



**T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Bir Fotovoltaik Sistemin Enerji Ekserji Ve
Eksergoekonomik Analizi**

AYSEL ÖZSELÇUK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

**Temmuz- 2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bir Fotovoltaik Sistemin Enerji, Ekserji Ve Eksergoekonomik Analizi

AYSEL ÖZSELÇUK

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi FATİH AKKURT

2022, 67 Sayfa

Jüri

Prof. Dr Ali KAHRAMAN
Dr Öğr. Üyesi Fatih AKKURT
Dr Öğr. Üyesi Sadık ATA

Bu çalışmada, Türkiye’de Konya ili iklim koşullarında 1166 MWp nominal güçte güneş enerjisi sisteminin polikristal, perc monokristal-half cut ve perc monokristal panel tipleri için enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri yapılmıştır. Öncelikle analizlerde kullanılan hesap yöntemi, sahada polikristal panel kullanılan sistemin dört yıllık saha değerleri ve PVsyst yazılım sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonra sistemin enerji ve ekserji değerleri hesaplanmış ve üç farklı panel tipi için sistemin aylık ve yıllık enerji ve ekserji verimleri elde edilmiştir. Tüm panel tipleri için enerji ve ekserji verimleri en az temmuz ayında, en fazla aralık ayında belirlenmiştir. Panel tipleri arasında en yüksek yıllık enerji verimi 20,1% ile perc monokristal-half cut hücre tipi ile elde edilirken onu 19,5% ile perc monokristal ve 16,00% ile polikristal hücre izlemiştir. Yıllık ekserji verimleri ise perc monokristal-half cut için 17,0%, perc monokristal için 16,4% ve polikristal için 11,6% olarak belirlenmiştir. Eksergoekonomik analiz için SPECO yöntemini kullanılmıştır. Bu yöntemle her panel tipi için elektriğin yıllık maliyet oranları, sistem elemanlarının ekserji yıkım maliyetleri, sistemin yıllık kârı ve geri ödeme süreleri belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre yıllık elektrik üretim maliyeti polikristal, perc monokristal-half cut ve perc monokristal için sırasıyla 35 \$/MWh, 41\$/ MWh ve 37 \$/ MWh olarak belirlenmiştir. Sistem kurulum maliyetlerine bağlı olarak geri ödeme süreleri polikristal, perc monokristal-half cut ve perc monokristal için sırasıyla 48 ay, 63 ay ve 53 ay olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eksergoekonomik Analiz, Ekserji, Enerji, Fotovoltaik Sistemler, Speco Metodu, Yenilenebilir Enerji

ABSTRACT

MS THESIS

Energy, Exergy And Exergoeconomi Analysis Of A Photovoltaic System

AYSEL ÖZSELÇUK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / ENERGY SYSTEMS
ENGINEERING**

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Fatih AKKURT

2022, 67 Pages

Jury

**Prof. Dr Ali KAHRAMAN
Dr Öğr. Üyesi Fatih AKKURT
Dr Öğr. Üyesi Sadık ATA**

In this study, energy, exergy and exergoeconomic analyzes of 1166 MWp nominal power solar energy system for polycrystalline, perc monocrystalline-half cut and perc monocrystalline panel types were carried out in the climatic conditions of Konya province in Turkey. First, the calculation method used in analyzes was verified by comparing the four-year field values of the system using the polycrystalline panel in the field and the PVsyst software results. Then, the energy and exergy values of the system were calculated and the monthly and annual energy and exergy efficiencies of the system were obtained for three different panel types. The energy and exergy efficiencies for all panel types were determined at least in July and at most in December. Among the panel types, the highest annual energy efficiency was obtained with the perc monocrystalline-half cut cell type with 20.1%, followed by perc monocrystalline with 19.5% and polycrystalline polycrystalline cells with 16.0%. Annual exergy efficiencies were determined as 17.0% for perc monocrystalline-half cut, 16.4% for perc monocrystalline and 11.6% for polycrystalline. The SPECO method was used for exergoeconomic analysis. With this method, annual cost rates of electricity, exergy destruction costs of system elements, annual profits and payback periods of the system were determined for each panel type. According to the results of the analysis, the annual electricity generation cost for polycrystalline, perc monocrystalline-half cut and perc monocrystalline was determined as 35 \$/MWh, 41 \$/MWh and 37 \$/MWh, respectively. Depending on the system setup costs, payback periods are calculated as 48 months, 63 months and 53 months for polycrystalline, perc monocrystalline-half cut and perc monocrystalline, respectively.

Keywords: Energy, Exergy, Exergoeconomic Analysis, Photovoltaic Systems, Renewable Energy, Speco Method

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans programında hazırlanmıştır.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji türlerinden biri olan fotovoltaik sistemde enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yapılarak, bu hesap yöntemi gerçek sonuç değerleri ve PVsyst sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Daha sonra sistem üç farklı panel tipi için aylık ve yıllık enerji ve ekserji verimleri elde edilmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve çabayla bana elinden gelenin fazlasını sunan, tezimi oluşturmamda ve ilerletmemde çok emeği geçen, şimdi ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli ve danışman hoca statüsünü hakkıyla yerine getiren Dr. Öğr. Üyesi Fatih AKKURT hocama teşekkürlerimi sunuyorum. Yine çalışmamda kaynak açısından bana yardımcı olan ve iş hayatındaki bilgi birikimimi arttıran özellikle Öğr. Gör. Celalettin BAKIR, Öğr. Gör. M. Esat DERE ve Efta Enerji ailesine teşekkür ederim.

Lisans eğitimim ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana kazandırdıkları bilgi, tecrübelerinden dolayı emeği geçen bütün hocalarıma teker teker teşekkürlerimi sunarım. Son olarak çalışmamda ve hayatımda desteğini ve güvenini benden esirgemeyen arkadaşlarıma, her şart ve koşulda yanımda olan her daim beni seven hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen hayattaki en büyük şansım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aysel ÖZSELÇUK
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Türkiye'nin Konumu	2
1.2. Türkiye'deki Yenilenebilir Enerji Türleri.....	4
1.3. Fotovoltaik Sistemler	6
1.3.1. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları.....	8
1.3.2. Güneş Panelleri	9
1.3.3. Evirici.....	15
1.3.4. Konstrüksiyon ve Montaj Malzemeleri	15
1.3.5. PVsyst Yazılımı	15
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Sistem Tanıtımı.....	24
3.2. Hesap Yöntemleri	26
3.2.1. Enerji Analizi.....	26
3.2.2. Ekserji Analizi	27
3.2.3. Eksergoekonomik Analiz.....	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	32
4.1. Aylık Sonuçlar	33
4.2. Yıllık Sonuçlar	36
4.3. Örnek Hesaplamalar	42
4.3.1. Enerji ve Ekserji Hesaplaması	42
4.3.2.Eksergoekonomik Analiz Örnek Hesaplama	48
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
6. KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
\$	: Dolar
₺	: Türk lirası
T_{cell}	: Hücre sıcaklığı
T_{amb}	: Ortam sıcaklığı
T_{sky}	: Gökyüzü sıcaklığı
T_{sun}	: Güneş sıcaklığı
NOCT	: Nominal çalışma Hücre Sıcaklığı koşulları
G	: Güneş radyasyonu
$\dot{E}_G$	: Elektrik üretimi
V_{OC}	: Açık devre voltajı
I_{SC}	: Kısa devre akımı
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
V_{MP}	: Maksimum güç üretiminde voltaj
I_{MP}	: Maksimum güç üretiminde akım
P_{max}	: Maksimum güç üretimi
TeC	: Sıcaklığa bağlı voltaj değişim katsayısı
A_{PV}	: Toplam Panel Alanı
$\dot{E}_x$	: Ekserji oranı
$\dot{E}_n$	: Enerji oranı
$\dot{Q}$	: Isı transfer hızı
η_{th}	: Enerji verimliliği
ψ	: Ekserji verimliliği
$\dot{E}_{x_{sol}}$	: Güneş ışıınının ekserjisi
$\dot{E}_{x_{p,k}}$	: Bileşenin ürün ekserji oranı
$\dot{E}_{x_{f,k}}$	: Bileşenin yakıt ekserji oranı
$\dot{E}_{x_{D,k}}$	: Bileşenin ekserji yıkımı
$\dot{C}_{D,k}$	: Bileşenin ekserji yok etme maliyetleri
h_{conv}	: Konvektif ısı transfer katsayısı
h_{rad}	: Işıma ısı transfer katsayısı
f_k	: Eksergoekonomik faktör
Z_k	: Bileşenin yatırım maliyetleri
$\dot{Z}_k$	: Bileşenin yatırım maliyeti oranı

CRF	: Kurtarma faktörü
φ	: Bakım faktörü
$Z_{sys,total}$	: Sistemin toplam yatırım maliyeti
P_{elec}	: Elektrik fiyatı
m	: Aylık güneş saati
H	: Yıllık güneş saati
PBP	: Geri ödeme periyodu
c_e	: Elektrik üretim maliyeti
n	: Sistemin ekonomik ömrü
i	:Yıllık faiz
kW	: kilowatt
MW	: megawatt
M^2	: metrekare
F	: kuvvet

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
CdTe	: Kadmiyum Tellür
EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
EVA	: Etilen Vinil Asetat
GEPA	: Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	: Güneş Enerjisi Santrali
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
DC	: Doğru akım
MPPT	: Maksimum güç noktası takibi
AR – GE	: Araştırma-Geliştirme
BIPV	: Bina entegreli fotovoltaiik sistem

1. GİRİŞ

Enerji, insanların varoluşundan beri ihtiyacı olan en temel gereksinimlerden bir tanesi olarak her çağda önemini korumuştur. Enerji ihtiyacının ucuz ve çevreci bir şekilde karşılanması dünyamız ve geleceğimiz için zorunluluğun çok daha ötesindedir. Bu sebeple yenilenebilir enerji gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Yaşanılan bütün gelişmeler sonucunda, enerji günden güne tükenerek sürdürülebilirliği konusu insanoğlunun en büyük sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Fiziksel olarak vardan yok edilemeyeceği gibi, yoktan da var edilemeyen enerji farklı biçimlerde ele alınmış ve olan sistemlerin iyileştirilmesi için çok fazla araştırma yapılmıştır. Enerji termodinamikte kısaca değişiklik yapabilme yeteneği olarak tanımlanmış olup, fiziksel olarak “bir cisim ya da cisimler sisteminin iş yapabilme özelliği” olarak açıklanmıştır.

Enerji yalnızca iş olarak değil; elektrik, kimyasal, mekanik, ısı, nükleer enerji gibi farklı türleri de mevcuttur. Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu ilkesini ifade eder. Termodinamiğin ikinci yasası enerjinin niteliğinin yanında niceliğinin öneminden bahseder ve doğadaki enerjinin biçim değiştirirken niceliğinin (kalitesinin) azaldığını bize ifade eder. Ekserji olarak karşımıza çıkan yasa, belirli bir haldeki sistemin en çok yapacağı işi (Çengel, 2008).

Ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının bir kombinasyonu olarak etkili bir analiz yöntemidir. Ekserji, referans koşullara göre sistemden elde edilebilecek maksimum iş potansiyeli olarak tanımlanır. Ekserji analizinde sistemdeki entropi üretimi dikkate alınır ve sistem elemanlarında meydana gelen ekserji yıkımının belirlenmesine bağlı olarak sistemin daha yüksek verim açısından daha kapsamlı bir analizini sağlar. Sistemlerin mükemmelle ne kadar yakın olduğunun bir ölçüsü olan ikinci kanun verimi ekserji analizi yöntemi ile hesaplanmaktadır (El-Emam ve Dincer, 2013). Ekserji analizi, termodinamiğin ikinci yasasını kullanarak güneşten elektrik üreten sistemlerin verimli kullanımını değerlendirmek için önemli bir araçtır (Bayrak ve diğerleri, 2017). Ayrıca ekserji analizi ve ekonomik ilkelerin bir birleşimi olan eksergoekonomik analiz, sistem çıktılarının ve ekserji yıkımlarının maliyetlerini araştıran ve enerji sistemlerinin sistematik olarak incelenmesine ve optimizasyonuna yardımcı olan bir yöntemdir (Nami H. ve arkadaşları, 2017).

Güneş radyasyonu haritalarının iyi bir başlangıç sağlamasına rağmen bölgelerin potansiyellerini belirleme noktasında, fotovoltaiik santrallerinden elde edilebilecek faydalı elektrik enerjisi hakkında tek başına yeterli fikir veremezler. Bu, güneş ışınımının yanı sıra ortam gibi çeşitli çevresel faktörlerin varlığına bağlanabilir.

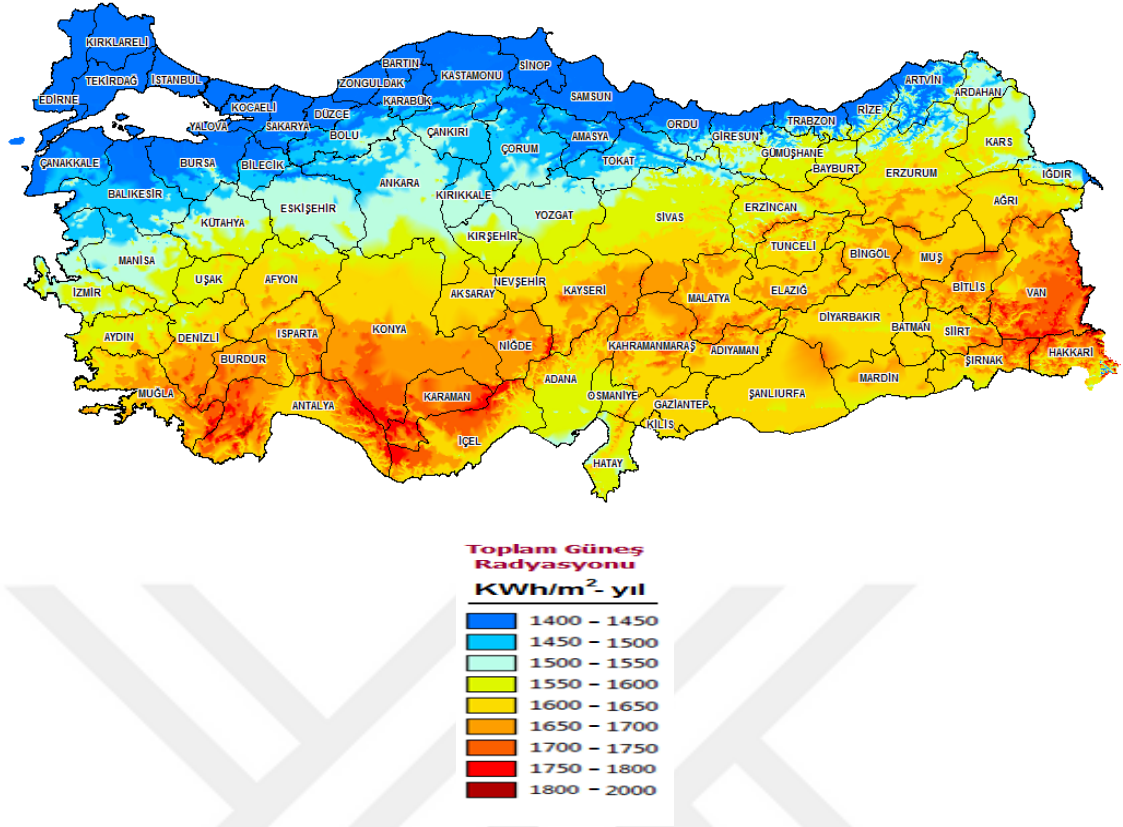
Sıcaklık, rüzgâr hızı, kirlenme vb. fotovoltaik sistemlerin performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Ayrıca, enerji tabanlı güneş radyasyonu haritaları, bir enerji kaynağının gerçek termodinamik değerini ölçemedikleri için fotovoltaik santrallerin verimliliği hakkında güvenilir bilgiler sağlayamaz. Bu özel konu, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanan ekserji yöntemleri kullanılarak etkin bir şekilde ele alınabilir (Aghbashlo M., Tabatabaei M., ve diğerleri, 2015).

Eksergoekonomi (Avrupa'da) olarak da adlandırılan termoekonomi terimi (Amerika Birleşik Devletleri'nde), ekserji analizi ve ekonomik ilkeleri birleştiren bir tür mühendislik dalıdır. Daha yüksek ekserji verimlilik ve daha düşük birim üretim maliyetleri ile enerji ile ilgili sistemin tasarımını, sentezini ve çalışmasını desteklemek için 20 yılı aşkın bir süredir yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sistem tasarımcısı veya yatırımcılara geleneksel enerji analizi ve ekonomik değerlendirmelerden elde edilemeyen değerli bilgiler sağlar (Tsatsaronis G., 2007).

1.1. Türkiye'nin Konumu

Türkiye kuzey yarım kürede 36° ve 42° kuzey paralelleri ile 26° ve 45° doğu meridyenleri arasına yerleşmiştir. Ekvator'un Kuzeyinde ve Greenwich'in Doğusunda bulunmaktadır. Dört mevsimin belirgin yaşandığı bir ülkedir, ılıman kuşakta yer alır (UN Demographic Yearbook, 2016).

Güneş Enerjisi güneşin çekirdeğinde oluşan füzyon (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) olayları sonucunda açığa çıkan enerjidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, 1370 W/m^2 olarak yaklaşık hesaplanmış olup bu değer atmosfer tabakasından dolayı yalnızca $0-1100 \text{ W/m}^2$ 'si yeryüzüne ulaşabilmektedir. Dünyaya gelen bu enerjinin, küçük bir kısmı bile bütün insanlığın enerji tüketiminin üstünde bir değere sahiptir. Ülkemiz bulunduğu coğrafi konum nedeniyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Enerji Bakanlığı tarafından açıklanan verilere göre Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresi 2,741 saat (günlük toplam 7,5 saat), ortalama toplam ışıyım şiddeti $1,527 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$ (günlük toplam $4,18 \text{ kWh/m}^2$) olduğu açıklanmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).



Şekil 1.1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)

BÖLGE	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² *yıl)	Güneşlenme Süresi (saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

Şekil 1.2. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü

Yılın büyük bir bölümünde yağış olması nedeniyle rutubetli bir havaya sahip olan Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi Türkiye'nin az ısıtım alan bölgesidir. Atmosferde bulunan fazla su buharı, ısıtımın yeryüzüne ulaşmamasına neden olur.

