oranı yüksek olan bu hücreler, düşük verimlilikleri nedeni ile pazar payının küçük bir bölümünü oluştururlar. İnce film paneller sıcağa daha dayanıklıdır ve panellerin üzerine herhangi bir gölge düştüğünde gölge dışındaki alan elektrik üretmeye devam eder. İnce film fotovoltaiik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir.

Başka bir deyişle ince film yarı-iletken malzeme, büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine değişen damarlardan oluşmaktadır.

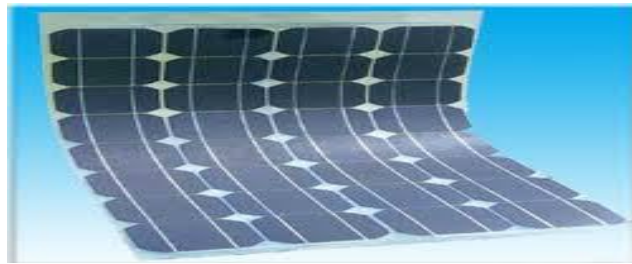
Bu panellerin verimlilik oranları % 7-14 arasında değişmektedir [5]. Şekil 1.4'de İnce Film fotovoltaik panel örneği görölmektedir.



Şekil 1.4 İnce Film fotovoltaik panel

Esnek Fotovoltaik Panel: Geleneksel güneş panellerine alternatif olarak, özellikle çatı uygulamaları için geliştirilmiş bir teknolojidir. PV konstrüksiyonlarının çatıya entegresinin zor olduğu uygulamalarda çatı izolasyonuna zarar vermeden monte edilebilir.

Birçok uygulamada enerji üretiminin yanında çatı membranı olarak da kullanılabilir. Kristal ve ince film hücrelerden oluşan güneş paneli çeşitleri mevcuttur. İnce film hücrelerden oluşan panellerin en önemli özelliği esnek olmasıdır. Her hangi bir konstrüksiyon ihtiyacı yoktur. Ayrıca kristal yapılı güneş panellerine göre ağırlık dağılımında avantaj sağlar. Cam içermediği için kırılma tehlikesi yoktur. En büyük özelliği ise taşınabilir olmasıdır [5]. Şekil 1.5'de Esnek fotovoltaik panel örneği görölmektedir.



Şekil 1.5 Esnek fotovoltaik panel

Kadmiyum Tellür (CdTe): Çok kristalli yapıya sahip bir yarı iletken olan bu malzeme, ışınları soğurmada yüksek verime sahiptir. Yaklaşık 1 μm kalınlığa sahip olmasına rağmen, üzerine gelen güneş ışınlarının %90'ını absorbe edebilmektedir.

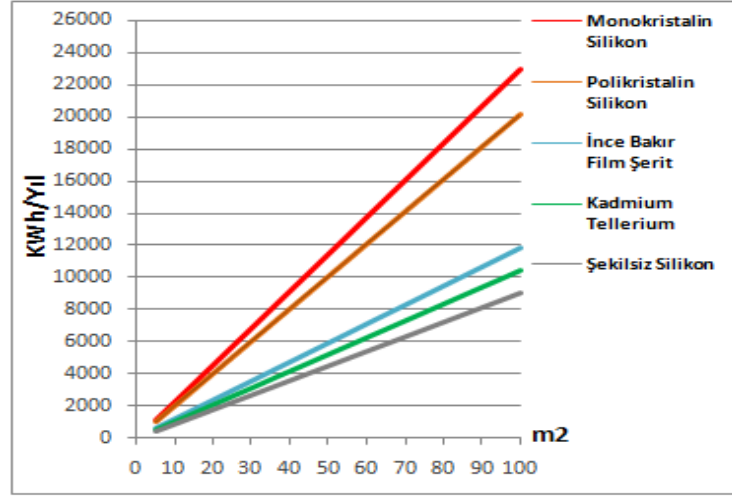
Kolay ve ucuz yöntemlerle üretilir. Ünite üzerinde çok az miktarda kullanılmasına rağmen, kadmiyum zehirli bir maddedir ve üretim aşamasında bazı önlemler alınmaktadır [5].

Amorf Silikon (a-Si): Genellikle az güç çıkışı ve az maliyet istenen, örneğin tüketici elektroniği sektöründe, yerlerde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Şekilsiz (amorf-silikon olarak da anılır) silikonlu PV üniteleri, diğer silikonlu üniteler gibi kristalli yapıya sahip değildir. En önemli özelliği, tek kristalli yapıdaki silikon PV ünitelerine göre yaklaşık 40 kat daha fazla ışığı absorbe edebilmesidir. Bu nedenle, çok ince bir a-Si tabakası (yaklaşık 1 µm, kristalli silikonlarda yaklaşık 200 µm) PV ünitesi yapımı için uygundur. Kristalli pillere göre maliyetleri daha düşüktür. Bütün bu avantajların yanında, parlak güneş ışığı altında kaybedebildiklerinden dolayı son derece hassastırlar [5]. Çizelge 1.2'de PV tiplerine göre elektrik çevrim oranları ve 1 kW için gerekli panel alanı verilmiştir.

Çizelge 1.2 PV tiplerine göre elektrik çevrim oranları [5]

Pil Hammaddesi	Elektrik Çevrim Oranı	1 kW için Gerekli Panel Alanı (m²)
Monokristalin Silikon	15-18	7-9
Polikristalin Silikon	13-16	8-11
İnce Film Şerit, Bakır İndiyum Diselenit	7.5-9.5	11-13
Kadmiyum Tellurit	6-9	14-18
Amorf Silikon	5-8	16-20

Gürsu Bursa Bölgesinde yıllık m² başına üretilebilecek enerji miktarı farklı PV'ler için Şekil 1.6'da verilmiştir. Verimi en yüksek olan monokristalin silikondan en fazla enerji alınmıştır. Maliyeti az ama verimi düşük olan şekilsiz silikon PV'lerden en düşük enerji sağlanmıştır.



Şekil 1.6 PV tiplerine göre m² başına düşen enerji miktarı [5]

Sonuç olarak bu çalışmanın ilk bölümünde, literatür araştırması yapılmış, daha önce yapılmış olan güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji sistemleri projelerinden faydalanılmıştır. Bu çalışmada gerekli olan bilgiler edinilerek farklı bakış açıları değerlendirilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar ile, bu çalışma için mantıksal bir temel hazırlanmış ve matematiksel modelleme kısmında yapılan hesaplamalar için denklemler edinilmiştir. Çalışmanın amacı ve bu amaca bağlı olarak uygulanacak metodoloji verilmiştir. Teknolojik olarak farklılık gösteren fotovoltaik hücre özellikleri, fotovoltaik panellerin elektrik çevrim oranları ve PV tiplerine göre m² başına düşen enerji miktarları verilmiştir.

İkinci bölümde, Pilot proje olarak seçilen Gürsu Bursa GES'in özellikleri verilmiş ve Gürsu bölgesinin Güneş potansiyeli incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, PV güç santrallerinin optimizasyonuna yönelik amaç fonksiyonunun belirlenmesi için bir matematiksel model oluşturulmuştur. Teknik yönden modelleme kısmında ışınım hesaplamaları PV panel veriminin hesaplaması ve elektrik üretimine yönelik hesaplamalar yapılmıştır. Çevresel yönden modelleme kısmında ne kadar miktarda CO₂ salımının azaltıldığı ve PV üretimi ile hangi miktarda CO₂ salımı yapıldığı hesaplanmış, Karbon ticareti yapılması durumunun kazanca ve amortisman süresine etkisi tartışılmıştır.

Ekonomik yönden modelleme kısmında amortisman süresi ve amortisman süresine etki eden parametreler hesaplanmıştır. Sistemin modellemesinde sabit ve değişken parametreler matematiksel model sınır koşullarında belirlenmiştir

Dördüncü bölümde, mevcut santral için bir simülasyon programı geliştirilmiş, geliştirilen simülasyon programı ve RetScreen simülasyon programına girdiler girilerek sonuçlar alınmış, bu sonuçlar karşılaştırılarak bir doğrulama yapılmıştır. Geliştirilen simülasyon yazılımında, RetScreen simülasyon yazılımından fazla olarak girilen değerler ile alınan sonuçların sapmaları değerlendirilmiş ve her iki simülasyon yazılımının girilen değerleri eşitlenerek alınan sonuçların sapmaları ile doğrulama yapılmıştır.

Beşinci bölümde, geliştirilen simülasyon programında duyarlılık analizleri incelenmiştir. Eğitim açısı-amortisman süresi, PV panel verimi-amortisman süresi, ilk maliyetler- amortisman süresi ve yakıt gelir maliyeti- amortisman süresi duyarlılık analizleri yapılmış, duyarlılık oranları hesaplanmıştır. Duyarlılığı en hassas olan parametrenin bulunması hedeflenmiştir.

Altıncı bölümde, duyarlılık analizleri sonucunda en hassas olarak bulunan parametrelere ait farklı senaryolar geliştirilmiş, bu senaryolara ait değerler geliştirilen simülasyon programına girilerek çıktılar alınmış, senaryolar sonucunda GES için en optimum sonuç bulunmuştur.

Yedinci bölümde bu çalışmanın sonuçları değerlendirilmiş, optimum sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. GÜRSU BURSA GES ÖZELLİKLERİ

Bursa-Gürsu GES projelendirme ve uygulamasını Merk Solar Enerji Çözümleri'nin gerçekleştirdiği, 96 kW güce sahip bir Güneş enerjisi santralidir. Santralin kurulması için toplamda 346.500 TL yatırım yapılmıştır. TEDAŞ Geçici Kabulü 29 Ocak 2013 tarihinde gerçekleştirilen tesis, bir aylık test sürecinin ardından 5 Mart 2013 tarihinde elektrik üretimine başlamıştır. Tesis LEÜY (Lisanssız Elektrik Üretimi Yönetmeliği) kapsamında tamamlanan ilk Güneş Enerji Santrali olmuştur. Şekil 2.1 de Santral görünümü verilmiştir. Gürsu Bursa Belediyesi tarafından hayata geçirilen “Sınırsız Temiz Enerji ile Kalkınan Bir Gürsu” projesi kapsamında oluşturulan Güneş Enerji Sistemi, TEDAŞ (Türkiye Elektrik ve Dağıtım Anonim Şirketi) tarafından onaylanan ilk lisanssız yüksek gerilim projesi olma özelliği taşımaktadır.

Belediye Stratejik Planlama Bitarafından hazırlanan ve (Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı) BEBKA tarafından verilen hibe desteği ile hayata geçirilmiş bir Güneş Enerji sistemidir.



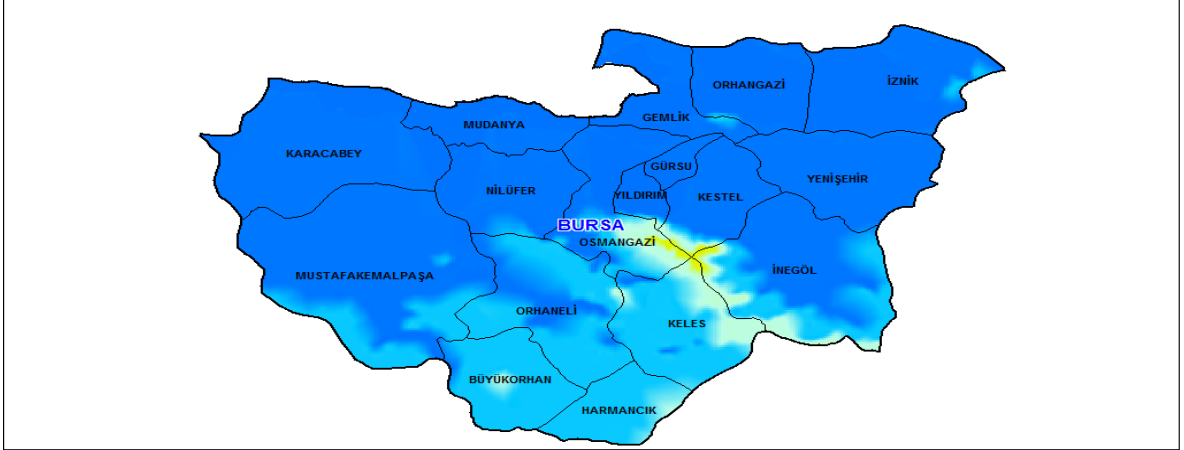
Şekil 2.1 Santralin görünümü

Tesis birçok özelliğiyle Türkiye'de ilk olma özelliği taşımaktadır. Bunlar;

- Projesi onaylanan ilk yüksek gerilim bağlı GES'tir.
- Lisanssız Elektrik Üretimi Yönetmeliği kapsamında üretim-tüketim noktalarının farklı olduğu ilk referans uygulamadır.
- Kendi enerji nakil hattı, trafosu ve hücreleri ile bağlantı yapan ilk GES'tir.
- Resmi olarak TEDAŞ Genel Müdürlüğü tarafından kabulü yapılan ilk GES'tir [13].

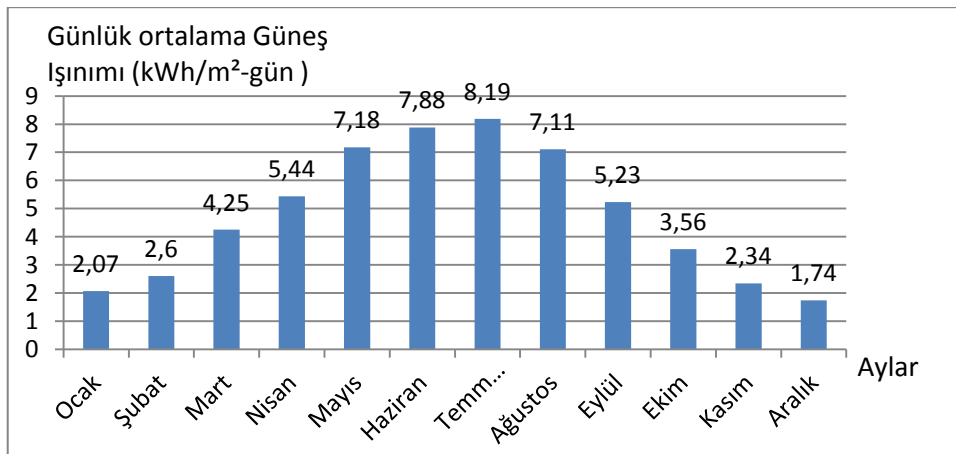
2.1 Gürsu Bursa Güneş Enerjisi Potansiyeli

Bursa, Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından sağlanmış iklim verilerine göre yılda m^2 başına 1.418 kWh güneş radyasyonu almaktadır. Aslında Türkiye için oldukça düşük olarak değerlendirilen bu ışınım değeri, Güneş paneli kullanımının yaygın olduğu olduğu Almanya'nın en çok ışınım alan bölgesinden daha fazla ışınım almaktadır. Şekil 2.2 de Gürsu Bursa'nun Güneş Potansiyeli haritası verilmiştir [14].



Şekil 2.2 Gürsu Bursa Güneş potansiyeli atlası

- EİE (Elektrik İşleri Enstitüsü) ve DMİ (Devlet Meteoroloji İstasyonu) istasyonlarında 1993-2013 yıllarına ait ölçüm yapılan 21 yıllık saatlik güneş ölçüm değerlerine göre Türkiye ortalama $3.6 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$, Bursa ortalama $3,8 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ güneş ışınımı almaktadır. Bu rakam Aralık ayında en düşük, Temmuz ayında da oldukça yüksektir [14]. Şekil 2.3 de Gürsu Bursa güneş ışınım değerleri verilmiştir.

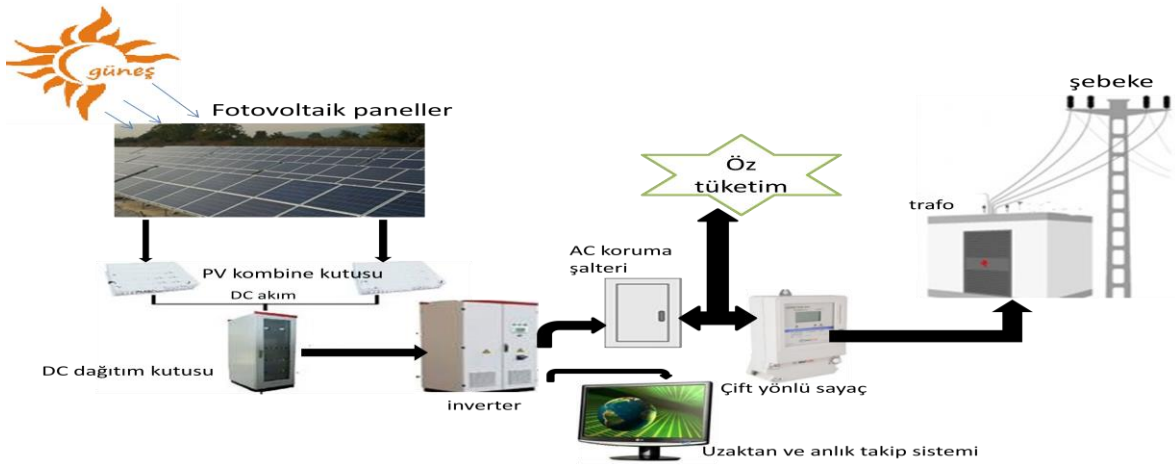


Şekil 2.3 Gürsu Bursa Güneş ışınım değerleri

3. MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışma Gürsu Bursa Bölgesinde kurulmuş olan bir GES'in fizibilite çalışmasını kapsamaktadır. Bu santralin fizibilite çalışmasını yapmak için matematiksel bir model oluşturulmuştur. Santral ile ilgili fiziki özellikler Giriş kısmının 1.3 bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Bu bölümde Gürsu Bursa bölgesinde kurulan GES'in teknik işleyişi verilmiştir. Güneşten alınan enerji fotovoltaik panellerle DC akıma çevrilir. PV'lerin kablolarının toplandığı PV kombine kutusundan DC dağıtım kutusuna geçecektir bu kutu yüksek voltajlarda invertöre zarar vermemesi için aslında bir controller gibi çalışır.

İnvertör, DC gerilimden AC gerilim elde etmek için kullanılan bir cihazdır. Sistemde alternatif akıma ihtiyaç duyulacağı için bir çevirici gerekmektedir. Fotovoltaik sistemin elektriksel korunumu DC yük şalteri, hat koruma şalteri, kaçak akım koruma şalteri ile sağlanır. Bunların yanı sıra yalıtım hatası sonucu meydana gelen dokunmaların getirdiği hayati tehlikeyi ve yangın ihtimalini önlemek için fotovoltaik sistem topraklanır. Üretilen enerjinin yeterli olmadığı durumlarda şebeke bağlantısını kullanarak elektrik ihtiyacını sağlayan, üretilen elektriğin tüketilenden daha fazla olduğu durumlarda ise şebekeye elektrik satışı gerçekleştirecek olan çift yönlü sayaç ile sistem tamamlanır. Gürsu Güneş Enerji Sisteminde, internet üzerinden oluşturulan sistemle elektrik üretimi ve günlük Güneş ışınım değerleri uzaktan izlenebilmektedir. Şekil 3.1'de Gürsu GES'in teknik işleyişi Çizelge 3.1'de santralin teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.1 Gürsu GES'in teknik şeması

Çizelge 3.1 Gürsu Bursa GES'in teknik özellikleri

Toplam kurulu güç	96 kW
Toplam kollektör alanı	644 m ²
Kullanılan kollektör markası	Canadian Solar CS6P-240P (Polikristalin)
Kullanılan fotovoltaik adeti	400
Bir adet PV fiyatı (2013 yılı)	234 \$
Fotovoltaiklerin verimi	% 14,92
Kullanılan invertör markası	Sunny Tripower
Kullanılan invertör adeti	5
Kullanılan invertör verimliliği	% 98,50
Proje ömrü	30 yıl

3.1 Teknik Yönden Modelleme

Bu çalışmanın teknik modellemesinde ışınım hesaplamaları, panel verim hesaplamaları ve elektrik üretimi denklem setleri türetilmiştir.

3.1.1 Işınım hesaplamaları

Elektrik üretiminin bulunabilmesi için öncelikle saatlik bazda eğimli yüzeye gelen güneş ışınımının bilinmesi gerekmektedir. Eğimli yüzeye gelen saatlik toplam güneş ışınımı; eğimli yüzeye gelen direkt, difüz ve yansıyan ışınımın toplamıyla hesaplanır. Bu hesaplama yapılırken Liu Jordan modeli ve Orgill, Hollands modeli kullanılmıştır. Bu hesaplama için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden Bursa iline ait 1993-2013 yılları arası 21 yıl için saatlik yatay düzleme gelen Güneş Işınım değerleri alınmıştır. Yatay düzleme gelen güneş ışınım değerlerinin bilinmesi ile eğimli yüzeye gelen direkt, difüz ve yansıyan ışınım hesaplanır. Eğimli yüzeye gelen direkt, difüz ve yansıyan ışınımın toplamı Eğimli yüzeye gelen saatlik toplam güneş ışınım değerlerini vermektedir. Çizelge 3.2'de Bursa iline ait yatay yüzeye gelen ortalama güneş ışınım değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 Bursa iline ait yatay yüzeye gelen ortalama güneş ışınım değerleri
(kWh/m²) [15]

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz.	Tem.	Ağu.	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
5-6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7-8	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
8-9	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
9-10	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
10-11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
11-12	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
12-13	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
13-14	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
14-15	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
15-16	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
16-17	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
17-18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
18-19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19-20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aylık Top.	2,07	2,60	4,25	5,44	7,18	7,88	8,19	7,11	5,23	3,56	2,34	1,74

Eğimli yüzeye gelen saatlik ışınım aşağıdaki adımlar takip edilerek bulunur.

Eğimli yüzeye gelen saatlik ışınım $I_{TE,s}$ (kWh /m²), eğimli yüzeye gelen direkt ışınım $I_{be,s}$ (kWh/m²), eğimli yüzeye gelen difüz ışınım $I_{de,s}$ (kWh /m²), eğimli yüzeye gelen yansıyan ışınım $I_{re,s}$ (kWh /m²) olarak gösterilmiştir. Eğik yüzeye gelen toplam ışınım, eğimli yüzeye gelen direkt, difüz ve yansıyan ışınımın toplanması ile Denklem (3.1)'den bulunur.

$$I_{TE,s} = I_{be,s} + I_{de,s} + I_{re,s} \quad (3.1)$$

Liu ve Jordan [6]modelinde eğik düzleme gelen direkt ışınımın hesaplanması Denklem (3.2)'de verilmiştir. Bu denklemde $I_{b,s}$ (kWh /m²) yatay düzleme gelen saatlik direkt güneş ışınımı, R_b direkt ışınım dönüşüm katsayısını vermektedir.

$$I_{be,s} = I_{b,s}R_b \quad (3.2)$$

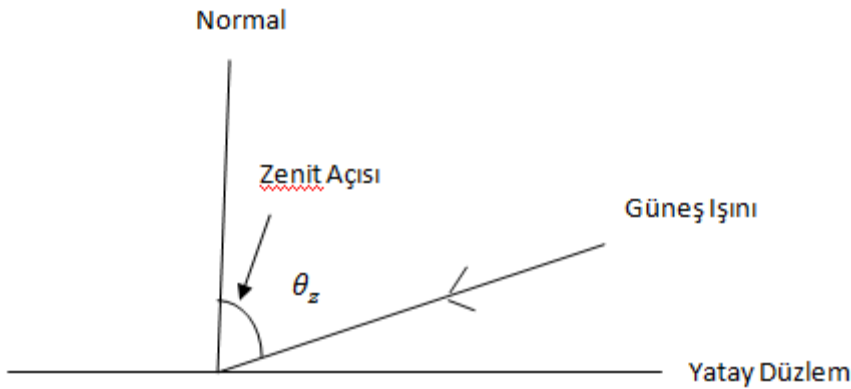
R_b güneş geliş açısının θ ve katsayısı zenit açısı θ_z 'nin birbirine oranı ile Denklem (3.3)'de bulunmuştur.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.3)$$

Zenit açısı, doğrudan güneş ışınımı ile yatay düzlemin dikeyi arasındaki açıdır. Zenit açısı, diğer bir deyişle güneş ışınlarının yatay düzleme geliş açısıdır. Zenit açısı diğer açılara bağlı olarak Denklem (3.4)'den hesaplanabilir [6].

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (3.4)$$

Şekil 3.2'de Zenit açısının gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2 Zenit Açısı

Deklinasyon açısı; güneş ışınları ve dünya arasında ki açısal ilişkiler bakımından en önemli olanıdır. Güneş ışınlarının aylar ve mevsimlere göre dünyaya geliş açısı olup ayrıca diğer bir tanımlamayla da güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Deklinasyon açısının diğer adı “sapma açısıdır”. Deklinasyon açısı dünyanın kendi eksenini ve yörünge düzlemi ile yaptığı 23,45°'lik açıdan kaynaklanır [6].

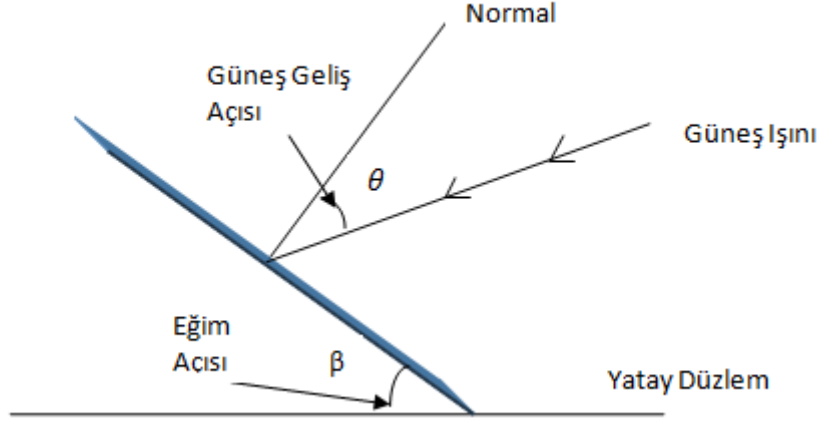
Deklinasyon açısının yaklaşık değeri Cooper denkleminde Denklem (3.5)'de hesaplanabilir;

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360(n+284)}{365} \right] \quad (3.5)$$

Denklemler (3.5)'de yer alan “n” = 1 Ocaktan itibaren gün sayısıdır. Örneğin 1 Ocak için n=1, 31 Aralık için n=365'dir.

Güneş geliş açısı, güneş ışınımı ile yatay yüzey arasındaki açıdır. Güneye yöneltilmiş eğimli yüzeyler için Denklem (3.1)'de hesaplanmış ve şekli, Şekil 3.2'de verilmiştir [6].

$$\cos\theta = \sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega \quad (3.6)$$



Şekil 3.3 Güneş Geliş Açısı

Çalışmada saatlik yatay düzleme gelen difüz güneş ışınımı hesabı için Orgill, Hollands modeli kullanılmıştır. Orgill ve Hollands, Liu Jordan modelinin üzerine yatay düzleme gelen difüz güneş ışınım modeli geliştirmiştir. Liu Jordan modelinde sabah 07:00 ye kadar ve akşam 16:00 dan sonra yatay ışınım değerleri düşük olduğundan dolayı difüz ışınım negatif çıkmaktadır. Liu Jordan modelinde difüz ışınım hesaplaması daha genel değerlendirmektedir.

Orgill ve Hollands modelinde [7], berraklık indeksi " k_t "nin değer aralıklarına göre difüz ışınım hesaplaması yapılmaktadır. k_t 'nin üç farklı değer aralığında alınması hesaplamaları daha doğru kılmaktadır. Aradaki farkı görebilmek için Liu Jordan modeli $I_{d,s}$ hesaplaması Denklem (3.7)'de, Orgill, Hollands modeli $I_{d,s}$ hesaplaması Denklem (3.8)'de verilmiştir. Çalışmanın matematiksel modellemesinde Orgill, Hollands modeli $I_{d,s}$ hesaplaması kullanılmıştır. Buna göre difüz ışınım $I_{d,s}$ (kWh / m^2) aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$I_{d,s} = I_{o,s}(0.384 - 0.416k_t) \quad (3.7)$$

$$I_{d,s} = I_{s \times} \begin{cases} 1 - 0,249k_t; & k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t; & 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177; & k_t > 0,75 \end{cases} \quad (3.8)$$

Denklemden k_t saatlik berraklık indeksidir. Aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$k_t = \frac{I_s}{I_{o,s}} \quad (3.9)$$

Denklem (3.10)'da $I_{o,s}$ (kWh /m²), atmosfer dışı yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınımı değeridir. G_{sc} güneş sabiti (1367 W/m²), ϕ enlem açısı, ω_2 ve ω_1 saat açıları, t_2 ve t_1 güneş saatleridir. Analizde t değerleri saat 5:00 ile 19:00 arasında alınmıştır, çünkü sadece bu saatler arasında güneş ışınımı mevcuttur.

$$I_{o,s} = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta] \quad (3.10)$$

Saat açısı Güneş ışınlarının bulunduğu boylam (güneş boylamı denilebilir) ile göz önüne alınan yerin boylamı arasındaki açıdır. Saat açısı, güneş boylamının göz önüne alınan yerin boylamı ile kesiştiği "güneş öğlesi" 'nden itibaren önce ise (-), sonra ise (+) olarak alınır. Güneş öğlesinde, güneş saati (GS) 12'dir. Güneş öğle vakti ile ilgili zaman arasındaki saat farkı, 15 sabit sayısı ile çarpılarak güneş saat açısı ω bulunur. Bu sabit sayı, dünyanın güneş etrafında bir defa dönüşü sırasında kat ettiği 360° 'lik açının 24'e bölünmesi ile elde edilmiştir.

Başka bir ifade ile bu katsayı, dünyanın güneş çevresinde 1 saatte yaptığı açıdır. Bir saat 15 boylama eşittir. Güneş açıları güneş öğlesine göre simetriktir.

Formül olarak ifade edersek;

$$\omega = 15 \times (GS - 12) \quad (3.11)$$

15 sabit sayısı her 15° saat açısı zaman olarak 1 saate tekabül eder diğer bir tanımlamayla dünyanın güneş çevresinde bir defa dönüşü sırasında kat ettiği 360°'lik açının 24 saate bölünmesiyle elde edilir yani 4 dakika da 1° olarak tanımlanabilir. Saat açıları güneş öğlesine göre simetriktir. Saat 14:00 (30°) ile saat 10:00'da (-30°) saat açıları eşittir [6]. Dolayısıyla ω_2 ve ω_1 değerleri Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'deki gibi hesaplanır.

$$\omega_2 = 15 \times (t_2 - 12) \quad (3.12)$$

$$\omega_1 = 15 \times (t_1 - 12) \quad (3.13)$$

$I_{b,s}$, yatay düzleme gelen saatlik direkt güneş ışınımı olup yatay düzleme gelen toplam ışınım (I_s) ile difüz ışınımın ($I_{d,s}$) farkından Denklem (3.14)'de hesaplanmıştır [6]. Burada I_s , Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan yatay düzleme gelen 21 yıllık saatlik ışınım değerleridir.

$$I_{b,s} = I_s - I_{d,s} \quad (3.14)$$

Bulunan bu değer denklem (3.2)'de yerine konarak, eğik düzlem için direkt ışınımın değeri bulunur.

Eğik düzleme gelen saatlik difüz güneş ışınımı $I_{de,s}$ Denklem (3.15) ile hesaplanır [6]. β yüzey eğim açısı, $I_{d,s}$ ise yatay düzleme gelen saatlik difüz güneş ışınımıdır ve denklem (3.8)'den hesaplanabilir.

$$I_{de,s} = \frac{1}{2} I_{d,s} (1 + \cos\beta) \quad (3.15)$$

Eğik düzleme gelen saatlik yansıyan güneş ışınımı değerleri $I_{re,s}$ (kWh / m²) Denklem (3.16) ile hesaplanmaktadır. Burada ρ yüzey yansıtma oranını ifade etmektedir. Bu çalışmada, literatürde genellikle kullanılan yüzey yansıtma oranı 0,2 olarak kullanılmıştır [8].

$$I_{re,s} = \frac{1}{2} \rho I_s (1 - \cos\beta) \quad (3.16)$$

Çizelge 3.3 de Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan yatay düzleme gelen güneş ışınım değerleri ile hesaplanan eğimli yüzeye gelen saatlik ortalama güneş ışınımı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Bursa iline ait eğimli yüzeye gelen saatlik ortalama güneş ışınım değerleri (kWh/m²)

Saat/Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz.	Tem.	Ağu.	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
5-6	0,06	0,05	0,07	0,50	1,15	1,22	0,83	0,36	0,16	0,07	0,05	0,03
6-7	0,06	0,09	0,58	1,95	3,81	4,66	4,20	2,58	1,25	0,47	0,13	0,01
7-8	0,23	1,28	2,72	5,53	8,24	9,09	9,14	7,38	4,59	2,83	-0,61	-0,32
8-9	1,97	3,02	6,26	10,76	13,40	13,69	13,27	11,08	7,21	6,30	3,65	2,07
9-10	4,55	5,69	10,46	13,18	16,66	17,42	18,22	16,79	14,35	10,57	7,77	4,73
10-11	8,08	9,46	14,07	16,13	18,93	19,76	21,17	20,83	18,26	14,68	11,21	7,79
11-12	10,03	11,26	15,30	17,02	20,32	21,31	22,60	22,31	18,87	14,70	11,30	8,37
12-13	10,26	11,26	15,33	16,84	20,49	21,44	22,87	22,11	18,73	14,59	10,90	8,60
13-14	8,66	9,89	14,05	15,57	18,92	20,05	21,89	20,85	17,17	12,33	8,31	6,65
14-15	6,26	7,73	12,10	13,35	16,58	17,71	19,47	18,32	14,36	9,25	5,70	4,40
15-16	3,58	5,23	8,84	10,02	12,99	13,94	15,41	14,36	10,53	5,54	2,71	2,12
16-17	1,77	2,62	5,05	6,19	8,88	10,19	10,97	9,19	5,70	2,07	0,68	1,16
17-18	0,13	0,24	1,82	2,78	4,74	5,81	6,17	4,49	1,75	0,30	0,08	0,04
18-19	0,05	0,05	0,17	0,44	1,39	2,14	2,02	0,82	0,22	0,05	0,04	0,03
19-20	0,05	0,05	0,05	0,05	0,16	0,50	0,40	0,12	0,03	0,04	0,04	0,03
Aylık Toplam	55,72	67,91	106,85	130,30	166,65	178,91	188,63	171,60	133,20	93,79	61,95	45,71

Eğimli yüzeye gelen aylık toplam ışınım değerleri çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Bursa iline ait eğimli yüzeye gelen aylık toplam güneş ışınımı değerleri

	Aylık Toplam Güneş Işınım Değeri (kWh/m²-ay)
Ocak	556
Şubat	68
Mart	107
Nisan	130
Mayıs	167
Haziran	179
Temmuz	189
Ağustos	172
Eylül	133
Ekim	94
Kasım	62
Aralık	4
Toplam	1.401

3.1.2 PV Panel Veriminin Hesaplanması

PV hücreleri sıcaklığı arttıkça PV performansı düşmektedir. PV paneller güneş enerjisinin %5 - 25'ini elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu nedenle güneş enerjisinin fazlası modüllerde ısınmaya sebep olur ve performans düşüklüğü gösterirler. Panelin güneş ışını alması ile birlikte elektrik üretimi başlar fakat verimlerin %100 olmamasından dolayı güneşten gelen enerjinin bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı da ısı enerjisi olarak ortaya çıkar. Bu olay panellerin ısınmasına neden olur, güneş hücrelerinin ısınması ile akım artarken, gerilim değeri düşer. Gerilimde ki düşüşün fazla olması nedeni ile çıkış gücünde de düşüş olur ve bu verim kaybına neden olur. Bu bölümde PV hücreleri yüzey sıcaklığı ve yüzey sıcaklığına bağlı olarak modül verimi hesaplamaları yapılmıştır.

Fotovoltaik panel veriminin hesaplanması için iki temel parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Birincisi PV panel yüzey sıcaklığı, ikincisi güneş ışınımı miktarıdır. Bunlara ek olarak PV üreticisinden alınan normal hücre çalışma sıcaklığı, modülün sıcaklık katsayısı gibi değerlerin bilinmesi gerekmektedir.

PV panel verimi optik verim ve ısı veriminin çarpılması ile elde edilir. Aşağıda PV panel verimi hesaplama denklemi Denklem (3.17)'de verilmiştir.

$$\eta^* = \eta_o \times \eta_c \quad (3.17)$$

Optik verim eğimli yüzeye gelen toplam ışınımın atmosfer dışı yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınımına oranı ile bulunur. Eğimli yüzeye gelen toplam ışınımı denklem (3.1)'de, atmosfer dışı yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınım hesaplaması denklem (3.10)'da verilmiştir. Denklem (3.18)'de optik verim hesaplaması verilmiştir.

$$\eta_o = \frac{I_{TE,s}}{I_{o,s}} \quad (3.18)$$

Yüzey sıcaklığına bağlı modül verimi η_c Denklem (3.19)'dan hesaplanmaktadır.

$$\eta_c = \eta_r - \mu(T_c - T_r) \quad (3.19)$$

Denklemden T_r hücrenin test edildiği sıcaklığı, μ hücrenin sıcaklık katsayısını, η_r ise test değerlerinde bulunan modül verimini göstermektedir. Kullanılan PV panelin özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Gürsu Bursa GES'de kullanılan PV panel özellikleri [16]

İndeks	Birim	240 Wp Serisi
PV markası	-	Canadian Solar
Pik Güç	Wp	240
Güç Saptırma	W	+5
Modül Verimi	%	14,92
Çalışma Gerilimi	(Vmppt)	29.90
Çalışma Akımı	(Imppt)	8.03
Ölçüler	mm	1638 x 982 x 40
Ağırlık	Kg	20
Sıcaklık Katsayısı	%/°C	0.065
Normal Çalışma Hücre Sıcaklığı (HNÇS)	°C	45
PV hücre test sıcaklığı (T_r)	°C	25

PV hücre yüzey sıcaklığı (T_c) Denklem (3.20)'den hesaplanmaktadır. Bu hesaplama için, T_a ortam sıcaklığına, HNÇS hücre normal çalışma sıcaklığına, $I_{TE,s}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınım miktarına ihtiyaç vardır. HNÇS, bir solar hücrenin, 1000 W/m^2 ışınım, 1 m/s rüzgar ve 25°C ortam sıcaklığı koşullarındaki sıcaklığıdır. 25°C sıcaklık ve 1000 W/m^2 güneş ışınımı, hücrenin test edildiği değerleri göstermektedir. Bursa ilinde yıllık ortalama rüzgar hızı 1.7 m/s 'dir. Bu değer hücrenin normal çalışma şartlarında verilen 1 m/s rüzgar hızına yakın bir değerdir ve bu değer santralin elektrik enerjisi üretimi yaptığı gündüz saatlerinde daha düşük olduğu için rüzgar hızına bağlı kayıplar, panel verimi hesaplamada dikkate alınmamıştır [9].

$$T_c = T_a + (\text{HNÇS} - 25^\circ\text{C}) \frac{I_{TE,s}}{1000} \quad (3.20)$$

Fotovoltaik panel sıcaklığının tahmin edilebilmesi için, seçilen bölgenin saatlik sıcaklık ve çalışmada bulunan eğik yüzeye gelen ışınım verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle Meteoroloji Genel Müdürlüğünden Bursa iline ait 1993-2013 yılları arası saatlik sıcaklık verileri alınmıştır. Çizelge 3.6'da Bursa ilinin 1993-2013 yılları arası 21 yıllık saatlik ortalama sıcaklık değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.6 1993-2013 yılları arası 21 yıllık saatlik ortalama sıcaklık değerleri [15]

Saat/Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz.	Tem.	Ağu.	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
5-6	3,41	3,60	5,20	8,59	13,52	17,73	20,05	19,58	15,34	11,52	7,27	5,22
6-7	3,41	3,54	5,43	9,86	15,31	19,70	22,00	21,24	16,40	11,74	7,20	5,17
7-8	3,62	4,10	6,82	11,73	17,18	21,62	23,97	23,39	18,57	13,46	8,09	5,44
8-9	4,56	5,32	8,41	13,40	18,94	23,29	25,75	25,36	20,71	15,44	9,85	6,48
9-10	5,73	6,55	9,81	14,82	20,35	24,75	27,30	27,00	22,45	17,26	11,53	7,71
10-11	6,89	7,74	11,04	15,99	21,57	26,03	28,63	28,49	24,02	18,70	12,94	8,75
11-12	7,68	8,60	11,92	16,74	22,41	26,98	29,59	29,63	25,07	19,76	13,91	9,49
12-13	8,28	9,28	12,48	17,25	22,98	27,56	30,27	30,37	25,93	20,48	14,59	10,02
13-14	8,69	9,71	12,81	17,60	23,23	27,84	30,71	30,75	26,31	20,83	14,97	10,31
14-15	8,60	9,68	12,74	17,51	23,17	27,78	30,68	30,70	26,15	20,61	14,79	10,22
15-16	8,22	9,40	12,48	17,15	22,82	27,48	30,33	30,25	25,60	19,95	13,96	9,65
16-17	7,30	8,61	11,80	16,45	22,22	26,88	29,67	29,47	24,64	18,62	12,52	8,64
17-18	6,52	7,63	10,66	15,40	21,16	25,98	28,64	28,19	23,02	17,20	11,47	7,97
18-19	5,97	6,95	9,55	13,95	19,64	24,59	27,15	26,48	21,47	16,16	10,74	7,45
19-20	5,54	6,46	8,88	13,05	18,34	23,01	26,62	25,23	20,51	15,38	10,14	7,11
Aylık Ort.	6,30	7,15	10,00	14,63	20,19	24,75	27,36	27,08	22,41	17,14	11,60	7,97

3.1.3 Elektrik Üretimine Yönelik Hesaplamalar

Güneşten gelen ışınımına göre hesaplanan verim ve hesaplanan diğer parametreler ile elektrik üretimi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Toplam kolektör alanı $A_k(m^2)$, saatlik elektrik üretimi E_s (kWh) Denklem (3.21)'den, günlük elektrik üretimi $E_{gün,n}$ (kWh) Denklem (3.22)'den, aylık elektrik üretimi $E_{ay,i}$ (kWh) Denklem (3.23)'den, yıllık toplam elektrik üretimi $E_{yıl}$ (kWh) Denklem (3.24)'den hesaplanmıştır. "s" alt indisi hesaplamaların hangi saatte yapıldığını, "n" alt indisi bir yıldaki gün sayılarını, "i" alt indisi hesaplamaların hangi ayda yapıldığını, "y" alt indisi bir aydaki gün sayılarını, göstermektedir.

$$E_s = I_{TE,S} \times A_k \times \eta^* \quad (3.21)$$

$$E_{gün,n} = \sum_{s=5:00}^{19:00} E_s \quad (3.22)$$

$$E_{ay,i} = \sum_{n=1}^y E_{gün,n} \quad (3.23)$$

$$E_{yıl} = \sum_{i=1}^{12} E_{ay,i} \quad (3.24)$$

3.2 Çevresel Yönden Modelleme

Çevresel modellemede hangi miktarda CO₂ salımının azaltıldığı ve PV üretimi ile hangi miktarda CO₂ salımı yapıldığı hesaplanmıştır. Toplam önlenebilir CO₂ miktarı $T_{önlenebilir-CO_2}$ (kgCO₂) olarak Denklem (3.25)'de hesaplanmış olup, üretim Katsayısı n_{CO_2} (kgCO₂/kWh) olarak verilmiştir. Üretim katsayısı değişken parametreler kısmında sayısal olarak verilmiştir ve yıllık üretim ile çarpılarak hangi fosil yakıtın üretim katsayısı ile çarpıldıysa, o fosil yakıtı göre toplam ne kadar Karbon salımının önüne geçildiği hesaplanabilir. Ayrıca Karbon ticareti mekanizmasının temelinde, sera gazı salımlarını azaltma fikri yatar. Birçok ülkede Karbon vergileri önerilmiş durumdadır. Bazı ülkelerde de hala uygulanmamaktadır. Türkiyede CO₂ vergisi henüz alınmamaktadır.

“Social cost of carbon” (SCC) diye geçen Karbon vergileri, küresel iklim değişikliğinin neden olacağı etkiler bazında tahmin ediliyor. Bu değerler farklı iklim değişikliği modelleme sonuçlarına göre değişiyor. İklim değişikliğinin geleceğe yönelik etkileri belirsizlik içerdiği için model bazında farklı sonuçlar elde edilmektedir.

Ayrıca, SCC değerleri sadece kullanılan farklı iklim değişikliği modellerine göre değil, aynı zamanda yıldan yıla değişmektedir.

Bunun nedeni, her modelde iklim değişikliğinin neden olacağı etkilerin eşdeğer maliyetlerinin yıl bazında artıyor olmasından kaynaklanıyor. En az etkili modelde 2015 yılında metrik ton CO₂ başına 12 dolar olarak belirtilmektedir.

Bu değer olarak F_{CO_2} (\$/ton) olarak gösterilmiştir. Miktarsal olarak CO₂ salımının önüne geçilmesiyle elde edilen kazanç K_{CO_2} (\$) olarak verilmiştir. Dolayısıyla bu kazanç çalışmaya bir senaryo olarak eklenmiş ve amortisman sresindeki azalma gözlemlenmiştir [17].

Doğalgazdan elektrik üretiminde 1 kWh elektrik üretimi yaklaşık olarak 0,201 (kgCO₂/kWh) retir. Doğalgaz ve diğer yakıt tiplerine göre emisyon faktörü izelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Yakıt tiplerine göre emisyon faktörü [10]

Yakıt Tipi	Emisyon faktörü (kg CO ₂ TJ) ⁻¹	Emisyon faktörü (kgCO ₂ /kWh)
Doğalgaz	56.100	0,201
Fuel Oil	74.100	0,266
Linyit	90.900-115.000	0,327-0,414
Taş Kömürü	89.500-99.700	0,322-0,358

$$T_{\text{nlenen-CO}_2} = E_{\text{yıl}} \times n_{\text{CO}_2} \quad (3.25)$$

Fotovoltaik panellerin üretiminden kaynaklı CO₂ salımları aslında göz ardı edilebilecek kadar düşüktür. PV modül üretiminde ortaya çıkan CO₂ salımı, 2,757-3,845 kgCO₂/kWh olarak verilmiştir [11]. Bu değer ortalama olarak 3,301 (kg CO₂/kWh) olarak alınmıştır ve n_{PV-CO_2} ile ifade edilmiştir.

PV modüllerin üretimi sırasında ortaya çıkan salım miktarı T_{PV-CO_2} (kgCO₂) Denklem (3.26)'da, nlenen net CO₂ salım miktarı T_{CO_2} (kgCO₂) Denklem (3.27)'de hesaplanmış olup, toplam kurulu güç P_g (kW) olarak verilmiştir.

$$T_{PV-CO_2} = n_{PV-CO_2} \times P_g \quad (3.26)$$

$$T_{CO_2} = T_{\text{nlenen-CO}_2} - T_{PV-CO_2} \quad (3.27)$$

3.3 Ekonomik Yönden Modelleme

Bu çalışmanın ekonomik amacında bahsedilen amortisman süresi t (yıl) bu bölümde hesaplanmıştır.

Amortisman süresi hesaplaması t (yıl) Denklem (3.28)'de verilmekte olup, bu santral için yapılan ilk kurulum maliyeti G (\$), toplam PV maliyeti G_{PV} (\$), arsa bedeli G_{arsa} (\$) toplamının, toplam kazanca oranı ile bulunur. Toplam maliyet G_{top} (\$) ile gösterilmiştir.

$$t = \frac{G + G_{arsa} + G_{PV}}{K_{top}} \quad (3.28)$$

Kurulum maliyetinde aşağıdaki kalemler hesaba katılmıştır.

- Fizibilite etüdünün maliyeti
- Geliştirme maliyeti
- Mühendislik maliyeti
- Yol yapım maliyeti
- İletim hattı maliyeti
- Trafo merkezi maliyeti
- Yedek parçalar maliyeti
- Nakliye maliyeti
- Öngörülmeyen giderler
- İşletme ve Bakım Maliyeti

Santrale yapılan yatırımın içinde arsa bedeli dahil olmadığı için Gürsu Bursa için m^2 'deki arsa bedeli (F_{arsa}) bulunmuş ve 1 kW santral kurulumu için gerekli alan $A_{k,1kW}$ (m^2), ile toplam kurulu güç P_g (kW) çarpılmıştır.

$$G_{arsa} = F_{arsa} \times A_{k,1kW} \times P_g \quad (3.29)$$

Fotovoltaik maliyeti firmaların PV fiyat kataloğu kısmından tedarik edilebilir.

Aylık kazanç $K_{ay,i}$ (\$) Denklem (3.32)'de, toplam kazanç $K_{yıl}$ (\$) Denklem (3.33)'de, toplam LEÜY kazancı $K_{top-leüy}$ (\$) Denklem (3.34)'de, toplam yerli malı kazancı $K_{top-yerli}$ (\$) Denklem (3.35)'de verilmiştir.

Elektrik Toptan satış fiyatı $F_{k-1,i}$ (\$) değişken bir parametre olduğundan dolayı, içinde bulunulan zamana göre farklı sonuçlar elde edilecektir.

Kazanç hesaplamasında değişken elektrik fiyatları sabit kalmayacağından dolayı her yıl için % 10 oranında artış olacağı varsayımında bulunulmuştur. Denklem (3.30)'da artışın değiştirilebilir olması için, artış miktarı "m" ile belirtilmiştir.

Denklem (3.30)'da "k" alt indisi yıl sayılarını, "z" alt indisi tahmin edilen amortisman süresini yıl olarak belirlemek için verilmiştir. "i" alt indisi 12 ay için ay sayılarını vermektedir. $F_{k,i}$ ile istenilen ay için elektrik satış fiyatı hesaplanmıştır. Her ay için tahmin edilen amortisman süresince yıllık hesaplanan elektrik kazancı ortalaması F_{i-ort} . (\$) olarak verilmiştir. $F_{k,i}$ (\$) baz alınan yıldaki aylık elektrik satış fiyatıdır ve Denklem (3.30)'daki gibi hesaplanmıştır.

$$F_{k,i} = F_{k-1,i} \times (1 + m) \quad (3.30)$$

$$F_{i-ort} = \frac{\sum_{k=1}^z F_{k,i}}{z} \quad (3.31)$$

$$K_{ay,i} = E_{ay,i} \times F_{i-ort} \quad (3.32)$$

$$K_{yıl} = \sum_{i=1}^{12} K_{ay,i} \quad (3.33)$$

Lisanssız elektrik üretim yasasına (LEÜY) göre yenilenebilir enerji ile üretilip şebekeye satılan her kWh enerji için devlet tarafından ödenen ücret $F_{leüy}$ (\$) ekonomik fizibilite çalışmasında amortisman süresine önemli katkı sağlar [18]. Toplam LEÜY kazancı $K_{top-leüy}$ (\$) 'dir. Tüketim talebinde elektrik enerjisi üretimi $E_{tük.tal.}$ (kWh) olarak gösterilmiştir. Aşağıdaki denklemde LEÜY'e göre kazanç hesaplaması verilmiştir.

$$K_{top-leüy} = F_{leüy} \times (E_{yıl} - E_{tük.tal.}) \quad (3.34)$$

GES 'de şebekeye verilen elektriği sağlayan PV'ler yerli üretim ise her kWh elektrik için devlet tarafından teşvik sağlanmaktadır.

PV modülleri Türk malı olsaydı her kWh başına güneş enerjisi için için devlet tarafından ödenen ücret F_{yerli} (\$) geri ödeme süresini minimize etmek için etkili olacaktır [18].