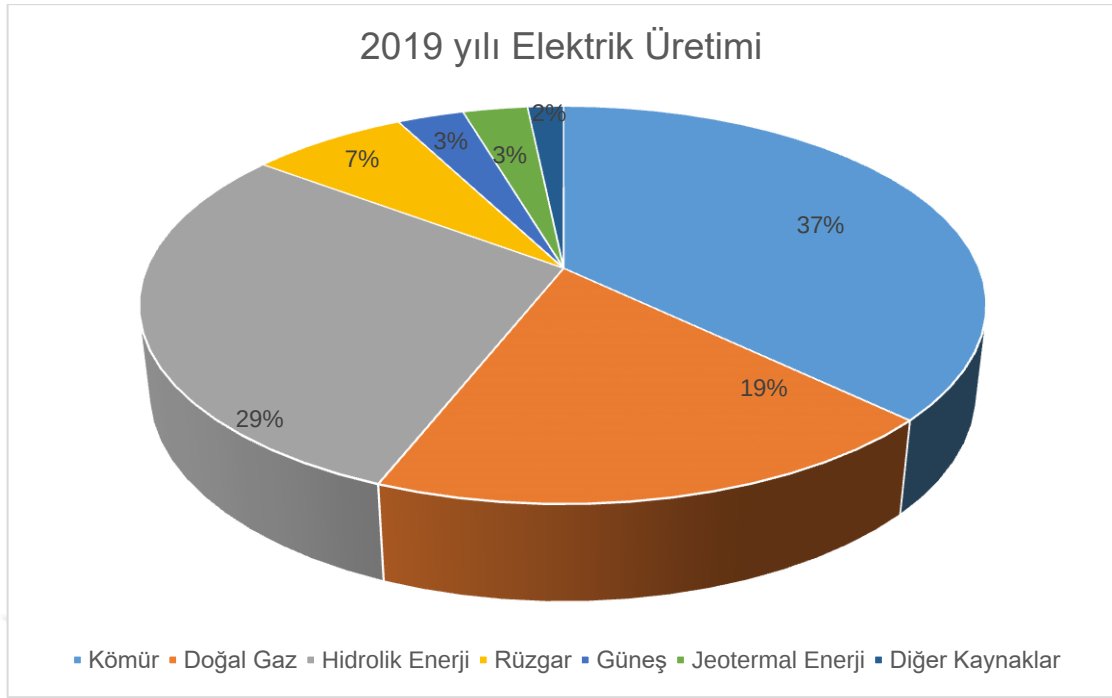
Marmara ve Kuzey Ege Bölgesi, Karadeniz bölgesine göre daha yüksek ısıtım değerlerine sahiptir. Güney Ege, Batı Akdeniz ve Orta Anadolu Bölgeleri orta derecede ısıtım ölçülmektedir. Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleri ısıtım değerleri iyi

olan bölgelerimizdir. Sert ve soğuk iklime sahip Güney Doğu Bölgesinin sağ en alt ucu ise ışıınım değeri en iyi olan bölgemizdir. Rakım yüksektir. Havadaki su buharı, yağmur ve kar şeklinde yoğunlaşmakta ve atmosfer daha berrak olup ışıının engellenmesi en az seviyededir. (Aksungur K.M. ve diğeri, 2013)

1.2. Türkiye’deki Yenilenebilir Enerji Türleri

1970’lerde başlayan enerji krizi ve son yıllarda küresel ısınmanın artması nedeniyle, gelişmiş ülkeler enerji üretiminde, konvansiyonel enerji türlerine karşılık alternatif enerji önemini hızla kazanmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji ve çevre teknolojileri alanında Ar-Ge ve iyileştirme çalışmaları artmış olup, dışa bağımlı olmayan, temiz, çevreci ve tükenmeyen enerji kaynaklarından enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Her ne kadar payı hala kömür, petrol, doğalgaz gibi geleneksel yöntemlerle enerji üretiminden düşük olsa da yıllara bakıldığında her yıl biraz daha artmaktadır. Yenilenebilir enerji genellikle elektrik üretiminde kullanılsa da, ısıtma ve ulaştırma gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) tarafından yayımlanan “Yenilenebilir Enerji İstatistikleri 2020” başlıklı rapora göre, Türkiye’de toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2010 yılında 17,369 MW iken, 2019 yılında bu değeri 44,587 MW’ a yükselmiştir. 2019 yılı kapasite verilerine göre Türkiye’de hidroelektrik kapasitesi 28,503 MW, rüzgâr enerjisi 7,591 MW, güneş enerjisi 5,996 MW, biyoenerji 983 MW, biyogaz 534 MW, jeotermal enerji 1,515 MW olarak belirlenmiştir (Özcan M., 2020).

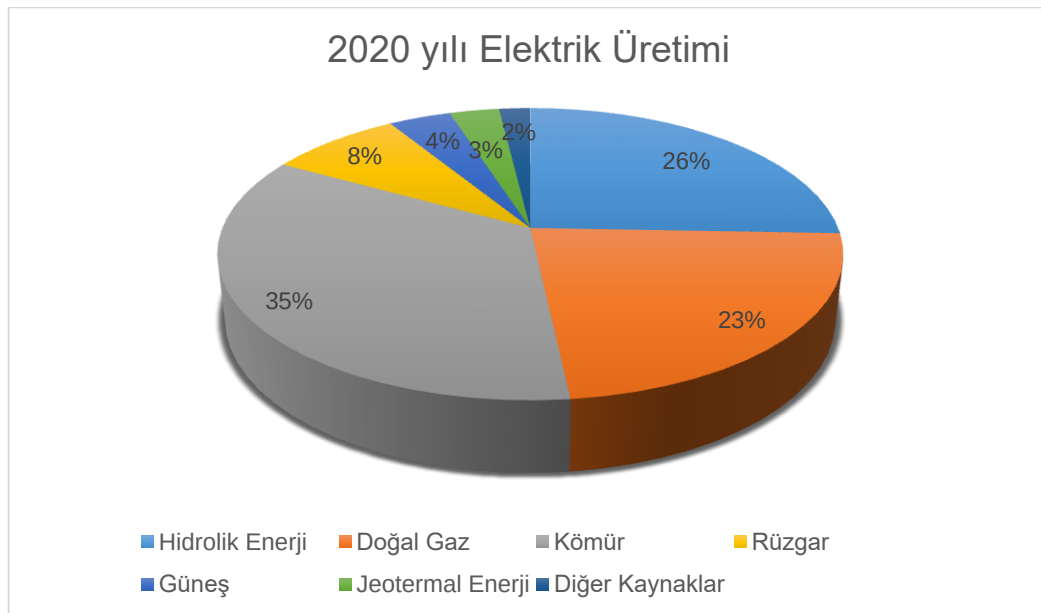
2019 yılında toplam kurulu gücümüz 91,267MW olup, elektrik üretimimizin, %37,14’ü kömürden, %18,85’i doğal gazdan, %29,23’i hidrolik enerjiden, %7,15’si rüzgârdan, %3,04’si güneşten, %2,95’i jeotermal enerjiden ve %1,64’ü diğeri kaynaklardan elde edilmiştir (GÜYAD, 2020).



Şekil 1.3. 2019 yılı elektrik üretim tablosu

2020 yılına gelindiğinde ise açıklanan değerler;

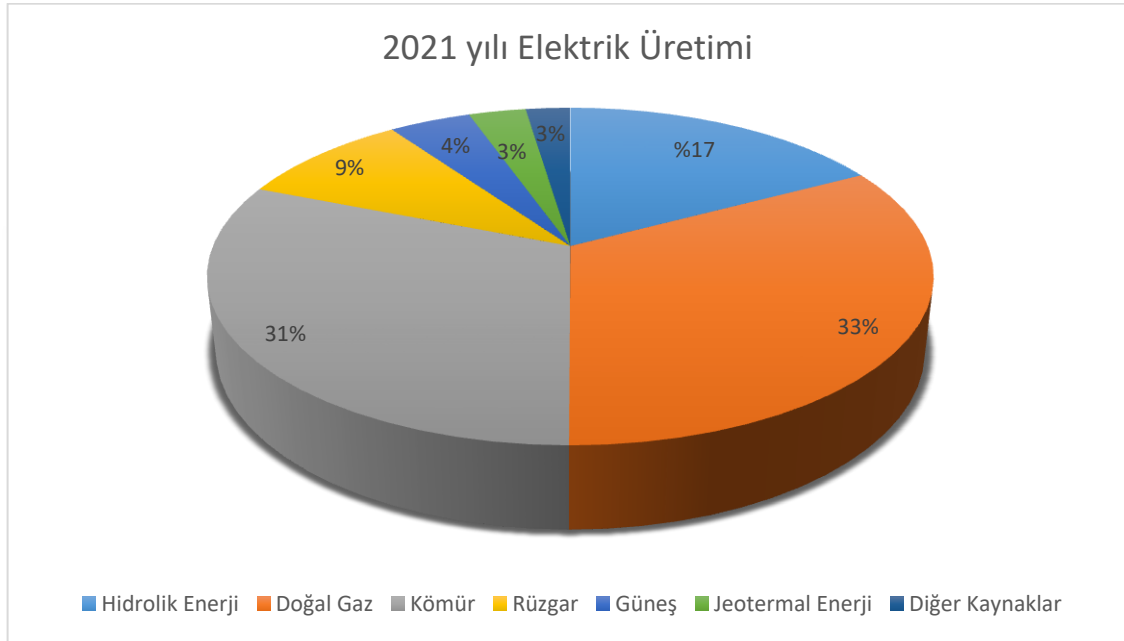
2020 yılı Aralık ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüz 94,801MW olup kaynaklara göre elektrik üretimi dağılımı; yüzde 25,59'u hidrolik enerji, yüzde 22,69'u doğal gaz, yüzde 34,82'si kömür, yüzde 8,11'i rüzgâr, yüzde 3,82'si güneş, yüzde 3,06'sı jeotermal ve yüzde 1,91'si ise diğer kaynaklar şeklindedir (GÜYAD, 2020).



Şekil 1.4. 2020 yılı Elektrik Üretimi

2021 yılına gelindiğinde ise açıklanan değerler;

2021 yılı Kasım ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüz 99,050 MW'a yükselmiş olup, kaynaklara göre elektrik üretimi dağılımı; yüzde 17,2'si hidrolik enerji, yüzde 32,85'i doğal gaz, yüzde 31,01'i kömür, yüzde 9,22'si rüzgâr, yüzde 4,33'ü güneş, yüzde 3,03'ü jeotermal ve yüzde 2,36'si ise diğer kaynaklar şeklindedir (GÜYAD, 2021).



Şekil 1.5. 2021 yılı Elektrik Üretimi

1.3. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistem veya PV sistem, güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. PV sistemler birçok sistemin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Sistemin ana elemanı olan güneş panelleri, yüzeylerine düşen güneş ışığını soğurarak DC akımlı elektriğe çevirir. Ürettiği doğrudan elektriği, eviriciler sayesinde alternatif akıma çevirerek elektrikli aletlerde kullanılabilir hale getirir. Bu sistemler iki gruba ayrılmaktadır. Şebekeye bağlı olan sistemler (on grid), şebekeden bağımsız sistemler (off grid) şeklindedir. Şebekeye bağlı sistemlerde ürettiği elektriği, anlık olarak iç tüketimde tüketmekte ve fazladan üretilen elektriği şebekeye iletmektedir.

Şebekeden bağımsız sistemlerde ise üretilen elektrikler aküler ile depolanmakta olup ihtiyaç anında elektriği akülerden çekerek kullanılmaktadır. Şebekenin olmadığı yerlerde sıklıkla tercih edilen off grid sistemler, on grid sistemlere göre akü maliyetleri

nedeniyle daha yüksek kurulum bedelleri ile kurulmakta ve zorunluluk olmadığı sürece tavsiye edilmemektedir.

Son yıllarda, fotovoltaik panellerden güneş enerjisi kullanımı önemli bir rol oynamaya başladı. Bu büyüme hemen hemen tüm batı ülkelerini kapsamasına rağmen, fotovoltaik üretim kapasitesinin bölgesel dağılımında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıklar genel olarak iklim koşulları ve özel olarak güneş radyasyonu ile zayıf bir şekilde ilişkili olduğu görülmektedir. Fotovoltaik enerji üretiminin iklim, talep, gelir gibi yerel faktörlere bağlı olup olmadığını amaçlayan çalışmalar, fotovoltaik üretim kapasitesinin bölgesel dağılımının konumsal bağımlılıktan etkilendiğini ortaya koymuştur (Copiello, S., ve diğerleri, 2017).

Dünya çapında artan enerji talebini yerine getirme yolunda yeni güneş enerjisi teknolojilerinin gelişmesi, birçok önemli çözümden biri olarak kabul edilmektedir.

Günümüzde fotovoltaik (PV) sistemlere dair harcamalarda tüm tesiste kullanılan bileşenlere dair harcamalar fotovoltaik modüllerin maliyetinden daha düşük maliyetlidir. Bu nedenle, fotovoltaik elektrik üretiminin toplam maliyetini daha da azaltmak için eviricilere, konstrüksiyon malzemelerine ve kurulumuna ek olarak işletim ve bakım maliyetlerine daha fazla önem verilir (Pearsall, N., 2017).

Fotoelektrik etki, bir kaynaktan yayılan ışık veya daha yüksek enerjili elektromanyetik dalganın bir madde yüzeyine düşmesi sonucu, maddeden elektron yayılması olayıdır. Maddeden yayılan bu elektronlar fotoelektron olarak adlandırılır. Heinrich Rudolf Hertz, elektromanyetik dalgaların varlığını deneysel olarak ilk defa göstermeye çalışırken gözlemlemiş olduğundan bu olay Hertz etkisi olarak da söylenmektedir. 1905 yılında Albert Einstein tarafından açıklanana kadar olay deneysel olarak gözlemlenmiş fakat bu olaya klasik fizik yasaları ile bir anlam verilememiştir. 1905 yılında Einstein, kuantum kuramını genişleterek ışığın kendisinin foton değil, ışık kuantumlarından oluştuğunu ileri sürmüş ve fotokimyanın temel işlemi olan “fotoelektrik olayı” açıklamıştır. Einstein’ın bu çalışması kuantum kuramına başlangıçta büyük bir destek sağladığı gibi kendisine de 1921 yılında Nobel ödülünü kazandırmıştır. (Yürük M., 2012)

Güneş hücrelerine ulaşan ışıma miktarı, güneş panelinden sağlanan güç miktarını belirlemektedir. Bir fotovoltaik modülün (PV) performansını etkileyen iki faktör: güneş ışınımı ve hücre sıcaklığıdır. Bu faktörlere ek olarak, modül tarafından üretilen enerji miktarı, diğer bileşenlerinin güvenilirliği ve çevresel koşullar gibi diğer faktörlere de bağlıdır.

Bölgesel ve yerel ölçeklerde arazi (kabartma) yüksekliği, kurulacak alanın yüzey eğimi, oryantasyon (en-boy) değişkenliği ve kurulacak alanın gölge alma durumu radyasyon dağılımı değiştiren en önemli faktörlerdendir (Hofierka, J. Süri, M., 2002).

PV sistemlerin dezavantajı atmosferik koşullara ve sıcaklığına da bağlı olarak yaklaşık %9-17'lik düşük verimliliğidir.

2020 yılı sonu itibari dünyada toplam 702 GW gücün güneş enerjisi ile elde edildiği belirtilmektedir. 2050 yılına kadar dünyanın gerekli enerjisinin %16'sının PV güç üretiminden elde edilebileceği tahmin edilmektedir (Venkateswari ve Sreejith, 2019).

Türkiye 2021 yılı itibari ile dünya genelinde en fazla güneş enerji santrali bulunan 49 ülke arasından 15. sıradadır ve kurulu güneş enerjisi gücü 7,065 MW' a ulaşmıştır (Kara ve arkadaşları, 2022).

Ülkemizde kurulumunun hızla artışa geçerek yaygınlaşmasının nedenleri arasında mevzuatlarda yapılan yenilikler ile elektrik fiyatlarında günden güne yaşanan artışlar sebep olmuştur.

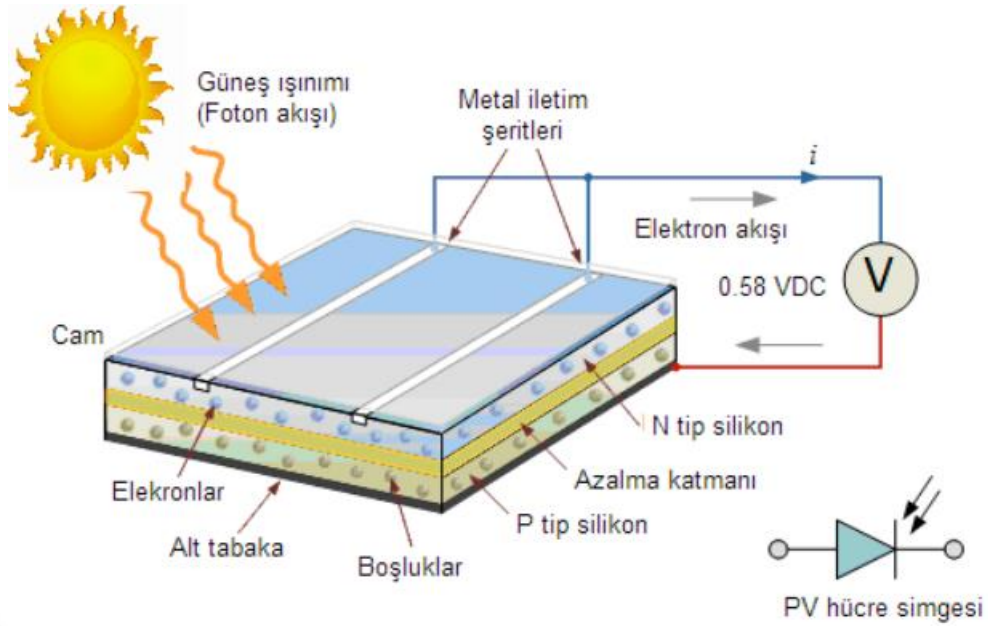
1.3.1. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları

- Fotovoltaik sistemlerinin ömrü, kurulum maliyetini birden fazla amorti edecek kadar uzundur.
- Bakımları kolay ve bakım maliyetleri çok azdır.
- Elektrik üretiminde yakıt olarak güneş enerjisini kullandığı için yakıt satın alma, sürekliliğini sağlama ve nakliye maliyetleri yoktur. Bu nedenle ilk kurulumundan sonra güncel maliyetlerde artış ya da azalış yoktur.
- Çevreyi kirletmezler, enerji üretimi sırasında herhangi bir atık çıkarmazlar.
- Sessiz ve çevreye zarar vermeden çalışırlar.
- Sistemde olan herhangi bir arıza durumunda sisteme müdahale kolaydır.
- Küçük, orta ve büyük ölçeklerde her ihtiyaca göre kurulumu yapılabilmektedir.
- Elektrik şebekesinin olmadığı yerlerde elektrikle çalışan ürünlerin kullanma imkânını sağlar.
- Arızalanma oranı düşüktür. Sistemde bir arıza olma durumunda sistemin tamamının çalışmasını etkilemez.
- İhtiyacın artması durumunda güç artırımı kolaylıkla yapılabilmektedir.

- Uzun ömürlüdür. Kurulan bir tesis ömrü 25 yıl olarak hesaplanmaktadır. (Panel verimi ilk 25 yıl lineer olarak %80'e düşeceği öngörülmektedir.)
- Panellerin üretilmesini sağlayan silisyum dünyada bol miktarda bulunmaktadır.
- Uzak teknolojisinde de güneş panelleri kullanılabilir.
- Elektrik zamlarından etkilenmeyerek enerji maliyetlerinin azalmasına yardımcı olmaktadır.

1.3.2. Güneş Panelleri

Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen fotonların enerjilerini yarı iletken malzemeler yoluyla elektron hareketine dönüştüren ve ardından elektrik akımı elde edilmesini sağlayan elektronik elemanlardır. Fotovoltaik hücre elektriksel modeli, yarı iletkenin başlangıç noktası olan p-n jonksiyonunu oluşturmak için silisyumun katkılanması gerekmektedir. Silisyum elementine periyodik cetvelin 5. Grubundan bir element eklenir. Silisyumun dış yörüngesinde 4, fosfor elementinde ise 5 elektron vardır, bileşik oluştuğunda dış yörüngesinde 8 elektron mevcut olur ve fazla olan bir elektron kristal yapıya verilir. Dolayısıyla kristal yapıda bir adet fazla negatif yük oluşmuş olur ve elde edilen yapı n tipi yarı iletken malzeme haline gelmiş olur. p tipi yarı iletken elde etmek için ise, silisyum ile 3. Grup elementlerinden bor ile bileşik oluşturmak gerekir. Bor elementinin son yörüngesinde ise 3 elektron vardır. Bileşik 4 oluştuğunda kristal yapıdan bir adet elektron eksilmek zorundadır ve bu durumda yapıda pozitif yük delik oluşmuş olur. Bu şekilde oluşan yapıya da p tipi yarı iletken denilmektedir. p yada n tipi malzemenin içerisine gerekli olan katkılanma yapılar yukarıda anlatıldığı şekilde p-n jonksiyonu oluşur. n tipinde elektronlar, p tipinde ise delikler çoğunluk taşıyıcısıdır. P-n jonksiyonu oluştuğu anda n tipindeki çoğunluk taşıyıcı elektronlar p tipine doğru akım oluştururlar, aynı zamanda p tipindeki deliklerin de n tipi maddeye doğru yer değiştirdiği varsayılır. Aralarında oluşan gerilim farkından dolayı yer değiştirme sonucunda meydana gelen akım ile elektrik üretimi gerçekleşmiş olur. (Anonim)



Şekil 1.6. Fotovoltaik modül (Anonim)

Uygulama kısmında en yaygın tipleri tek kristal silikon (mono-crystalline silicon, çoklu kristal silikon (poly-crystalline silikon), ince film (thin-film) paneldir.