Toplam yerli malı kazancı $K_{top-yerli}$ (\$) olarak bulunmuştur.

$$K_{top-yerli} = F_{yerli} \times (E_{yil} - E_{tük.tal.}) \quad (3.35)$$

Bölüm 3.2 de önlenecek CO_2 salımı miktarı, karbon azaltım birim fiyatı verilmiştir. Bu değerlerle aşağıdaki denklemde önlenecek CO_2 salımı ile getirilen kazanç hesaplanmıştır.

$$K_{CO_2} = T_{CO_2} \times F_{CO_2} \quad (3.36)$$

Toplam kazanç K_{top} (\$), GES ile yapılan üretimde sağlanan toplam kazanç ve LEÜY'a göre yenilenebilir enerji kullanımı ile sağlanan kazanç, yerli malı kullanım durumunda hesaplanan toplam kazanç ve önlenecek CO_2 salım teşviği ile getirilen kazanç toplamı ile bulunmaktadır.

$$K_{top} = K_{top-yerli} + K_{top-leüy} + K_{yil} + K_{CO_2} \quad (3.37)$$

Amortisman süresinin yapılan tüm hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan denklemi aşağıda verilmiştir.

$$t = (G + G_{arsa} + G_{PV}) / [(F_{yerli} \times (\sum_{i=1}^{12} \sum_{n=1}^y \sum_{s=5:00}^{19:00} I_{TE,s} \times A_k \times \eta^*)) + (F_{leüy} \times (\sum_{i=1}^{12} \sum_{n=1}^y \sum_{s=5:00}^{19:00} I_{TE,s} \times A_k \times \eta^*)) + \sum_{i=1}^{12} (\sum_{n=1}^{12} \sum_{s=5:00}^{19:00} I_{TE,s} \times A_k \times \eta^*) \times \frac{\sum_{k=1}^z F_{k-1,i} \times (1+m)}{z} + (((((\sum_{i=1}^{12} \sum_{n=1}^y \sum_{s=5:00}^{19:00} I_{TE,s} \times A_k \times \eta^*)) \times n_{CO_2}) - (n_{PV-CO_2} \times P_g)) \times F_{CO_2})] \quad (3.38)$$

Denklem (3.38)'de geçen bölüm 3.1 de hesaplaması yapılan eğimli yüzeye gelen ışınım miktarı $I_{TE,s}$ 'in açık formülü denklem (3.39)'da belirtilmiştir.

$$I_{TE,s} = [(I_s - (I_{s \times} \left\{ \begin{array}{l} 1 - 0,249k_t; \quad k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t; \quad 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177; \quad k_t > 0,75 \end{array} \right\}) \frac{\sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega}{\cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta} + \frac{1}{2} (I_{s \times} \left\{ \begin{array}{l} 1 - 0,249k_t; \quad k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t; \quad 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177; \quad k_t > 0,75 \end{array} \right\}) (1 + \cos\beta) + [\frac{1}{2} \rho I (1 - \cos\beta)]] \quad (3.39)$$

Denklem (3.39)'da geçen ve Bölüm 3.1.1'de hesaplanan k_t , berraklık indisinin açık formülü aşağıdaki gibidir.

$$k_t = \frac{I_s}{\frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times [\cos\varphi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin\varphi \sin\delta]} \quad (3.40)$$

Denklem (3.38)'de geçen ve Bölüm 3.1.2'de hesaplanan " η^* " PV panel veriminin açık formülü aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\eta^* = I_{TE,s} / \left(\frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times [\cos\varphi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin\varphi \sin\delta] \right) \times (\eta_r - \mu((T_a + (HN\Ç S - 25^\circ C) \frac{I_{TE,s}}{1000})_c - T_r)) \quad (3.41)$$

3.4 Matematiksel Model Sınır Koşulları

Sistemin modellenmesinde sabit ve değişken parametreler verilmiştir. Sabit parametreler iki kısımda incelenmiştir. Bunlar santrale ait sabit parametreler ve meteorolojik sabit parametrelerdir.

Santralin sabit parametreleri aşağıdaki gibidir.

- Santralin toplam kurulu gücü olan 96 kW alınmıştır.
- Projenin ekonomik ömrü 30 yıl olarak alınmıştır.
- Kullanılan invertör verimi %98,5, markası Sunny Tripower ve 5 adet kullanılmıştır. Sunny Tripower Piyasada fotovoltaik ayırımı olmaksızın genellikle kullanılan invertör markasıdır.
- Gürsu Bölgesinde güncel arsa bedeli belediye çalışanları ile görüşülerek 55,25 (\$/ m²) olarak belirtilmiştir.
- Santralin kurulum maliyetinin içinde olan kalemler Bölüm 3.3'de verilmiştir. Meteorolojik sabit parametreler Bölüm 3.1.1'de verilen ışınım değerleri ve 3.1.2'de verilen dış ortam sıcaklık değerleridir.

Sistemin matematiksel modellemesinin oluşturulması ve hesaplamaların yapılabilmesi için bazı değişken parametreler aşağıdaki çizelgede en güncel haliyle verilmiştir.

Çizelge 3.8 Mevcut santral değişken parametreleri

Tanım	Gösterim
Santralin kurulum maliyeti	G
Santralin PV maliyeti	G_{PV}
Fotovoltaiklerin eğim açısı	β
Fotovoltaik tipi	FT
Elektrik tüketim değeri	E_T
Elektrik toptan satış fiyatı	$F_{k-1,i}$
LEÜY'e göre her kWh YEK için ödenen ücret	$F_{leüy}$
LEÜY'e göre yerli fotovoltaikden üretilen her kWh enerji için ödenen ücret	F_{yerli}
1 kW sistem için gerekli Polikristal PV alanı	$A_{k,1kW}$
m ² başına arsa bedeli	F_{arsa}

Santral Lisanssız elektrik üretim yasasına (LEÜY) göre yenilenebilir enerji ile üretilen her kW enerji için devlet tarafından ödenen ücret ile güneş enerjisi üretiminde kullanılan yerli malı ekipman kullanımı ile üretilen her kW enerji için devlet tarafından ödenen ücret 2013 yılında belirtilen yönetmeliğe göre Çizelge 4.1'de verilmiştir [18]. Yerli malı ekipman kullanımı teşviği, ekipmanların türüne göre değişmektedir. PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı, PV modülleri imalatı, PV modülünü oluşturan hücre imalatı, invertör imalatı, PV modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme imalatı olarak farklı ekipmanlara farklı teşvikler verilmektedir. Bu çalışmada yerli malı PV modül imalatı için teşvik verilmesi durumu incelenmiştir.

4. SİMÜLASYON YAZILIMI VE DOĞRULAMASI

Bu çalışma için oluşturulan teknik, ekonomik ve çevresel matematiksel modellemede oluşturulan denklemler kullanılarak Excel programında bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Geliştirilen simülasyon yazılımı 36 sayfadan oluşmaktadır. Santrale ait girdiler, ara çıktılar ve çıktılar Çizelge 4.1 de verilmekte olup geliştirilen simülasyon yazılımı sayfalarının detaylı incelenmesi ekler kısmında verilmiştir.

Çizelge 4.1 Geliştirilen simülasyon programı girdileri, ara çıktıları ve çıktıları

Girdiler	Ara çıktılar	Çıktılar
-Toplam kurulu güç	-Atmosfer dışı yatay	-Eğik düzleme gelen
-Toplam kurulum maliyeti	düzleme gelen saatlik	aylık güneş ışınım
İlk kurulum maliyeti	güneş ışınımı	değeri
-Toplam elektrik tüketimi	-Direkt ışınım dönüşüm	-Aylık elektrik üretim
-Elektrik toptan satış fiyatı	katsayısı	değerleri
-Dolar kuru	-Berraklık indeksi değerleri	-Şebekeden elektrik
-Birim elektrik üretimi başına	-Yatay düzleme gelen	alınmaması durumunda
LEÜY kazancı	toplam difüz güneş ışınımı	yıllık elektrik fiyatı artış
-Birim elektrik üretimi başına yerli	-Yatay düzleme gelen	oranına göre
malı kazancı	toplam direkt güneş ışınımı	hesaplanan kazanç
-Elektrik satış fiyatı artış oranı	-Zenit açısı değerleri	-Toplam LEÜY kazancı
-PV üretimi CO ₂ salım faktörü	-Güneş geliş açısı	-Toplam yerli malı
-Arsa bedeli	değerleri	kazancı
-Karbon azaltma teşviği	-Eğik düzleme gelen	-CO ₂ teşviği kazancı
-Karbon emisyon faktörü	toplam difüz, direkt, yayılı	-Toplam kazanç
-PV kollektör alanı, adet fiyatı,	ışınım değerleri	-Amortisman süresi
kullanım adeti boyutu, 1 kW için	-PV yüzey sıcaklığı	-Toplam CO ₂ üretim
gerekli alan	-PV verimi	miktarı
-Yatay düzleme gelen saatlik		Duyarlılık analizi çıktıları
Güneş ışınımı değerleri		
-Saatlik sıcaklık değerleri		

Geliştirilen simülasyon programında, Bölüm 3.3'de bahsedilen maliyet girdileri PV maliyeti, ilk kurulum maliyeti ve arsa maliyeti olarak üç kısımda toplanmıştır.

4.1 Doğrulamaya Yönelik Hesaplamalar

Mevcut santral girdileri kullanılarak, bu çalışmada geliştirilen simülasyon yazılımı ve piyasada yaygın olarak kullanılan RetScreen simülasyon yazılımı ile doğrulanması gerekmektedir. Santralden alınan veriler ile birlikte mevcut santralin değerleri hesaplanmıştır. Bölüm 3.4'de, Çizelge 3.8'de verilen değişken parametrelerin mevcut santral için değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu değerler santralden TL olarak alınmış, 2013 yılı Mart ayı Dolar kur fiyatına göre Dolara çevrilmiştir.

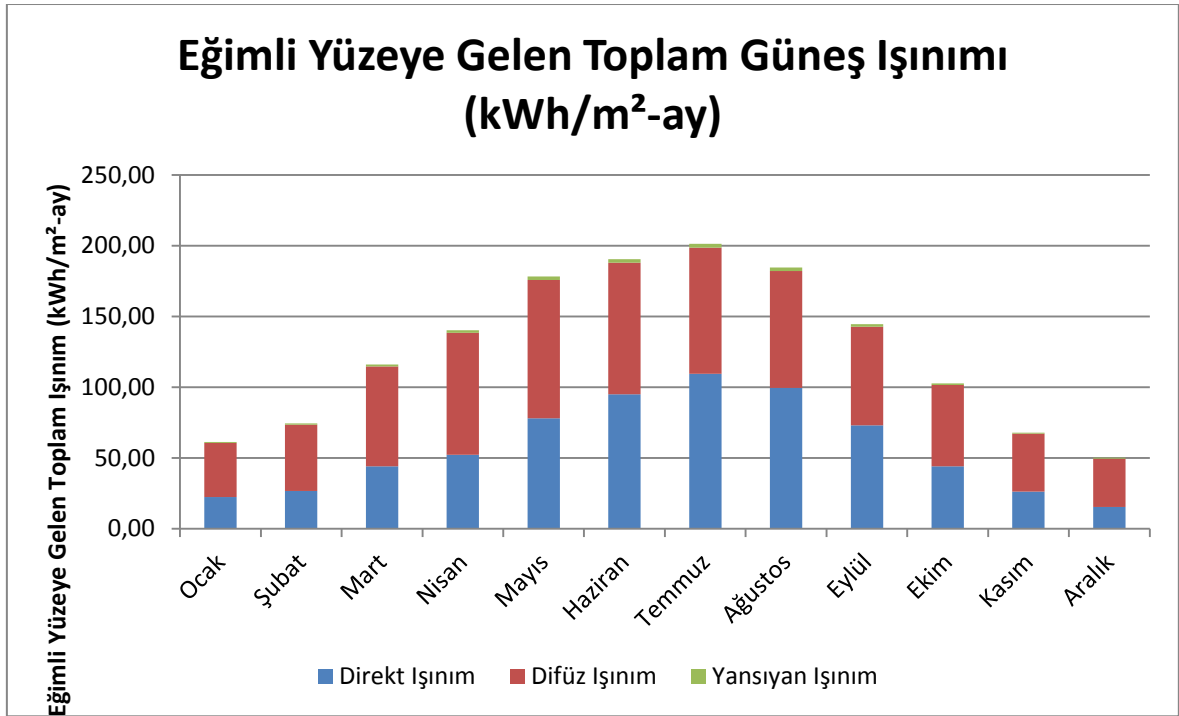
Çizelge 4.2 Gürsu Bursa GES'de kullanılan parametreler

G	97.514 \$
G_{PV}	93.923 \$
β	30°
FT	Polikristalin
$F_{k-1,i}$	0,188 \$/kWh
$F_{leüy}$	0.133 \$/kWh
F_{yerli}	1.3 \$/kWh
$A_{k,1kW}$	8 m ²
F_{arsa}	55,25 \$

Bölüm 1.5'de de bahsedildiği gibi, ince film fotovoltaik paneller sıcağa daha dayanıklıdır ve panellerin üzerine herhangi bir gölge düştüğünde gölge dışındaki alan elektrik üretmeye devam eder. Fiyat olarak İnce film PV ler ve polikristalin tipi fotovoltaik panellerden biraz daha yüksektir. 1 kW kurulu sistem için Polikristalin fotovoltaik panel için yaklaşık 8 m² alana, ince film fotovoltaik panellerin kullanılması durumunda ise yaklaşık 13 m² alana ihtiyaç vardır [19].

4.1.1 Mevcut santral için geliştirilen simülasyon sonuçları

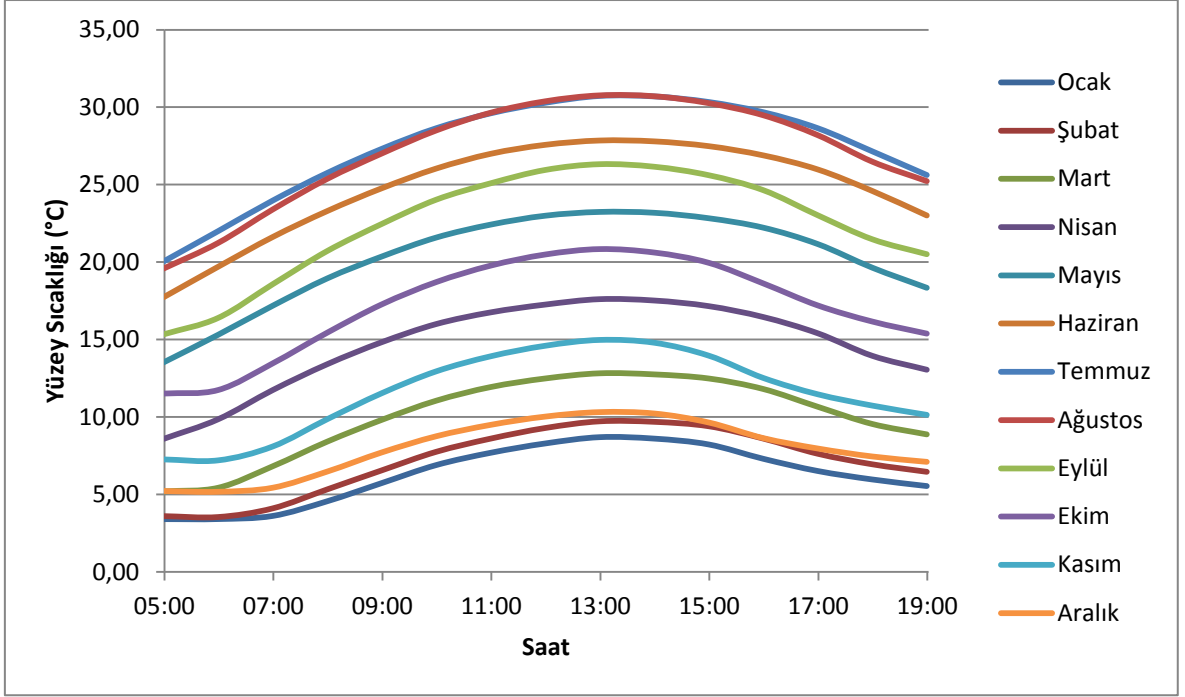
Geliştirilen simülasyon yazılımı ile Gürsu Bursa GES'in çıktıları alınmıştır. Işınım hesaplamaları sonucunda eğimli yüzeye gelen ışınım miktarlarına göre en iyi ışınım miktarı Temmuz ayında, en az ışınım miktarı Aralık ayında olduğu gözlemlenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınım verileri ile hesaplanan difüz, direk ve yayılı ışınım grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.



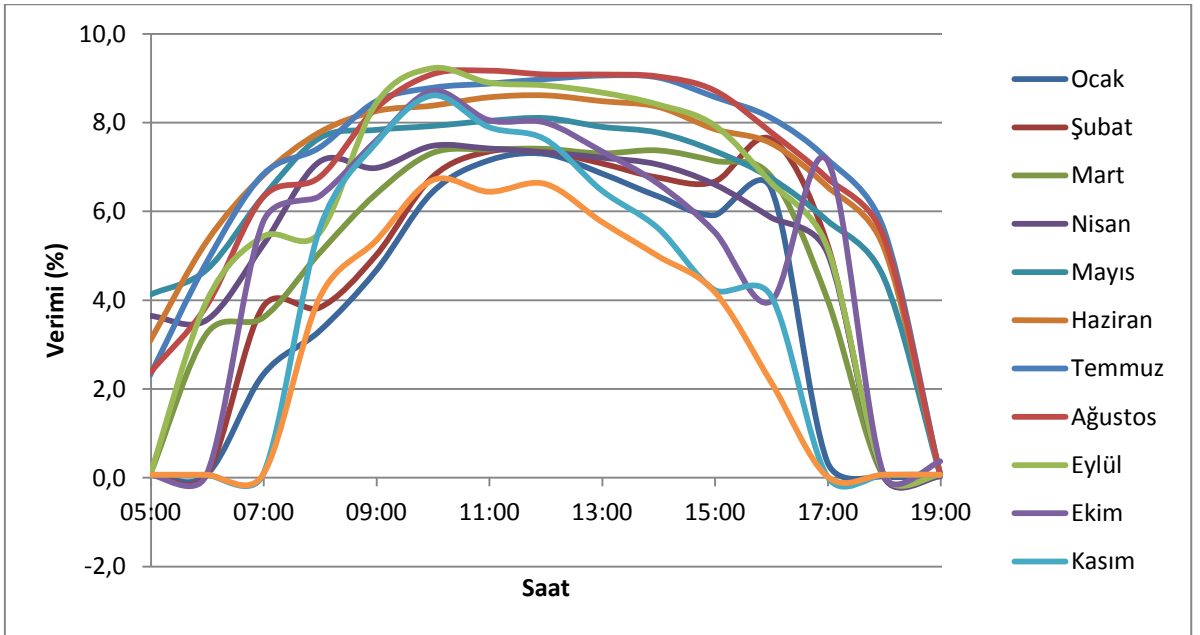
Şekil 4.1 Bursa iline ait eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışınımı (kWh/m²-ay)

Santralde kullanılan panelin yüzey sıcaklığına göre verim değişimi aylara ve saatlere göre incelenmiştir. Şekil 4.2'ye göre ortam sıcaklığı arttıkça panel yüzey sıcaklığı da artmaktadır. Panel yüzey sıcaklığının artması ve optik verim hesaplaması panel veriminin azalmasına sebep olmaktadır.

Şekil 4.3'e göre sıcaklığın arttığı yaz aylarında ve öğle saatlerinde panel verimi azalmaktadır. Seçilen PV modül verimi % 14,92 olup Şekil 4.2 ve 4.3'de aylara ve saatlere göre ortalama panel yüzey sıcaklık değişimi ve panel verim değişimi verilmiştir.



Şekil 4.2 Aylara ve saatlere göre panel yüzey sıcaklığı değişimi



Şekil 4.3 Aylara ve saatlere göre panel verimi değişimi

Alınan 20 yıllık ışınım değerlerine göre saatlik ortalama PV panel verimi Denklem (3.41)'e göre % 5 olarak bulunmuştur.

Genelde fotovoltaik panellerin eğim açıları, Güneş enerjisi santralının kurulduğu bölgenin enlem açısına eşit olarak yerleştirilirler ve yıl boyu bu açı sabit olarak tutulmaktadır.

Bursa'nın enlem açısı 40,18° olup mevcut santraldeki fotovoltaik panellerin eğim açısı 30° olarak ayarlanmıştır. PV paneller, bu eğim açısı ile yerleştirildiğinde yılda 70.600 kWh elektrik enerjisi üretmektedir. Güneşten gelen ışınımına göre panelin elektrik üretim verimi (3.41) no'lu denklemden hesaplanmıştır. Bu PV'lerin aylık elektrik enerjisi üretimi Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Santralde üretilen aylık elektrik enerjisi

Aylar	Aylık Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)
Ocak	2.533
Şubat	3.133
Mart	4.383
Nisan	5.785
Mayıs	8.108
Haziran	8.996
Temmuz	10.005
Ağustos	9.463
Eylül	7.113
Ekim	4.420
Kasım	4.549
Aralık	2.113
TOPLAM	70.600

Verilen değerler ve oluşturulan matematiksel modelleme sonucunda amortisman süresini Denklem (3.38)'den 10,4 yıl olarak bulunmuştur. Santralde ihtiyaçtan daha fazla üretim planlanmadığı için şebekeye elektrik satılmamaktadır. Bu durumdan dolayı santral LEÜY'e göre belirlenen teşvikleri alamamaktadır.

Gürsu Bursa GES elektrik üretimi ile şebekeden 70.600 kWh elektrik satın almadığından dolayı 17.053 \$ kazanç sağlanmıştır. Santralin elektrik üretimi artışı ile daha fazla kazançlar elde edilecektir.

Bu santralde fotovoltaik panel kullanımı ile toplamda 13.873 kgCO₂ salımının önüne geçildiği denklem (3.27)'den hesaplanmıştır. Tüm bu değerlerin yer aldığı simülasyon çıktısı Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Gürsu Bursa GES için geliştirilen Simülasyon Çıktısı

	Geliştirilen Simülasyon Çıktısı
Yıllık Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	70.600
CO₂Teşviği Kazancı	-
Toplam Kazanç (\$)	17.053
Amortisman Süresi (yıl)	10,4
Toplam CO₂ Üretimi (kg)	13.873

4.1.2 Mevcut santral için RetScreen simülasyon yazılımı sonuçları

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalara en uygun simülasyon programı araştırılmış buna göre RetScreen simülasyon programı bu çalışma için en uygun yazılım olduğu belirlenmiştir. Sanayiden ve akademik çevrelerden sayısız uzmanın katkısıyla geliştirilen bu yazılım çeşitli konvansiyonel ve yenilenebilir enerji biçimlerinin üretim miktarlarını, çevreye etkilerini, teknik ve ekonomik uygulanabilirliklerini değerlendirmek üzere kullanılmakta olduğundan dolayı bu çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir.

RetScreen yazılımı girdileri, geliştirilen simülasyon yazılımı girdileri ile aynı değerlerde alınmış olup 2013 yılı için her iki simülasyon yazılımında kullanılan girdiler Çizelge 4.5'de verilmiştir. .

Çizelge 4.5 Gürsu Bursa GES için RetScreen simülasyon yazılımı girdileri

<i>İklim veri yeri</i>	Bursa
E_T	185.000 kWh
β	30°
FT	Polikristalin
$F_{k-1,i}$	0,188 \$/kWh
İnvertör verimliliği	99%
G_{top}	191.436 \$
Yakıt Türü	Doğalgaz
n_{CO_2}	0,201
Proje ömrü	30 yıl

Çizelge 4.5 de verilen toplam maliyete (G_{top}) dahil olan kalemler Bölüm 3.3'de belirtilmiştir.

Mevcut santral için RetScreen simülasyon yazılımında başlangıç ekranında "Proje Tipi" olarak, "Elektrik" seçilir. Analiz türü olarak, iki adet yöntem vardır. Yöntem 2 daha ayrıntılı girdi ve çıktılar vermektedir. Yöntem 1, maliyet analizi, finansal analiz ve emisyon analizi yapmadığından dolayı, daha ayrıntılı sonuçlar almak için yöntem 2 seçilmiştir.

Teknoloji seçimi için, RetScreen simülasyon yazılımı projenin hangi enerji türü ile çalışıldığı ile ilgili seçenekler sunmaktadır. Teknoloji tipi için Fotovoltaik sistemler seçilir. Şekil 4.4'de başlangıç ekranının mevcut proje için girilen verileri görülmektedir.

Proje bilgileri

[Proje veritabanına bakınız](#)

Proje adı	GURSU GES
Proje yeri	TURKEY BURSA
Hazırlatan	BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
Hazırlayan	KIVILCIM MERVE AKSUNGUR
Proje tipi	Elektrik
Teknoloji	Fotovoltaik
Şebeke tipi	Merkezi şebeke ve iç yük
Analiz türü	Yöntem 2
Isıl değer referansı	Üst Isıl Değer (UID)
Ayarlar göster	<input checked="" type="checkbox"/>
Dil	Turkish - Türkçe
Kullanıcı kılavuzu	English - Anglais
Para birimi	\$
Birim	Metrik birim

Saha referans koşulları

[İklim verileri verini seçiniz](#)

İklim verisi yeri	Bursa
Verileri göster	<input checked="" type="checkbox"/>

Enlem
Boylam
Rakım
Isıtma tasarım sıcaklığı
Soğutma tasarım sıcaklığı
Yer sıcaklığı amplitüdü

Birim	İklim verisi yeri	Proje yeri
'N	40,2	40,2
'E	29,1	29,1
M	100	100
°C	-2,2	
°C	32,6	
°C	19,8	

Ay

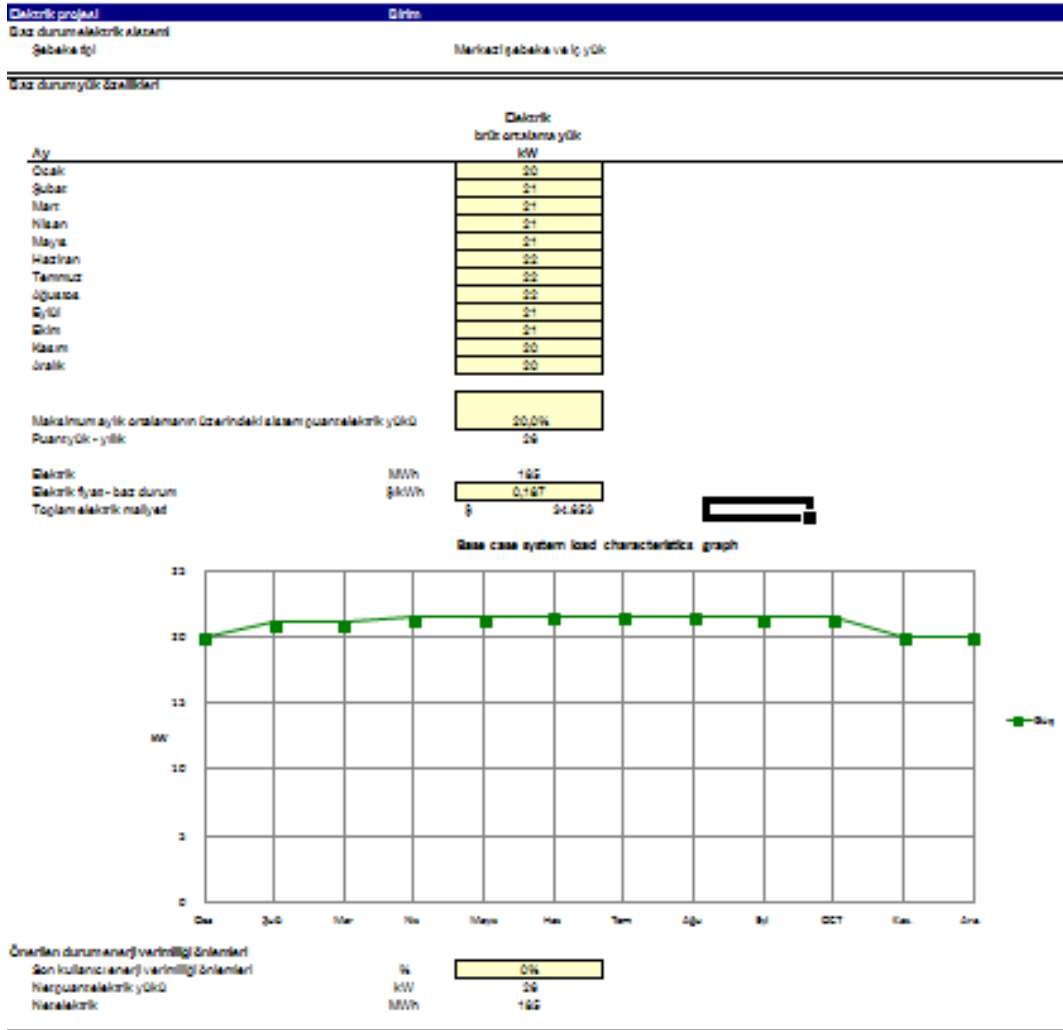
Ocak
Şubat
Mart
Nisan
Mayıs
Haziran
Temmuz
Ağustos
Eylül
Ekim
Kasım
Aralık
Yıllık
Ölçüm yeri:

Ay	Hava sıcaklığı °C	Bağıl nem %	Günlük güneş radyasyonu - yatay kWh/m ² /g	Atmosferik basınç kPa	Rüzgar hızı M/s	Yer sıcaklığı °C	Isıtma derece-gün °C-g	Soğutma derece-gün °C-g
Ocak	5,2	78,3%	1,67	96,8	2,3	3,4	397	0
Şubat	5,5	75,9%	2,31	96,7	2,4	4,0	350	0
Mart	8,1	73,5%	3,49	96,6	2,5	7,7	307	0
Nisan	12,9	72,1%	4,46	96,3	2,2	13,8	153	87
Mayıs	17,4	69,8%	5,91	96,4	2,1	19,4	19	229
Haziran	21,9	65,1%	6,71	96,3	2,0	23,7	0	357
Temmuz	24,2	62,6%	6,79	96,3	2,3	26,1	0	440
Ağustos	24,1	64,2%	5,93	96,3	2,2	25,6	0	437
Eylül	20,1	68,2%	4,69	96,5	1,9	22,0	0	303
Ekim	15,2	76,6%	2,99	96,8	1,7	16,0	87	161
Kasım	10,0	79,4%	1,88	96,8	1,7	9,2	240	0
Aralık	6,7	78,6%	1,39	96,8	2,2	4,6	350	0
Yıllık	14,3	72,0%	4,03	96,6	2,1	14,7	1.902	2.015
Ölçüm yeri:	M				10,0	0,0		

Şekil 4.4 RetScreen başlangıç ekranı

RetScreen simülasyon yazılımında iklim verisi yeri olarak Gürsu Bursa bölgesi seçildiğinde simülasyon programından çıkan ölçümlere göre 1 yıl için ortalama günlük yatay güneş radyasyonu 4,03 (kWh/m²), dış ortam sıcaklığı 1 yıl için günlük ortalama 14,7 °C olarak hesaplanmıştır.

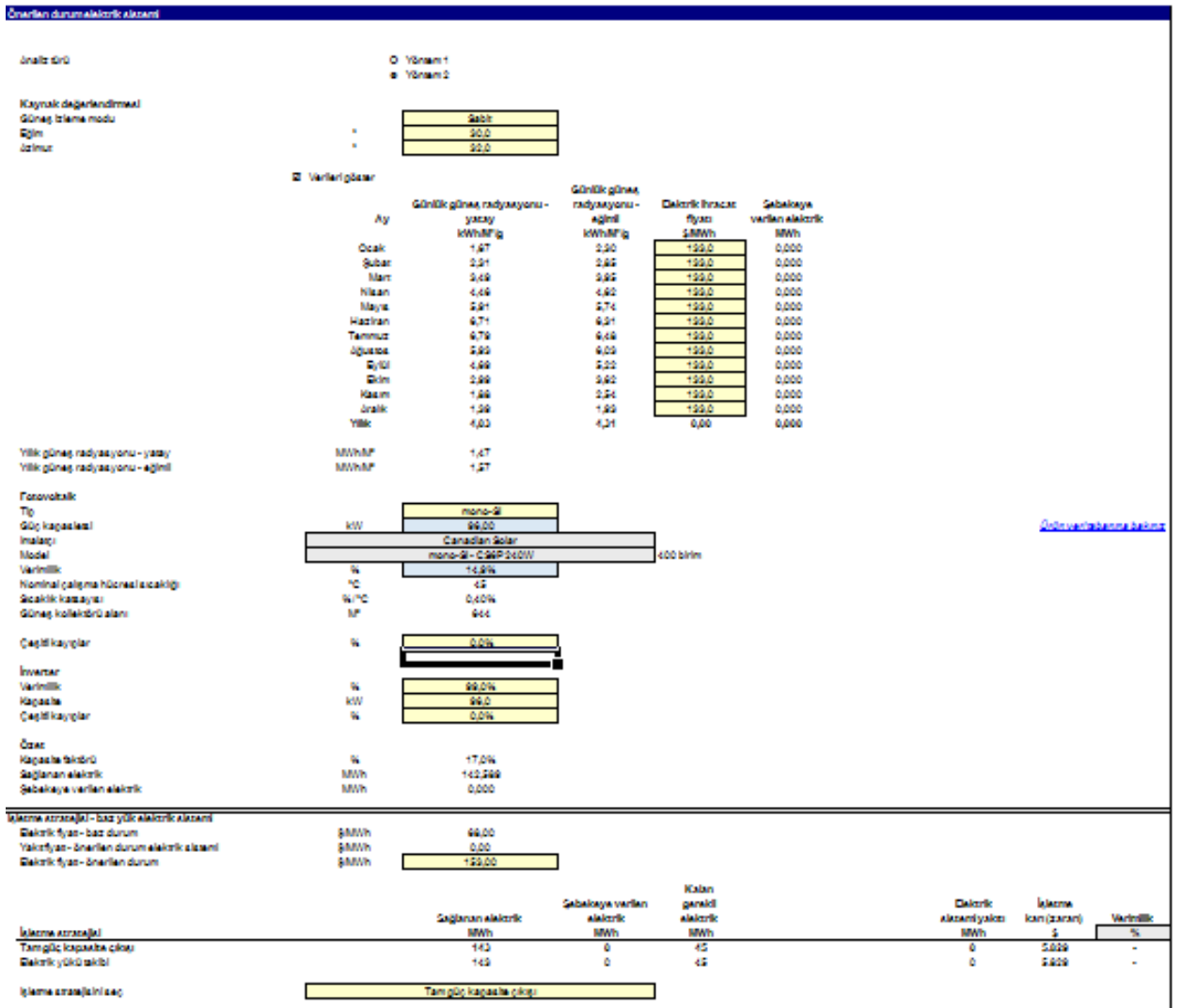
RetScreen simülasyonun "Yük ve Şebeke" ekranında işletmenin 2013 yılı elektrik tüketimi 185 MWh ve elektrik alış fiyatı 0,188 \$/kWh olarak girilmiş, simülasyonda toplam elektrik gideri 34.653 \$ hesaplanmıştır. Şekil 4.5'de RetScreen yük ve şebeke ekranı verilmiştir.



Şekil 4.5 RetScreen yük ve şebeke ekranı

RetScreen "Enerji Modeli" ekranına;

- PV Panellerin eğim açısı girilmiştir.
- PV panel özellikleri girilmiştir. Programın veri tabanında bu PV özellikleri bulunmuştur.
- İnvertör verimliliği ve özellikleri girilmiştir.
- Şebekeye elektrik satışı olması durumunda aylara göre elektrik satış fiyatı girilmiştir. Ancak santral işletmenin tüketim talebini karşılayamadığı için şebekeye verilen elektrik "0" olarak görülmektedir.
- Santralin toplam ürettiği enerji 142 MWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.6'da RetScreen Enerji Modeli ekranı verilmiştir.



Şekil 4.6 RetScreen enerji modeli ekranı

Simülasyonun maliyet analizi kısmında finansal analiz kısmındaki çıktıları alabilmek için aşağıdaki veriler girilmiştir.

- Fizibilite etüdünün maliyeti,
- Geliştirme maliyeti,
- Mühendislik maliyeti,
- PV maliyeti,
- Yol yapım maliyeti,
- İletim hattı maliyeti,
- Trafo merkezi maliyeti,
- Enerji verimliliği önlemleri için varsa maliyeti,
- Yedek parçalar maliyeti,
- Nakliye maliyeti,
- Öngörülmemen giderler, sisteme girilir. Şekil 4.7'de RetScreen maliyet analizi ekranı görülmektedir.

İlk maliyetler (krediler)	Birim	Miktar	Birim maliyet	Miktar	Nisbi maliyetler
Fizibilite etüdü					
Fizibilite etüdü	maliyet	1	\$ 8.000	\$ 8.000	
Ave Toplam:				\$ 8.000	4,2%
Geliştirme					
Geliştirme	maliyet	1	\$ 8.000	\$ 8.000	
Ave Toplam:				\$ 8.000	4,2%
Mühendislik					
Mühendislik	maliyet	1	\$ 20.000	\$ 20.000	
Ave Toplam:				\$ 20.000	10,4%
Elektrik sistemi					
Baz yük - Fotovoltaik	KW	96,00	\$ 978	\$ 93.923	
Puant yük - Sebekte elektrikli	KW	25,93	\$ 0	\$ 2	
Yol yapımı	km	3	\$ 1.000	\$ 3.000	
İletim hattı	km	1	\$ 5.000	\$ 5.000	
Trafo Merkezi	proje	1	\$ 2.000	\$ 2.000	
Enerji verimliliği önlemleri	proje			\$ -	
Kullanıcı tanımı	maliyet			\$ -	
Ave Toplam:				\$ 103.924	54,3%
Sistem dengesi ve diğer					
Yedek parçalar	%	100,0%	\$ 2.000	\$ 2.000	
Nakliye	proje			\$ -	
Eğitim ve işletmeye alma	proje			\$ -	
Kullanıcı tanımı	maliyet	1	\$ 49.512	\$ 49.512	
Öngörülmemen giderler	%		\$ 191.438	\$ -	
İnşaat dönemi faizi			\$ 191.438	\$ -	
Ave Toplam:				\$ 61.512	28,3%
Toplam ilk maliyetler				\$ 191.438	100,0%
Yıllık maliyetler (krediler)					
İşletme ve bakım					
Parçalar ve işgücü	proje		\$ -	\$ -	
Kullanıcı tanımı	maliyet		\$ -	\$ -	
Öngörülmemen giderler	%		\$ -	\$ -	
Ave Toplam:				\$ -	
Yakıt maliyeti - önerilen durum					
Elektrik	MWh	43	\$ 187.000	\$ 8.108	
Ave Toplam:				\$ 8.108	
Yıllık tasarruf					
Yakıt maliyeti - baz durumu					
Elektrik	MWh	185	\$ 187.000	\$ 34.653	
Ave Toplam:				\$ 34.653	
Dönemsel maliyetler (krediler)					
Kullanıcı tanımı	maliyet		\$ -	\$ -	
Proje ömrünün sonu	maliyet		\$ -	\$ -	

Şekil 4.7 RetScreen maliyet analizi ekranı

RetScreen simülasyonu emisyon analizi kısmında yakıt tipi olarak Doğalgaz seçilmiştir. Karşılaştırma da bu yakıt tipine göre yapılacaktır. Hesaplanan elektrik üretim değeri ve girilen emisyon faktörü ile yıllık 28,5 tCO₂ salımının önüne geçildiği hesaplanmıştır. Emisyon analizi sera gazı emisyon faktörü çarpanına göre hesaplanmaktadır. Emisyon faktörü, tam yanmanın ve diğer tüm kimyasal reaksiyonların tamamlandığının varsayıldığı bir kaynak akışındaki faaliyet verisine ait sera gazının ortalama emisyon oranını vermektedir.

Şekil 4.8'de simülasyon programının yakıt türü doğalgaz olduğu durumda RetScreen emisyon analizi değerleri verilmiştir. Sera gazı emisyon faktörü olarak 0,201 tCO₂/MWh alınmıştır.

Ülke - bölge	Yakıt türü	Seragazı emisyon faktörü (nakliye ve dağıtım)	I&D kayıpları	Seragazı emisyon faktörü
		tCO ₂ /MWh	%	tCO ₂ /MWh
Turkey	Doğal gaz	0,201	0,0%	0,201

Proje boyunca gerçekleşen temel değişiklikleri

Baz durum sistem seragazı özeti (Temel)				
Yakıt türü	Yakıt karışımı %	Yakıt tüketimi MWh	Seragazı emisyon faktörü	Seragazı emisyonu tCO ₂
			tCO ₂ /MWh	tCO ₂
Elektrik	100,0%	185	0,201	37,2
Toplam	100,0%	185	0,201	37,2

Önerilen durum sistem seragazı özeti (Elektrik projesi)				
Yakıt türü	Yakıt karışımı %	Yakıt tüketimi MWh	Seragazı emisyon faktörü	Seragazı emisyonu tCO ₂
			tCO ₂ /MWh	tCO ₂
Güneş	76,8%	142	0,000	0,0
Elektrik	23,4%	43	0,201	8,7
Toplam	100,0%	185	0,047	8,7

Seragazı emisyonu azaltma özeti					
Elektrik projesi	Baz durum seragazı emisyonu tCO ₂	Önerilen durum seragazı emisyonu tCO ₂	Brüt yıllık seragazı emisyonu azalması tCO ₂	Seragazı kredileri işlem ücretleri %	Net yıllık seragazı emisyonu tCO ₂
		37,2	8,7	28,5	0%

Şekil 4.8 RetScreen emisyon analizi ekranı

Simülasyon programının finansal analiz kısmında amortisman süresi hesaplaması yapılmış olup amortisman süresi 7,2 yıl bulunmuştur. Aşağıda Şekil 4.9'da RetScreen yazılımının geri ödeme süresi çıktısı verilmiştir.

Finansal sürdürülebilirlik		
Vergi öncesi İGO - özsermaye	%	13,6%
Vergi öncesi İGO - varlıklar	%	13,6%
Vergi sonrası İGO - özsermaye	%	13,6%
Vergi sonrası İGO - varlıklar	%	13,6%
Basit geri ödeme	yıl	7,2
Özsermaye geri ödeme	yıl	7,2
Net Şimdiki Değer (NPV)	\$	488.502
Yıllık yaşam döngüsü tasarrufları	\$/yıl	16.283
Maliyet-Fayda oranı		4,16
Seragazi azaltma maliyeti	\$/tCO2	(322)

Şekil 4.9 RetScreen finansal analiz ekranı

4.2 Simülasyon Yazılımının Doğrulanması

Gürsu Bursa fotovoltaik Güneş enerjisi santrali verileri kullanılarak, bu tez kapsamında geliştirilen simülasyon programı ile RetScreen simülasyon yazılımından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geliştirilen simülasyonda verilerin güvenilir olması için son 20 yılın güneş ışınım ve sıcaklık değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınarak hesaplanmıştır. RetScreen Güneş ışınım değerlerini 1967-1976 yılları arası 10 yılın ortalama değerlerini alarak hesaplama yapar. Sıcaklık değerleri için 1951-1980 yılları arasındaki 30 yılın ortalama değerleri alınmaktadır [15]. Güneş Radyasyonu ve sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre yapılan karşılaştırmada, verilerin ait olduğu yılların aynı olmamasından kaynaklanan bir fark görülmektedir. Geliştirilen simülasyon yazılımında yatay düzleme gelen saatlik ışınım değerleri ile saatlik sıcaklık değerleri RetScreen simülasyonu verileri ile aynı tutulması için oransal olarak eşitlenmiştir. RetScreen programı ışınım ve sıcaklık değerleri değişiminde olanak sağlamadığı için, eşitleme RetScreen programı ışınım ve sıcaklık değerlerine göre geliştirilen simülasyon yazılımında gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen simülasyon programında optik verim hesabı, elektrik artış fiyatı, PV kurulumunun yapıldığı arsa maliyeti ve PV panel üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ salım miktarı hesaplamalara dahil edilmeden sonuçlar alınmış ve doğrulama yapılmıştır. Çizelge 4.6'da İki simülasyon yazılımı girdilerinin aynı alınması durumunda program çıktıların karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 4.6 İki simülasyon yazılımı girdilerinin aynı alınması durumunda program çıktıların karşılaştırılması ve doğrulanması

Parametre	RetScreen	Geliştirilen Simülasyon	Sapma Değeri (%)
$E_{yıl}$ (kWh)	142.000	144.572	-1,8
T_{CO_2} (ton)	28,5	29	-1,8
t (Yıl)	7,2	7,0	2,7

Çizelge 4.6'da girdiler aynı alındığında geliştirilen simülasyon yazılımı çıktıların, RetScreen simülasyon yazılımı çıktılarına göre hesaplanan sapma değerleri ihmal edilebilir ölçüdedir. Buna göre geliştirilen simülasyon yazılımının doğrulanması yapılmıştır. Ancak optik verim hesabı, elektrik artış fiyatı, PV kurulumunun yapıldığı arsa maliyeti ve PV panel üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ salım miktarının hesaplamalara dahil edilmemesi, güvenilir, ayrıntılı ve doğru sonuçlar alınmasını engellemiştir.

Geliştirilen simülasyon programında RetScreen simülasyonunda farklı olarak, elektrik fiyat artışı, optik verim, PV üretiminde ortaya çıkan CO₂ salım miktarı, PV kurulum toplam arsa maliyeti değerleri girilmiştir. İki programın sonuçlarında bu değerlerden kaynaklı büyük ölçüde sapma görülmüştür. Çizelge 4.7'de iki programın çıktıları verilmiştir.

Çizelge 4.7 RetScreen ve geliştirilen simülasyon programı çıktıları karşılaştırması

Parametre	RetScreen	Geliştirilen Simülasyon
I_s (ort-günlük) (kWh/m ²)	4,03	3,78
T (°C)	14,7	16,44
$E_{yıl}$ (kWh)	142.000	70.600
T_{CO_2} (ton)	28,5	13,9
t (Yıl)	7,2	10,4

- Gürsu Bursa GES'de yıllık üretilen toplam elektrik enerjisi geliştirilen simülasyon programında daha düşük çıkmıştır. Elektrik retim değerlerinin farklı olmasının sebebi, RetScreen PV verim hesaplamasında optik verim hesaplaması yapmamış, PV panel verimini direk olarak PV'nin test ortamında ölçüm verimini hesaplamalara dahil etmiştir.
- Çevresel faktörlerin karşılaştırılmasında Retscreen Programında elektrik üretim değeri daha yüksek olduğundan dolayı nlenen CO₂ salım miktarı daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca PV panel üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ salım miktarı RetScreen'de hesaplanmamıştır.
- Amortisman sürelerinin karşılaştırılmasında bütün finansal girdiler değerlendirilmiş, elektrik üretim değerlerinin farklı çıkması ve elektrik satış fiyatı artış oranının girdi olarak işlenmemesi, optik verimin hesaplanmaması ve PV kurulumu yapılan arsanın maliyetinin eklenmemesi RetScreen programının amortisman süresinin daha düşük çıkmasına sebep olmuştur.

RetScreen programında yerli malı PV kullanım kazancı ile ilgili bir girdi bulunmamaktadır. PV seçimi, programının veri bankasında kayıtlı olan PV hücre tipleri sınırlandırılmıştır. Ayrıca RetScreen'de PV'lerin kurulduğu arsanın bedeli ve panellerin kapladığı alan girdisi bulunmamaktadır. İki programın girdi karşılaştırması değerleri izelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 RetScreen ve geliştirilen simülasyon girdi karşılaştırması

Girdiler	Geliştirilen Simülasyonu	RetScreen
Elektrik fiyat artışı	✓	✗
PV tipi eşitliliği	✓	✗
PV kurulum arsa bedeli	✓	✗
PV kurulum toplam arsa alanı	✓	✗
Optik verim	✓	✗

RetScreen programında manuel olarak işınım ve sıcaklık değerleri girilemediğinden dolayı, en güncel değerler ile bir analiz yapılamamaktadır. Programda hesaplamaların formülleri görülememektedir. Çevresel yönden yapılan analiz için, PV retiminde ortaya çıkan CO₂ salım miktarı çıktısı vermemektedir.

RetScreen duyarlılık analizi kısmında, parametreler program tarafından belirlenmekte olup, istenilen her parametrenin duyarlılık analizleri incelenememektedir. Geliştirilen simülasyon programında istenilen parametreler için duyarlılık analizi yapılabilmektedir. İki programın çıktı karşılaştırması değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 RetScreen ve geliştirilen simülasyon çıktı karşılaştırması

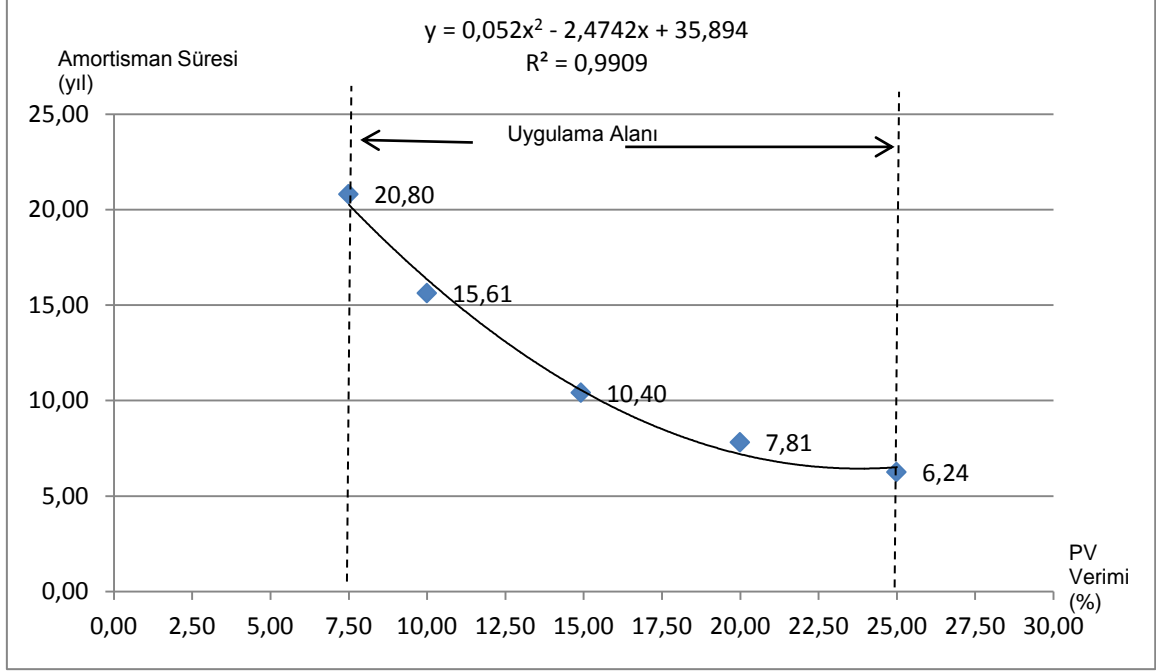
Çıktılar	Geliştirilen Simülasyonu	RetScreen
Saatlik ışınım değerleri	✓	✗
Saatlik sıcaklık değerleri	✓	✗
Formül ekranı	✓	✗
PV üretiminde ortaya çıkan CO ₂ salım miktarı	✓	✗
İstenilen duyarlılık analizi incelemesi	✓	✗

RetScreen lisanslı ve kabul edilmiş bir program olduğundan dolayı, geliştirilen simülasyonun RetScreen'e göre sapma değerleri hesaplanmıştır. RetScreen'de panel verimi hesaplaması eksikliği, ışınım değeri hesaplamada baz alınan yılların farklılığı, PV üretiminde ortaya çıkan CO₂ salım miktarı hesaplanmasının olmaması, yıllık elektrik satış fiyatı oranının ve PV kurulan arsanın maliyetinin amortisman süresine etki etmemesi sapma değerlerini etkilemiştir. Geliştirilen simülasyon programının daha esnek olduğu, daha ayrıntılı ve daha güvenilir sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir.

5. DUYARLILIK ANALİZLERİ

Teknoekonomik optimizasyona yönelik senaryoların oluşturulması için etkin parametrelerin tespitine yönelik bu bölümde, duyarlılık analizleri yapılmıştır. Duyarlılık analizlerinde bu çalışmada geliştirilen ve doğrulanan simülasyon yazılımı kullanılmış olup, teknoekonomik optimizasyonun amaç fonksiyonu çıktısı olan amortisman süresinin farklı parametrelerde ne oranda etkilendiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda her parametre için uygulama alanı belirlenerek grafikler çizilmiştir. Grafiklerin denklemi ve hata payları (R^2) verilmiştir. Hata payı 1'e ne kadar yakınsa eğri ile denklem o kadar birbirine uygundur. Uygulama sınır değerlerinin ortalama değeri, "ortalama değer teoremi" ile hesaplanarak, fonksiyonun türev denkleminde yerine koyularak özgül duyarlılık oranları hesaplanır. Bu bölümde PV hücre verimi, eğim açısı, yakıt maliyeti ve yatırım maliyeti ve için yapılan duyarlılık analizleri yapılmış ve özgül duyarlılık oranları hesaplanmıştır. Farklı parametreler için belirlenen özgül duyarlılık oranları Çizelge 5.1'de mutlak değerce büyükten küçüğe doğru sıralanmış olup, bunlardan mutlak değeri en yüksek değere sahip olan parametreler etkin parametre olarak belirlenmiştir.

Farklı PV hücre tiplerinin duyarlılık analizlerinin oluşturulmasında, farklı tipte PV hücreler için en yüksek ve en düşük PV panel verimleri tespit edilerek uygulama alanı belirlenmiştir. Buna göre % 7,5 ile % 25 arasında değişen PV panel verimleri arasında beş farklı değer için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Şekil 5.1'de PV Panel verimi -Amortisman süresi duyarlılık analizi grafiği verilmiştir.



Şekil 5.1 PV Panel verimi-Amortisman süresi duyarlılık analizi

Panel verimindeki artışın amortisman süresini hiperbolik olarak azalttığı görülmüştür. Bunun sebebi verimi yüksek hücre, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına sebep olmuştur. Şekil 5.1'de eğrinin denklemi grafik üzerinde verilmiş olup özgül duyarlılık oranı aşağıda hesaplanmıştır. Özgül duyarlılık oranı bu eğrinin eğiminde, uygulama alanı sınırlarında ortalama değer bulunarak eğrinin türevinde yerine koyulması ile hesaplanır. Ortalama değer "Ortalama değer teoremi"ne göre hesaplanır. Ortalama değer teoremi, düzgün bir eğrinin üzerinde seçilen herhangi bir bölüm üzerinde, türevi (eğimi) bu bölümün "ortalama" türevine eşit olan en az bir noktanın bulunduğunu belirtmektedir.