1.3.2.1. Half-Cut Panel Teknolojisi

Half-Cut ifadesi, Türkçe karşılığı olarak yarı-kesim anlamına gelmektedir. Normal boyutta olan hücreler özel bir lazer ile oldukça dikkatli bir şekilde ortadan ikiye bölünmektedir. Standart güneş paneline göre daha fazla hücreli panel oluşturulmaktadır. Paneldeki by-pass diyotları üst ve alt katmanda birbirinden ayıracak şekilde ortada yer alır. Bu sayede alt ve üst kısımlar birbirinden bağımsız olarak çalışırlar. Bu da daha az iç dirence, daha yüksek enerji çıkışına ve gölgelenmeden daha az etkilenip düşük verim kaybı oluşmasını sağlar.

Shukir yaptığı çalışma ile güneş hücresini ikiye bölüp montaj yaparak panel üretiminin birçok faydası bulunduğu bulgularına ulaşmıştır.

Bunlar:

1. Hücreyi ikiye bölerken her bir yarı hücre, tüm hücre tarafından üretilen aynı voltajı üretir. Çünkü voltaj iki nokta arasında oluşan potansiyel farktır. Ve bu sayede güneş panelinden üretilen voltajın artmasına neden olur.



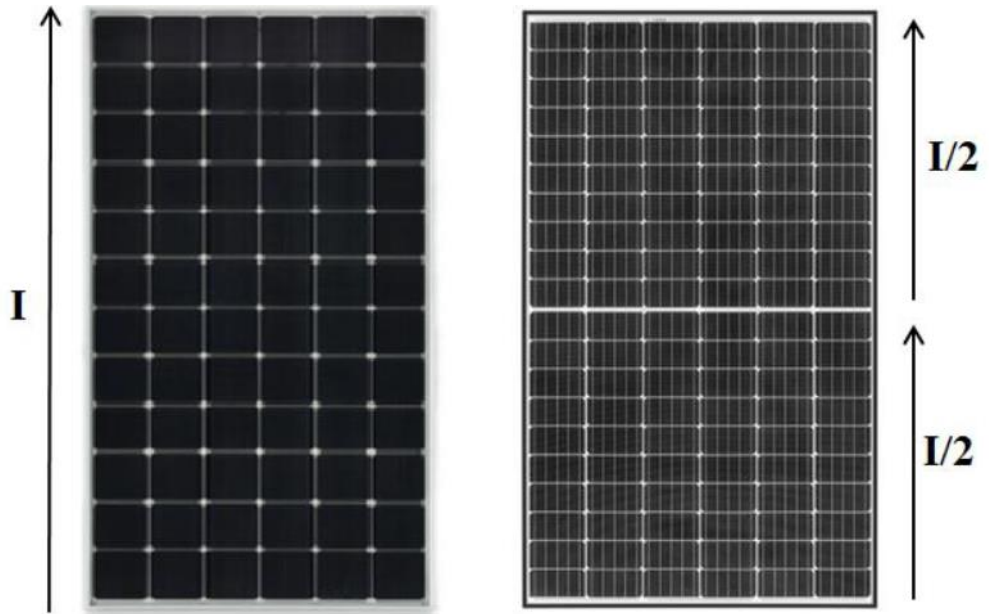
Şekil 1.7. Hulfcut hücre modeli

2. Çıkış akımı hücrenin alanına ($28 - 35 \text{ cm}^2$) bağlı olduğundan, hücrenin yarısından üretilen akım, tam hücrenin akımının yarısına eşittir ve dolayısıyla kayıplar (P) kayıplar = $I^2 * R$ yarı yarıya azalacaktır.



Şekil 1.8. Hulfcut hücre modeli

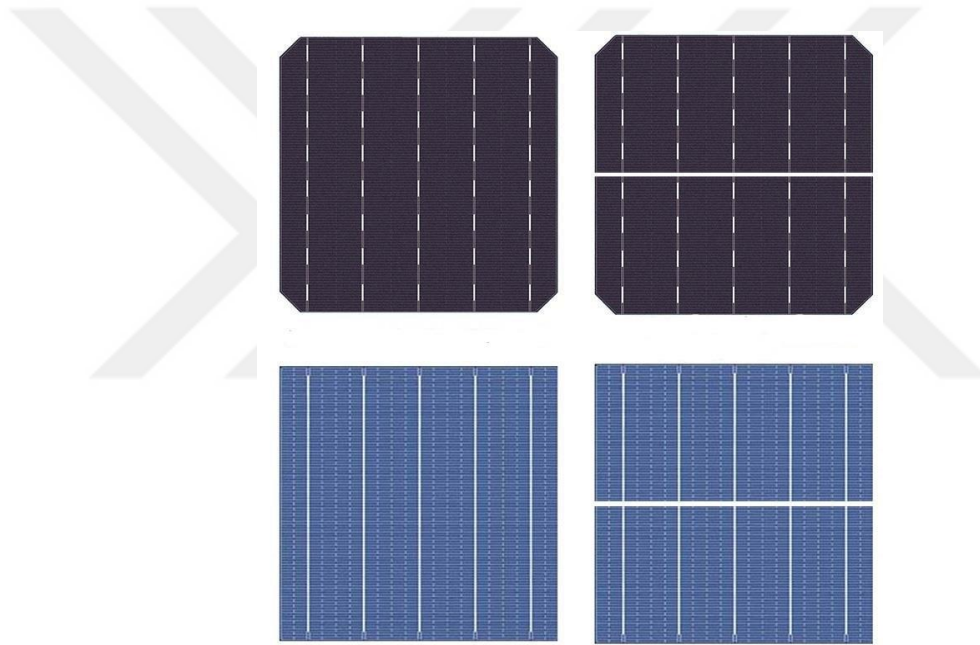
3. Bağlantı baralarında kaybolan güç azalır çünkü içlerinden geçen akım yarı yarıya azalır ve uzunlukları da yarı yarıya azalır.



Şekil 1.8. Hulfcut panel modeli

4. Hücre ikiye bölünüp daha sonra bakır tellerle birleştirildiğinde hücrenin dayanıklılığı artar.
5. Güneş panelinin ortasında bakır yapıştırma bandının bulunması nedeniyle güneş panelinin dayanıklılığı da arttırılmıştır.
6. Güneş panelini gölgeden korumak için, güneş paneline ters olarak bypass diyotları her bir hücreye (16-24). Bu nedenle, bir hücre veya hücre sütunu gölgeye maruz kaldığında, panelin gücünün üçte biri kaybolur, ancak yarı kesilmiş hücrenin bir hücre veya hücre sütununu gölgeye maruz bırakması durumunda, altıda bir kayıp yaşanacaktır.

Şeklinde ifade etmiştir. (Shukir S.S., 2021)



Şekil 1.9. Hulfcut Polikristal ve monokristal hücre modeli

1.3.2.2. PERC Panel Teknolojisi

PERC açılım olarak “ Passivated Emitter and Rear Cell”’dir. Türkçe anlam olarak pasif verici ve arka hücre anlamına gelir. Ve standart güneş modüllerinin verimliliğini artırmak için kullanılan modern bir teknolojidir. Bu, hücrenin arkasına pasifleştirilmiş bir katman eklenerek yapılır. Pasifleştirilmiş katman, her tür PV modülüne (yani poli, mono ve diğerleri) eklenebilir fakat monoperc oldukça popüler olduğu için genellikle panel üreticileri sadece bu tip olarak üretir. Standart bir modülün yüzeyine düşen güneş ışığı ya yansıtılır, emilir ya da yüzeyden geçirilir. Ancak perc modüllerinde ise hücrelerden geçen ışık tekrar kullanılabilir. Perc modüllerde, standart

modüllerin arka tarafına pasifleştirilmiş eklenen katman sayesinde panelden geçen fotonları geri yansıtma yeteneğine sahiptir. Bu sayede modül tarafından daha fazla ışık emilir ve böylece daha yüksek üretim sağlanır. Perc güneş modülleri bu şekilde çalışır. Perc modüllerin yüzeyi tarafından daha fazla ışık absorbe edildiğinden, birim alan başına toplam üretim yüksek ve dolayısıyla daha yüksek verimliliklidir (Joshi H., 2021).

1.3.2.3. Monokristal Panel

Monokristal panel üretiminde “Czochralski Methodu” olarak bilinen üretim şekli kullanılmaktadır. Czochralski 1971 yılında geliştirdiği bu yöntemde silisyum dioksiti (SiO_2), 1700 derece civarında olan sıcaklık ile eritmiştir. Eriyiğin içine daha sonra küçük bir aşırı kristali batırılmakta ve yavaş yavaş yukarıya soğuk bölgeye doğru çekilerek uzun ve tek kristalli silindir elde edilmiştir. Oluşan bu silindir genellikle çokgen olarak dilimlenip daha sonra yarı iletken malzemelerle bir araya getirilerek güneş modülü kurulumunda montajı yapılacak şekilde son halini alır.

Monokristal hücrenin rengi diğer şekilde üretilen panellere göre daha koyu renklidir. Sıcak havalarda daha verimli çalışma özelliği gösteren monokristal paneller üretimin uzun ve zahmetli olması nedeniyle diğer tip panellere göre daha yüksek maliyet içermektedir. Son zamanlarda sıklıkla tercih edilen monokristal güneş paneli en yüksek verimli panel çeşidi olarak bilinmektedir. Laboratuvar çalışmalarında monokristal tek bir güneş pilinin hücresinin verimliliği %24 oranına ulaşmasına rağmen, bu pil çeşidinden üretilen monokristal panelin uygulamadaki verimliliği %17 civarındadır (Ciach, J. ĩelazny, 2005).

1.3.2.4. Polikristal Panel

Monokristal silisyum hücre üretimine benzer özellikler ile üretilen polikristal hücrenin üretim teknolojisi daha kolaydır. En çok tercih edilen üretim şekli dökme yöntemidir. Polikristal yapılı silisyum, eriyik halde kalıplarda soğutularak elde edilir. Soğuyan yarı iletken genellikle kare ya da dikdörtgen şeklinde dilimlenmektedir. Daha sonra monokristal hücrede olduğu gibi yarı iletken malzemelerle bir araya getirilerek bağlantıları yapılır.

Polikristal silisyum üretiminde Czochralski yöntemi veya başka bir saflaştırma yöntemi kullanılmadığından oluşan polikristal silisyumlar homojen değildir. Bundan dolayı polikristal güneş hücreleri kalite ve verimlilikleri monokristal güneş pillerine göre daha düşüktür. Polikristal silisyum yapımındaki kolaylıktan dolayı fiyatı monokristal güneş pillerine göre daha düşüktür. Polikristal güneş pillerinde yansımayı engelleyici cam varsa mavi renkte görünmektedir, yansımayı engelleyici cam yoksa

gümüş rengindedir. Monokristal pile göre kullanım alanı daha yaygındır. Bunun en büyük nedeni ise daha kolay ulaşılabilir ve buna bağlı olarak daha uygun fiyatlı olmasıdır. Bu nedenle fayda/maliyet oranı yüksektir. (Pathak, M.J.M., ve diğerleri, 2014)

1.3.2.5. İnce Film Panel

Emilim özelliği iyi olan maddeler kullanılarak üretilen ince film güneş pilleri yarı iletken malzemelerin geniş yüzeyler üzerine kaplanmasıyla oluşturulmaktadır. Dalga boyu katsayısı 0,7 mikrondan daha az olan bir bölgedeki güneş radyasyonunu emmek için 1000 mikron kalınlığında amorf silisyum gerekli iken kristal silisyum ile aynı radyasyonu emmek için 5000 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Yapılan araştırmalarda güneş pilleri üretiminde kullanılabilecek birçok yarı iletken malzemenin düşük maliyetlerle cam, paslanmaz çelik ya da plastikten yapılmış geniş yüzeylere uygulanabildiği ispatlanmıştır. İnce film pillerde kullanılan yarı iletken malzemelerin büyüklükleri; bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine kadar değişen damarlardan oluşmaktadır. Bunlarda dolayı ince film güneş panelleri esnek bir yapıya sahip olmaktadır. İnce film güneş pillerinde daha çok amorf silisyum, kadmiyum ve tellür elementlerinde meydana gelen bileşikler kullanılmaktadır. İnce film güneş pillerinde güneş ışınlarını soğurma oranları çok yüksek olmasına karşın çıkış akımları çok düşüktür. Bundan dolayı çıkış voltajları kristal silisyumlu pillere göre yaklaşık 2-3 kat daha fazla iken akımları bir o kadar küçüktür. İnce film malzeme istenilen birçok malzeme üzerine istenilen boyutta kaplanabilirken, silisyum pillerin boyutları kristalin boyutları ile sınırlıdır. Modül ve panel yapımında ince film malzeme kullanımı daha kolay ve uygundur. Verimleri %5 ile %8 arasında değişmektedir. Işık yutma oranı yüksek olan bu hücreler, düşük verimlilikleri nedeni ile pazar payının küçük bir bölümünü oluştururlar. İnce film paneller ısıya daha dayanıklıdır. Ayrıca paneller üzerine herhangi bir gölge düştüğünde gölge dışındaki alanın elektrik üretmesine olanak sağlamaktadır. İnce film fotovoltaiik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir. Başka bir deyişle ince film yarı iletken malzeme, büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine 21 değişen damarlardan oluşmaktadır. İnce film hücreleri laboratuvar ortamında %13 verime kadar ulaşmıştır (T. Markvart, L. Castaner, 2011).

Düşük maliyetleri olmasına rağmen aynı güçte üretim sağlayabilmek için çok daha geniş alanlara kurulum yapılması gerektiği için alanın sorun olmadığı durumlarda kullanılmaktadır.

1.3.3. Evirici

Güneşten gelen enerji güneş panelleri ile doğrudan akım olarak üretilmektedir. Bu DC akım eviriciler aracılığıyla AC akıma yani şebekeden geçen elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir.

Depolamalı sistemler ve şebekeye bağlı sistemler için kullanılan iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Kare dalga, modifiye sinüs ve tam sinüs modelleri olmak üzere mevcut olup tam sinüs eviriciler, merkezi eviriciler ve dizi eviriciler şeklinde de ayrılmaktadır.

Merkezi eviriciler, diğer eviricilerden farklı olarak panellerin evirici öncesinde DC korumanın yapılmış olduğu bağlantı kutularında birleştirildikten hemen sonra evirici bağlantısının oluşturulduğu sistemlerdir. Merkezi evirici diğer eviricilere göre daha büyük ve merkezden yönetim sağlamaktadır. Daha çok arazi uygulamalarında kullanılan bu evirici şeklinde arıza durumunda büyük kayıplar yaşanmaktadır.

Dizi eviriciler fotovoltaik dizinin doğrudan evirici bağlantısı ile oluşturulan giriş gerilimlerinin tanımladığı voltaj değerine kadar panellere seri bağlantısı olan sistemlerdir. Sistem güvenliği için DC ve AC koruma alternatifleriyle birlikte üretilen dizi evirici çözümleri bulunmaktadır. DC kutu kısmında bulunan MPPT'ler panel serilerinin girişlerinde paralel yapılar diziler halinde oluşmaktadır. Arıza anında tespitin daha kolay olduğu eviriciler sıklıkla tercih edilmektedir.

1.3.4. Konstrüksiyon ve Montaj Malzemeleri

Uygun güçte ve özellikle belirlenen güneş panelleri arazi, bina çatı ve cephesine konstrüksiyon sistemleri sayesinde montajı yapılarak kurulumu gerçekleştirilir. Farklı alanlara göre tasarlanan bu sistemlerde arazi uygulamalarında zemin etüdü yapıp diğer bina çatı, cephe uygulamalarında da kar yükü, deprem, heyelan, sel gibi riskler göz önüne alınarak sabit, tek eksen ya da çift eksen olarak tasarlanır.

Sistemin taşıyıcı kısmı olan konstrüksiyonlar genellikle alüminyum malzemelerden üretilerek çekme, yaşlandırma testleri yapılarak dayanıklılığı ve ömrü en uzun olan malzemeler seçilerek tasarlanır. Arazide kullanılan kolon ve kiriş için çelik malzemeler tercih edilir.

1.3.5. PVsyst Yazılımı

PVsyst yazılımı, dünya çapında binlerce mühendis tarafından kullanılan kapsamlı bir güneş enerjisi tasarım aracıdır. PVsyst, büyük ve şebeke ölçekli güneş

enerjisi kurulumları için standarttır. Şebekeye bağlı PV sistemlerinin tasarımını kolaylaştırır.

Mühendisler, tasarımcılar ve proje yöneticileri, bir güneş enerjisi santralinin enerji ve finansal çıktısını tahmin etmek için genellikle PVsyst programını tercih ederler. Simülasyonlar, tasarımı ekipman özelliklerine ve konfigürasyonlarına göre optimize ederek zamandan tasarruf sağlar.

PVsyst, ön tasarım ve proje tasarımı olmak üzere iki düzeyde güneş simülasyonu sunar.



Şekil 1.10. PVsyst

Proje dizayn kısmı seçildikten sonra saha kurulumu ile alakalı şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız, sulama sistemlerini içeren pompalama sistemleri ve DC şebeke olmak üzere dört seçenek belirtir.

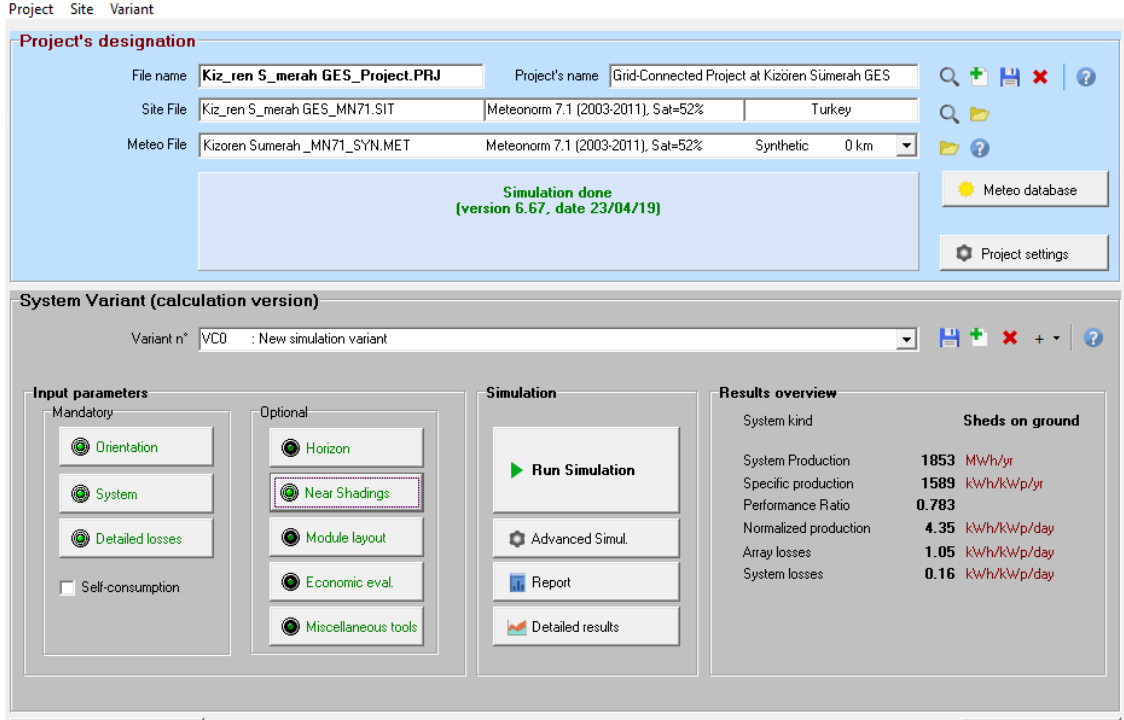
Metenorm veya NASA veri bağlantılarını kullanarak dünyanın herhangi bir lokasyonunda güneş radyasyonu, saatlik hava durumu gibi verilere ulaşımı sağlayarak raporlamanın gerçekçi sonuçlara dayanmasını sağlar.

File Name ve Project name bölümü doldurulur.

Site file bölümünde güneş enerjisi santralinin kurulması planlanan lokasyonu seçilerek verilerin proje ile ilişkilendirilmesi sağlanır. Daha sonra sistem tasarımında kullanılan konstrüksiyon(tek yönlü, çift yönlü, tek eksenli hareket edebilen vb.) ile eğim

açısı ve azimuth açılarını belirleyip sahanın güneşlenme miktarlarını hesaplamasını sağlarsınız.

System bölümünde sahada kullanılan panel ve evirici seçilerek, seri ve paralel modül bağlantı seçenekleri belirlenir. Evirici ve panel özelliklerini barındıran alt yapısı binlerce PV Modülü, evirici, akü, jeneratör ve pompa içerir. Bunlar piyasada bulunan ürünlerin kullanımını kolaylaştırır ve düzenli olarak güncellenir. Ek olarak, PVsyst, en son güneş PV modüllerini, eviricileri vb. eklememize/içe aktarmamıza izin verir. Hala alt yapıya eklenmemiş olan pv panelin PAN dosyasını PVsyst' e kolayca aktarabilirsiniz.



Şekil 1.11. PVsyst

Detailed losses bölümünden sistemin kayıp değerleri girilir. (Bu bölüme veri girişi yapılmamış proje standartları kullanılmıştır.)

Self consumption bölümünde öz tüketim verileri girilir. (Projede öz tüketim verileri girilmemiştir.)

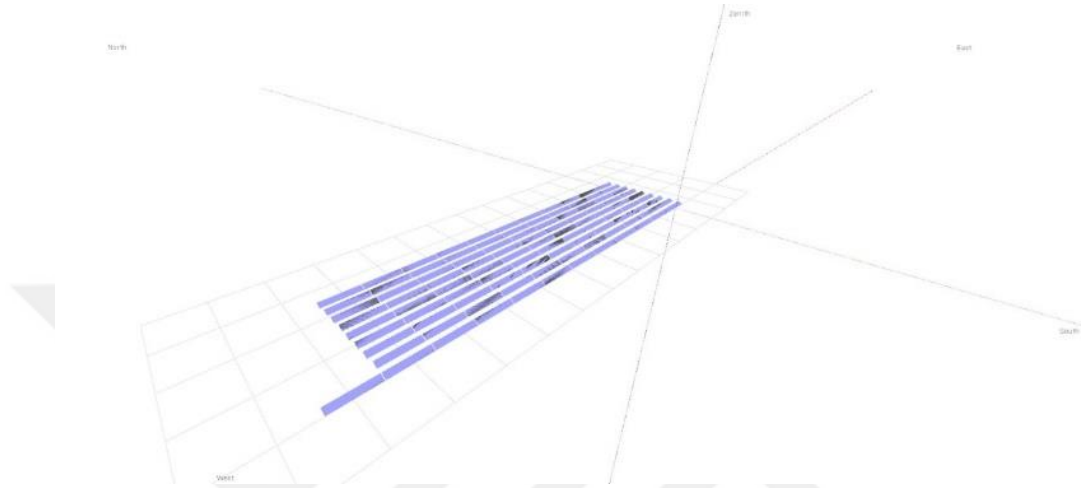
Near shadings ile sahayı uygulamada kuracağınız şekilde tasarlarsınız. 2 boyutlu çizim imkanı sunan program, sahadaki gölgelendirmeyi simülasyon ile gösterme imkanı sunmaktadır.

Module Input bölümünden FV panellerin MPPT ve dizi bağlantı seçenekleri belirlenir. Hangi panel gruplarının hangi eviricilere bağlanacağı seçilir.

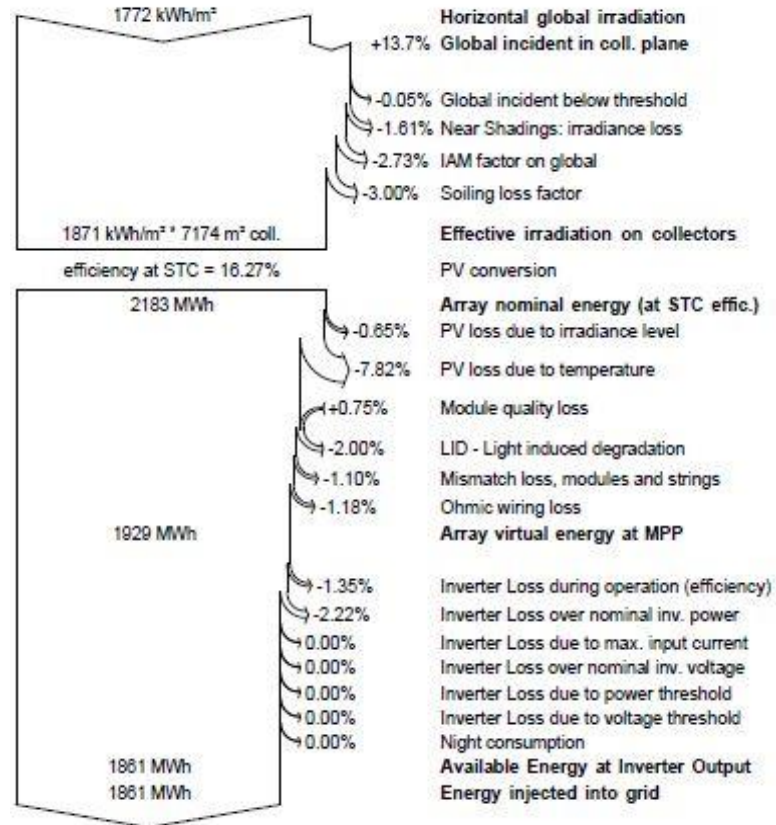
Energy management bölümünden güç faktörü, şebeke kısıtları gibi veriler girilir. (Bu bölüme veri girişi yapılmamış, program standartları kullanılmıştır.)

Economic Evaluation bölümünden ekonomik analiz için veri girişi yapılır. (Bu bölüme veri girişi yapılmamış, program standartları kullanılmıştır.)

Run Simulation bölümünden program çalıştırılıp ve rapor bölümünden sonuç raporu pdf. olarak çıktısı alınabilmektedir.



Şekil 1.12. PVsyst saha uygulaması yerleşim planı



Şekil 1.13. PVsyst saha uygulaması kayıp değerleri

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürdeki bulunan PV sistemlerin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizi çalışmaları arasında;

Joshi ve ark. 2009, Yeni Delhi için tipik bir gün için bir fotovoltaiik (PV) ve fotovoltaiik-termal (PV/T) sistemlerin deneysel verilerinin performans özelliklerini enerji ve ekserji verimliliklerine dayalı olarak araştırmışlardır. Enerji verimliliğinin sırasıyla minimum %33 ile maksimum %45 arasında değiştiğini, ekserji verimliliğinin (PV) sırasıyla minimum %7,8 ile maksimum %13,8 arasında değiştiğini bulmuşlardır.

Sukumaran ve Sudhakar 2018, Hindistan, Cochin Uluslararası Havalimanı'nda bulunan, gerçek hava durumu verilerine ve tesisin izlenen değerlerine dayalı olarak 12 MWp şebeke bağlantılı fotovoltaiik enerji santralinin enerji ve ekserji analizi üzerinde çalışmışlardır. Ekserji yıkımının maliyetini birim elektrik maliyeti cinsinden tahmin etmişlerdir. En yüksek enerji üretimi mart ayında, en düşük ise temmuz ayında gerçekleşmiştir. Tesisin yıllık enerji verimliliği %16,4 ile %13,33 arasında değişirken, ekserji verimliliği %9 ile %10 arasında değişmiştir. Ekserji yıkımının maksimum ve minimum maliyeti sırasıyla 21,99 milyon INR ve 7,78 milyon INR olarak bulunmuştur.

Gaur ve Tiwari 2014, Farklı türdeki güneş pilleri için yarı saydam ve opak fotovoltaiik (PV) modüllerin eksergoekonomik ve çevresel ekonomik analizlerini yapmışlardır. Yeni Delhi, Hindistan iklim koşulları için EXCEM yöntemiyle belirlenen yıllık elektrik ve net bugünkü değerler yarı saydam PV modüller, opak olanlara kıyasla daha yüksek net enerji kaybı oranı (L_{en}) ve net ekserji kaybı oranı (L_{ex}) göstermiştir.

İzgi ve Akkaya 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Parkı'nda inşa edilen 750 Wp'lik bir güneş fotovoltaiik (PV) sisteminin eksergoekonomik analizi üzerinde çalışmışlardır. Sistemin ekonomik değerleri ekserji, maliyet, enerji ve kütle (EXCEM) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Ağustos ve nisan ayı birim maliyetini sırasıyla 0,214 W/\$ ve 0,129 W/\$, ağustos ve nisan ayı için ortalama birim maliyetini sırasıyla 0,222 W/\$ ve 0,134 W/\$ olarak belirlemişlerdir.

Hepbaşlı ve diğerleri 2016, Yaşar Üniversitesi'nde Kurulu BIPV sistemini değerlendirmek için ekserji, maliyet, enerji ve kütle (EXCEM) analiz yöntemini

kullanmıştır. Enerji ve ekserji terimlere dayalı eksergoekonomik parametreler, günlük ortalama değerler sırasıyla 0,315 ve 0,293 olmak üzere 0,001 ila 0,714 W/€ ve 0,001 ila 0,664 W/€ arasında belirlenmiştir.

Rahnama ve diğerleri 2019, İran'ın gerçek iklim şartlarında 100 kW şebeke bağlantılı polikristal PV paneller kullanılan enerji sisteminin eksergoekonomik ve eksergoçevre haritaları üzerinde çalışmışlardır. Eksergoekonomik analiz için SPECO yöntemini kullandılar. En yüksek yıllık ortalama ekserji verimliliği 14,2% olarak Erdebil'de, en düşük 13,2 %Ahwaz ve Bandar-e-Abbas belirlemişlerdir. Yıllık elektrik üretimi, Zahedan için minimum 28,2 USD/GJ değerinden Rasht için maksimum 44,2 USD/GJ değerine kadar değişmiştir.

Hepbaşlı ve ark. 2018, gerçek operasyonel verilere dayalı olarak SPECO yöntemini kullanarak İzmir Yaşar Üniversitesinde kurulu bir BIPV sisteminin termoeekonomik analizi ve değerlendirilmesi üzerinde çalışmıştır. Çalışmalarına göre günlük ortalama enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 10,7–12,7% ve 11,4–13,6% aralığında belirlenmiştir. Elektriğin yıllık ekserji maliyeti 0,368 €/kWh olarak bulunmuştur.

Ogbannaya ve diğerleri 2019, Yaptıkları çalışmada bir fotovoltaiik (PV) modülden dönüşüm ve kullanım kayıplarının geri kazanılmasının etkilerinin incelenmesi için yeni bir enerji ve ekserji verimliliği geliştirme analizi (EEEEA) önermişlerdir. Ve dört farklı entegre enerji sisteminin analizini yapmışlardır. Bunlar:

- 1.PV-Akü
- 2.Fotovoltaiik-termal (PV/T)-Akü
3. PV-Akü Elektrolizör-Yakıt hücresi
- 4.PV/T-Akü-Elektrolizör-Yakıt hücresi'dir.

Gerçek güneş radyasyonu ve sıcaklık verilerini diğer veriler ile birleştirerek veriler elde etmişlerdir. Sistem 2' nin hem enerji hem de ekserji verimliliğinin, Sistem 1'e göre sırasıyla %27,89 ve %5,42 oranında arttığını, Sistem 3'ün enerji ve ekserji verimlilikleri, Sistem 1'e göre sırasıyla %3,11 ve %4,10 oranında azaldığını; Sistem 4'ün enerji ve ekserji verimlilikleri, Sistem 2'ye göre sırasıyla %21,92 ve %7,72 oranında azalırken, IES'lerin termodinamik verimlilikleri, sistem karmaşıklığı ile yükselmediği sonuçlarına ulaşmışlardır.

Hepbaşlı ve Abid 2015, çalışmasında Suudi Arabistan'ın Riyad kentinde gerçek verileri de kullanarak verimlilik modellemesinin önemini göstermek için bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada fotovoltaiik modüllerin enerji ve ekserji verimleri,

sürdürülebilirlik indeksi, iyileştirme potansiyeli faktörleri ve ekserji maliyetleri açısından performansları incelemiştir. Analizde ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı, rüzgar hızı, yoğunluğu ve havanın nemi gibi termodinamik değişkenler dikkate alınmıştır. İnceleme, olası iyileştirmeler için sistemde mevcut olan çeşitli ekserji kayıpları ve ekserji yıkımlarından kaynaklanan tersinmezliklerin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Enerji verimliliğinin sırasıyla %34,09 ile %52,14 arasında değiştiğini, ekserji verimliliğinin ise sırasıyla %0,16 ile %15,23 arasında değiştiğini hesaplamışlardır.

Emre Biçek ve arkadaşları 2020, Türkiye'nin konum itibarıyla en fazla güneşlenme alan illerinden Van'ın Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde kurulan 17kWp gücündeki fotovoltaik sistemlerin güç üretimini, meteorolojik değişkenlerinin etkisiyle incelemiş olup, çoklu doğrusal regresyon analizi kullanarak bir istatistiksel model çıkarımı yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda üretilen güç değişkeni için, saatlik güneşlenme şiddetinin en yüksek olumlu etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca saatlik nispi nem, saatlik rüzgar hızı, saatlik sıcaklık, saatlik bulutluluk oranında üretilen güç üzerinde istatistiksel olarak etkiye sahip olduğu ve durağanlık varsayımı sağlandıktan sonra elde edilen modelin R^2 'si 0,445 olarak hesaplamışlardır.

Eissa AL-SHAGEA ve ark. 2021, Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesinin binası çatısında Polikristal paneller kullanılarak kurulu gücü 5,1kW'lık sistemin enerji üretim değerleri ile PVsol, PVsyst ve GEPA programlarından alınan tahmini üretim değerleri karşılaştırılarak sistemin tahmini üretim performansı, 2018-2019 yılları arasında PVsyst verilerine göre %87,5-%91 GEPA performans yüzdesinin %96,6-%100 ve PVsol verilerine göre ise %97,3-%98,1 olarak gerçekleştiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca inceledikleri GES'in, sistem kurulum maliyetini 10,47 yılda amorti ettiği hesaplamış olup yerli üretim teşvik mekanizmaları dahil edildiğinde 3 yıl daha azalabileceği sonucuna varmışlardır. Bu fotovoltaik sistem için kabul edilebilir sınır aralığında ve değeri %14,6 kapasite faktörüne ulaşmışlardır.

Kanchan ve ark. 2012, bir odanın çatısına binaya entegre edilmiş yarı saydam fotovoltaik/termal (BISPV) sistemin enerji ve ekserji performansını değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. Altı farklı fotovoltaik (PV) modül dikkate alınarak enerji ve ekserji bazında karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlara göre maksimum yıllık elektriksel enerji 810 kWh ile kristal silisyum hücrenin (c-si) üzerine amorf silisyum hücrenin (a-si) yerleştirilmesiyle tasarlanan yapıdan (HIT şeklinde adlandırılır) elde edilmiştir. Maksimum yıllık ısı enerjisi ise 464 kWh ile amorf silisyum hücre yapısından elde

edilmiştir. Bu sonuçlara göre HIT yapının elektrik üretimi için, a-si hücrenin ise ısıtma yapılacak yerler için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak yıllık toplam ısı enerjisi (2497 kWh) ve ekserji (834 kWh) değerlerinin HIT yapıda maksimum olduğu sonucuna varmışlardır.

Ayadi O. ve ark. 2021, yaptıkları çalışmada Ürdün bölgesinde iki yüzeyli bir modülün elektriksel ve termal davranışını deneysel olarak araştırmak için bifacial panel ile üç farklı panel tipinin (half-cut, mono-perc ve polikristal panel) performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Ürdün Üniversitesi Mühendislik Okulu'nun çatısına 30°'lik bir eğim açısı güneye bakacak şekilde dört PV modülü yerleştirmişlerdir. Gerekli tüm sistem parametrelerini (akım, voltaj, hücre ve ortam sıcaklıkları ve panellerin ön ve arka taraflarında güneş radyasyonu) ölçebilen eksiksiz bir veri toplama sistemi tasarlayıp bu sistemi kurduktan sonra 5 hafta boyunca ölçümler yapmışlardır. PV modülleri için sıcaklık ölçümleri, ölçülen sıcaklıkların modül yüzeyindeki sensör konumundan ne de monte edildiği modül tarafından etkilenmediğini göstermiştir. Ayrıca iki yüzeyli modül sıcaklıklarının diğer modüllerin sıcaklıklarına benzer olduğu bulunmuştur. Enerji açısından bakıldığında, bifacial modül ekim ve kasım aylarında beş haftalık bir süre boyunca monoperc, halfcut ve polikristal panellere kıyasla sırasıyla %9,9, %13,1 ve %24,9 daha fazla enerji ürettiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu sonuçlarla, iki yüzeyli PV panellerin, bir PV santralinde enerji üretimini iyileştirmek için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Sudhakar K. Ve Srivastava 2014, T. Hindistan Bhopal'de bulunan Enerji Merkezi'nde kurulu fotovoltaik panel ile alakalı kapsamlı bir enerji ve ekserji analizini deneysel olarak yapmıştır. Bir güneş PV panelinin performansını araştırmak için parametrik çalışmalarda bulunmuşlardır. Bir yaz günü boyunca doğru ölçümlerle elde ettikleri deneysel veriler ile maksimum enerji verimliliğine yol açan optimum sıcaklığı bulmak için analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile:

1. Yapılan ölçümlerden çıkan sonuçlara göre; PV modüllerinin düşük bir ekserji verimliliğine (η_{ex} %8,5) sahip olduğunu bulmuşlardır. PV sistemiyle ilgili olarak, ekserji analizi, günümüzün silikon modüllerinin güneş radyasyonunun yüksek ekserji içeriğinden çok az yararlandığını göstermiştir.
2. Güneş panelinin enerji ve ekserji verim değerleri sırasıyla %6,4 ve %8,5 olarak hesaplamışlardır.
3. Ortam sıcaklığı arttıkça artan hücre sıcaklığı ve tersinmezlikler nedeniyle PV ekserji verimliliği azalırken, çıkan elektrik miktarının arttığını

gözlemlemişlerdir. PV modülünün ekserji verimliliği, güneş radyasyon yoğunluğunun artmasıyla başlangıçta artar ve maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalır.