Şekil 5.1'de verilen eğrinin eğimi Denklem (3.41)'de hesaplanmıştır.

$$\frac{d(y)}{d(x)} = (0,104x) - 2,4742 \quad (3.41)$$

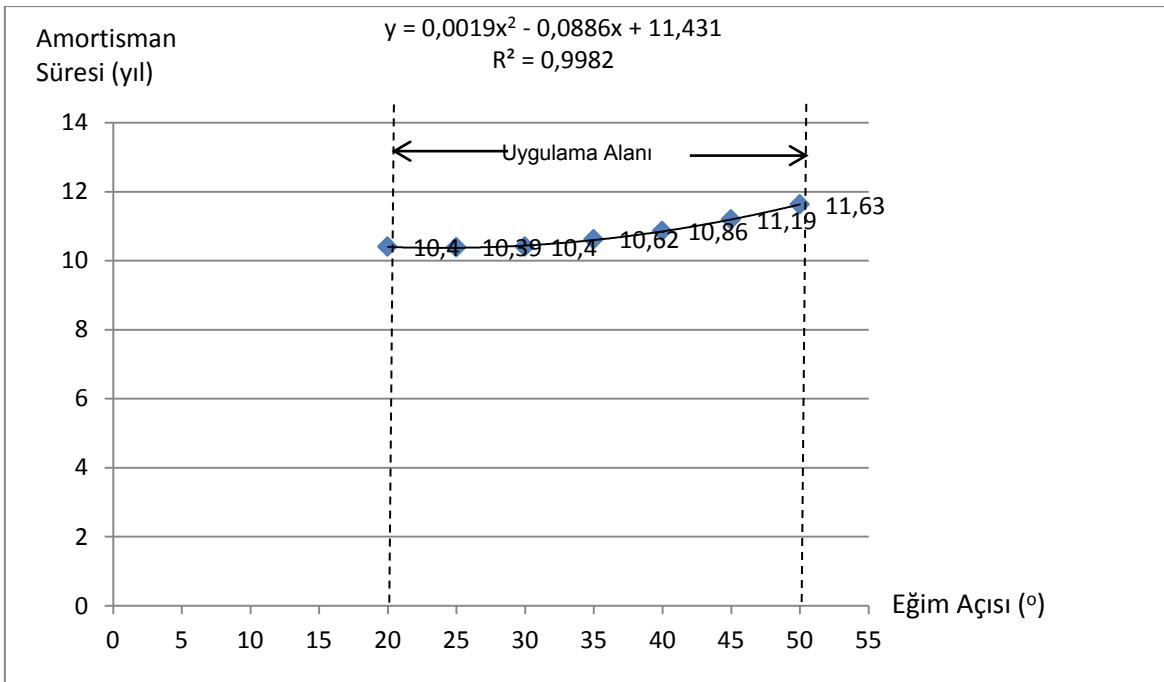
Denklem (3.42)'de verilen ortalama değer teoreminde "a" ve "b" noktaları grafiğin sınır noktalarıdır. "c" değeri, uygulama alanı sınır noktalarının fonksiyonda hesaplanan değerlerinin farkının, sınır noktalarının farkına oranı ile bulunur.

$$f'(c) = \frac{f(b)-f(a)}{(b)-a} \quad (3.42)$$

Ortalama değer teoremine göre hesaplanan ortalama değer, fonksiyonun türevinde yerine koyularak özgül duyarlılık oranı hesaplanmıştır. PV verimi-amortisman süresi duyarlılık analizi özgül duyarlılık oranı Denklem (3.43)'de -0,78420 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{ÖDO} = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=c} = -0,78420 \quad (3.43)$$

Eğim açısı için yapılan duyarlılık analizinde uygulama alanı enlem açısının 20° altında ve 10° üstünde seçilmiş olup duyarlılık analizi grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir. Bu aralıkta yapılan analizde amortisman süresinin en kısa olduğu eğim açısının 25° olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2 Eğim açısı-Amortisman süresi duyarlılık analizi

Eğim açısı için yapılan duyarlılık analizinde optimum değerden daha düşük değerlerde amortisman süresi artış oranının daha az olduğu görülmüştür.

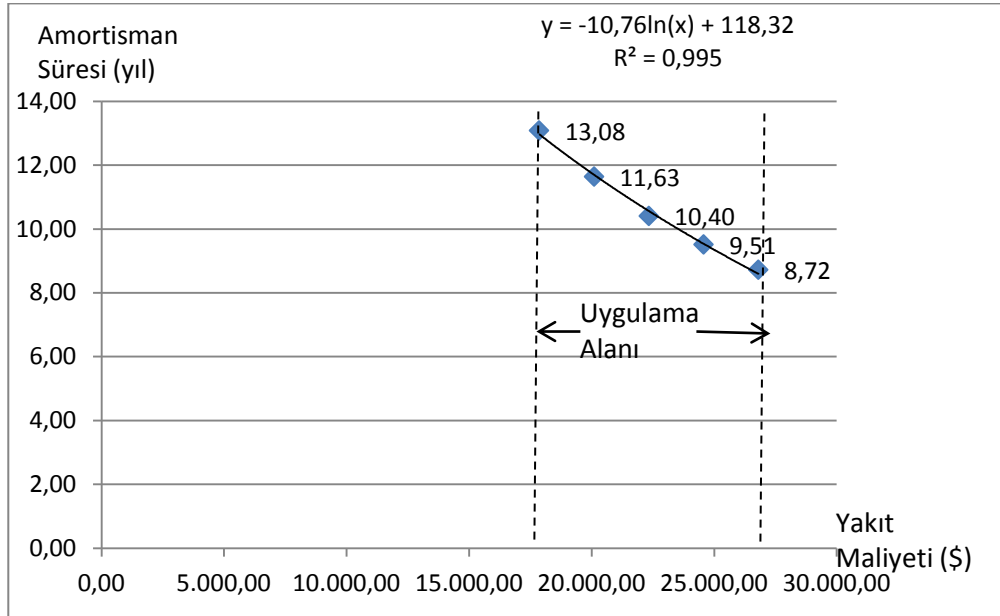
Şekil 5.2'de verilen eğrinin eğimi Denklem (3.44)'de verilmiştir.

$$\frac{d(y)}{d(x)} = (0,038x) - 0,0886 \quad (3.44)$$

Ortalama eğim açısı denklem (3.42)'ye göre hesaplanarak, özgül duyarlılık oranı Denklem (3.45)'de -0,04440 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{ÖDO} = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=c} = -0,04440 \quad (3.45)$$

Yakıt maliyeti amortisman süresi için duyarlılık analizi grafiği Şekil 5.3'de verilmektedir. Uygulama alanı baz alınan elektrik fiyatının enflasyon oranında artması +10% ve azalması -10% aralığında seçilmiş ve beş farklı değer için incelenmiştir.



Şekil 5.3 Yakıt maliyeti -Amortisman süresi duyarlılık analizi

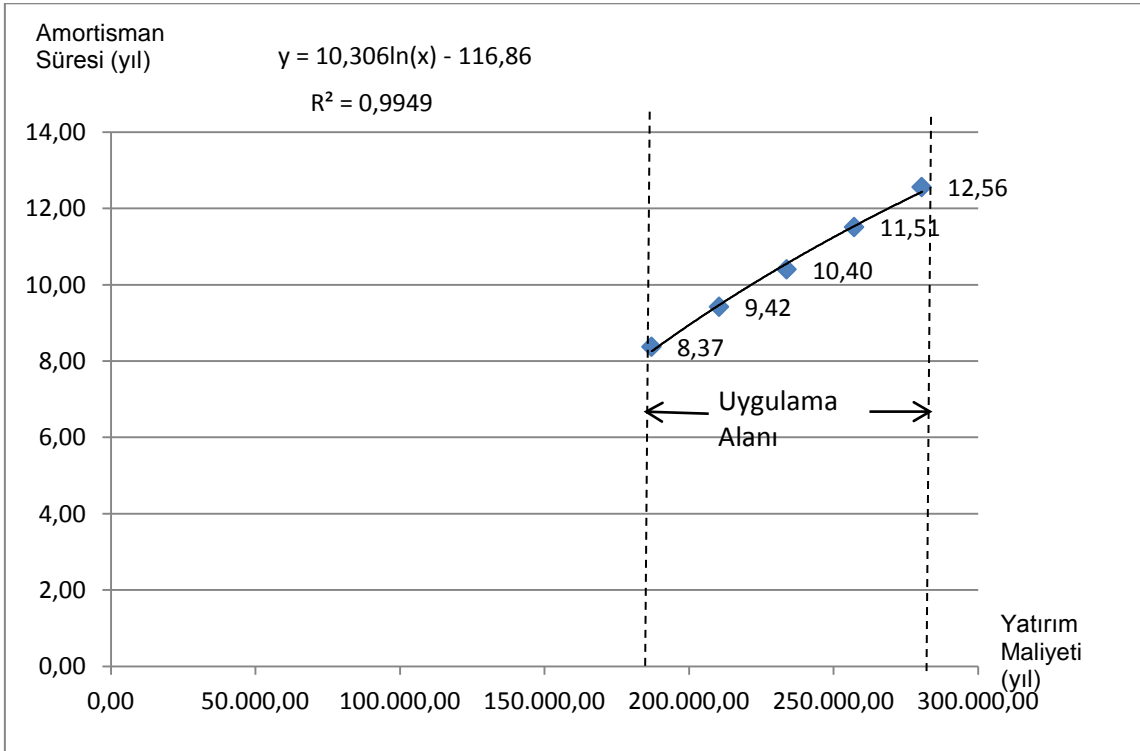
Gürsu Bursa GES'de üretilen elektrik üretimi ile sağlanan kazancının artması amortisman süresini kısaltmakta olup özgül duyarlılık oranı aşağıda hesaplanmıştır. Şekil 5.3'de verilen eğrinin eğimi Denklem (3.46)'da verilmiştir.

$$\frac{d(y)}{d(x)} = \frac{-10,76}{x} \quad (3.46)$$

Ortalama yakıt maliyeti değeri denklem (3.42)'ye göre hesaplanarak, özgül duyarlılık oranı Denklem (3.47)'de -0,00048 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{ÖDO} = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=c} = -0,00048 \quad (3.47)$$

Geliştirilen simülasyon programı Yatırım maliyeti-Amortisman süresi Duyarlılık Analizi grafiği Şekil 5.4'de verilmiştir. Uygulama alanı mevcut santral yatırım maliyetinin \pm % 10 aralığında değiştirilmesi ile beş farklı değer için incelenmiştir.



Şekil 5.4 Yatırım maliyeti-Amortisman süresi duyarlılık analizi

Bu analizde santral kurulum maliyeti ile amortisman süresinin doğru orantılı olduğu görülmekte olup Şekil 5.4'de verilen eğrinin eğimi Denklem (3.48)'de verilmiştir

$$\frac{d(y)}{d(x)} = \frac{10,306}{x} \quad (3.48)$$

Ortalama yatırım maliyeti değeri, denklem (3.42)'ye göre hesaplanarak, özgül duyarlılık oranı Denklem (3.49)'da -0,00048 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{ÖDO} = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=c} = -0,00048 \quad (3.49)$$

Yukarıdaki duyarlılık analizlerine göre uygulama alanlarındaki grafiklerin eğimlerinden geliştirilen simülasyon programında duyarlılık analizleri ve özgül duyarlılık oranları hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Duyarlılık oranları

Duyarlılık Analizi Parametreleri	Geliştirilen Simülasyon Duyarlılık Oranı
PV panel verimi -Amortisman süresi	-0,78420
Eğim açısı-Amortisman Süresi	0,04440
Yakıt maliyeti-Amortisman süresi	-0,00048
Yatırım maliyeti- Amortisman süresi	0,00004

Yapılan analizler sonucunda özgül duyarlılık oranı mutlak değerce en yüksek olan parametrelerin PV panel verimi ve eğim açısında olduğu Çizelge 5.1'de görülmektedir. Bu bağlamda teknoekonomik optimizasyona yönelik senaryoların farklı PV hücre tipleri ve farklı PV eğim açıları için oluşturulmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

6. OPTİMİZASYONA YÖNELİK SENARYOLAR

Duyarlılık analizleri sonucunda belirlenen en etkin iki parametre olan PV hücre türü ve eğim açısının değişimine yönelik iki farklı senaryo oluşturulmuş olup, bu senaryoların her birinde Gürsu Bursa Güneş enerjisi santralindeki üretimin talebe eşit olması ve talebin üzerinde olması halinde, devlet tarafından CO₂ teşviği sağlanması ve sağlanmaması durumları ayrıca irdelenmiştir.

6.1 Eğim Açısı Değişimi Senaryosu

Gürsu Bursa bölgesinin enlemi 40,18 °dir. Mevcut Güneş enerjisi santralinde fotovoltaiklerin diziliminde eğim açısı 30° olarak alınmıştır. Danışmanlık şirketleri GES kurulumu yapacakları yerler için genellikle PV eğim açılarını bölgenin enlem açısına eşit alırlar. Bu bölümde eğim açısı değiştirilerek elektrik üretimi miktarlarına göre ve amortisman süresi üzerindeki etkisi incelenerek teknoekonomik ve çevresel yönden optimum sonuç bulunmuştur.

Bu incelemede matematiksel modelleme bölümünde de devlet tarafından bahsedildiği gibi devlet tarafından CO₂ salımının azaltılması için teşvik verilmesi durumu da göz önüne alınarak elektrik üretim miktarlarına göre amortisman süreleri hesaplanmış ve en düşük amortisman süresinin hangi durumda olduğu tespit edilmiştir.

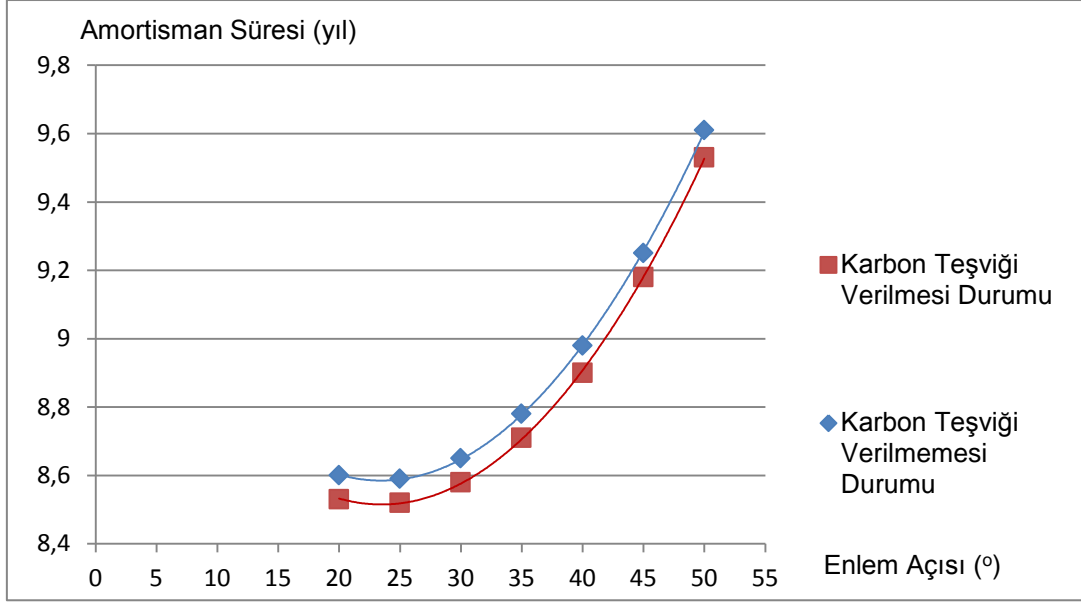
6.1.1 Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi

Gürsu Bursa Güneş enerjisi santralinde tüketim talebinin tamamının karşılanması durumunda eğim açılarının değişimine göre amortisman süresi, toplam kazanç, toplam yatırım bedeli ve önlenecek CO₂ salım miktarları bu tez kapsamında geliştirilen simülasyon yazılımı kullanılarak enlem açısının 10° üzeri ve 20° altındaki değerler için hesaplanmış ve sonuçlar 7 farklı eğim açısı için Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi

Elektrik üretimi 185.000 (kWh)	CO ₂ Teşviği Verilmemesi Durumu							CO ₂ Teşviği Verilmesi Durumu						
	Eğim Açıları (β)							Eğim Açıları (β)						
	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
CO ₂ t eşviği kazancı			-	-	-	-	-	439,23	439,43	436,28	429,81	420,11	407,34	391,71
Şebekeden elektrik alınmaması durumunda kazanç	52.780	52.803	52.434	51.673	50.534	49.033	47.197	52.780	52.803	52.434	51.673	50.534	49.033	47.197
Toplam kazanç	52.780	52.803	52.434	51.673	50.534	49.033	47.197	53.220	53.243	52.870	52.103	50.954	49.441	47.589
Toplam kurulum maliyeti	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826	453.826
Önlenen Net CO ₂ Salım Miktarı	36.602	36.618	36.356	35.817	35.009	33.945	32.643	36.602	36.618	36.356	35.817	35.009	33.945	32.643
Amortisman süresi	8,60	8,59	8,65	8,78	8,98	9,25	9,61	8,53	8,52	8,58	8,71	8,90	9,18	9,53

Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde, her eğim açısında amortisman süreler kısalmıştır. En kısa amortisman süresi 25° eğim açısında gözlemlenmiştir. Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması için daha fazla yatırım yapılması gerektiği halde, üretilen elektrik sayesinde şebekeden elektrik alınmadığı için elde edilen kazanç daha fazla artış gösterdiği için amortisman süresi kısalmıştır. Bunun yanında devlet tarafından, önlenen her ton CO₂ için teşvik alınması durumunda, amortisman sürelerinin daha da düştüğü görülmüştür. En kısa amortisman süresi 25° eğim açısında, devletin sağladığı CO₂ teşviği kazancı ile sağlanmıştır. Şekil 6.1'de senaryo için amortisman süresi değişimi verilmiştir.



Şekil 6.1 Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi değişimi

6.1.2 Tüketim Talebinin Üzerindeki Değişken Üretim Oranları için Eğim Açılarının Değişim Durumuna Göre Amortisman Süresi Değişimi

Gürsu Bursa Bölgesinde kurulan güneş enerjisi santralinde, elektrik tüketim talebinin üzerinde elektrik üretimi yapılması halinde, 8 farklı elektrik üretim değeri için, eğim açılarının değişimine göre, amortisman süreleri incelenmiştir.

Şebekeye elektrik satışı yapılması halinde devlet her kWh başına ücret ödemektedir. Ayrıca kullanılan her yerli malı PV modülü için de satılan her kWh başına ayrıca ücret ödemekte olup, Çizelge 4.1 de bu ücretler belirtilmiştir. Üretilen elektrik miktarının oransal olarak değişmesiyle, teşvik alınması ve alınmaması durumunda farklı eğim açıları için amortisman süresi değişimi Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Tüketim talebinin üzerindeki değişken üretim oranları için eğim açılarının değişim durumuna göre amortisman süresi durumu

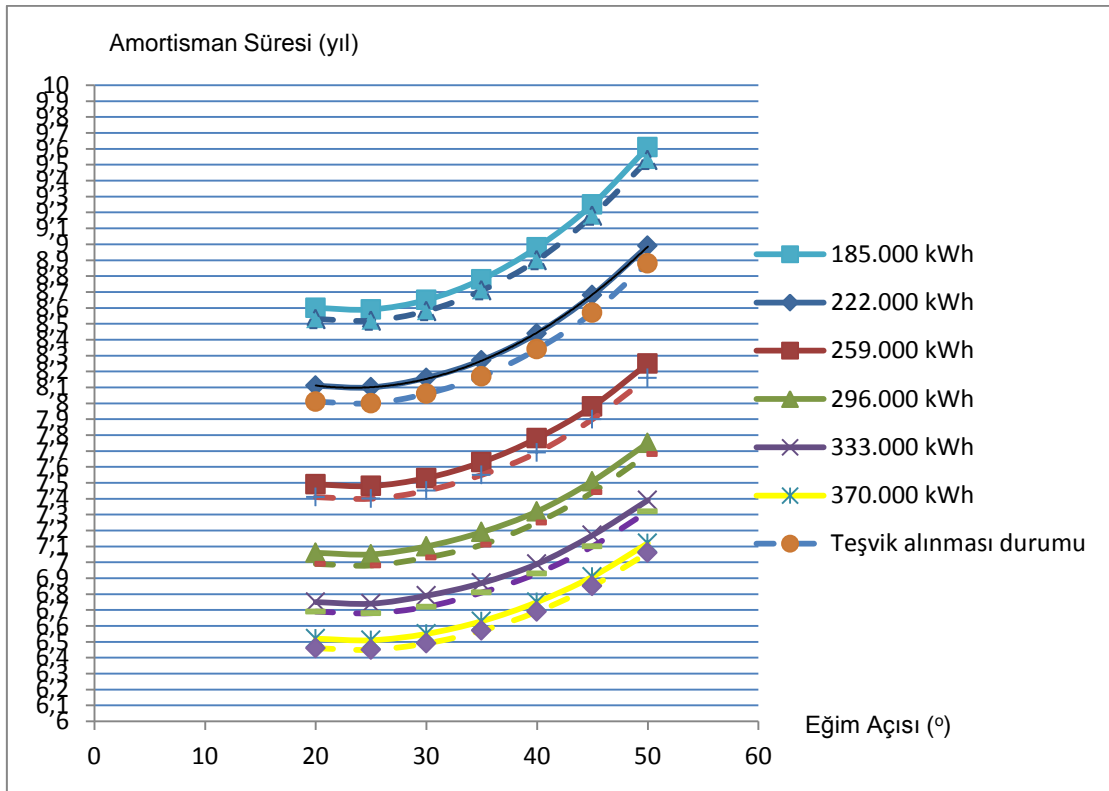
E _{yıl} (kWh)	CO ₂ ve yerli malı PV modül kullanım teşviği verilmemesi durumu							CO ₂ ve yerli malı PV modül kullanım teşviği verilmesi durumu						
	Eğim Açılı (β)							Eğim Açılı (β)						
	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
185.000	8,60	8,59	8,65	8,78	8,98	9,25	9,61	8,53	8,52	8,58	8,71	8,90	9,18	9,53
203.500	8,54	8,53	8,60	8,72	8,90	9,16	9,50	8,44	8,43	8,49	8,61	8,79	9,05	9,38
222.000	8,11	8,10	8,16	8,27	8,44	8,68	8,99	8,01	8,00	8,06	8,17	8,34	8,57	8,88
240.500	7,76	7,76	7,81	7,91	8,07	8,29	8,58	7,68	7,67	7,72	7,82	7,98	8,20	8,48
259.000	7,49	7,48	7,53	7,63	7,78	7,98	8,25	7,41	7,40	7,45	7,55	7,69	7,90	8,16
277.500	7,26	7,25	7,30	7,39	7,53	7,77	7,98	7,18	7,17	7,22	7,31	7,45	7,65	7,90
296.000	7,06	7,05	7,10	7,19	7,32	7,51	7,75	6,99	6,98	7,03	7,11	7,25	7,44	7,68
314.500	6,90	6,89	6,93	7,02	7,15	7,33	7,56	6,82	6,81	6,87	6,95	7,08	7,26	7,49
333.000	6,75	6,74	6,79	6,87	6,99	7,17	7,39	6,69	6,68	6,72	6,81	6,93	7,10	7,32
351.500	6,63	6,62	6,66	6,74	6,86	7,03	7,25	6,57	6,56	6,60	6,68	6,80	6,97	7,18
370.000	6,52	6,51	6,55	6,63	6,75	6,91	7,12	6,46	6,45	6,49	6,57	6,69	6,85	7,06

Şebekeye elektrik satılabilmesi, daha yüksek kapasiteli santral ve yüksek yatırım maliyeti oluştursa da devlet tarafından, ihtiyaç fazlasında üretilen her kWh elektrik için ödenen ücret santral için ciddi bir gelir kaynağı oluşturmakta dolayısıyla da amortisman süresi mevcut santral şartlarına göre daha düşük çıkmaktadır.

Ayrıca, böylece çevresel açıdan da daha duyarlı bir sistem yaratılmış olmaktadır. Devlet tarafından alınan elektriğin başka bir işletmeye satılmasıyla, o işletmenin fosil kaynak kullanarak yapacağı CO₂ salımının da önüne geçilmiş olacaktır.

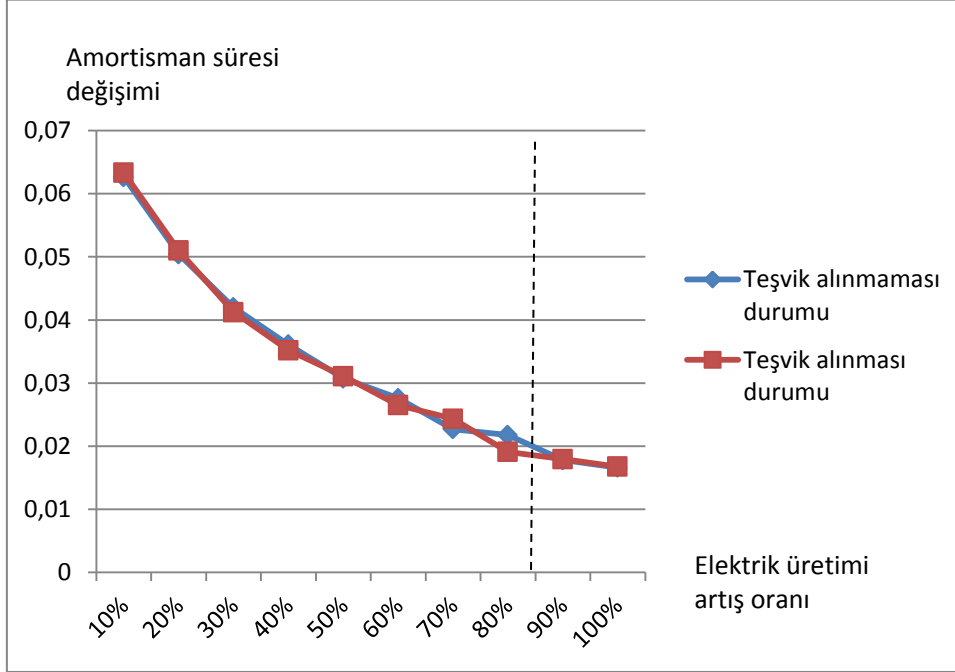
CO₂ ve yerli malı PV modül kullanım teşviği verilmesi durumunda kazanç daha da artmış ve amortisman süresi kısalmıştır. Diğer senaryolardan yapılan çıkarımlarda olduğu gibi bu senaryoda da en verimli eğim açısının 25° olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.2'de talebin üzerinde beş farklı orandaki elektrik üretim değeri için, CO₂ önleme teşviği ve yerli malı kullanım teşviği verilmesi ve verilmemesi durumları için eğim açılarının değişimine göre amortisman süreleri grafiği verilmiştir. Düz çizgiler teşvik olmayan durumda beş farklı elektrik üretim oranı için amortisman süresi değişimini, kesikli çizgiler ise teşvik alındığı durumda amortisman süresi değişimini göstermektedir.