4. Bu ölçümlerden alınan sonuçlar ile güneş panelinin tasarımının ve kullanımının optimizasyonu, ekserji analizi yoluyla yapılabileceğini öne sürmüş ve bir güneş panelinin termodinamik verimliliğini optimize ederken, hem tasarım hem de işletim parametreleri dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Joshi A.S., Dincer I., ve Reddy B.V. 2014, Hindistan'ın başkenti Yeni Delhi'de 2006 yılının mart ayında hazırlanan deneysel verilere dayanan çalışmalarında sırasıyla enerji ve ekserji verimliliğine dayalı bir fotovoltaik (PV) ve fotovoltaik-termal (PV/T) sistemin performans özellikleri ile ilgili araştırma yapmışlardır. PV sistemi güneş enerjisini DC elektrik enerjisine dönüştürürken, PV/T sistemi elektrik enerjisi üretimi ile birlikte güneş radyasyonunun termal enerjisini de kullanır. PV ve PV/T sistemleri için ekserji verimliliği, PV ve PV/T performansının ve olası iyileştirmelerinin incelenmesinde faydalı olması açısından geliştirilmiştir. Bir PV sistemine ve bileşenlerine ekserji analizi, ekserji akışını, kayıpları ve enerji, ekserji ve güç dönüşüm verimliliği gibi çeşitli verimlerini değerlendirmek için uygulamışlardır. Sistemin enerji verimliliği termodinamiğin birinci yasasına dayalı olarak ve termodinamiğin ikinci yasası ile güneş ışıınımı ekserji değerlerini içeren ekserji verimliliği de hesaplanmış olup güneş ışıınımı ekserjisi değerleri kullanılarak PV sisteminin sonuçlarının daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Enerji verimliliğinin sırasıyla minimum %33 ile maksimum %45 arasında değiştiği, karşılık gelen ekserji verimliliğinin (PV/T) minimum %11,3 ile maksimum %16 arasında değiştiği ve ekserji verimliliğinin (PV) sırasıyla minimum %7,8 ile maksimum %13,8 arasında olduğu hesaplanmıştır.

Pathak M.J.M., ve arkadaşları 2014, üç farklı lokasyon olan Detroit, Denver ve Phoenix'de aylık ortalama sıcaklık ve güneş akısındaki farklılıklar dikkate alınarak simülasyon yaptılar. 4 farklı sistemi inceleyerek gerçekleştirdikleri simülasyonlarda kullandıkları sistemler;

1. Geleneksel iki panelli fotovoltaik güneş enerjili hibrit sistem (PVTx2),
2. Yan yana yerleştirilmiş fotovoltaik ve termal sistem (PV+T),
3. İki adet panel yerleştirilip hazırlanan fotovoltaik sistem,
4. Sınırlı bir çatı alanına sahip uygulamalar için üstün teknik güneş enerjisi sistemlerini belirlemek için özdeş soğurucu alanlara sahip iki panelli bir güneş enerjisi sistemi için ekserji analizi yapıldı.

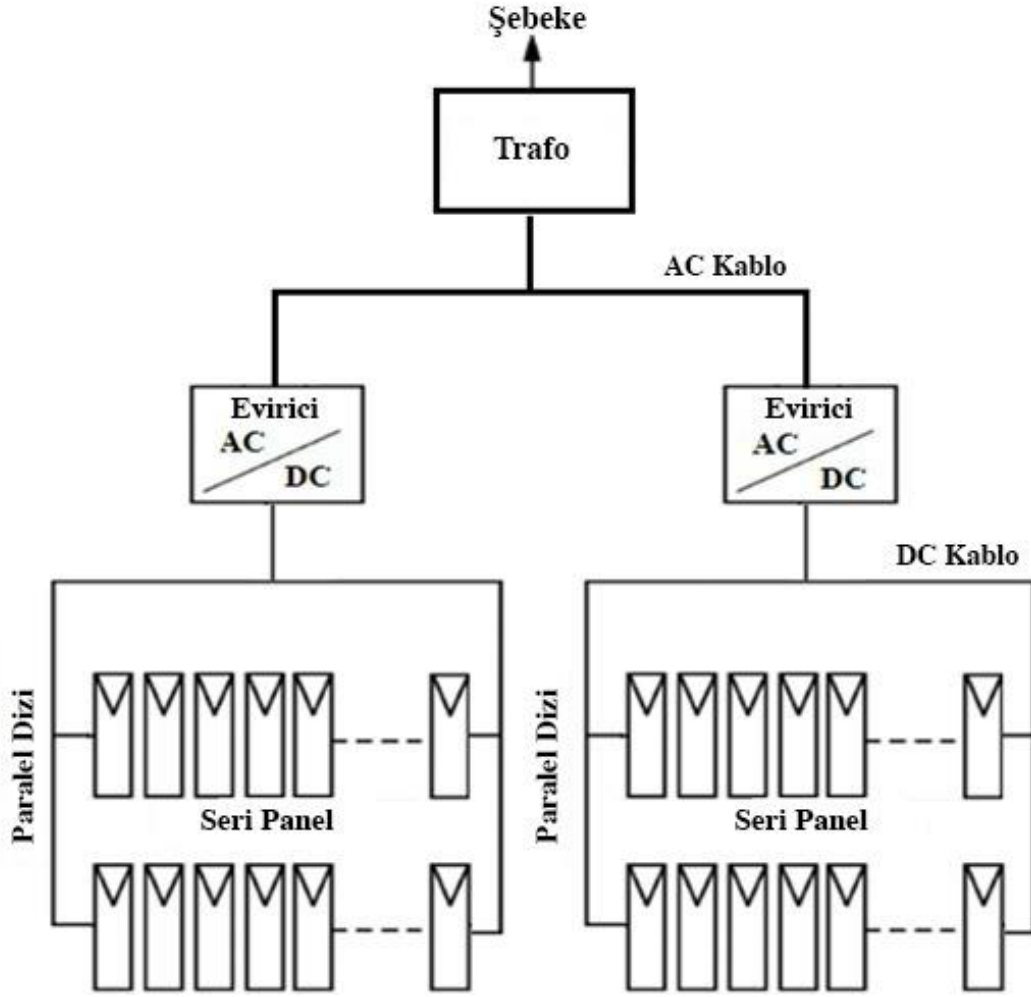
Ekserji analizi sonuçları, PVT sistemlerinin tüm lokasyonlar için PV + T sistemlerinden %69 daha iyi performans gösterdiğini, 3 numaralı PV sistemlerle karşılaştırıldığında %6,5 ile

%8,4 arasında daha fazla ekserji ürettiğini ve saf güneş termalinden 4 kat daha fazla ekserji yarattığını göstermektedir. Üretilen tüm termal ve elektrik enerjisini kullanabilen PVT sistemlerinin ekserji performansında PV + T veya PV sadece sistemlere göre daha üstün olduğunu açıkça görüp belirtmişlerdir.

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Sistem Tanıtımı

Güneş enerjisi sisteminin şeması Şekil 3.1' de sunulmuştur. Kurulu sistem 1166 kWp nominal güçtedir. Sistemde polikristal PV paneller kullanılmıştır. Paneller 25° tilt açısı ve 0° azimut açısı ile Konya ili sınırları içinde 38.15° N enlem ve 33.17° E boylamda araziye kurulmuştur. Sistemin temel elemanları birbirine paralel ve seri olarak bağlı PV paneller, eviriciye kadar DC kablolar, eviriciler, evirici sonrası AC kablolar ve transformatörden oluşmaktadır. Aynı nominal güç için sistemde perc monokristal halfcut ve perc monokristal paneller kullanılması durumu için analiz çalışmaları yapılmıştır. Her üç durum için sistemde kullanılan panel ve evirici özellikleri ve adetleri Çizelge 3.1.'de sunulmuştur. Makalede tablolarda ve metinlerde perc monokristal halfcut ve perc monokristal paneller kısaca halfcut ve monoperc olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.1. Fotovoltaik Sistem Şematik Gösterimi

Çizelge 3.1. Fotovoltaik Sistemde kullanılan panel ile eviricilerin sayı ve özellikleri

pV Panel	Hücre tipi	Polikristal	Hulfcut	Monoperc
	Modeli	PW-DC-265-P-60	PW-DC-450-166M-72x2	PW-DC-400-M-72
	Nominal gücü	265 Wp	450 Wp	400 Wp
	Paraleldeki hücre sayısı	200	162	162
	Serideki hücre sayısı	22	16	18
	Açık devre voltajı (V_{oc})	38,68 V	48,46 V	49,37 V
	Kısa devre akımı (I_{sc})	8,96 A	11,39 A	10,51 A
	Maksimum güç noktasındaki voltaj (V_{mpp})	31,42 V	41,48 V	39,87 V
	Maksimum güç noktasındaki akım (I_{mpp})	8,44 A	10,86 A	10,04 A
	Nominal çalışma hücre sıcaklığı (NOCT)	48 °C	45 °C	45 °C

	Doldurma faktörü	0,764	0,816	0,771
	Toplayıcı Alanı	6425 m ²	5146 m ²	5291 m ²
Evirici	Model adı	SUN2000-40KTL	SUN2000-100KTL	SUN2000-100KTL
	Birim Nominal Gücü	40 kWac	100 kWac	100 kWac
	Çalışma gerilimi	200–1000 V	200-1100 V	200-1100 V
	Toplam Evirici sayısı	25	10	10

3.2. Hesap Yöntemleri

3.2.1. Enerji Analizi

PV panelin enerji verimi, elektrik üretim değerinin panele enerji girişine oranı olarak tanımlanır. Panelde elektrik üretimi doğru akım (DC) olarak gerçekleşir. Eviricide AC akıma dönüştürülür. PV panellerin nominal özelileri 1000 kW ve 25°C standart test şartlarında belirlenir. PV panelin elektrik üretim değeri standart test şartlarında elde edilenden farklı olarak PV üzerine gelen güneş ışınımına ve çevre sıcaklığına göre, enerji girişi ise panel üzerine gelen güneş ışınımına bağlı olarak değişir. PV panelin saatlik elektrik üretim değerinin radyasyona ve çevre sıcaklığına bağlı olarak standart test koşullarına göre değişimini belirlemek için öncelikle PV panelin sıcaklığı 3.1 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$T_{cell} = T_{amb} - \frac{(NOCT-20)*G}{800} \quad (^\circ C) \quad (3.1)$$

Burada T_{cell} , T_{amb} , NOCT ve G sırasıyla panel sıcaklığını, çevre sıcaklığını, nominal çalışma hücre sıcaklığı koşullarını ve solar radyasyon değerlerini ifade etmektedir. Atmosferik şartlara göre değişen açık devre voltajı 3.2 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$V_{OC}^* = V_{OC} * \frac{(100 - ((T_{cell} - 25) * T_{ec}))}{100} \quad (V) \quad (3.2)$$

Burada V_{OC} , ve T_{ec} sırasıyla standart test koşullarındaki açık devre voltajını ve sıcaklığa bağlı voltaj değişim katsayısını ifade etmektedir. Aynı atmosferik şartlarda panelin kısa devre akımı 3.3 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$I_{SC}^* = I_{SC} * \frac{G}{1000} \quad (A) \quad (3.3)$$

burada I_{SC} , standart test şartlarındaki kısa devre akımını, G eğik yüzeye gelen ışınım miktarını ifade etmektedir. Bu durumda panelin atmosferik şartlardaki enerji elektrik üretim değeri 3.4 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$P_{\max}^* = V_{OC}^* * I_{SC}^* * FF = V_{MP}^* * I_{MP}^* \quad (\text{kW}) \quad (3.4)$$

burada FF, sırasıyla fill factor değerleri, V_{MP}^* ve I_{MP}^* atmosfer şartlarına göre maksimum voltaj ve akım değerleridir. Panel enerji giriş değeri $\dot{E}_{in,pv}$, ortalama güneş radyasyonu ve toplam panel alanına göre eşitlik 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{in,pv} = A_{PV} * G \quad (\text{kWh}) \quad (3.5)$$

PV panelin saatlik enerji verimi, enerji çıkışının ve enerjisi girişine oranı olarak 3.6 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{E}_{out,pv}}{\dot{E}_{in,pv}} = \frac{P_{\max}^*}{\dot{E}_{in}} \quad (3.6)$$

PV panelinden sonra elektrik doğru akım kablosu, evirici alternatif akım kablosu ve trafodan geçerek şebekeye iletilir. Her bir geçiş elemanında belirli oranlarda elektriksel kayıplar meydana gelir. Doğru akım kablosunun, eviricinin, alternatif akım kablosunun ve trafonun kayıp yüzdeleri sırasıyla 1%, 3%, 1% ve 2,2% olarak kabul edilmiştir. Sistemde meydana gelen elektrik kayıpları 3.7 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{loss,sys} = P_{\max}^* * (1 + 3 + 1 + 2,2)\% \quad (\text{kWh}) \quad (3.7)$$

Bu durumda şebekeye aktarılan net enerji 3.8 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{out,sys} = \dot{E}_{out,pv} - \dot{E}_{loss} \quad (\text{kWh}) \quad (3.8)$$

Tüm sisteminin aylık ve yıllık enerji verimleri saatlik elektrik üretim değerleri kullanılarak ilgili zaman periyodundaki sistemdeki elektrik üretiminin ve sisteme enerji girişine oranı olarak 3.9 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{sys} = \frac{\int_{TP} \dot{E}_{out,sys}}{\int_{TP} \dot{E}_{in,sys}} \quad (3.9)$$

3.2.2. Ekserji Analizi

Sisteme giren yegâne ekserji panel yüzeyine gelen güneş enerjisinin ekserjisidir. Panel giren ekserji değeri ortalama çevre sıcaklığına, güneş sıcaklığına ve güneş radyasyonuna bağlı olarak 3.10 denklemi ile hesaplanmıştır (Petela, 1964).

$$\dot{E}_{sol,pv} = A_{PV} G \left[1 + \frac{1}{3} * \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} * \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) \right] \quad (\text{kWh}) \quad (3.10)$$

Burada T_a ve T_{sun} sırasıyla ortalama çevre sıcaklığı ve güneş sıcaklığıdır. Güneş

sıcaklığı 6000 K olarak alınmıştır. Genel olarak herhangi bir sistemde elektrik enerji ile ekserjisi aynıdır. Dolayısıyla PV panelinde güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü sonrasında panelin maksimum elektrik potansiyelini ifade eden atmosfer şartlarına bağlı ekserji değeri eşitlik 3.11 ile hesaplanmıştır. Güneş enerjisinin ekserjisi PV panelde üç şekilde yıkıma uğrar. Birincisi güneş ışıının elektrik enerjisine dönüşümü ile meydana gelen ekserji yıkımı, ikincisi PV de meydana gelen içsel ekserji yıkımı ve son olarak hücre ve çevre sıcaklığı farkı sonucu çevreye doğru olan ısı transferi ile meydana gelen ekserji yıkımıdır.

$$\dot{E}_{\text{elek,PV}} = V_{\text{OC}}^* \cdot I_{\text{SC}}^* \quad (\text{kWh}) \quad (3.11)$$

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü sırasında meydana gelen ekserji yıkımı eşitlik 3.12 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{\text{D,conv}} = \dot{E}_{\text{soll}} - \dot{E}_{\text{elec,PV}} \quad (\text{kWh}) \quad (3.12)$$

PV panelde meydana gelen içsel ekserji yıkımı panelin fill faktörüne bağlı olarak panelin ekserjisi ile panelden elektrik çıkışı arasındaki fark kadardır ve 3.13 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{\text{D,elek}} = \dot{E}_{\text{elec,PV}} - P_{\text{max}}^* = V_{\text{OC}}^* \cdot I_{\text{SC}}^* \cdot (1 - FF) \quad (\text{kWh}) \quad (3.13)$$

PV panelde ısı transferi ile meydana gelen ekserji yıkımı 3.14 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{\text{D,therm}} = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{cell}}}\right) \quad (\text{kWh}) \quad (3.14)$$

burada $\dot{Q}$, T_{amb} ve T_{cell} sırasıyla çevreye olan ısı kaybı, ortalama çevre sıcaklığı ve panel sıcaklığıdır. Fotovoltaik yüzeyden çevreye olan ısı kaybı 3.15 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Q} = U \cdot A_{\text{PV}} \cdot (T_{\text{cell}} - T_{\text{amb}}) = (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}) \cdot A_{\text{PV}} \cdot (T_{\text{cell}} - T_a) \quad (\text{kWh}) \quad (3.15)$$

Burada U toplam ısı transfer katsayısıdır ve konveksiyon ve radyasyon katsayılarının toplamıdır. Konveksiyon ısı transfer katsayısı 3.16 denklemi ile hesaplanmıştır (Bayrak ve diğerleri, 2017).

$$h_{\text{conv}} = 2.8 + 3 \cdot V_w \quad (\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (3.16)$$

Burada V_w saastlik ortalama rüzgâr hızıdır.

PV ve çevresi arasındaki ışıının ısı transfer katsayısı 3.17 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_{sky} - T_{cell}) * (T_{sky}^2 + T_{cell}^2) \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (3.17)$$

Burada ε ve σ ve sırasıyla emisyonu ve Stefan– Boltzmann sabitidir. Denklemde kullanılan gökyüzü sıcaklığı T_{sky} 3.18 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$T_{sky} = T_{amb} - 6 \quad (^\circ C) \quad (3.18)$$

PV panelin ekserji verimliliği, ekserji çıkışı ve ekserji girişi oranıdır. PV panelden ekserji çıkış değeri güneş enerjisinin ekserjisinden ekserji yıkımlarının çıkarılması ile 3.19 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Ex}_{out,PV} = \dot{Ex}_{soll} - \dot{Ex}_{dest,conv} - \dot{Ex}_{dest,elek} - \dot{Ex}_{dest,therm} = P_{max}^* - \dot{Ex}_{dest,therm} \quad (3.19)$$

PV panelin ekserji verimi 3.20 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\Psi_{PV} = \frac{\dot{Ex}_{out,pv}}{\dot{Ex}_{sol,pv}} = \frac{P_{max}^* - \dot{Ex}_{D,therm}}{\dot{Ex}_{sol,pv}} \quad (3.20)$$

Panel sonrası sistem elemanlarına giren ve çıkan enerji türü elektrik olması nedeniyle ekserji verimleri enerji verimleri ile aynıdır. Dolayısıyla sistem elemanlarındaki ekserji kaybı 3.21 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$Ex_{kayıp,comp} = \dot{Ex}_{out,PV}^* * (1 + 3 + 1 + 2,2)\% \quad (kWh) \quad (3.21)$$

Bu durumda şebekeye aktarılan net ekserji 3.22 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$Ex_{çıkış,sys}(kWh) = Ex_{çıkış,pv} - Ex_{kayıp,comp} \quad (3.22)$$

Sistemin exerji verimi aylık ve yıllık zaman periyotlarında sistemden çıkan ekserjinin sisteme giren toplam ekserji değerlerinin oranı olarak 3.23 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\Psi_{sys} = \frac{\int_{Tp} \dot{Ex}_{çıkış,sys}}{\int_{Tp} \dot{Ex}_{sol,sys}} \quad (3.23)$$

Eksergoekonomik analiz hesaplamalarda kullanılmak amacıyla tüm sistem bileşenlerinin ürün, yakıt ve yıkım ekserji, $\dot{Ex}_{P,k}$, $\dot{Ex}_{F,k}$ ve $\dot{Ex}_{D,k}$, değerleri hesaplanmış ve hesap denklemleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Fotovoltaik Sistemdeki yakıt, ürün ve yıkım ekserji denklemleri

Sistem Bileşeni	Yakıt Ekserjisi Denklemi	Ürün Ekserjisi Denklemi	Ekserji Yıkım Denklemi
PV	$Ex_{sol,pv}$	$Ex_{çıkış,pv} = P_{max} * \dot{E}_{yıkım,term}$	$\dot{E}_{Y,PV} = Ex_{sol,pv} - Ex_{çıkış,pv}$
DC Kablo	$Ex_{çıkış,pv}$	$Ex_{çıkış,dc kab} = 0,99 * Ex_{çıkış,pv}$	$\dot{E}_{Y,DC kab} = Ex_{çıkış,pv} - Ex_{çıkış,dc kab}$
Evirici	$Ex_{çıkış,dc kab}$	$Ex_{çıkış,evr} = 0,97 * Ex_{çıkış,dc kab}$	$\dot{E}_{Y,evr} = Ex_{çıkış,dc kab} - Ex_{çıkış,evr}$
AC Kablo	$Ex_{çıkış,evr}$	$Ex_{çıkış,AC kab} = 0,99 * Ex_{çıkış,dc kab}$	$\dot{E}_{Y,AC kab} = Ex_{out,inv} - Ex_{çıkış,AC kab}$
Trafo	$Ex_{çıkış,AC kab}$	$Ex_{çıkış,trafo} = 0,978 * Ex_{çıkış,AC kab}$	$\dot{E}_{Y,trafo} = Ex_{çıkış,AC kab} - Ex_{çıkış,trafo}$