Şekil 6.2 Talebin üzerinde farklı oranda elektrik üretimi olması durumunda CO₂ önleme teşviği ve yerli malı kullanım teşviği verilmesi ve verilmemesi için eğim açılarına göre amortisman süreleri

Talebin üzerinde elektrik üretimi durumunda, santralin elektrik üretimi kapasitesi arttıkça, amortisman süresi yavaşlayarak azaldığı gözlemlenmiştir. En kısa amortisman süresinin tespit edildiği 25° eğim açısında optimum elektrik üretimi için amortisman süresi değişimi grafiği Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3 25° eğim açısında elektrik üretimi artış oranlarına göre amortisman süresi değişimi

Talebin üzerindeki elektrik üretimindeki artışın, amortisman süresinin kısalma hızını yavaşlattığı görülmektedir. 25° eğim açısında % 80'den fazla elektrik üretiminde amortisman süresindeki azalma oranı düşmektedir.

6.2 Farklı Çeşit PV Hücre Tipi Kullanılması Senaryosu

İkinci senaryoda PV hücre tipi değişiminin amortisman süresine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda farklı PV hücre tipleri incelenmiş olup bunlar mevcut santral için incelenen polikristalin, ince film ve monokristalin fotovoltaik hücrelerdir. Simülasyonlarda PV hücre tiplerinin verim değerleri kullanılmış olup önceki senaryolarda tespit edilen optimum eğim açısı 25° olarak sabit alınmıştır.

6.2.1 İnce film PV hücre kullanımı

Bu çalışmada örnek olarak incelenen fotovoltaik güneş enerjisi santralinde polikristalin PV kullanılmıştır. Polikristalin PV hücrelerin verimleri oldukça yüksek, maliyetleri ise ince film PV hücrelere göre daha düşüktür.

İnce film hücrelerin sıcağa daha dayanıklı olması dikkat çekmekte olup ince film PV hücre kullanımında 96 kW için PV panel maliyeti 86.400 \$'dır. Bu santral için toplamda 960 adet PV panel kullanılması gerekmekte olup santralin PV paneller hariç kurulum maliyeti 97.514 \$, arsa maliyeti ise denklem (3.28)'den hesaplandığı üzere 68.950 \$ olup toplam kurulum maliyeti 252.864 \$'dır. Çizelge 6.3'de ince film PV hücrelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.3 İnce Film Fotovoltaik panel özellikleri ve birim fiyatı [20]

İndeks	Birim	Değer
Pik Güç	Wp	100
Güç Saptırma	W	+5
Modül Verimi	%	7,5
Çalışma Gerilimi	(Vmppt)	18.06
Çalışma Akımı	(Imppt)	5.59
Ölçüler	mm	1.195 × 780 × 35
Ağırlık	Kg	8.8
Sıcaklık Katsayısı	%/°C	0.065
Çalışma hava sıcaklığı	°C	45
Bir adet Fiyatı (2013 yılı)	\$	90

Çizelge 6.4'de ince film PV hücre kullanımı durumunda 25° eğim açısı için aylık elektrik üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.4 İnce Film PV kullanımı durumunda 25° eğim açısı için aylık elektrik üretim değerleri

Aylar	($\beta=25^\circ$) Aylık Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)
Ocak	1.585
Şubat	1.875
Mart	2.702
Nisan	3.488
Mayıs	4.847
Haziran	5.561
Temmuz	6.245
Ağustos	6.205
Eylül	5.306
Ekim	3.392
Kasım	2.934
Aralık	1.376
TOPLAM	45.514

İnce Film PV hücre fiyatı polikristalin PV hücrelerden daha yüksek olduğundan dolayı toplam yatırım 18.997 \$ daha yüksek çıkmıştır. Elektrik üretim değerinin düşmesi yatırım maliyetlerinin artması amortisman süresini oldukça uzatmıştır. İnce Film PV panel kullanımındaki simülasyon çıktısı Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5 İnce Film PV panel kullanımı simülasyon çıktısı

	($\beta=25^\circ$) İnce Film PV hücre kullanım durumu
Yıllık Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	45.514
CO₂ Teşviği Kazancı	-
Toplam Kazanç(\$)	18.109
Amortisman Süresi (yıl)	13,9
Toplam CO₂ Üretimi (kg)	8.831

6.2.2 Monokristalin PV hücre kullanımı

Monokristalin PV hücreler Bölüm 1.5'de de bahsedildiği gibi aynı gücü üreten polikristalin PV hücrelere göre daha yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Monokristalin PV hücre kullanımında 96 kW için gereken PV paneli maliyeti 100.800 \$'dır. Bu santral için toplamda 384 adet PV panel kullanılması gerekmektedir. Santralin PV paneller hariç kurulum maliyeti 97.514 \$, arsa maliyeti ise denklem (3.29)'dan hesaplandığı üzere 47.734 \$ olup, toplam kurulum maliyeti 246.048 \$'dır. Aşağıdaki Çizelge 6.6'da monokristalin PV hücrelerin özellikleri ve birim fiyatı verilmiştir.

Çizelge 6.6 Monokristalin PV panel özellikleri ve birim fiyatı [16]

İndeks	Birim	Değer
Pik Güç	Wp	250
Güç Saptırma	W	+5
Modül Verimi	%	15,54
Çalışma Gerilimi	(Vmppt)	27,7
Çalışma Akımı	(Imppt)	6,51
Ölçüler	mm	1.640 × 992 × 40
Ağırlık	Kg	18,5
Çalışma Hava Sıcaklığı	°C	45
Bir adet Fiyatı (2013 yılı)	\$	262,5

Monokristalin PV hücre kullanımı panel verimini artırmıştır. Bu yüzden elektrik üretimi değişmiş ve elektrik üretim değeri mevcut santralde kullanılan polikristalin PV panel kullanımına göre artmıştır. Çizelge 6.7'de monokristalin PV panel kullanımı durumunda 25° eğim açısı için aylık elektrik üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.7 Monokristalin PV kullanımı durumunda 25° eğim açısı için aylık elektrik üretim değerleri

Aylar	($\beta=25^\circ$) Aylık Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)
Ocak	2.462
Şubat	3.008
Mart	4.943
Nisan	6.028
Mayıs	8.377
Haziran	9.522
Temmuz	10.503
Ağustos	9.696
Eylül	7.207
Ekim	4.593
Kasım	3.984
Aralık	1.894
TOPLAM	72.218

Arsa bedeli ve fotovoltaik panel bedeli arttığından dolayı amortisman süresi artmıştır. Monokristalin PV panel kullanımındaki simülasyon çıktısı Çizelge 8.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8 Monokristalin PV panel kullanımı simülasyon çıktısı

	($\beta=25^\circ$) Monokristalin PV kullanım durumu
Yıllık Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)	72.218
CO₂ Teşviği Kazancı	-
Toplam Kazanç (\$)	22.853
Amortisman Süresi (yıl)	10,8
Toplam CO₂ Üretimi (kg)	14.198

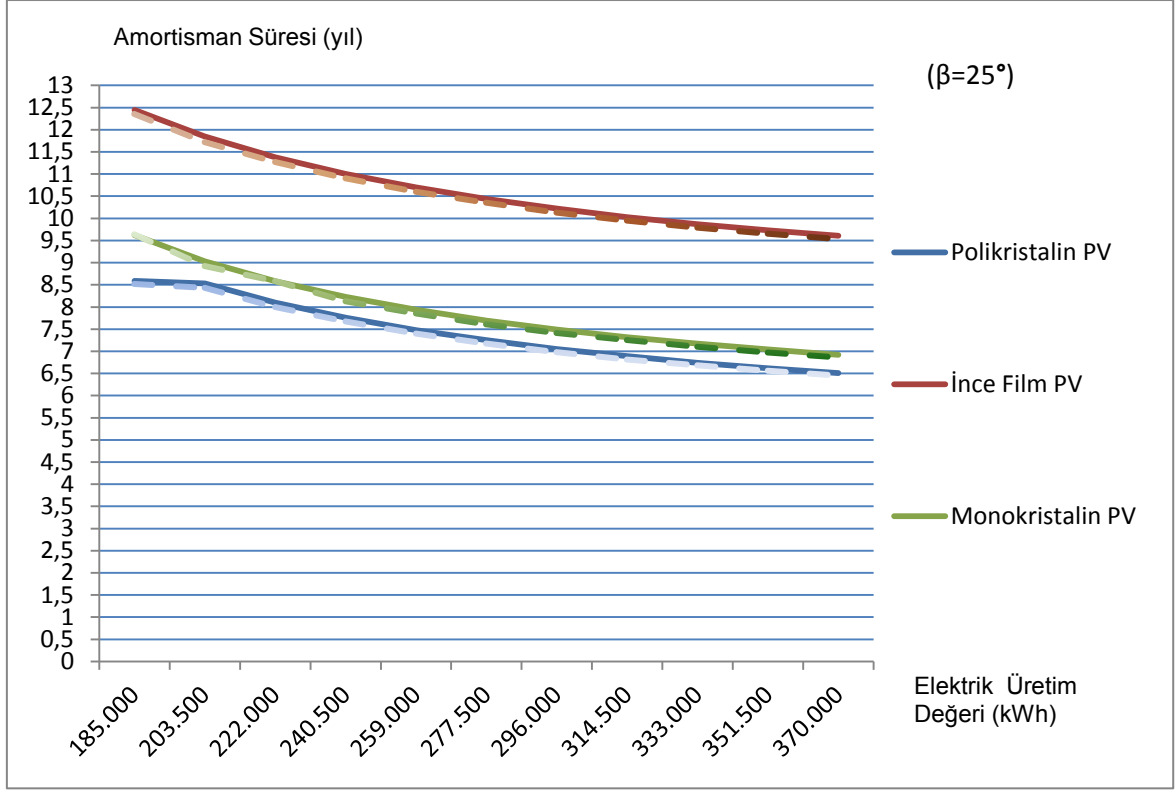
Bu senaryoda incelenen iki farklı tipte PV hücresi ile örnek santralde kullanılan polikristalin panelin amortisman süresine etkisinin incelenmesi sonucunda, en kısa amortisman süresinin polikristalin PV panel kullanılması durumunda olduğu görülmüştür.

İlk senaryo ve ikinci senaryoların sonuçları birlikte incelendiği zaman teknoekonomik ve çevresel açıdan en iyi sonucun polikristalin PV paneller kullanılarak eğim açısının 25° olduğu % 80 talep üzerinde üretim yapıp şebekeye satılması olduğu durumda olduğu görülmüştür. Geliştirilen simülasyonla elde edilen sonuçların verildiği Çizelge 6. 9'da en iyi eğim açısı olan 25° 'de üç farklı PV hücre tipi için elektrik üretim değerlerinin değişimine göre, teşvik alınması ve alınmaması halindeki amortisman süresi değişimleri incelenmiştir.

Çizelge 6.9 25° eğim açısında talep üzerinde değişken artan elektrik üretimine göre, devlet teşviği verildiği ve verilmediği durumlarda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişimi

E _{yıl} (kWh)	Devlet teşviği verilmemesi durumu (β=25°)			Devlet teşviği verilmesi durumu (β=25°)		
	Polikristalin PV panel	İnce Film PV panel	Monokristalin PV panel	Polikristalin PV panel	İnce Film PV panel	Monokristalin PV panel
185.000	8,59	12,45	9,62	8,52	12,35	9,64
203.500	8,53	11,85	9,03	8,43	11,72	8,92
222.000	8,10	11,38	8,58	8,00	11,27	8,58
240.500	7,76	11,00	8,23	7,67	10,90	8,13
259.000	7,48	10,70	7,94	7,40	10,60	7,85
277.500	7,25	10,44	7,69	7,17	10,35	7,61
296.000	7,05	10,22	7,49	6,98	10,13	7,41
314.500	6,89	10,03	7,32	6,81	9,95	7,25
333.000	6,74	9,87	7,17	6,68	9,79	7,10
351.500	6,62	9,73	7,04	6,56	9,65	6,97
370.000	6,51	9,61	6,92	6,45	9,53	6,86

Çizelge 6.9'da elde edilen değerlerin grafik üzerinde gösterimi Şekil 6.4'de verilmiştir.

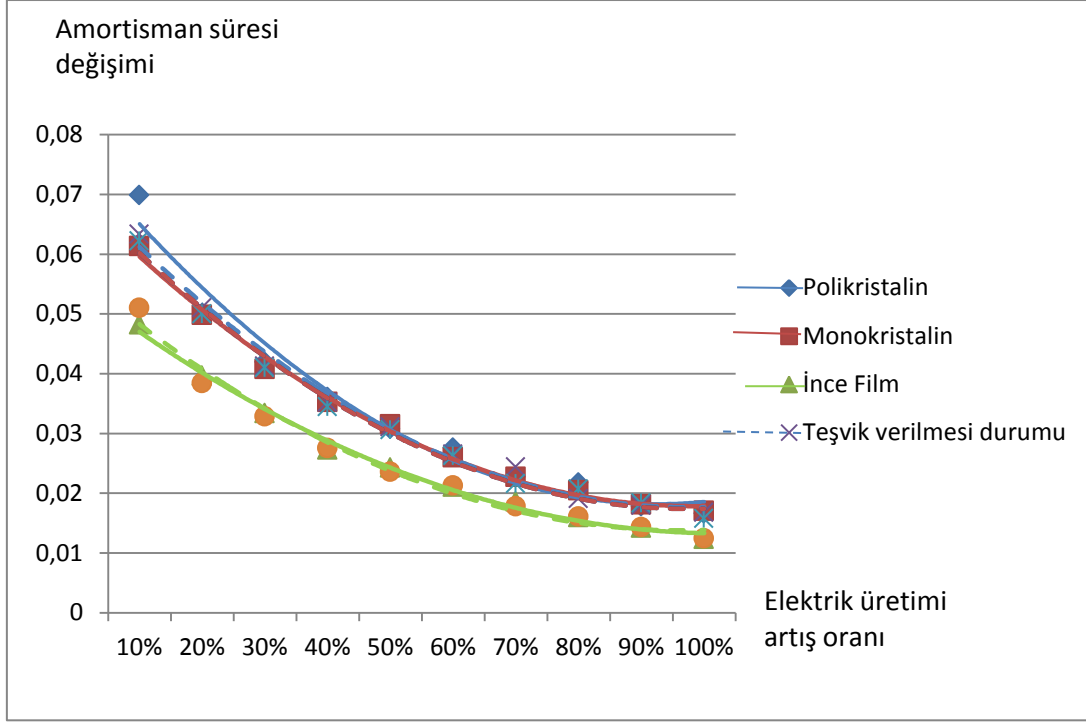


Şekil 6.4 25° eğim açısında, devlet teşviği verildiği ve verilmediği durumlarda elektrik üretim değerlerine göre amortisman süresi değişimi

Farklı PV tipleri için alınan amortisman süresi çıktılarında, her PV hücre tipi için elektrik üretim miktarı arttıkça amortisman süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca şebekeye satılan her kWh elektrik için devlet tarafından sağlanan teşvikler sayesinde amortisman süresinin daha da kısaldığı görülmektedir.

Ekonomik açıdan geri ödemeyi en kısa sürede sağlayan PV hücre tipinin Polikristalin PV tipi olduğu kanıtlanmıştır.

Talebin üzerinde elektrik üretimi durumunda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişiminin farklı olduğu görülmektedir. Monokristalin PV hücre tipi kullanımındaki amortisman süresi değişimi ince film PV hücre kullanımı durumundaki amortisman süresi değişiminden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. En kısa amortisman süresinin tespit edildiği 25° eğim açısında farklı PV hücre tipleri için devlet teşviği verilmesi ve verilmemesi durumlarında amortisman süresi değişimi grafiği Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.5 25° eğim açısında farklı PV hücre tipleri için devlet teşviği verilmesi ve verilmemesi durumlarında amortisman süresi değişimi

Talebin üzerindeki elektrik üretimindeki artışın, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresinin kısalma hızını yavaşlattığı görülmektedir. Talebin üzerindeki elektrik üretiminin % 80 artma noktasında, eğrinin düşüşü daha da yavaşlamakta olduğu görülmektedir. Bu bağlamda yapılan yatırımın en kısa sürede geri ödemesi için Polikristalin PV panel kullanımı ve tüketim talebinin % 80 üzerinde elektrik üretimi kapasitesinde kurulum yapılması gerektiği tespit edilmiştir.

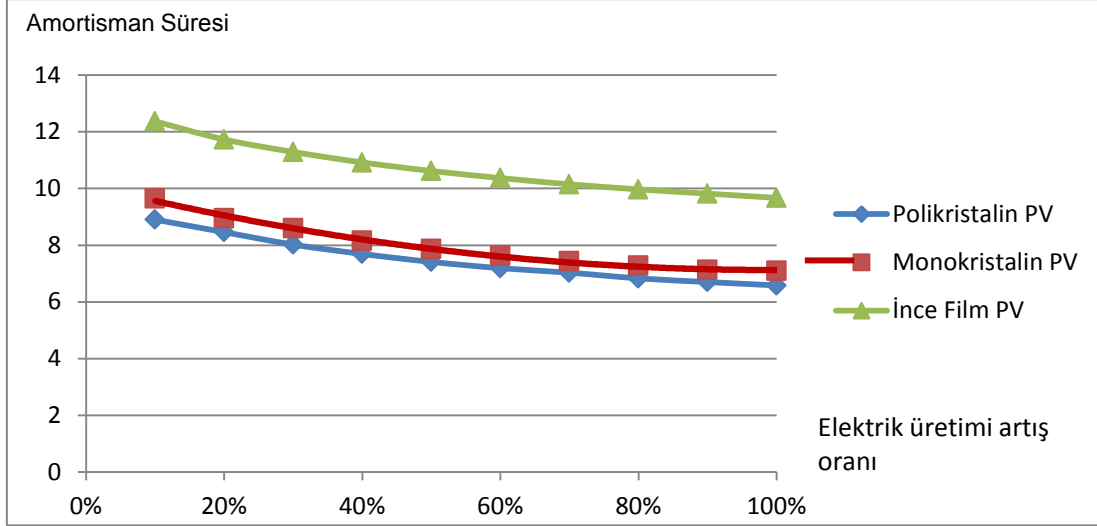
6.3 Farklı PV Tipleri için Karbon Teşviği Olması Durumunda Amortisman Süresi Değişimi

Mevcut santral için Karbon azaltım teşviği kazancı hem çevresel açıdan fayda sağlamakta, hem de ekonomik açıdan amortisman süresinin kısalmasında etkili olmaktadır. 25° eğim açısında farklı PV hücre tipleri için tüketim talebinin üzerinde üretim yapılması halinde amortisman süreleri Çizelge 6.10'da incelenmiştir.

Çizelge 6.10 25° eğim açısında talep üzerinde artan elektrik üretimine göre, Karbon teşviği verilmesi durumunda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişimi

E _{yıl} (kWh)	Karbon teşviği verilmesi durumu (β=25°)		
	Polikristalin PV panel	İnce Film PV panel	Monokristalin PV panel
185.000	8,53	12,37	9,65
203.500	8,46	11,73	8,95
222.000	8,02	11,29	8,60
240.500	7,69	10,92	8,16
259.000	7,41	10,62	7,86
277.500	7,19	10,37	7,63
296.000	7,03	10,15	7,43
314.500	6,83	9,97	7,28
333.000	6,70	9,82	7,13
351.500	6,58	9,67	7,10
370.000	6,47	9,55	6,88

Şekil 6.6'da 25° eğim açısında talep üzerinde artan elektrik üretimine göre, Karbon teşviği verilmesi durumunda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişimi verilmiştir. 25° eğim açısında % 80'den fazla elektrik üretiminde, amortisman süresindeki azalma oranı düşmektedir.



Şekil 6.6 25° eğim açısında talep üzerinde artan elektrik üretimine göre, Karbon teşviği verilmesi durumunda, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresi değişimi

6.4 En Uygun Senaryo için RetScreen ve Geliştirilmiş Simülasyon Karşılaştırması

Duyarlılık analizleri sonucunda belirlenen en etkin iki parametreye yönelik yapılan senaryoların sonucunda Gürsu Bursa GES için Polikristalin PV'ler 25° eğim açısıyla yerleştirilerek, tüketim talebinin % 80 üzerinde elektrik üretimi yapılarak, Karbon ticaretinin ve yerli malı PV kullanım teşviğinin hesaba katılması ile, teknoekonomik ve çevresel açıdan en iyi sonuç elde edilmiştir. Gürsu Bursa GES için mevcut durum ve en iyi senaryo karşılaştırması Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.11 Gürsu Bursa GES için mevcut durum ve en iyi senaryo karşılaştırması

Parametreler	Gürsu Bursa GES mevcut durum	Gürsu Bursa GES için en iyi senaryo
Eğim Açısı (°)	30	25
Elektrik Tüketim Talebi (kWh/yıl)	185.000	185.000
Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	70.600	333.500
PV Tipi	Polikristalin PV	Polikristalin PV
Karbon Teşviği Kazancı (\$)	yok	var
Yerli malı PV kullanım teşviği (\$)	yok	var

En iyi senaryo için RetScreen ve geliştirilen simülasyondan elde edilen sonuçların mevcut durum ile karşılaştırılması Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12 En iyi senaryo için RetScreen ve geliştirilen Simülasyon Çıktıları

Parametreler	Gürsu Bursa GES mevcut durum	Geliştirilen Simülasyon Çıktıları	RetScreen Çıktıları
Eğim Açısı (°)	30	25	25
Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	70.600	333.500	333.500
Toplam Kazanç (\$/yıl)	17.053	110.590	54.322
Önlenen Toplam CO ₂ Miktarı (kg/yıl)	13.873	65.910	67.000
Amortisman Süresi (yıl)	10,4	6,7	5,9

Sonuç olarak Gürsu Bursa Güneş enerjisi santrali için mevcut durumda 10,4 yıl olarak hesaplanan amortisman süresi, elde edilen en iyi senaryolar için geliştirilen simülasyonda 6,7 yıl olarak bulunmuş, aynı girdiler için RetScreen'de 5,9 yıl olarak bulunmuştur. RetScreen yazılımı ve geliştirilen simülasyon arasındaki bu fark, saatlik Güneş Radyasyonu ve saatlik sıcaklık ölçüm verileri için baz alınan yılların farklı olmasından dolayı, saatlik ışınım ve sıcaklık verileri farklılığından, RetScreen simülasyon programının, panel verimi hesaplaması eksikliği, PV üretiminde ortaya çıkan CO₂ salım miktarının hesaplanmaması, yıllık elektrik satış fiyatı artışının ve PV Güneş enerjisi santralinin kurulduğu arsanın maliyetinin hesaba katılmamasından kaynaklanmaktadır.

7.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında fotovoltaik Güneş enerjisi santrallerinde teknik, ekonomik ve çevresel açıdan optimizasyon yapılabilecek bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Bu bağlamda öncelikle bir matematiksel modelleme oluşturularak simülasyon yazılımı geliştirilmiş ve bu yazılım piyasada yaygın olarak kullanılan RetScreen simülasyon yazılımı kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulama aşamasında Gürsu Bursa bölgesinde kurulan 96 kW kapasiteli bir fotovoltaik Güneş enerjisi santrali seçilmiş ve her iki simülasyon yazılımına aynı girdiler verilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

7.1 Bulgular

Geliştirilen simülasyonun doğrulanması için yatay düzleme gelen saatlik ışınım değerleri ile saatlik sıcaklık değerleri RetScreen simülasyonu verileri ile aynı tutulması için oransal olarak eşitlenmiştir. Geliştirilen simülasyon programında optik verim hesabı, elektrik artış fiyatı, PV kurulumunun yapıldığı arsa maliyeti ve PV panel üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ salım miktarı hesaplamalara dahil edilmeden sonuçlar alınmış ve doğrulama yapılmıştır. Elektrik üretim değeri ve önlenebilir CO₂ salım miktarında -% 1,8, amortisman süresinde ise % 2,7 sapma tespit edilmiş olup, sapmaların düşük olması sebebiyle geliştirilen simülasyonun doğrulanması yapılmıştır. Doğrulanmış simülasyon yazılımında optimizasyon yapabilmek için duyarlılık analizleri ile etkin parametreler belirlenmiş ve bu parametrelere göre oluşturulan senaryoların optimizasyonu simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Etkin parametrelerin tespiti için yapılan, PV hücre verimi, eğim açısı, yakıt maliyeti ve yatırım maliyeti duyarlılık analizleri için uygulama alanları belirlenerek yapılan duyarlılık analizleri sonucunda özgül duyarlılık oranı değerlerinin PV panel verimi ve eğim açısı için en yüksek olduğu görülmüştür.

En etkin iki parametre olan PV hücre türü ve eğim açısının değişimine yönelik eğim açısı değişimi senaryosu ve farklı çeşit PV hücre tipi kullanılması senaryoları yapılmıştır. Bu senaryolarda Gürsu Bursa Güneş enerjisi santralindeki elektrik üretiminin talebe eşit olması ve talebin üzerinde olması halinde, devlet tarafından CO₂ teşviği verilmesi ve verilmemesi durumları incelenmiştir.

Tüketim talebine eşit miktarda üretim olması halinde eğim açıları, enlem açısının 10° üzeri ve 20° altındaki değerler için alınmış, devlet tarafından Karbon teşviği verilmesi ve verilmemesi durumlarında amortisman süreleri incelenmiştir. En kısa amortisman süresi, devletin sağladığı Karbon teşviği kazancı ile 25° eğim açısında tespit edilmiştir.

Elektrik tüketim talebinin üzerinde elektrik üretimi yapılması halinde, 8 farklı elektrik üretim değeri için, eğim açıları, enlem açısının 10° üzeri ve 20° altındaki değerler için alınmış, amortisman süreleri incelenmiştir. Elektrik tüketim talebinin üzerinde elektrik üretimi durumunda, santralin elektrik üretimi kapasitesi arttıkça, amortisman süresinin yavaşlayarak azaldığı gözlemlenmiştir. En kısa amortisman süresinin tespit edildiği 25° eğim açısında tüketim talebinin % 80 üzerinde elektrik üretimi yapan Güneş enerjisi santrali kurulumu yapılması tespit edilmiştir.

Gürsu Bursa GES için farklı çeşit PV hücre tipi kullanılması senaryosunda optimum eğim açısı olarak tespit edilen 25° eğim açısı sabit alınmıştır. Mevcut santral için incelenen polikristalin, ince film ve monokristalin fotovoltaik hücre tipleri bu senaryo için incelenmiştir. İnce Film PV hücre fiyatı polikristalin PV hücrelerden daha yüksek PV hücre verimi de polikristalin PV hücrelerden daha düşük olduğundan dolayı elektrik üretim değerinin düşmesi, yatırım maliyetlerinin artması amortisman süresini oldukça uzatmıştır. Monokristalin PV panel kullanımı durumunda, PV hücre verimi polikristalin PV hücre tipine göre daha yüksek olsa da arsa bedeli ve fotovoltaik panel bedeli arttığından dolayı amortisman süresi artmıştır. Talebin üzerindeki elektrik üretimindeki artışın, farklı PV hücre tipleri için amortisman süresinin kısalma hızını yavaşlattığı görülmekte olup, tüketim talebinin üzerindeki elektrik üretiminin % 80 artma noktasında, amortisman süresi düşüşünün yavaşlamakta olduğu görülmüştür. Bu senaryoda Gürsu Bursa GES için Polikristalin PV panel kullanımı ve tüketim talebinin % 80 üzerinde elektrik üretimi kapasitesinde kurulum yapılması gerektiği tespit edilmiştir.