3.2.3. Eksergoekonomik Analiz

Bu çalışmada, sistemin eksergoekonomik analizi için ekserji analizi ve ekonomik ilkelerin bir kombinasyonu olarak oluşturulan spesifik ekserji maliyetleme (SPECO) yöntemi kullanılmıştır (Lazeretto ve Tsatsaranis,2006). Fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri için eksergoekonomik maliyet dengesi 3.24 denklemi ile hesaplanmıştır (Rahnama ve diğerleri, 2019) (Hepbaşlı ve arkadaşları, 2018).

$$\dot{C}_s + \dot{Z}_{sys} = \dot{C}_e \quad (\$/MWh) \quad (3.24)$$

Burada $\dot{C}_s$, sisteme giren güneş ışınımının maliyet oranını, $\dot{C}_e$ üretilen elektriğin maliyet oranını, $\dot{Z}_{sys}$, tesisin yatırım maliyet oranınıdır. Aynı denklem birim eksergoekonomik maliyetine ve ekserji değerlerine bağlı olarak 3.25 denkleminde dönüştürülmüştür.

$$c_s * \dot{E}_s + \dot{Z}_{sys} = c_e * \dot{E}_e \quad (3.25)$$

Güneş enerjisi sisteminin yıllık yatırım oranı 3.26 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Z}_{sys,yıllık} = Z_{sys} * CRF * \varphi \quad (\$/yıl) \quad (3.26)$$

burada, Z_{sys} , CRF, φ sırasıyla sistemin toplam ilk yatırım maliyeti, sermaye geri kazanımı ve bakım faktörüdür. Sistemin toplam ilk yatırım maliyeti üç farklı panel tipi için Çizelge 3.3 de sunulmuştur. Sermaye geri kazanımı CRF, 3.27 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$CRF = \frac{i (i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1} \quad (3.27)$$

burada i ve n sistemin yıllık faiz oranını ve ekonomik ömrünü temsil etmekte olup sırasıyla 0,1 ve 25 yıl olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 3.3. Fotovoltaik Sistemin ilk yatırım maliyet değerleri

Sistem Bileşeni	İlk Yatırım Maliyet Değerleri (\$)		
	POLİKRİSTAL	HALFCUT	MONOPERC
PV	390660	498960	431568
DC Kablo	6440	4700	5208
Evirici	39000	43000	43000
AC Kablo	14570	8096	8085
Trafo	30000	29000	29000
Diğerleri	85000	78344	81939
Toplam	565670	662100	598800

Sistemin aylık yatırım oranı değerleri yıllık yatırım oranı kullanılarak 3.28 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Z}_{\text{sys,aylık}} = \frac{\dot{Z}_{\text{sys,yıllık}}}{H} * m \quad (\$/\text{ay}) \quad (3.28)$$

Burada, H ve m sırasıyla toplam yıllık ve aylık güneşlenme saatleridir.

Eksergoekonomik analizin önemli sonuçlarında birisi de sistem bileşenlerinin ekserji yıkım maliyet oranlarıdır. Ekserji yıkımının niceliğinin yanı sıra bu yıkımının maliyetini de hesaplanması tasarımcılara cihaz kalitesi ve maliyeti açısından fikir verir. Ekserji yıkım maliyeti cihazın ekserji yıkım değerinin cihazın yakıt birim maliyeti ile çarpımı ile bulunur. PV panelleri içeren güneş enerjisi sisteminde PV panel hariç tüm sistem elemanlarının yakıt ve ürün ekserjileri elektrik enerjisine bağlıdır. PV panelin ise yakıt ekserjisi güneş enerjisi olup birim maliyeti sıfırdır. Bu durumda PV panelin ekserji yıkımını maliyetlendirmek ancak tüm sistem elemanlarını yegâne ürünü olan elektriksel ekserjinin birim maliyeti ile mümkün olabilir. Dolayısıyla PV panel dâhil tüm sistem elemanlarının ekserji yıkım maliyet değerleri 3.29 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{C}_{D,k} = c_e \dot{E}_{D,k} \quad (\$/\text{yıl}) \quad (3.29)$$

Sistemi oluşturan herbir elemanın yıllık yatırım oranı elemanın ilk yatırım maliyetine göre yıllık ve aylık yatırım maliyetinin belirlenmesine benzer bir şekilde 3.30 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Z}_k = Z_k * CRF * \varphi \quad (\$/\text{ay}) \quad (3.30)$$

Bir sistem bileşeninin maliyet performansı, hem sisteminin yıllık yatırım oranına hem de sistemin ekserji yıkım maliyetine bağlıdır. Bu ifade eksergoekonomik faktör olarak tanımlanır. Eksergoekonomik faktör, cihaz yatırım oranının ekserji yıkım maliyeti ile toplamına oranını ile hesaplanır. Bu oran 0 ile 1 aralığındadır.

Eksergoekonomik faktör 0'a yakınsa, tersinmezliklerin maliyeti baskındır. Eksergoekonomik değer 1'e yaklaştığında, sermaye maliyeti daha büyük bir etkiye sahiptir (Beyan ve arkadaşları, 1995). PV sisteminin her bir bileşeni için maliyet performansı 3.31 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (3.31)$$

Geri ödeme süresi tüm sistemler için en önemli parametrelerden birisidir. Farklı PV modelleri için sistemin geri ödeme süreleri, ilk yatırım maliyetlerine ve yıllık kârlara göre belirlenmiştir. Her bir panel tipi kullanımı için sistemin birim elektrik üretim maliyeti eksergoekonomik yöntemle hesaplanmıştır. Elektriğin birim piyasa fiyatı ile maliyeti arasındaki fark kâr verir. Bu kâr değerinin yıllık elektrik üretimi ile çarpılması sistemin yıllık kârını verir. Sistemin geri ödeme süresini hesaplamak için her yılın kâr değeri, sistemin kurulduğu zamanı değerine dönüştürülmüştür. Yıllık kâr değerleri toplamının sistemin toplam ilk yatırım maliyetine ulaştığı, sistemin geri ödeme süresi olarak belirlenmiştir ve 3.32 denklemi ile hesaplanmıştır.

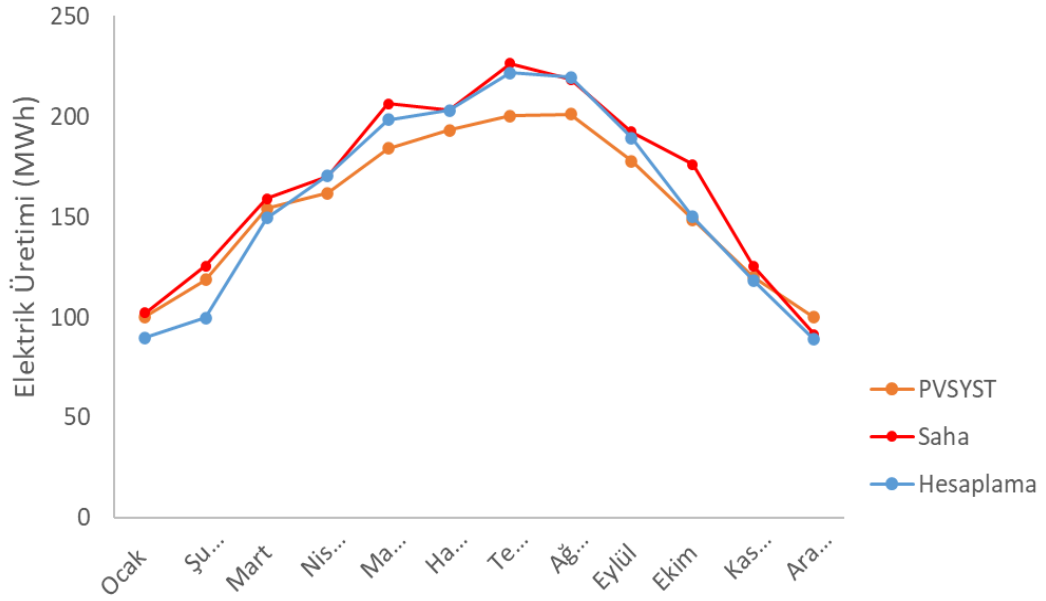
$$PBP = \sum_{n=1}^{n=25} \frac{(p_{elec} - c_e) * EG_{yillik}}{(1 + i)^n} \quad (3.32)$$

Burada, Z_{sys} , p_{elec} , c_{elec} , EG_{yillik} , n ve i sırasıyla sistemin ilk yatırım maliyetini, elektriğin piyasa fiyatını, elektrik üretim maliyetini, yıllık elektrik üretimini, sistemin ekonomik ömrünü ve yıllık faizi ifade eder.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Güneş enerjisi sisteminin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri sunulan hesap yöntemi ile yapılmıştır. Hesap yönteminin doğruluğunu araştırmak amacı ile hesap yöntemi ile elde edilen elektrik üretim değerleri polikristal panel kullanılan kurulu sistemin son dört yıl içinde aylık saha ve PVsyst yazılım sonuçları ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve Şekil 4.1' de sunulmuştur. Üç farklı üretim değerleri içerisinde aylara göre en yüksek aylık elektrik üretim değerleri araziden elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Hesap yöntemi ile elde edilen sonuçlar bazı aylarda saha üretim değerlerine, bazı aylarda PVsyst yazılım ile elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür. Yıllık toplam elektrik üretin değerine göre sahada yıllık ortalama 1996 MWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. PVsyst yazılım da yıllık elektrik üretimi 1860

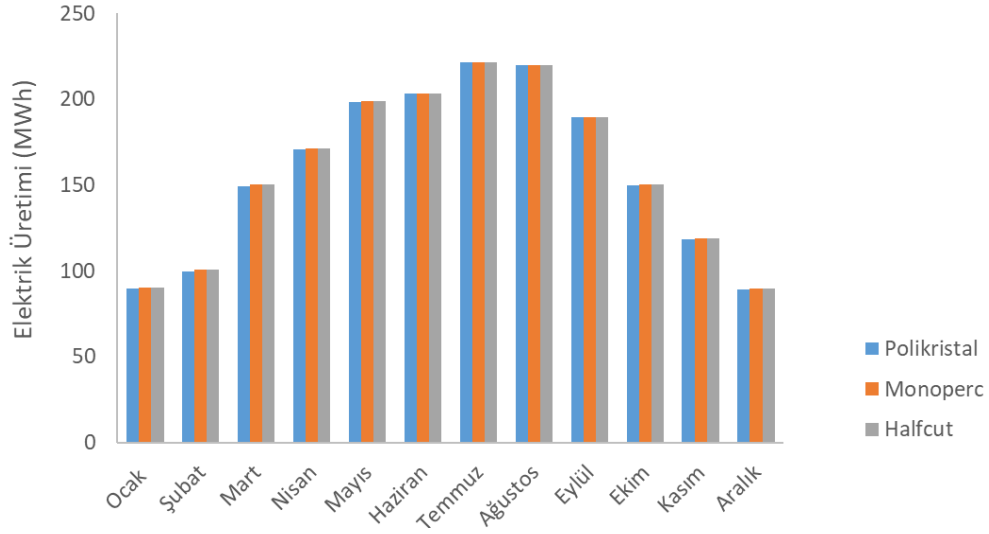
MWh, hesap yöntemi ile 1902 MWh olarak belirlenmiştir. Yıllık değerlere göre hesap yöntemi ile saha değerleri arasındaki fark 4,7%, PVsyst yazılım ile 2,3% fark tespit edilmiştir. Hesap yönteminin kabul edilebilir bir doğrulukta sonuçlar vermesi sonucu sistemin analizi üç farklı PV panel tipi için hesaplanan elektrik üretim değerlerine göre analiz edilmiş ve aylık ve yıllık olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1. Sistemin saha, PVsyst ve hesap yöntemi ile aylık elektrik üretim değerleri

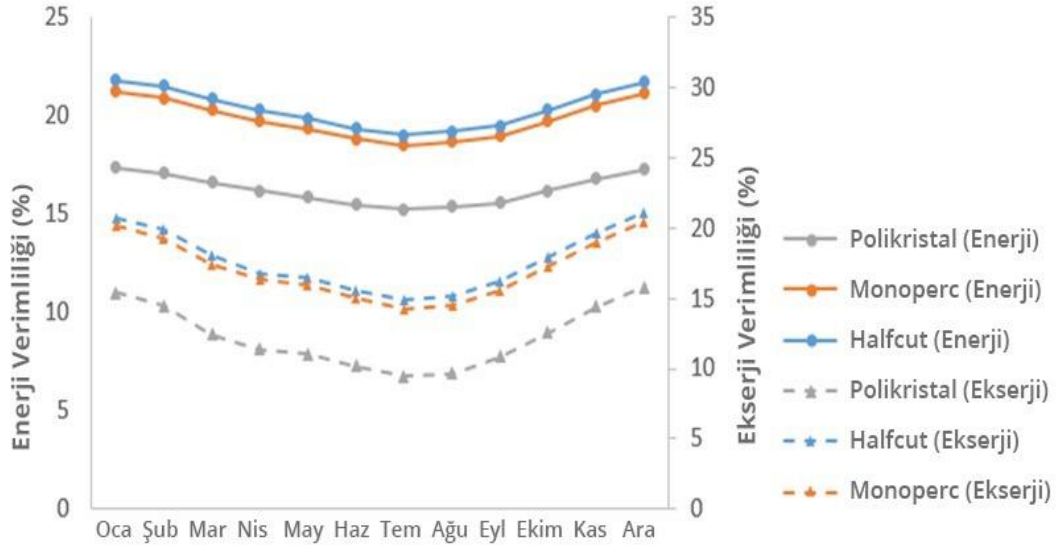
4.1. Aylık Sonuçlar

Güneş enerjisi sisteminin üç farklı panel tipi için aylık elektrik üretim değerleri Şekil 4.2 'de sunulmuştur. Tüm panel tipleri için elektrik üretimi en az aralık ayında, en fazla temmuz ayında belirlenmiştir. Elektrik üretiminin aylara göre farkı, güneş radyasyonuna ve güneşlenme saatlerine göre değişmektedir. Sistemin elektrik üretimi polikristal panel için minimum 89,0 MWh maksimum 221,7 MWh, halfcut ve monoperc paneller için her ayda eşit değerlerde minimum 89,6 MWh maksimum 221,6 MWh olarak belirlenmiştir.



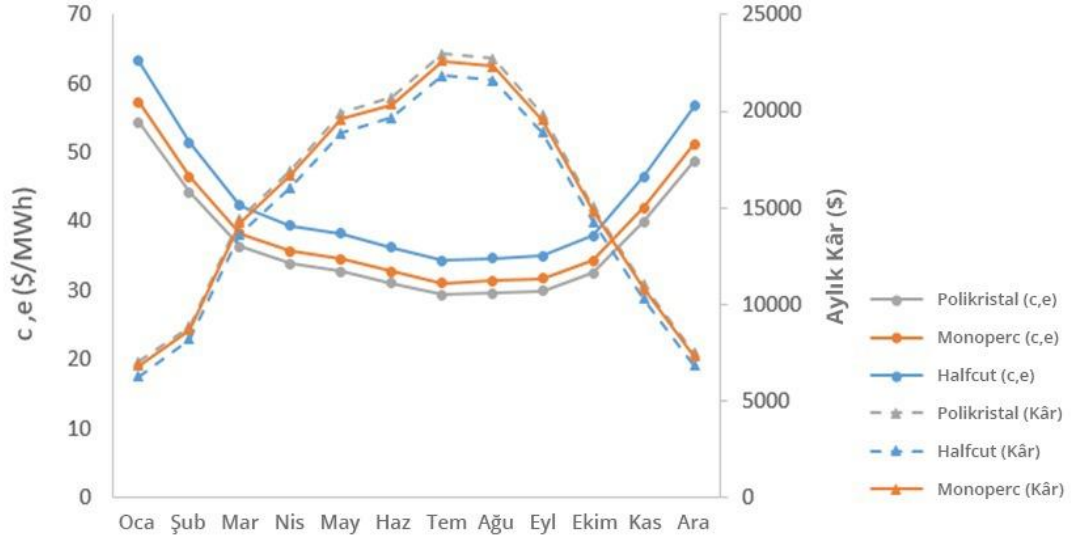
Şekil 4.2. Sistemin üç farklı panel tipi için aylık elektrik üretim değerleri

Güneş enerjisi sisteminin aylık enerji ve ekserji verimlerinin aylara göre değişimi Şekil 4.3 'de sunulmuştur. Tüm panel tipleri için enerji ve ekserji verimleri en az temmuz ayında, en fazla aralık ayında belirlenmiştir. Yaz aylarında panel elektrik üretim panel sıcaklığının artmasına bağlı olarak kış aylarına göre azalmaktadır. Bununla birlikte güneşlenme saatini uzun oluşu sistemin elektrik üretimini artırmaktadır. Sisteme giren güneş enerjisinin ve ekserjisinin yaz aylarında artmasına ve elektrik üretiminin artışının giren enerjisi ve ekserji değerlerine oranla azlığı sistemin enerji ve ekserji verimlerinin yaz aylarında azalmasına neden olmuştur. Panel tipleri arasında aynı ay için en yüksek verim değerleri halfcut, en düşük ise polikristal panel tipi için belirlenmiştir. halfcut panel tipi için enerji ve ekserji verimleri sırasıyla ocak ayında 21,8% ve 20,8%, temmuz ayında 19,0% ve 14,9% olarak hesaplanırken, aynı değerler polikristal panel tipi için sırasıyla ocak ayında 17,4% ve 15,4%, temmuz ayında 15,2% ve 9,4% olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3 Sistemin üç farklı panel tipi için aylık enerji ve ekserji verimlerinin aylara göre değişimi

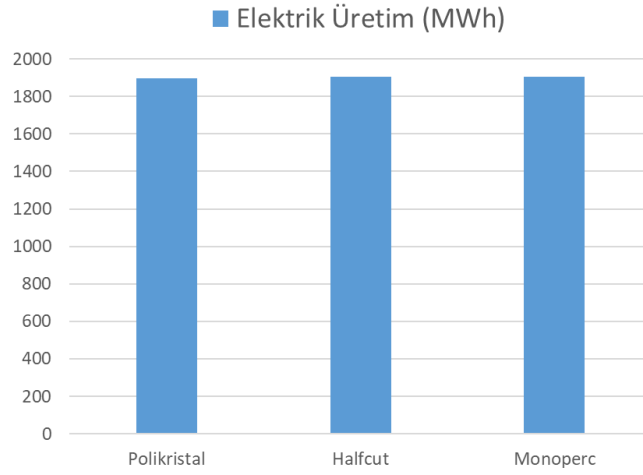
Eksergoekonomik analiz sonuçlarına göre elektrik maliyet oranının $\dot{C}_e$ ve sistemin aylık kâr değerlerinin aylara göre değişimi Şekil 4.4’de sunulmuştur. Tüm panel tipleri için elektrik maliyet oranı en yüksek ocak ayında, en düşük temmuz ayında belirlenmiştir. Ocak ayı elektrik maliyet oranı değerleri halfcut, monoperc ve polikristal panel tipleri için sırasıyla 63 \$/MWh, 57 \$/MWh ve 54 \$/MWh olarak belirlenirken, bu değerler temmuz ayı için 34 \$/MWh, 31 \$/MWh ve 29 \$/MWh olarak belirlenmiştir. Her üç panel tipi arasında ilk yatırım maliyetinin en fazla halfcut panel için olmasına bağlı olarak elektrik maliyet oranları yüksek çıkmıştır. Sistemin yatırım maliyetinin aylık karşılığının elektrik üretim değerine oranı olarak hesaplanan elektrik maliyet oranı soğuk aylarda daha yüksek, sıcak aylarda daha düşük hesaplanmıştır. Elektriğin satış fiyatı ile maliyet oranı arasındaki farka göre her üç PV panel tipi için sistemin aylık kâr değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.4 ’de sunulmuştur. Sistemin en kârlı olduğu ay her üç panel tipi için temmuz ayı iken en az kâr ocak ayında elde edilmiştir. Panel tipleri arasında en yüksek kâr düşük yatırım maliyeti dolayısıyla polikristal panel ile elde edilirken, en az kâr sistem yatırım maliyeti yüksek olan halfcut panel tipi için belirlenmiştir. Elektrik satış fiyatının 133 \$/MWh olduğu durumda panel tipleri arasında en yüksek aylık kâr 22970 \$ ile polikristal panel için temmuz ayında, en düşük kâr 6292 \$ ile halfcut panel tipi için ocak ayında elde edilmiştir.