Mevcut santral için Karbon teşviğinin amortisman süresine etkisi incelenmiş, Karbon teşviğinin hesaba katılması ile amortisman süresi Polikristalin PV'lerin 25° eğim açısında yerleştirilerek tüketim talebinin üzerindeki elektrik üretiminin % 80 artma noktasında en kısa olduğu görülmüştür.

Gürsu Bursa GES için en iyi senaryonun Karbon teşviği ve yerli malı PV kullanım teşviğinin hesaba katılması ile Polikristalin PV'lerin 25° eğim açısında yerleştirilerek, tüketim talebinden % 80 fazla oranda elektrik üretimi yapması durumu en iyi senaryo olarak tespit edilmiştir.

En iyi senaryo için, geliştirilen simülasyon ve RetScreen simülasyonu çıktıları karşılaştırılmış, mevcut durumda 10,4 yıl olarak bulunan amortisman süresi geliştirilen simülasyonda 6,7 yıl, RetScreen simülasyon yazılımında 5,9 yıl olarak bulunmuştur. İki simülasyon arasındaki bu fark, saatlik Güneş Radyasyonu ve saatlik sıcaklık ölçüm verileri için baz alınan yılların farklı olmasından dolayı, saatlik ışınım ve sıcaklık verileri farklılığından, RetScreen simülasyon programının panel verimi hesaplaması eksikliği, PV üretiminde ortaya çıkan CO₂ salım miktarının hesaplanmaması, yıllık elektrik satış fiyatı artışının ve PV Güneş enerjisi santralının kurulduğu arsanın maliyetinin hesaba katılmamasından kaynaklanmaktadır.

Geliştirilen simülasyon programının istenilen her parametre için duyarlılık analizleri yapmasından dolayı esnek olduğunu, çevresel açıdan PV üretiminde ortaya çıkan CO₂ salım miktarının hesaplaması, yıllık elektrik satış fiyatı artışının ve PV Güneş enerjisi santralının kurulduğu arsanın maliyetini hesaplaması daha ayrıntılı sonuçlar verdiğini ve ışınım hesaplamalarında baz alınan yılların daha günümüze yakın olması daha güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Yapılan duyarlılık analizleri ve senaryolar sonucunda, Geliştirilen simülasyon programının RetScreen simülasyon programına göre daha esnek olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak bu tez kapsamında örnek proje olarak seçilen Gürsu Bursa Güneş enerjisi santrali için yapılan simülasyon sonucunda yapılan duyarlılık analizlerinde, en etkin iki değer PV hücre tipi ve eğim açısının değişimine yönelik olduğu ortaya çıkmış ve bu parametrelere yönelik yapılan senaryolarda optimum panel eğim açısının, 25° olduğu belirlenmiş, en verimli PV panel tipinin Polikristalin PV olduğu tespit edilmiştir. Optimum amortisman süresi için tüketim talebinin % 80 fazlasında elektrik üretimi yapılacak bir santral kurulması gerektiği tespit edilmiştir. Monokristalin fotovoltaiik hücreler Karbon salımını en fazla önleyen PV hücre tipi olup, Karbon ticareti sayesinde santrale sağlanan kazancın amortisman süresini azalttığı belirlenmiştir.

Gürsu Bursa GES için Polikristalin PV'ler 25° eğim açısıyla yerleştirilerek, tüketim talebinin % 80 üzerinde elektrik üretimi yapılarak, devletin yerli malı PV modül kullanım teşviği vermesi durumunda ve Karbon ticaretinin hesaba katılması ile, teknoekonomik ve çevresel açıdan en iyi sonuç elde edilmiştir.

7.2 Öneriler

İleride yapılacak çalışmalarda Güneş enerjisi santrallerinin optimum tasarımı ve işletme koşullarının belirlenmesine yönelik geliştirilen simülasyon programı ile sistemin teknoekonomik ve çevresel optimizasyonu yatırımcılar ve mühendisler için hem zaman tasarrufu yapılabilecek hem de geniş boyutlu bir sistem analizi yapmak açısından oldukça faydalı olacak bir araç geliştirilmiştir. Sonuçların daha iyileştirilmesi için kablo kayıpları, toz kayıpları ve invertör kayıpları da hesaba katılmalıdır. Bursa ilinin ortalama rüzgar hızının, hücrenin normal çalışma şartlarındaki rüzgar hızı değerine yakın olmasından dolayı, PV verim hesabına katılmayan rüzgar etkisi, daha hassas bir şekilde incelenerek verim kayıplarına eklenmelidir. Çevresel açıdan yapılan analizde, eğimli bir şekilde toprağa yerleştirilen PV panellerin toprakta yaşayan canlılar için oluşturduğu etki ve toprağın gün ışığından yararlanamama süresi için çevrede oluşturan zararın geniş bir şekilde araştırılması, çevreye karşı daha duyarlı bir sistem yaratacaktır.

Polikristalin panelin yapılan araştırmalar sonucunda hem maliyet hem de kullanım açısından avantajlı bir panel olduğu kanıtlanmış olsa da, piyasada bulunan daha fazla panel çeşidi için yapılacak analizlerin senaryolar kısmına eklenmesinin çalışmanın güvenilirliğini artıracığı düşünülmektedir. Diğer yandan Karbon ticareti sayesinde elde edilecek kazançlar düşünüldüğünde ülkemizin Karbon ticareti borsasına girmesinin yenilenebilir enerji kullanımını artıracığı düşünülmektedir.

Duyarlılık analizleri sonucunda ortaya çıkan, özgül duyarlılık oranı en yüksek çıkan PV panel verimi değişkeni, günümüzde kullanılan PV hücrelerin AR-GE çalışmalarına ayrılan maddi desteğin artırılması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda Güneş enerjisi ve yenilenebilir enerjiye olan yatırımların artması, çevreye daha duyarlı sistemlerin geliştirilmesi için paneller daha verimli ve ucuz PV hücrelerin geliştirilmesi gerektiği değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] ALTIN, V., Güneş Enerjisinden Yararlanılarak Elektrik Üretimi, Mimar ve Mühendis Dergisi, s.28-31, 2014.
- [2] AKBULUT, U., DOĞAN B., ve KINCAY, O., RetScreen Programı Kullanılarak Türkiye şartlarına Uygun RES Projelerinin Ekonomik Analizi, TTMD Dergisi no. 59, s.27-32, 2009.
- [3] LALWANI, M., KOTHARI, D.P., SINGH M., Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares, International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul, vol.1, no.3, 2010.
- [4] SİVRİOĞLU, M., YURDAKUL, M., AYDOĞAN, A., İÇ, Y.T., Büyük Ticari Yapılarda Kurulacak Kojenerasyon Sistemlerinin Ekonomik Açından Alternatif Sistemlerle Karşılaştırılması Cankaya University Journal of Science and Engineering, no.8, s.1, 2010.
- [5] CANAN, F., Mimaride Fotovoltaik Panel Uygulamaları, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Ekim 2003, Kayseri, Bildiriler Kitabı, no.330, s. 43-52, 2003
- [6] JORDAN, L., The inter-relationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. s. 1–19, 1960
- [7] ORGILL J.F., HOLLANDS K.G.T., Correlation Equation For Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface, Solar Energy, s. 19, 1977.
- [8] KACIRA, M., ŞİMŞEK, M., BABÜR, Y., DEMİRKOL, S., Determining Optimum Tilt Angles and Orientations of Photovoltaic Panels in Sanliurfa, Turkey, Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Şanlıurfa, 2003.
- [9] DENİZ, E., Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar, Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, İzmir, 2013.
- [10] ASLANOĞLU S., KÖKSAL M., Elektrik Üretimine Bağlı Karbondioksit Emisyonunun Bölgesel Olarak Belirlenmesi ve Uzun Dönem Tahmini, Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi vol.1, s.19-29, 2012.

- [11] VARINCA K., VARANK G. Güneş Kaynaklı Farklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Kıyaslanması ve Çözüm Önerileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği, Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, 2005.
- [12] RetScreen Simülasyonu, Alınma tarihi: 18.02.2014,
<http://www.retscreen.net/ang/home.php>
- [13] Gürsu Bursa Belediyesi Web Sitesi, Alınma tarihi: 18.02.2014,
http://www.gursu.bel.tr/haber.asp?haber_id=133850.
- [14] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü Web Sitesi, Alınma tarihi: 23.10.2014,
<http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>.
- [15] Meteoroloji Genel Müdürlüğü Bursa ili 1993-2013 Yılları Arası Veriler.
- [16] Canadian Solar, Alınma tarihi; 23.10.2014,
<http://www.solarelectricsupply.com/canadian-solar-cs6p-240-solar-panels-109>.
- [17] KILKIŞ, Ş., Başkent Üniversitesi, Enerji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, ENE 524 Ders Notları, 2013.
- [18] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, Alınma tarihi: 11.10.2014,
<http://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.5346.pdf>.
- [19] Kutlu Enerji Güneş Enerjisi Sistemleri Bilgilendirme Sayfası, Alınma tarihi: 23.10.2014, <http://www.solarvizyon.com/sss.html>.
- [20] İnce Film Fotovoltaik Panel Satışı e-Ticaret Sitesi, Alınma tarihi: 01.11.2014,
http://www.alibaba.com/product-detail/Bluesun-100w-poly-transparent-thin-film_1588435375.html?s=p.

EKLER LİSTESİ

Ek 1 Simülasyon Yazılımı Girdileri

EK 1.1 Geliştirilen Simülasyon Programı Santral Girdileri

Ek 1.2 Geliştirilen Simülasyon Programı PV Hücre Girdileri

Ek 2 Simülasyon Yazılımı Ara Çıktıları

Ek 2.1 Geliştirilen Simülasyon Programında Ortalama Yatay Işınım Değerleri (I_s)

Ek 2.2 Geliştirilen Simülasyon Programında Atmosfer Dışı Yatay Düzleme Gelen Saatlik Güneş Işınımı ($I_{o,s}$) (kWh/m^2) Değerleri

Ek 2.3 Geliştirilen Simülasyon Programında Ortalama Direkt Işınım Dönüşüm Katsayısı (R_b) Değerleri

Ek 2.4 Geliştirilen Simülasyon Programında Ortalama Berraklık İndeksi Değerleri

Ek 2.5 Geliştirilen Simülasyon Programında Yatay Düzleme Gelen Toplam Difüz Güneş Işınımı ($I_{d,s}$) (kWh/m^2) Değerleri

Ek 2.6 Geliştirilen Simülasyon Programında Yatay Düzleme Gelen Toplam Direkt Güneş Işınımı ($I_{b,s}$) (kWh/m^2) Değerleri

Ek 2.7 Geliştirilen Simülasyon Programında Ortalama Zenit Açısı Değerleri

Ek 2.8 Geliştirilen Simülasyon Programında Ortalama Güneş Geliş Açısı Değerleri

Ek 2.9 Geliştirilen Simülasyon Programında Eğik Düzleme Gelen Toplam Difüz ($I_{de,s}$), Direkt ($I_{be,s}$), Yayılı ($I_{re,s}$) Işınım Değerleri

Ek 2.10 Geliştirilen Simülasyon Programında Eğik Düzleme Gelen Toplam Işınım Değerleri ($I_{TE,s}$) Ek 2.12 Geliştirilen Simülasyon Programı Ortalama PV Yüzey Sıcaklığı Değerleri (T_c), ($^{\circ}\text{C}$)

Ek 2.11 Geliştirilen Simülasyon Programı Ortalama Sıcaklık Değerleri (T_a), ($^{\circ}\text{C}$)

Ek 2.12 Geliştirilen Simülasyon Programı Ortalama PV Yüzey Sıcaklığı Değerleri

Ek 2.13 Geliştirilen Simülasyon Programında Ortalama PV Verimi Değerleri

Ek 3 Simülasyon Yazılımı Çıktıları

Ek 3.1 Geliştirilen Simülasyon Programı Polikristalin PV Elektrik Üretimi Ve Kazanç Çıktıları

Ek 3.2 Geliştirilen Simülasyon Programı İnce Film Ve Monokristalin PV Elektrik Üretimi Ve Kazanç Çıktıları

Ek 4 Simülasyon Yazılımı Açıklaması

Ek 5 Simülasyon Yazılımı CD'si

EK 1

Simülasyon Yazılımı Girdileri

EK 1.1 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI SANTRAL GİRDİLERİ

Toplam Kurulu Güç (kW)	Toplam Kurulum Maliyeti (\$)	İlk Kurulum Maliyeti (\$)	Toplam Elektrik Tüketimi (kWh)	Elektrik Toptan Satış Fiyatı (\$/kWh)	Dolar Kuru	LEÜY Kazanç (\$/kWh)
96	191.436	97.514	185.000	0,188	1,81	0,133
TEP Çevrim Katsayısı (ton/ kW)	Yerli Malı Kazancı (\$/kWh)	Elektrik Toptan Satış Fiyatı artış Oranı	PV Üretim CO ₂ salım faktörü	Gürsu Bölgesinde Arsa Bedeli (\$/m ²)	Karbon azaltma teşviği (\$/ton)	CO2 Emisyon faktörü (kg/kWh)
0,000086	0,013	10%	3,301	55,249	12	0,201

EK 1.2 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI PV HÜCRE GİRDİLERİ

Polikristalin toplam Kollektör Alanı (m ²)	Polikristalin adet fiyatı (\$)	Polikristalin panel Kullanım Adeti	Polikristalin Toplam Fotovoltaik fiyatı (\$)	Polikristalin Boyutu (m)=1,638*0,982	1kW İÇİN Polikristalin için gerekli alan(m ²)= 8 Toplam Alan	Polikristalin PV için arsa bedeli (\$)	Toplam Maliyet(Polikristalin)
644	234,8066298	400	93.923	1,608516	768	42.431	233.868
İnce Film Bakır Şerit Fotovoltaik Alanı (m ²)	İnce Film Bakır Şerit Fotovoltaik Adeti (100 wattlık)	ince film \$/W =0,9	ince film Fotovoltaik Toplam Maliyet (\$)	ince film boyutu (m)= 1,2*0,78	1kW İÇİN ince film için için gerekli alan(m ²)=13 Toplam Alan	İnce Film PV için arsa bedeli (\$)	Toplam Maliyet (İnce Film)
829,44	960	900	86.400	0,864	1.248	68.950	252.864
Monokristalin toplam Kollektör Alanı (m ²)	Monokristalin adet fiyatı (\$)	Monokristalin panel Kullanım Adeti	Monokristalin Toplam Fotovoltaik fiyatı (\$)	Monokristalin Boyutu (m)=1,640*0,992	1kW İÇİN Monokristalin için gerekli alan(m ²)= 9 Toplam Alan	Monokristalin PV için arsa bedeli (\$)	Toplam Maliyet(Monokristalin)
624,72192	262,5	384	100.800,00	1,63	864	47.734,81	246.048,81

EK 2

Simülasyon Yazılımı Ara Çıktıları

EK 2.1 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ORTALAMA YATAY IŞINIM DEĞERLERİ (I_s) (kWh /m²)

Saat/Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
5-6	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
6-7	0,00	0,01	0,08	0,26	0,51	0,68	0,56	0,33	0,17	0,07	0,02	0,00
7-8	0,01	0,11	0,32	0,70	1,07	1,27	1,22	0,93	0,57	0,28	0,13	0,05
8-9	0,06	0,38	0,73	1,31	1,65	1,79	1,66	1,33	0,88	0,68	0,39	0,21
9-10	0,14	0,72	1,18	1,58	1,99	2,19	2,19	1,94	1,61	1,10	0,78	0,51
10-11	0,23	1,12	1,54	1,90	2,22	2,43	2,49	2,34	2,00	1,48	1,10	0,80
11-12	0,28	1,31	1,68	2,00	2,36	2,59	2,63	2,49	2,08	1,52	1,16	0,87
12-13	0,29	1,31	1,68	1,98	2,38	2,60	2,65	2,47	2,07	1,52	1,14	0,89
13-14	0,25	1,16	1,54	1,84	2,21	2,44	2,54	2,33	1,90	1,32	0,92	0,72
14-15	0,19	0,92	1,32	1,59	1,95	2,18	2,28	2,06	1,61	1,01	0,65	0,49
15-16	0,11	0,61	0,97	1,21	1,56	1,75	1,85	1,65	1,20	0,63	0,32	0,24
16-17	0,03	0,28	0,56	0,77	1,10	1,33	1,38	1,10	0,67	0,24	0,08	0,05
17-18	0,00	0,05	0,18	0,35	0,60	0,80	0,83	0,57	0,22	0,03	0,01	0,01
18-19	0,00	0,01	0,02	0,06	0,18	0,31	0,31	0,14	0,03	0,01	0,00	0,00
19-20	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Aylık Toplam	49,664	60,00	86,00	118,94	155,43	176,31	186,44	176,11	140,66	96,61	65,64	44,55

EK 2.2 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ATMOSFER DIŞI YATAY DÜZLEME GELEN SAATLİK GÜNEŞ IŞINIMI ($I_{o,s}$) (kWh /m²) DEĞERLERİ

$$I_{o,s} = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360\pi}{365} \right) \times [\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) +$$

$$\frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta]$$

86

w2	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	120	
w1	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105	
sinw2- sinw1	-0,03	0,03	0,10	0,16	0,21	0,24	0,26	0,26	0,24	0,21	0,16	0,10	0,03	-0,03	-0,10	
w2-w1	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	
Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Toplam(kWh/m²)
Ocak	-14,09	-5,97	1,87	8,90	14,64	18,71	20,81	20,81	18,71	14,64	8,90	1,87	-5,97	-14,09	-21,94	67,79
Şubat	-9,61	-2,04	5,28	11,83	17,19	20,97	22,93	22,93	20,97	17,19	11,83	5,28	-2,04	-9,61	-16,92	116,20
Mart	-5,40	3,08	11,27	18,62	24,61	28,85	31,05	31,05	28,85	24,61	18,62	11,27	3,08	-5,40	-13,59	210,61
Nisan	0,33	8,30	16,00	22,90	28,53	32,52	34,58	34,58	32,52	28,53	22,90	16,00	8,30	0,33	-7,37	278,95
Mayıs	4,71	12,50	20,03	26,77	32,28	36,18	38,20	38,20	36,18	32,28	26,77	20,03	12,50	4,71	-2,82	338,53
Haziran	6,41	13,68	20,70	26,99	32,13	35,77	37,65	37,65	35,77	32,13	26,99	20,70	13,68	6,41	-0,61	346,04
Temmuz	5,72	13,33	20,69	27,28	32,66	36,47	38,44	38,44	36,47	32,66	27,28	20,69	13,33	5,72	-1,63	347,54
Ağustos	2,13	10,13	17,86	24,79	30,45	34,45	36,52	36,52	34,45	30,45	24,79	17,86	10,13	2,13	-5,60	307,06
Eylül	-3,13	4,94	12,73	19,72	25,42	29,45	31,54	31,54	29,45	25,42	19,72	12,73	4,94	-3,13	-10,92	230,42
Ekim	-8,90	-0,54	7,54	14,78	20,69	24,87	27,03	27,03	24,87	20,69	14,78	7,54	-0,54	-8,90	-16,97	154,00
Kasım	-12,78	-4,89	2,72	9,55	15,12	19,06	21,10	21,10	19,06	15,12	9,55	2,72	-4,89	-12,78	-20,39	79,39
Aralık	-15,06	-7,06	0,66	7,58	13,24	17,24	19,31	19,31	17,24	13,24	7,58	0,66	-7,06	-15,06	-22,79	49,02

EK 2.3 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ORTALAMA DİREKT İŞINIM DÖNÜŞÜM KATSAYISI (R_b) DEĞERLERİ

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Ortalama
Ocak	0,79	0,41	-4,42	2,87	1,99	1,77	1,69	1,67	1,69	1,77	1,99	2,87	-4,42	0,41	0,79	0,79
Şubat	0,89	0,41	9,87	1,86	1,61	1,53	1,49	1,48	1,49	1,53	1,61	1,86	9,87	0,41	0,89	2,45
Mart	1,19	0,33	1,46	1,34	1,31	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,31	1,34	1,46	0,33	1,19	1,18
Nisan	2,75	0,41	0,97	1,08	1,12	1,14	1,15	1,16	1,15	1,14	1,12	1,08	0,97	0,41	2,75	1,23
Mayıs	3,16	0,41	0,81	0,95	1,02	1,05	1,07	1,07	1,07	1,05	1,02	0,95	0,81	0,41	3,16	1,20
Haziran	-1,80	0,41	0,76	0,90	0,97	1,01	1,03	1,04	1,03	1,01	0,97	0,90	0,76	0,41	-1,80	0,51
Temmuz	-3,70	0,41	0,79	0,93	0,99	1,03	1,05	1,05	1,05	1,03	0,99	0,93	0,79	0,41	-3,70	0,27
Ağustos	-1,85	0,41	0,89	1,02	1,08	1,10	1,12	1,12	1,12	1,10	1,08	1,02	0,89	0,41	-1,85	0,58
Eylül	1,43	0,41	1,20	1,22	1,23	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,23	1,22	1,20	0,41	1,43	1,14
Ekim	0,96	0,41	2,99	1,64	1,50	1,44	1,42	1,41	1,42	1,44	1,50	1,64	2,99	0,41	0,96	1,48
Kasım	0,81	0,41	-7,53	2,52	1,88	1,70	1,64	1,62	1,64	1,70	1,88	2,52	-7,53	0,41	0,81	0,30
Aralık	0,76	0,41	-1,79	3,48	2,15	1,87	1,77	1,75	1,77	1,87	2,15	3,48	-1,79	0,41	0,76	1,27

EK 2.4 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ORTALAMA BERRAKLIK İNDEKSİ DEĞERLERİ (k_t)

$$k_t = \frac{I_s}{I_{0,s}}$$

88

Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Ortalama
Ocak	0,00	-0,01	0,22	0,21	0,30	0,39	0,42	0,43	0,41	0,39	0,36	0,54	-0,02	0,00	0,00	0,24
Şubat	-0,01	0,01	0,16	0,25	0,33	0,42	0,44	0,45	0,43	0,42	0,41	0,43	-0,12	-0,01	0,00	0,24
Mart	-0,02	0,25	0,24	0,34	0,41	0,46	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,43	0,78	-0,04	0,00	0,34
Nisan	-0,06	0,26	0,36	0,48	0,46	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,44	0,40	0,35	-0,06	-0,01	0,33
Mayıs	0,26	0,35	0,46	0,53	0,53	0,53	0,53	0,54	0,53	0,52	0,50	0,47	0,42	0,33	-0,07	0,43
Haziran	0,27	0,41	0,51	0,55	0,57	0,57	0,57	0,58	0,57	0,57	0,54	0,54	0,49	0,40	-0,63	0,43
Temmuz	0,21	0,36	0,51	0,52	0,58	0,59	0,59	0,59	0,60	0,60	0,59	0,57	0,54	0,46	-0,28	0,47
Ağustos	0,42	0,28	0,45	0,46	0,55	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,57	0,53	0,48	0,86	-0,02	0,50
Eylül	-0,12	0,29	0,37	0,37	0,53	0,57	0,55	0,55	0,54	0,53	0,50	0,44	0,35	-0,16	0,00	0,35
Ekim	-0,01	-0,18	0,32	0,39	0,46	0,51	0,48	0,48	0,45	0,42	0,36	0,26	-0,10	-0,01	0,00	0,26
Kasım	0,00	-0,03	0,41	0,33	0,43	0,48	0,46	0,45	0,40	0,36	0,28	0,24	-0,02	0,00	0,00	0,25
Aralık	0,00	0,00	0,63	0,24	0,33	0,40	0,39	0,40	0,36	0,32	0,27	0,68	-0,01	0,00	0,00	0,27

EK 2.5 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA YATAY DÜZLEME GELEN TOPLAM DİFÜZ GÜNEŞ İŞİNİMİ ($I_{d,s}$)

(kWh /m²) DEĞERLERİ

$$I_{d,s} = I_s \times \begin{cases} 1 - 0,249k_t, & k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t, & 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177, & k_t > 0,75 \end{cases}$$

Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Toplam(kWh/m ²)
Ocak	0,065	0,067	0,353	1,760	4,056	6,055	6,883	6,854	6,110	4,723	2,782	0,576	0,125	0,051	0,051	40,510
Şubat	0,054	0,094	0,826	2,790	5,111	6,969	7,604	7,603	6,970	5,682	3,874	1,710	0,495	0,051	0,048	49,881
Mart	0,072	0,603	2,612	5,651	8,190	9,595	10,311	10,325	9,526	8,135	6,176	3,748	0,975	0,176	0,051	76,145
Nisan	0,359	2,016	5,067	7,561	9,429	10,621	11,361	11,337	10,643	9,476	7,605	5,246	2,596	0,442	0,048	93,806
Mayıs	1,152	3,871	6,670	8,434	10,216	11,491	12,060	12,023	11,464	10,343	8,724	6,628	4,163	1,422	0,155	108,817
Haziran	1,621	4,595	6,690	8,286	9,625	10,741	11,191	11,126	10,637	9,614	8,381	6,462	4,462	2,112	0,398	105,942
Temmuz	1,157	4,266	6,718	8,712	9,635	10,545	11,092	10,984	10,294	9,154	7,922	6,147	4,175	1,908	0,341	103,050
Ağustos	0,507	2,666	5,991	8,266	9,432	10,006	10,593	10,701	10,041	8,890	7,382	5,669	3,337	0,731	0,089	94,303
Eylül	0,186	1,287	4,114	6,351	8,053	8,842	9,675	9,755	9,190	8,020	6,324	4,197	1,559	0,236	0,037	77,825
Ekim	0,070	0,469	2,212	4,838	6,886	7,991	8,834	8,901	8,275	6,814	4,665	1,919	0,264	0,050	0,044	62,233
Kasım	0,054	0,139	0,891	2,883	5,021	6,265	6,990	7,038	6,343	4,795	2,459	0,584	0,082	0,040	0,038	43,623
Aralık	0,030	0,013	0,178	1,720	3,969	5,651	6,217	6,313	5,460	3,904	1,892	0,164	0,047	0,035	0,036	35,630

EK 2.6 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA YATAY DÜZLEME GELEN TOPLAM DİREKT GÜNEŞ IŞINIMI ($I_{b,s}$) (kWh /m²) DEĞERLERİ

$$I_{b,s} = I_s - I_{d,s}$$

8

Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	Toplam(kWh/m ²)
Ocak	0,00	0,00	0,02	0,10	0,33	1,24	1,95	2,12	1,60	0,95	0,45	0,39	0,00	0,00	0,00	9,15
Şubat	0,00	0,00	0,04	0,19	0,50	1,77	2,57	2,60	2,08	1,45	0,90	0,49	0,08	0,00	0,00	12,67
Mart	0,00	0,05	0,18	0,68	2,02	3,71	4,14	4,15	3,75	3,27	2,20	1,07	0,54	0,00	0,00	25,77
Nisan	0,04	0,14	0,80	3,36	3,78	5,26	5,36	5,21	4,71	3,79	2,51	1,15	0,35	0,06	0,00	36,54
Mayıs	0,08	0,51	2,53	5,83	6,94	7,68	8,34	8,48	7,56	6,49	4,70	2,82	1,05	0,15	0,00	63,15
Haziran	0,13	1,07	3,87	6,67	8,66	9,56	10,45	10,56	9,73	8,58	6,26	4,65	2,23	0,48	0,06	82,95
Temmuz	0,07	0,57	3,78	5,59	9,27	10,91	11,56	11,85	11,61	10,54	8,05	5,71	3,02	0,75	0,03	93,33
Ağustos	0,07	0,21	2,00	3,24	7,30	10,20	10,88	10,56	10,06	8,92	6,85	3,80	1,58	0,44	0,00	76,09
Eylül	0,01	0,11	0,60	0,98	5,36	7,83	7,68	7,49	6,70	5,39	3,66	1,43	0,24	0,02	0,00	47,52
Ekim	0,00	0,09	0,22	1,02	2,60	4,75	4,30	4,20	3,07	1,90	0,74	0,15	0,03	0,00	0,00	23,09
Kasım	0,00	0,00	0,19	0,36	1,53	2,93	2,71	2,48	1,34	0,65	0,19	0,05	0,00	0,00	0,00	12,41
Aralık	0,00	0,00	0,22	0,11	0,42	1,21	1,31	1,40	0,78	0,35	0,14	0,25	0,00	0,00	0,00	6,18

EK 2.7 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ORTALAMA ZENİT AÇISI DEĞERLERİ ($\cos \theta_z$)

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	Ortalama
Ocak	-0,414	-0,230	-0,045	0,127	0,275	0,389	0,460	0,484	0,460	0,389	0,275	0,127	-0,045	-0,230	0,145
Şubat	-0,341	-0,149	0,044	0,223	0,377	0,495	0,569	0,594	0,569	0,495	0,377	0,223	0,044	-0,149	0,241
Mart	-0,224	-0,027	0,170	0,354	0,512	0,633	0,709	0,735	0,709	0,633	0,512	0,354	0,170	-0,027	0,372
Nisan	-0,088	0,106	0,301	0,482	0,638	0,758	0,833	0,859	0,833	0,758	0,638	0,482	0,301	0,106	0,501
Mayıs	0,021	0,208	0,395	0,569	0,719	0,834	0,906	0,931	0,906	0,834	0,719	0,569	0,395	0,208	0,587
Haziran	0,071	0,253	0,435	0,604	0,750	0,862	0,932	0,956	0,932	0,862	0,750	0,604	0,435	0,253	0,621
Temmuz	0,048	0,232	0,417	0,588	0,736	0,849	0,920	0,945	0,920	0,849	0,736	0,588	0,417	0,232	0,606
Ağustos	-0,044	0,148	0,340	0,519	0,673	0,791	0,865	0,891	0,865	0,791	0,673	0,519	0,340	0,148	0,537
Eylül	-0,175	0,022	0,220	0,403	0,561	0,682	0,759	0,785	0,759	0,682	0,561	0,403	0,220	0,022	0,422
Ekim	-0,305	-0,110	0,084	0,266	0,421	0,541	0,616	0,641	0,616	0,541	0,421	0,266	0,084	-0,110	0,284
Kasım	-0,397	-0,210	-0,024	0,150	0,300	0,415	0,487	0,511	0,487	0,415	0,300	0,150	-0,024	-0,210	0,168
Aralık	-0,435	-0,253	-0,071	0,098	0,244	0,356	0,426	0,450	0,426	0,356	0,244	0,098	-0,071	-0,253	0,115

EK 2.8 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ORTALAMA GÜNEŞ GELİŞ AÇISI DEĞERLERİ ($\cos \theta$)

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega$$

36

w1	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	105
Enlem	40,18														
Eğim	30														
Saat/Ay	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	Ortalama
Ocak	-0,326	-0,093	0,140	0,358	0,544	0,688	0,778	0,808	0,778	0,688	0,544	0,358	0,140	-0,093	0,379
Şubat	-0,303	-0,060	0,183	0,409	0,603	0,752	0,846	0,878	0,846	0,752	0,603	0,409	0,183	-0,060	0,431
Mart	-0,260	-0,011	0,238	0,470	0,670	0,823	0,919	0,952	0,919	0,823	0,670	0,470	0,238	-0,011	0,493
Nisan	-0,203	0,043	0,289	0,518	0,715	0,866	0,961	0,994	0,961	0,866	0,715	0,518	0,289	0,043	0,541
Mayıs	-0,152	0,084	0,321	0,541	0,730	0,875	0,966	0,997	0,966	0,875	0,730	0,541	0,321	0,084	0,563
Haziran	-0,127	0,103	0,332	0,547	0,730	0,872	0,960	0,990	0,960	0,872	0,730	0,547	0,332	0,103	0,568
Temmuz	-0,139	0,094	0,327	0,544	0,731	0,874	0,964	0,994	0,964	0,874	0,731	0,544	0,327	0,094	0,566
Ağustos	-0,183	0,060	0,303	0,529	0,723	0,872	0,966	0,998	0,966	0,872	0,723	0,529	0,303	0,060	0,552
Eylül	-0,240	0,009	0,258	0,490	0,690	0,843	0,939	0,972	0,939	0,843	0,690	0,490	0,258	0,009	0,514
Ekim	-0,290	-0,045	0,201	0,430	0,627	0,777	0,872	0,905	0,872	0,777	0,627	0,430	0,201	-0,045	0,453
Kasım	-0,321	-0,085	0,151	0,370	0,559	0,704	0,795	0,826	0,795	0,704	0,559	0,370	0,151	-0,085	0,392
Aralık	-0,332	-0,103	0,127	0,341	0,525	0,666	0,755	0,785	0,755	0,666	0,525	0,341	0,127	-0,103	0,363

EK 2.9 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA EĞİK DÜZLEME GELEN TOPLAM DİFÜZ ($I_{de,s}$), DİREKT ($I_{be,s}$), YAYILI ($I_{re,s}$) İŞİNİM DEĞERLERİ

$$I_{de,s} = \frac{1}{2} I_{d,s} (1 + \cos\beta)$$

$$I_{be,s} = I_{b,s} R_D$$

$$I_{re,s} = \frac{1}{2} \rho I_s (1 - \cos\beta)$$

Aylar	Aylık Toplam Difüz Güneş Işınım Değeri (kWh/m ²)
Ocak	38,61
Şubat	47,54
Mart	72,58
Nisan	89,41
Mayıs	103,72
Haziran	100,98
Temmuz	98,22
Ağustos	89,88
Eylül	74,18
Ekim	59,32
Kasım	41,58
Aralık	33,96
Toplam	849,99

Aylar	Aylık Toplam Direkt Güneş Işınım Değeri (kWh/m ²)
Ocak	16,19
Şubat	19,54
Mart	33,61
Nisan	41,05
Mayıs	64,11
Haziran	79,97
Temmuz	92,21
Ağustos	82,01
Eylül	58,06
Ekim	33,25
Kasım	19,49
Aralık	11,14
Toplam	550,62

Aylar	Aylık Toplam Yayılı Güneş Işınım Değeri (kWh/m ²)
Ocak	0,465
Şubat	0,585
Mart	0,955
Nisan	1,221
Mayıs	1,611
Haziran	1,769
Temmuz	1,839
Ağustos	1,596
Eylül	1,174
Ekim	0,799
Kasım	0,525
Aralık	0,392
Toplam	12,932

EK 2.10 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA EĞİK DÜZLEME GELEN TOPLAM IŞINIM DEĞERLERİ ($I_{TE,S}$)

$$I_{TE,S} = I_{be,S} + I_{de,S} + I_{re,S}$$

	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	TOPLAM
Ocak	0,06	0,06	0,25	1,97	4,56	8,02	9,93	10,15	8,59	6,22	3,56	1,65	0,13	0,05	0,05	55
Şubat	0,05	0,09	1,22	3,04	5,73	9,44	11,20	11,20	9,85	7,71	5,21	2,58	0,27	0,05	0,05	68
Mart	0,07	0,60	2,76	6,32	10,52	14,09	15,32	15,35	14,07	12,11	8,85	5,06	1,79	0,17	0,05	107
Nisan	0,49	2,00	5,64	10,90	13,33	16,27	17,16	16,97	15,70	13,48	10,14	6,29	2,83	0,45	0,05	132
Mayıs	1,17	3,94	8,48	13,71	16,94	19,19	20,57	20,73	19,16	16,82	13,21	9,07	4,86	1,43	0,16	169
Haziran	1,32	4,87	9,44	14,07	17,78	20,10	21,63	21,75	20,35	18,01	14,22	10,46	6,02	2,23	0,48	183
Temmuz	0,91	4,34	9,47	13,60	18,56	21,49	22,89	23,16	22,17	19,76	15,70	11,25	6,42	2,15	0,39	192
Ağustos	0,40	2,65	7,56	11,27	16,98	20,99	22,46	22,25	20,99	18,47	14,52	9,34	4,61	0,89	0,12	173
Eylül	0,16	1,28	4,66	7,30	14,36	18,22	18,85	18,71	17,16	14,37	10,56	5,75	1,77	0,22	0,04	133
Ekim	0,07	0,49	2,79	6,29	10,51	14,53	14,60	14,50	12,30	9,26	5,57	2,09	0,30	0,05	0,04	93
Kasım	0,05	0,13	-0,34	3,62	7,65	11,00	11,16	10,78	8,28	5,71	2,72	0,68	0,08	0,04	0,04	62
Aralık	0,03	0,01	-0,21	2,05	4,72	7,71	8,31	8,53	6,64	4,41	2,12	1,05	0,05	0,03	0,03	45

EK 2.11 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI ORTALAMA SICAKLIK DEĞERLERİ (T_a), (°C)

Ay/Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ortalama
05:00	3,41	3,60	5,20	8,59	13,52	17,73	20,05	19,58	15,34	11,52	7,27	5,22	10,92
06:00	3,41	3,54	5,43	9,86	15,31	19,70	22,00	21,24	16,40	11,74	7,20	5,17	11,75
07:00	3,62	4,10	6,82	11,73	17,18	21,62	23,97	23,39	18,57	13,46	8,09	5,44	13,16
08:00	4,56	5,32	8,41	13,40	18,94	23,29	25,75	25,36	20,71	15,44	9,85	6,48	14,79
09:00	5,73	6,55	9,81	14,82	20,35	24,75	27,30	27,00	22,45	17,26	11,53	7,71	16,27
10:00	6,89	7,74	11,04	15,99	21,57	26,03	28,63	28,49	24,02	18,70	12,94	8,75	17,57
11:00	7,68	8,60	11,92	16,74	22,41	26,98	29,59	29,63	25,07	19,76	13,91	9,49	18,48
12:00	8,28	9,28	12,48	17,25	22,98	27,56	30,27	30,37	25,93	20,48	14,59	10,02	19,12
13:00	8,69	9,71	12,81	17,60	23,23	27,84	30,71	30,75	26,31	20,83	14,97	10,31	19,48
14:00	8,60	9,68	12,74	17,51	23,17	27,78	30,68	30,70	26,15	20,61	14,79	10,22	19,39
15:00	8,22	9,40	12,48	17,15	22,82	27,48	30,33	30,25	25,60	19,95	13,96	9,65	18,94
16:00	7,30	8,61	11,80	16,45	22,22	26,88	29,67	29,47	24,64	18,62	12,52	8,64	18,07
17:00	6,52	7,63	10,66	15,40	21,16	25,98	28,64	28,19	23,02	17,20	11,47	7,97	16,99
18:00	5,97	6,95	9,55	13,95	19,64	24,59	27,15	26,48	21,47	16,16	10,74	7,45	15,84
19:00	5,54	6,46	8,88	13,05	18,34	23,01	25,62	25,23	20,51	15,38	10,14	7,11	14,94

EK 2.12 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI ORTALAMA PV YÜZEY SICAKLIĞI DEĞERLERİ (T_c), (°C)

$$T_c = T_a + (HNQS - 25^{\circ}\text{C}) \frac{I_{T.E.L}}{1000}$$

Saat/Ay	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	Ortalama
Ocak	3,41	3,41	3,62	4,56	5,73	6,90	7,69	8,29	8,70	8,60	8,23	7,30	6,52	5,97	5,54	6,30
Şubat	3,60	3,54	4,10	5,33	6,55	7,75	8,60	9,29	9,72	9,69	9,40	8,61	7,63	6,95	6,46	7,15
Mart	5,20	5,43	6,82	8,41	9,81	11,05	11,93	12,49	12,82	12,75	12,49	11,81	10,66	9,55	8,88	10,01
Nisan	8,59	9,86	11,74	13,41	14,83	16,00	16,76	17,26	17,61	17,52	17,16	16,46	15,41	13,95	13,05	14,64
Mayıs	13,52	15,31	17,18	18,95	20,36	21,58	22,42	23,00	23,24	23,18	22,83	22,23	21,17	19,64	18,34	20,20
Haziran	17,74	19,70	21,62	23,30	24,77	26,04	26,99	27,57	27,85	27,80	27,48	26,89	25,98	24,60	23,01	24,76
Temmuz	20,05	22,00	23,97	25,75	27,31	28,64	29,61	30,29	30,73	30,70	30,34	29,68	28,64	27,15	25,62	27,37
Ağustos	19,58	21,24	23,40	25,37	27,01	28,50	29,64	30,38	30,76	30,71	30,26	29,48	28,19	26,49	25,23	27,08
Eylül	15,34	16,40	18,57	20,71	22,46	24,03	25,09	25,95	26,32	26,16	25,61	24,65	23,02	21,48	20,51	22,42
Ekim	11,52	11,74	13,46	15,44	17,27	18,71	19,77	20,49	20,84	20,62	19,95	18,62	17,20	16,16	15,38	17,15
Kasım	7,27	7,20	8,09	9,86	11,53	12,94	13,92	14,60	14,97	14,79	13,96	12,52	11,47	10,74	10,14	11,60
Aralık	5,22	5,17	5,44	6,48	7,71	8,75	9,49	10,02	10,31	10,23	9,65	8,64	7,97	7,45	7,11	7,98

EK 2.13 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMINDA ORTALAMA PV VERİMİ DEĞERLERİ

$$\eta^* = \eta_o \times \eta_c$$

Ay	Ortalama
Ocak	0,04327
Şubat	0,04977
Mart	0,05679
Nisan	0,05271
Mayıs	0,06238
Haziran	0,05814
Temmuz	0,06581
Ağustos	0,07337
Eylül	0,05536
Ekim	0,03980
Kasım	0,03645
Aralık	0,04343

EK 3

Simülasyon Yazılımı Çıktıları

EK 3.1 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI POLİKİSTALİN PV ELEKTRİK ÜRETİMİ VE KAZANÇ ÇIKTILARI

Aylar	Aylık Toplam Eğik Düzleme gelen Güneş Işınım Değeri (kWh/m ²)	Aylık Üretim Polikristalin PV (kWh)	Aylık Kazanç (\$/ay) Polikristalin PV	Geri Ödeme süresinin 11 yılı aşmayacağı düşünüldüğünde %10 artış oranına göre hesaplanan kazanç (\$/ay)	Aylık Üretim İnce Film (kWh/ay)	Aylık Kazanç (\$/ay) İnce Film	Geri Ödeme süresinin 15 yılı aşmayacağı düşünüldüğünde %10 artış oranına göre hesaplanan kazanç (\$/ay)	Aylık Üretim Monokristalin (kWh/ay)	Aylık Kazanç (\$/ay) Monokristalin	Geri Ödeme süresinin 11 yılı aşmayacağı düşünüldüğünde %10 artış oranına göre hesaplanan kazanç (\$/ay)
Ocak	55,26	2.464,70	462,98	779,96	1.584,81	297,70	630,58	2.462	462,41	779,01
Şubat	67,67	3.075,13	577,65	973,14	1.874,94	352,20	746,01	3.008	565,10	951,99
Mart	107,14	4.373,15	821,48	1.383,90	2.702,10	507,58	1.075,13	4.943	928,57	1.564,32
Nisan	131,68	5.916,96	1.111,47	1.872,45	3.487,50	655,11	1.387,63	6.028	1.132,28	1.907,49
Mayıs	169,44	8.335,76	1.565,83	2.637,88	4.847,28	910,54	1.928,67	8.377	1.573,64	2.651,04
Haziran	182,72	9.376,57	1.761,35	2.967,25	5.560,59	1.044,53	2.212,49	9.522	1.788,58	3.013,13
Temmuz	192,27	10.377,16	1.949,30	3.283,89	6.244,67	1.173,03	2.484,68	10.503	1.972,99	3.323,80
Ağustos	173,49	9.609,64	1.805,13	3.041,01	6.204,99	1.165,58	2.468,89	9.696	1.821,36	3.068,35
Eylül	133,42	7.123,57	1.338,13	2.254,28	5.306,12	996,73	2.111,24	7.207	1.353,78	2.280,65
Ekim	93,37	4.402,64	827,02	1.393,23	3.391,55	637,09	1.349,45	4.593	862,83	1.453,56
Kasım	61,60	4.027,14	756,48	1.274,40	2.933,52	551,05	1.167,21	3.984	748,47	1.260,91
Aralık	45,49	2.015,59	378,62	637,84	1.376,04	258,48	547,51	1.894	355,86	599,49
Toplam	1.413,54	71.098,01	13.355,43	22.499,24	45.514,10	8.549,61	18.109,49	72.218	13.565,86	22.853,74

EK 3.2 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI İNCE FİLM VE MONOKRİSTALİN PV ELEKTRİK ÜRETİMİ VE KAZANÇ ÇIKTILARI

	Mevcut Santral Polikristalin PV Kullanılması Durumu	Mevcut Santral Karbon emisyon teşviği verilme Durumu	İnce Film Fotovoltaik Kullanılması Durumu	İnce Film Karbon emisyon teşviği verilme Durumu	Monokristalin PV Kullanılması Durumu	Monokristalin Karbon emisyon teşviği verilme Durumu
Toplam LEÜY Kazancı (\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Yerli Malı Kazancı (\$)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2 Teşviği Kazancı	0,00	166,48	0,00	105,98	0,00	170,39
Toplam Kazanç (\$)	22.341,61	20.176,38	18.109,49	18.215,46	22.853,74	23.024,13
Amortisman Süresi (yıl)	10,4678	11,5912	13,9631	13,8818	10,7662	10,6866
Toplam CO2 Üretimi (kg)	13.873,68	13.873,68	8.831,44	8.831,44	14.198,97	14.198,97

EK 4

Simülasyon Yazılımı Açıklaması

EK 4 GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANIM BİLGİLERİ

Bu çalışmada oluşturulan Excel tabanlı simülasyon yazılımının hesaplama sayfalarına ilişkin açıklamalar aşağıda verilmiştir. Buna göre;

Sayfa1: Çıktı sayfasında santralin tüm çıktıları ilk sayfada verilmiştir. Matematiksel modelleme ile oluşturulan hesaplamalar daha sonra gelen sayfalarda incelenmiştir. Mevcut durumda ve farklı elektrik üretim değerlerine göre Polikristalin PV, İnce film PV ve Monokristalin PV için elektrik üretim değerleri, kazanç değerleri, amortisman süresi, Devlet teşviği kazançları, önlenebilir CO_2 salım miktarı çıktıları verilmiştir.

Sayfa 2: Duyarlılık analizi sayfası Eğim açısı-amortisman süresi, PV panel verimi-amortisman süresi, ilk maliyetler- amortisman süresi ve yakıt gelir maliyeti-amortisman süresi duyarlılık grafiklerini, uygulama alanlarını ve duyarlılık oranlarını vermektedir.

Sayfa 3: Kazanç Polikristalin sayfası yıllara göre elektrik fiyat artışı durumunda Polikristalin PV kullanımı ile kazanılan kazancı vermektedir.

Sayfa 4: Kazanç İnce film sayfası yıllara göre elektrik fiyat artışı durumunda İnce film PV kullanımı ile kazanılan kazancı vermektedir.

Sayfa 5: Kazanç Monokristalin sayfası yıllara göre elektrik fiyat artışı durumunda Monokristalin PV kullanımı ile kazanılan kazancı vermektedir.

Sayfa 6: Yatay ışınım sayfasına MGM'den alınan Bursa iline ait saatlik yatay düzleme gelen ışınım miktarları girilmiştir.

Sayfa 7: $I_{o,s}$ sayfası atmosfer dışı yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınımı değeridir. G_{sc} güneş sabiti, ϕ enlem açısı, ω_2 ve ω_1 saat açıları, t_2 ve t_1 güneş saatleri çarpanı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 8: R_b sayfasında direkt ışınım dönüşüm katsayısı, güneş geliş açısının θ ve katsayısı zenit açısı θ_z 'nin birbirine oranı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 9: k_t sayfasında saatlik berraklık indeksi, yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınım değerinin, atmosfer dışı yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınımına oranı ile hesaplanmıştır.

Sayfa 10: $I_{d,s}$ sayfasında yatay düzleme gelen difüz güneş ışınımı, k_t 'nin değer aralıklarına göre saatlik olarak hesaplanmıştır

Sayfa 11: $I_{b,s}$ sayfasında yatay düzleme gelen saatlik direkt güneş ışınımı, yatay düzleme gelen toplam ışınım (I_s) ile difüz ışınımın ($I_{d,s}$) farkından hesaplanır.

Sayfa 12: Zenit açısı güneş ışınlarının yatay düzleme geliş açısıdır. ϕ enlem açısı, δ denklinasyon açısı ve ω saat açısı çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 13: Güneş geliş açısı β eğim açısı, ϕ enlem açısı, δ denklinasyon açısı ve ω saat açısı çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 14: $I_{be,s}$ sayfasında eğik düzleme gelen direkt ışınımı, $I_{b,s}$ yatay düzleme gelen saatlik direkt güneş ışınımı ve R_b direkt ışınım dönüşüm katsayısının çarpımı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 15: $I_{de,s}$ sayfasında eğik düzleme gelen saatlik difüz güneş ışınımı, $I_{d,s}$ ise yatay düzleme gelen saatlik difüz güneş ışınımı ve β yüzey eğim açısı çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 16: $I_{re,s}$ sayfasında eğik düzleme gelen saatlik yansıyan güneş ışınımı değerleri, ρ yüzey yansıtma oranını, β yüzey eğim açısı ve I_s saatlik yatay düzleme gelen ışınım çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 17: Toplam ışınım sayfasında aylara göre eğimli yüzeye gelen toplam ışınım grafiği çizilmiştir.

Sayfa 18: $I_{TE,s}$ sayfasında eğimli yüzeye gelen toplam ışınım değerleri, eğimli yüzeye gelen difüz, direkt ve yayılı ışınımın toplamı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 19: Kontrol Sayfası Polikristalin sayfasında, Polikristalin PV sayısal değerleri verilmiştir.

Sayfa 20: T_a sayfasında MGM'den alınan Bursa iline ait saatlik sıcaklık değerleri girilmiştir.

Sayfa 21: T_c sayfasında Polikristalin PV hücre yüzey sıcaklığı, T_a saatlik sıcaklık değerleri, HNÇS hücre normal çalışma sıcaklığı ve $I_{TE,S}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınım çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 22: η_c Polikristalin sayfasında, yüzey sıcaklığına bağlı modül verimi hesaplaması, T_r hücrenin test edildiği sıcaklığı, μ hücrenin sıcaklık katsayısı, η_r test değerlerinde bulunan modül verimi çarpanları ile hesaplanmıştır.

Sayfa 23: η_0 Polikristalin sayfasında PV optik verimi, $I_{TE,S}$ eğimli yüzeye gelen saatlik ışınımının, $I_{o,S}$ atmosfer dışı yatay düzleme gelen saatlik güneş ışınımına oranı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 24: $\eta *$ Polikristalin sayfasında, PV verimi, η_c modül verimi ve η_0 PV optik verimi çarpımı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 25: Üretim Polikristalin sayfasında, Polikristalin ile elektrik üretim değerleri, $I_{TE,S}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınımı, $\eta *$ PV verimi ve A_k toplam kollektör alanının çarpımı ile bulunur.

Sayfa 26: Kontrol Sayfası İnce film sayfasında, İnce film PV sayısal değerleri verilmiştir.

Sayfa 27. İnce film T_c sayfasında İnce film PV hücre yüzey sıcaklığı, T_a saatlik sıcaklık değerleri, HNÇS İnce film hücre normal çalışma sıcaklığı ve $I_{TE,S}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınım çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 28: η_c İnce film sayfasında, yüzey sıcaklığına bağlı modül verimi hesaplaması, T_r hücrenin test edildiği sıcaklığı, μ hücrenin sıcaklık katsayısı, η_r test değerlerinde bulunan modül verimi çarpanları ile hesaplanmıştır.

Sayfa 29: $\eta *$ İnce film sayfasında, PV verimi, η_c modül verimi ve η_0 PV optik verimi çarpımı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 30: Üretim İnce film sayfasında, İnce film ile elektrik üretim değerleri, $I_{TE,S}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınımı, $\eta *$ PV verimi ve A_k toplam kollektör alanının çarpımı ile bulunur.

Sayfa 31: Kontrol Sayfası Monokristalin PV sayfasında, Monokristalin PV sayısal değerleri verilmiştir.

Sayfa 32: Monokristalin PV T_c sayfasında Monokristalin PV hücre yüzey sıcaklığı, T_a saatlik sıcaklık değerleri, HNÇS Monokristalin PV hücre normal çalışma sıcaklığı ve $I_{TE,S}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınım çarpanları ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 33: η_c Monokristalin PV sayfasında, yüzey sıcaklığına bağlı modül verimi hesaplaması, T_r hücrenin test edildiği sıcaklığı, μ hücrenin sıcaklık katsayısı, η_r test değerlerinde bulunan modül verimi çarpanları ile hesaplanmıştır.

Sayfa 34: η^* Monokristalin PV sayfasında, PV verimi, η_c modül verimi ve η_0 PV optik verimi çarpımı ile saatlik olarak hesaplanmıştır.

Sayfa 35: Üretim Monokristalin PV sayfasında, Monokristalin PV ile elektrik üretim değerleri, $I_{TE,S}$ eğik yüzeye gelen saatlik ışınımı, η^* PV verimi ve A_k toplam kollektör alanının çarpımı ile bulunur.

Sayfa 36: Senaryo grafikleri sayfasında, senaryolar kısmında bahsedilen senaryoların amortisman süresine etkisi grafiklerle çizilmiştir.

EK 5 SİMÜLASYON YAZILIM CD'Sİ