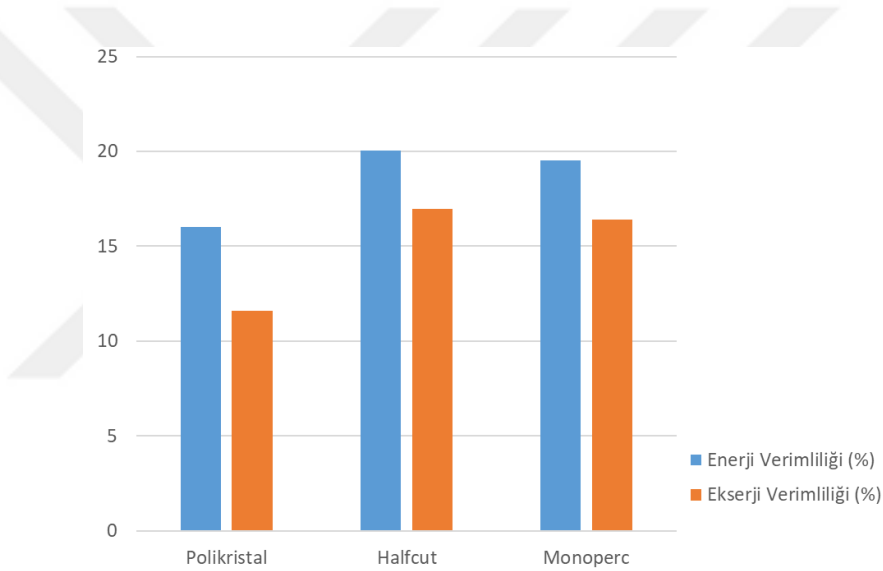
Şekil 4.4. Sistemin üç farklı panel tipi için elektrik maliyet oranları ve aylık kârları

4.2. Yıllık Sonuçlar

Güneş enerjisi sisteminin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri yıllık değerlere göre de yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle her üç panel tipi için sistemin yıllık elektrik üretim değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.5' de sunulmuştur. Tüm panel tipleri için yıllık elektrik üretimi birbirine yakın değerler olarak belirlenmiştir. Sistemin yıllık elektrik üretimi polikristal panel tipi için 1902 MWh, halfcut ve monoperc panel tipleri için ise 1908 MWh olarak belirlenmiştir. Yıllık elektrik üretimi birbirine yakın olması sistemin nominal gücünün her üç panel tipi için aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Lakin aynı nominal güç için gerekli alan panel tipine göre farklıdır. Yıllık elektrik üretiminin hesaplanması sonrası sisteme giren enerji ve ekserji değerlerine bağlı olarak enerji ve ekserji verimleri hesaplanmış ve Şekil 4.6' da sunulmuştur. En yüksek yıllık enerji verimi 20,1% ile halfcut hücre tipi ile elde edilirken onu 19,5% ile monoperc ve 16,0% ile Polikristal hücre izlemiştir. Yıllık ekserji verimleri ise halfcut için 17,0%, monoperc için 16,4% ile ve polikristal için 11,6% olarak belirlenmiştir. Her iki verim değerinin halfcut için yüksek, polikristal için düşük çıkmasının sebebi halfcut panel tipi için modül alanının en az, dolayısıyla sisteme giren güneş enerjisine bağlı enerji ve ekserjinin en az olması, polikristal panel tipi için ise bu durumun tam tersi olmasıdır.

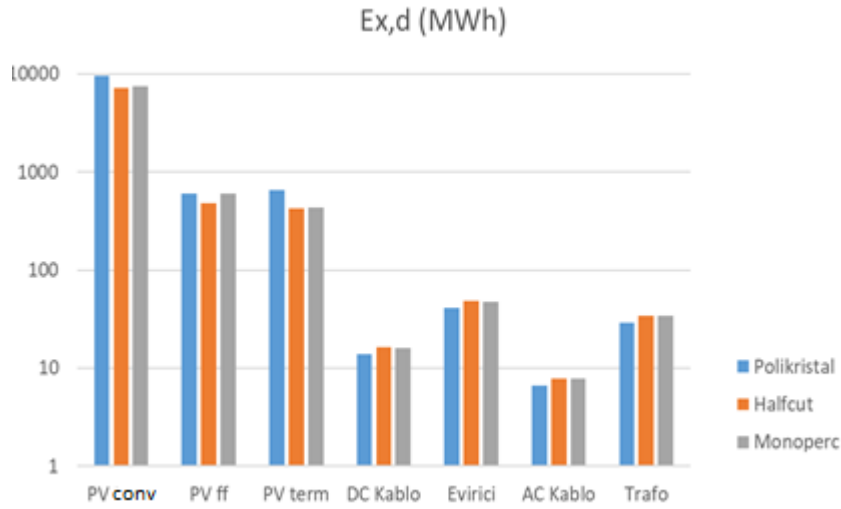


Şekil 4.5. Sistemin üç farklı panel tipi için yıllık üretim değerleri



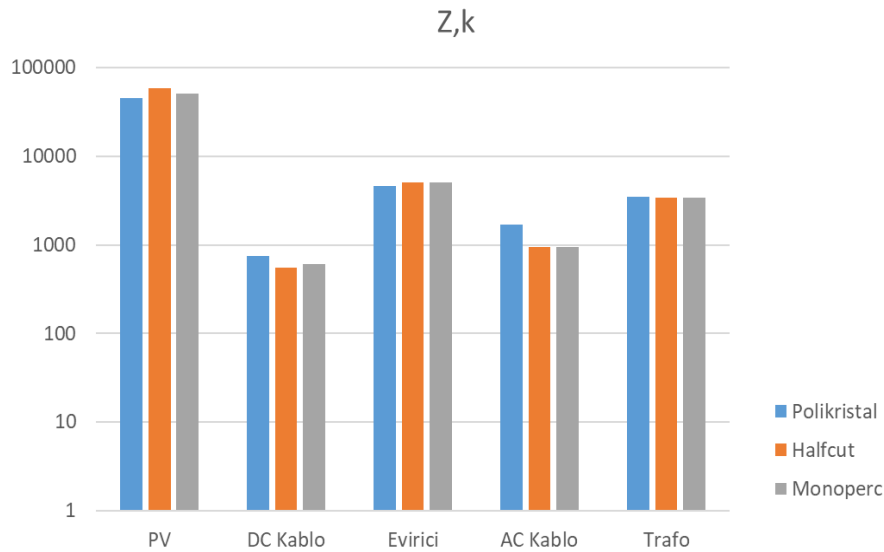
Şekil 4.6. Sistemin üç farklı panel tipi için enerji ve ekserji verimleri

Güneş enerjisi sistemini oluşturan her bir elemanın yıllık ekserji yıkım miktarları Şekil 4.7’ da sunulmuştur. Tüm sistemin toplam yıllık ekserji yıkımı polikristal, halfcut ve monoperc panel kullanılan sistemler için sırasıyla 9779 MWh, 7389 MWh ve 8251 MWh olarak sırasıyla belirlenmiştir. En fazla ekserji yıkımı diğer elemanlarla mukayese edilemeyecek şekilde en fazla PV panellerde meydana gelmiştir. Sistemde meydana gelen ekserji yıkımının tüm PV paneller için ortalama 86,1%’i güneş ışınımının elektrik enerjisine dönüşümü sırasında, 6,7%’ i içsel elektrik ekserji yıkımı sonucu, 5,9%’ i ısı transferi ile meydana gelmektedir. PV panel harici sistem elemanları arasında ekserji yıkımı en fazla sırasıyla 0,6% ile eviricide, 0,4% ile trafoda ve 0,2% ile AC ve DC kablolarda meydana gelmektedir.



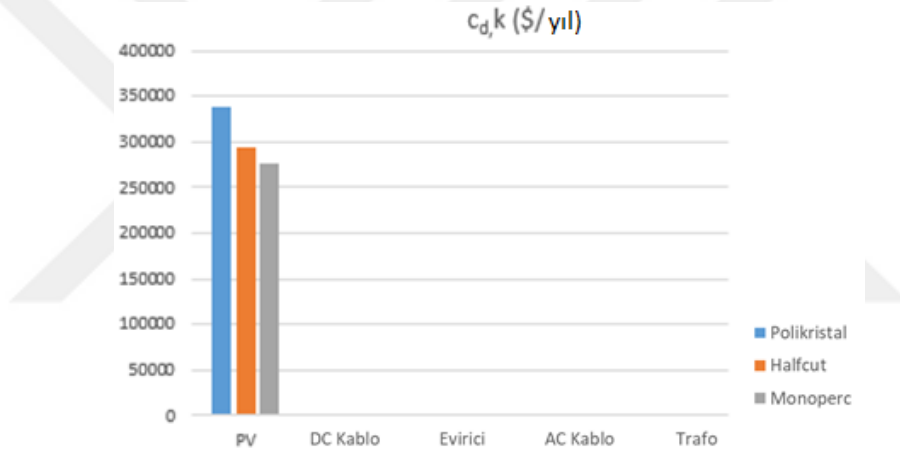
Şekil 4.7. Sistemin üç farklı panel tipi için sistem elemanlarının ekserji yıkım miktarları

Eksergoekonomik analiz kapsamında sistemi elemanlarının yıllık yatırım oranları hesaplanmış ve Şekil 4.8’ de sunulmuştur. En yüksek yıllık yatırım oranı sırasıyla PV panelde, eviricide, trafoda ve kablolarda belirlenmiştir. PV panel tiplerine göre en yüksek yıllık yatırım oranları halfcut, monoperc ve polikristal için sırasıyla 58268 \$/yıl 50398 \$/yıl ve 45621 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Halfcut ve monoperc için sistemlerdeki eviricinin ve trafonun yıllık yatırım oranları aynı değerlerde 5021- 3387 \$/yıl, polikristal panel tipleri için 4554- 3503 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. DC ve AC kabloların toplam yıllık yatırım oranları sistem büyüklüğüne bağlı olarak polikristal, monoperc ve halfcut panel tipleri için sırasıyla 2454 \$/yıl, 1552 \$/yıl ve 1494 \$/yıl olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8. Sistemin üç farklı panel tipi için sistem elemanlarının yıllık yatırım oranları

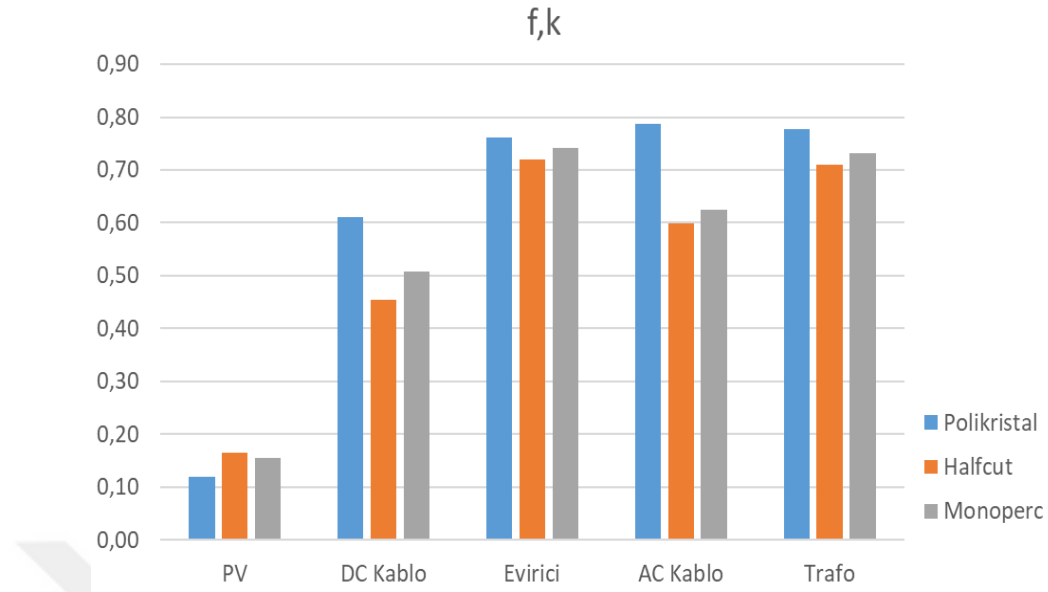
Sistem elemanlarının yıllık ekserji yıkımı ile elektrik maliyetinin çarpımıyla elde edilen ekserji yıkım maliyeti değerleri Şekil 4.9’ de sunulmuştur. Bu en yüksek ekserji yıkım maliyet değerleri PV panel için hesaplanmıştır. polikristal, halfcut ve monoperc panel tipleri için sırasıyla ekserji yıkım maliyeti değerleri 337530 \$/yıl, 294861 \$/yıl ve 275949 \$/yıl olarak belirlenmiştir. Polikristal panelde elektrik maliyeti en az olmasına rağmen ekserji yıkımı değerinin fazla olması ekserji yıkım maliyet değerinin en yüksek olmasını sağlamıştır. Halfcut panelin ekserji yıkımı en az olmasına rağmen elektrik maliyetinin yüksek oluşu ekserji yıkım maliyetinin monoperc panele göre daha yüksek olmasına neden olmuştur. Dolayısıyla bu durum sistem elemanlarının değerlendirilmesinde ekserji yıkımın miktarının yanı sıra bu yıkım maliyetinin de önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. Sistemin üç farklı panel tipi için sistem elemanlarının ekserji yıkım maliyeti değerleri

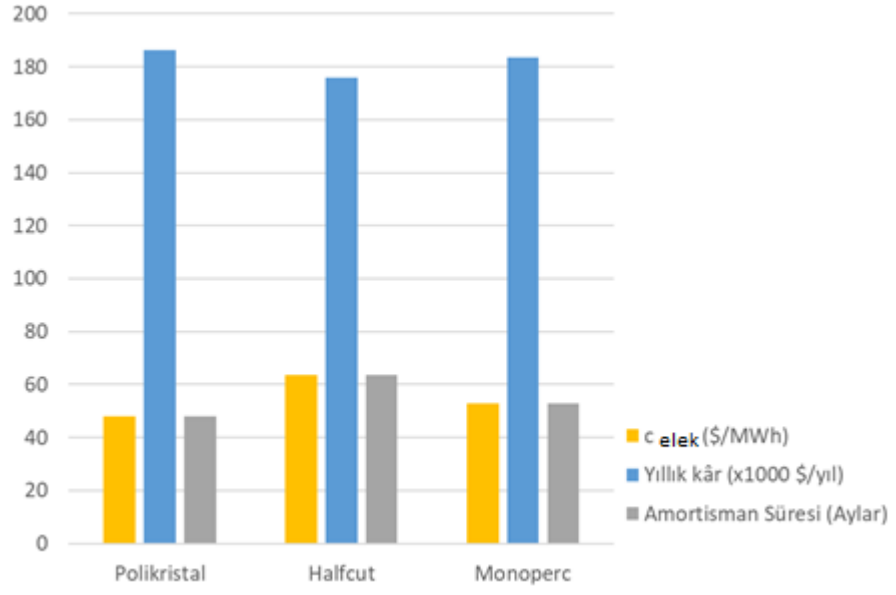
Güneş enerjisi sistemi elemanlarının eksergoekonomik faktör değerleri Şekil 4.10’da sunulmuştur. PV panellerin eksergoekonomik faktör değerleri Polikristal, halfcut ve monoperc panel tipleri için sırasıyla 0,12, 0,17 ve 0,15 olarak belirlenmiştir. Bu durum PV panellerdeki ekserji yıkım maliyetinin sermaye maliyetine göre daha baskın olduğunu göstermektedir. Sistemlerdeki diğer elemanlarda eksergoekonomik faktör değerleri sırasıyla, evirici için 0,76, 0,72, 0,74, trafo için 0,78, 0,71, 0,73 olarak belirlenmiştir. Eksergoekonomik faktörün 1 ‘e yakın olduğu evirici ve trafo değerleri her iki cihaz için sermaye maliyetinin ekserji yıkım maliyetine göre daha baskın olduğunun anlamına gelmektedir. DC ve AC kablolar için ise eksergoekonomik faktör değerleri sırasıyla 0,61, 0,45 ve 0,51 ve 0,79, 0,60 ve 0,62 olarak belirlenmiştir. Bu durum polikristal kullanılan sistem dışında kablo maliyet değerinin ekserji yıkım

maliyet yaklaşık birbirine eş etkide olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.10. Sistemin üç farklı panel tipi için sistem elemanlarının eksergoekonomik faktör değerleri

Güneş enerjisi sisteminin üç farklı panel tipi için elektrik üretim maliyeti, yıllık kârı ve geri ödeme süreleri Şekil 4.11'de sunulmuştur. Türkiye'de PV sistemleri ile üretilen elektriğin enterkonnekte sisteme satış fiyatı 133 \$/MWh' dir. Eksergoekonomik analiz sonuçlarına göre yıllık elektrik üretim maliyeti polikristal, halfcut ve monoperc için sırasıyla 35 \$/MWh, 41\$/MWh ve 37 \$/MWh olarak belirlenmiştir. Bu değerler sistemim yıllık elektrik üretim miktarları ile çarpıldığında Polikristal, half cut ve Monoperc panel tipleri için yıllık kâr değerleri sırasıyla 186891 \$/yıl, 176396 \$/yıl ve 183788 \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Sistemin farklı panel tipleri için geri ödeme süreleri yıllık kâr değerlerine ve ilk kurulum maliyetine göre hesaplanmıştır. Öngörülen 25 yıllık sistem ömrü içerisinde yıllık kâr değerlerinin kuruluş zamanı değerine dönüştürülmesi sonrasında başlangıçtan itibaren toplamının sistemin maliyet değerine ulaştığı süre geri ödeme süresi olarak belirlenmiştir. Geri ödeme süreleri polikristal, halfcut ve monoperc panel tipleri için sırasıyla 48 ay, 63 ay ve 53 ay olarak hesaplanmıştır. Geri ödeme süresinde panel veriminden daha çok panel maliyetinin süre üzerinde daha etkin olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.11. Sistemin üç farklı panel tipi için elektrik üretim maliyeti, yıllık kârı ve geri ödeme süreleri

4.3. Örnek Hesaplamalar

4.3.1. Enerji ve Ekserji Hesaplaması

Örnek hesaplama olarak önce panellerin enerji ve ekserji veriminin saat 11-12 arası için, sonra tüm sistem enerji ve ekserji verimi ocak ve temmuz ayı toplam değerlerine göre bulunuşu aşağıda sunulmuştur.

Panelin ocak ayı saat 11-12 arası için enerji verimi:

Tablo 3.1'den alınan verilere göre panelin nominal değerleri; gücü: 265W, açık devre voltajı 38.68V ve kısa devre akımı 8,96A' dir

Ocak ayı için saat 11-12 arası için çevre şartları:

Eğik yüzeye gelen güneş ışıınımı: 362 W

Çevre sıcaklığı: 2,6 °C

Rüzgâr Hızı: 4,9 m/s

Kolektör alanı: $22*200*1,46=6425 \text{ m}^2$ olmak üzere;

Sisteme giren enerji:

$$\dot{E}_{in,pv} = 6425 * 362 = 2325488 \text{ Wh}$$

Bir panelde standart test koşullarında üretilen enerji:

$$P_{max} = 38,68 * 8,96 * 0,7646$$

$$P_{max} = 264,99 = 265 \text{ Wh}$$

Çevre şartlarına göre hücre sıcaklığı:

$$T_{cell} = 2,6 - \frac{(48 - 20) * 362}{800} \quad T_{cell} = 15,27 \text{ °C}$$

Açık devre gerilimi:

$$V_{OC}^* = 38,68 * \frac{(100 + ((15,27 - 25) * (-0,324)))}{100} \quad V_{OC}^* = 39,90 \text{ V'dır.}$$

Kısa devre akımı:

$$I_{SC}^* = 8,96 * \frac{362}{1000} \quad I_{SC}^* = 3,244 \text{ A}$$

Panelde üretilen gücün miktarı:

$$P_{max}^* = 39,90 * 3,244 * [265 / (8,96 * 38,68)] * 200 * 22$$

Panel verimi:

$$\eta_{en,PV} = \frac{E_{out,pv}}{E_{in,pv}} = \frac{435398}{2325488} \quad \eta_{en,PV} = \%18,7$$

Sistemin ocak ayı için enerji verimi:

Sisteme ocak ayı boyunca 516,4 MWh enerji girişi olmuştur.

Sistemde ocak ayı boyunca panellerden toplam 96,5 MWh enerji çıkışı olmuştur.

Panellerden sonra sistem elemanlarında meydana gelen güç kayıpları:

$$En_{\text{sis kayıpları}} = 96,5 * (1 + 3 + 1 + 2,2)\% \quad En_{\text{sis kayıpları}} = 6,95 \text{ MW W}$$

Sistemden enerji çıkışı:

$$En_{\text{out,sys}} = 96,5 - 6,95 = 89,5 \text{ MWh}$$

Sisteme ocak ayı boyunca panellerden toplam enerji girişi toplam 516,4 MW olmuştur. Dolayısıyla ocak ayı enerji verimi

$$\eta_{\text{len,sys}} = \frac{89,5}{516,4} = 0,174 \text{ ile } \%17,4 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Panelin ocak ayı saat 11-12 arası için ekserji verimi:

Sisteme giren güneş ekserjisi:

$$\dot{E}x_{\text{soll,pv}} = 6425 * 362 \left[1 + \frac{1}{3} * \left(\frac{(2,6 + 273)}{6000} \right)^4 - \frac{4}{3} * \left(\frac{(2,6 + 273)}{6000} \right) \right]$$

$$\dot{E}x_{\text{soll,pv}} = 2183307 \text{ Wh}$$

Fotovoltaik panelden üretilen elektriğin ekserji:

$$\dot{E}x_{\text{elec,PV}} = 22 * 200 * 39,9 * 3,24 \quad \dot{E}x_{\text{elec,PV}} = 569423 \text{ Wh}$$

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü sırasında meydana gelen ekserji yıkımı:

$$\dot{E}x_{\text{dest,conv}} = 2183307 - 569423 \quad \dot{E}x_{\text{dest,conv}} = 1613883 \text{ Wh}$$

PV panelde meydana gelen içsel ekserji yıkımı:

$$\dot{E}x_{\text{dest,elec}} = 569423 * (1 - 0,8) = 134025 \text{ Wh}$$

Panelde ısı transferi ile oluşan ekserji yıkımını bulmak için öncelikle panel ve çevre arasındaki toplam ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır:

$$h_{\text{conv}} = 2,8 + 3 * 4,9 \quad h_{\text{conv}} = 17,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Gökyüzü sıcaklığı:

$$T_{\text{sky}} = 2,6\text{°C} - 6\text{°C} \quad T_{\text{sky}} = -3,4\text{°C}$$

$$h_{\text{rad}} = 0,89 * (5,67E - 0,8) * ((-3,4 + 273) - (15,27 + 273)) * ((-3,4 + 273)^2 - * (15,27 + 273)^2)$$

$$h_{\text{rad}} = 4,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Toplam ısı transfer katsayısı:

$$U = 17,5 + 4,4 = 21,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Toplam ısı transferi:

$$\dot{Q} = 21,9 * 6425 * (15,27 - 2,6) = 1781509 \text{ Wh}$$

Isı transferine bağlı ekserji yıkımı:

$$\dot{E}x_{dest,therm} = 1781509 * \left(1 - \frac{2,6 + 273}{15,27 + 273}\right) \quad \dot{E}x_{dest,therm} = 78300 \text{ Wh}$$

Panelden çıkan ekserji değeri:

$$\dot{E}x_{out,PV} = 2183307 - 1613883 - 134025 - 78300$$

$$\dot{E}x_{out,PV} = 357099 \text{ Wh}$$

Panel ekserji verimi:

$$\psi_{ex,pv} = \frac{\dot{E}x_{out,pv}}{\dot{E}x_{sol,pv}} = \frac{357099}{2183307} \quad \psi_{ex,pv} = 16,4$$

Sistemin ocak ayı için ekserji verimi:

Ocak ayında güneş enerjisi ile sisteme giren ekserji 484,6 MWh' dır.

Güneş ışıınının elektrik enerjisine dönüşümü ile meydana gelen ekserji yıkımı 358,5 MWh' dır.

PV de meydana gelen içsel ekserji yıkımı 29,7 MWh' dır.

ısı transferi ile meydana gelen ekserji yıkımı 16,1 MWh' dır.

Panelden çıkan ekserji değeri

$$484,6 - 358,5 - 29,7 - 16,1 = 80,4 \text{ MWh' dır.}$$

Panel sonrası sistem elemanlarına giren ve çıkan enerji türü elektrik olması nedeniyle ekserji verimleri enerji verimleri ile aynıdır. Dolayısıyla sistem elemanlarındaki ekserji kayıpları DC kablo, evirici, AC kablo ve trafoda meydana gelen ekserji yıkım sırasıyla 0,8 MWh, 2,4 MWh, 0,8 MWh, 1,7 MWh'dır.

Sistemden ekserji çıkışı

$$80,4 - 0,8 - 2,4 - 0,8 - 1,7 = 74,8 \text{ MWh' dır}$$

Dolayısıyla ocak ayı enerji verimi:

$$\Psi_{sys} = \frac{74,8}{484,6} = 0,154 \text{ ile } \%15,4 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Panelin temmuz saat 11-12 arası için enerji verimi:

Temmuz ayı için saat 11:00 için çevre şartları:

Eğik yüzeye gelen güneş ışıınını: 726 W

Çevre sıcaklığı: 26,3 °C

Rüzgâr Hızı: 5 m/s

Kolektör alanı: 22*200*1,46=6425 m² olmak üzere;

Sisteme giren enerji:

$$\dot{E}_{in,pv} = 6425 * 726 = 4664335,1 \text{ Wh}$$

Bir panelde standart test koşullarında üretilen güç:

$$P_{max} = 38,68 * 8,96 * 0,7646$$

$$P_{max} = 264,99 = 265 \text{ Wh}$$

Çevre şartlarına göre hücre sıcaklığı:

$$T_{cell} = 26,3 - \frac{(48 - 20) * 726}{800} \quad T_{cell} = 51,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Açık devre gerilimi:

$$V_{oc}^* = 38,68 * \frac{(100 + ((51,73 - 25) * (-0,324)))}{100} \quad V_{oc}^* = 35,33 \text{ V'dır.}$$

Kısa devre akımı:

$$I_{sc}^* = 8,96 * \frac{726}{1000} \quad I_{sc}^* = 6,5 \text{ A}$$

Panelde üretilen gücün miktarı:

$$P_{max}^* = 35,33 * 6,5 * [265 / (8,96 * 38,68)] * 200 * 22$$

$$P_{max}^* = 773203,3 \text{ Wh}$$

Panel verimi:

$$\eta_{en,pv} = \frac{E_{out,pv}}{E_{in,pv}} = \frac{773203,3}{4664335,1} \quad \eta_{en,pv} = \%16,6$$

Sistemin temmuz ayı için enerji verimi:

Sisteme temmuz ayı boyunca 1454,5 MWh enerji girişi olmuştur.

Sistemde temmuz ayı boyunca panellerden toplam 238,4 MWh enerji çıkışı olmuştur. Panellerden sonra sistem elemanlarında meydana gelen enerji kayıpları:

$$E_{sis \text{ kayıpları}} = 238,4 * (1 + 3 + 1 + 2,2)\% \quad E_{sis \text{ kayıpları}} = 16,7 \text{ MWh}$$

Sistemden enerji çıkışı:

$$E_{out,sys} = 238,4 - 16,7 = 221,7 \text{ MWh}$$

Dolayısıyla Temmuz ayı enerji verimi:

$$\eta_{en,sys} = \frac{221,7}{1454,5} = 0,152 \text{ ile } \%15,2 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Panelin Temmuz ayı saat 11-12 arası için ekserji verimi:

Sisteme giren güneş ekserjisi:

$$\dot{E}x_{soll,pv} = 6425 * 726 \left[1 + \frac{1}{3} * \left(\frac{(26,3 + 273)}{6000} \right)^4 - \frac{4}{3} * \left(\frac{(26,3 + 273)}{6000} \right) \right]$$

$$\dot{E}x_{soll,pv} = 4354093,9 \text{ Wh}$$

Fotovoltaik panelden üretilen elektriğin ekserji:

$$\dot{E}x_{elec,PV} = 22 * 200 * 35,33 * 6,5 \quad \dot{E}x_{elec,PV} = 1011212,22 \text{ Wh}$$

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü sırasında meydana gelen ekserji yıkımı:

$$\dot{E}x_{dest,conv} = 4354093,9 - 1011212,22 \quad \dot{E}x_{dest,conv} = 3342881,68 \text{ Wh}$$

PV panelde meydana gelen içsel ekserji yıkımı:

$$\dot{E}x_{dest,elec} = 1011212,22 * (1 - 0,8) = 23800852,3$$

Panelde ısı transferi ile oluşan ekserji yıkımını bulmak için öncelikle panel ve çevre arasındaki toplam ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır:

$$h_{conv} = 2,8 + 3 * 5 \quad h_{conv} = 17,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Gökyüzü sıcaklığı:

$$T_{sky} = 26,3\text{°C} - 6\text{°C} \quad T_{sky} = 20,3 \text{°C}$$

$$h_{rad} = 0,89 * (5,67E - 0,8) * ((20,32 + 273) - (51,73 + 273)) * ((20,32 + 273)^2 - (51,73 + 273)^2)$$

$$h_{rad} = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Toplam ısı transfer katsayısı:

$$U = 17,8 + 6 = 23,8 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Toplam ısı transferi:

$$\dot{Q} = 23,8 * 6425 * (51,73 - 26,3) = 3880852,3 \text{ Wh}$$

Isı transferine bağlı ekserji yıkımı:

$$\dot{E}x_{dest,therm} = 3880852,3 * \left(1 - \frac{26,3 + 273}{51,73 + 273} \right) \quad \dot{E}x_{dest,therm} = 303675,2 \text{ Wh}$$

Panelden çıkan ekserji değeri:

$$\dot{E}x_{out,PV} = 4354093,9 - 3342881,68 - 238008,9 - 303675,2$$

$$\dot{E}x_{out,PV} = 469528,1 \text{ Wh}$$

Fotovoltaik sistemde gerçekleşen ekserji verimi:

$$\psi_{ex,pv} = \frac{\dot{E}x_{out,pv}}{\dot{E}x_{sol,pv}} = \frac{469528,1}{4354093,9} \quad \psi_{ex,pv} = 10,7$$

Sistemin temmuz ayı için ekserji verimi:

Ocak ayında güneş enerjisi ile sisteme giren ekserji 1357,1 MWh' dır.

Güneş ışıınının elektrik enerjisine dönüşümü ile meydana gelen ekserji yıkımı 1045,4 MWh' dır.

PV de meydana gelen içsel ekserji yıkımı 67,2 MWh' dır.

Isı transferi ile meydana gelen ekserji yıkımı 100,7 MWh' dır.

Panelden çıkan ekserji değeri

$1454,5 - 1045,4 - 67,2 - 100,7 = 137,7$ MWh' dır.

Panel sonrası sistem elemanlarına giren ve çıkan enerji türü elektrik olması nedeniyle ekserji verimleri enerji verimleri ile aynıdır. Dolayısıyla sistem elemanlarındaki ekserji kayıpları DC kablo, evirici, AC kablo ve trafoda meydana gelen ekserji yıkımı sırasıyla 1,4 MWh, 4,1 MWh, 1,3 MWh, 2,9 MWh'dır.

Sistemden ekserji çıkışı

$137,7 - 1,4 - 4,1 - 1,3 - 2,9 = 128,0$ MWh' dır

Dolayısıyla ocak ayı enerji verimi:

$$\Psi_{\text{sys}} = \frac{128,0}{1357,1} = 0,094 \text{ ile } \%9,4 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

4.3.2.Eksergoekonomik Analiz Örnek Hesaplama

Üç farklı panel tipi arasında eksergoekonomik analiz örnek hesabı, polikristal panel tipi için yapılmıştır. Hesap aşamaları aşağıda sunulmuştur.

1.Sistemin aylık ve yıllık yatırım oranlarının belirlenmesi:

Polikristal panel ile kurulan sistemin toplam maliyet değeri:

$$Z_{\text{sistem, yıllık}} = 565.670\$$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,yıllık}} = Z_{\text{sistem}} * CRF * \varphi$$

$$\dot{Z}_{\text{sys,aylık}} = \frac{\dot{Z}_{\text{sys,yıllık}}}{H} * m$$

H: yıllık güneşlenme saati

m: aylık güneşlenme saati

Sermaye geri kazanım değeri:

$$CRF = \frac{i (i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1}$$

n: 25 yıl (sistem ömrü)

i: 0,1 (yıllık faiz oranı)

$\varphi = 1,06$ bakım faktörü

$$CRF = \frac{0,1 (0,1 + 1)^{25}}{(0,1 + 1)^{25} - 1}$$

$$CRF=0,11$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,yıllık}} = 565670 * 0,11 * 1,06$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,yıllık}} = 66058 \$/\text{yıl}$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,ocak}} = \frac{66058}{3774} * 279$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,ocak}} = 4883 \$/\text{ay}$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,temmuz}} = \frac{66058}{3774} * 372$$

$$\dot{Z}_{\text{sistem,temmuz}} = 6511 \$/\text{ay}$$

2.Elektrik enerjisinin eksergoekonomik maliyet değerlerinin belirlenmesi:

$$c_s * \dot{E}x_s + \dot{Z}_{\text{sys}} = c_e * \dot{E}x_e$$

$$c_s = 0 \text{ (solar enerji maliyeti)}$$

$$\text{Ocak ayı için} \quad 0 + 4883 \$/\text{ay} = c_e * 89,7\text{MWh/ay}$$

$$c_{e, \text{ocak}} = 54 \$/\text{MWh}$$

$$\text{Temmuz ayı için} \quad 0 + 6551 \$/\text{ay} = c_e * 221,7\text{MWh/ay}$$

$$c_{e, \text{temmuz}} = 29 \$/\text{MWh}$$

$$\text{Tüm yıl için} \quad 0 + 66058 \$/\text{yıl} = c_e * 1902\text{MWh/yıl}$$

$$c_{e, \text{tüm yıl}} = 35 \$/\text{MWh}$$

3. Aylık ve yıllık kârın hesaplanması

Elektrik satış fiyatının 133\$/MWh olarak esas alınıp hesaplamalar yapılmıştır.

Ocak ayı kârı	$(133 - 54) \$/\text{MWh} * 89,7 \text{MWh/ay}$	Ocak ayı kârı=7050 \$/ay
Temmuz ayı kârı	$(133 - 29) \$/\text{MWh} * 221,7 \text{MWh/ay}$	Temmuz ayı kârı=22970\$/ay
Tüm yıl kârı	$(133 - 35) \$/\text{MWh} * 1902 \text{MWh/yıl}$	Tüm yıl kârı=186.396\$/yıl

4. Sistem bileşinin yıllık yatırım oranlarının belirlenmesi:

$$\dot{Z}_k = Z_k * \text{CRF} * \varphi$$

PV Panel için	$\dot{Z}_{\text{panel}} = 390660 * 0,11 * 1,06$	$\dot{Z}_{\text{panel}} = 45621 \$/\text{yıl}$
Evirici için	$\dot{Z}_{\text{evirici}} = 39000 * 0,11 * 1,06$	$\dot{Z}_{\text{evirici}} = 4554 \$/\text{yıl}$
DC Kablo için	$\dot{Z}_{\text{DC kablo}} = 6640 * 0,11 * 1,06$	$\dot{Z}_{\text{DC kablo}} = 752 \$/\text{yıl}$
AC Kablo için	$\dot{Z}_{\text{AC kablo}} = 14570 * 0,11 * 1,06$	$\dot{Z}_{\text{AC kablo}} = 1701 \$/\text{yıl}$
Trafo	$\dot{Z}_{\text{trafo}} = 30000 * 0,11 * 1,06$	$\dot{Z}_{\text{trafo}} = 3503 \$/\text{yıl}$

5. Cihazların Yıllık Ekserji Yıkımının Hesaplanması:

PV panel, Polikristal panel tipine sahip sistemin;

$$\dot{E}_{\text{sol,pv}} = A_{\text{PV}} G \left[1 + \frac{1}{3} * \left(\frac{T_a}{T_{\text{sun}}} \right)^4 - \frac{4}{3} * \left(\frac{T_a}{T_{\text{sun}}} \right) \right] \text{ denklemine göre bulunan panel}$$

yüzeyine düşen yıllık ekserji değeri toplam 11102MW'dır.

Dönüşüm ekserji yıkımı paneldeki $V_{\text{OC}} * I_{\text{SC}}$ denklemine göre elektrik ekserjisi yıllık 2675 MWh'dir. Güneş enerjisinin elektrik ekserjisine dönüşümü sonucu ekserji yıkımı

$$E_{\text{D,PV}} \text{ dönüşüm} = 11102 - 2675 = 8427 \text{ MWh/yıl}$$

$$\text{Panel içi elektriksel ekserji yıkımı} = 593 \text{ kWh/yıl}$$

$$\text{Isı kaybı dolayısıyla ekserjiyıkımı} = 661 \text{ kWh/yıl}$$

- Panelde toplamda ekserji yıkımı 9718 kWh/yıl'dır.

$$\text{Panelden ekserji çıkışı} = 11102 - 9718 = 1384 \text{ kWh/yıl}$$

- DC kabloda ekserji yıkımı %1 olduğundan $1384 * 0,01 = 14 \text{ MWh/yıl}$
- Eviricide ekserji yıkımı %3'tür.

$$\text{Eviricide ekserji girişi} = 1384 - 14 = 1370 \text{ MWh}$$

$$\text{Evirici de ekserji yıkımı} = 1370 * 0,03 = 41 \text{ MWh/yıl}$$

- AC kablo da ekserji girişi $1370 - 41 = 1329 \text{ MWh/yıl}$

$$\text{AC kablo ekserji yıkımı} \%1 \text{ 'dür. AC kablo ekserji yıkımı} = 1329 * 0,01 = 13 \text{ MWh/yıl}$$

- Trafo ekserji girişi $1329 \text{ MWh/yıl} - 13 \text{ MWh/yıl} = 1316 \text{ MWh/yıl}$

Trafo ekserji yıkımı %2,2'dir. Trafo ekserji yıkımı $1316 * 0,022 = 28,852 \text{ MWh}$ olarak hesaplanmıştır.

6. Sistem bileşenlerinin yıllık ekserji yıkım maliyetlerinin belirlenmesi:

$$\dot{C}_{D,k} = c_e \dot{E}x_{D,k}$$

PV Panel için	$\dot{C}_{D,pv} = 35 \text{ \$/MWh} * 9718 \text{ MWh/yıl}$	$\dot{C}_{D,pv} = 337530 \text{ \$/yıl}$
Eviri için	$\dot{C}_{D,inv} = 35 \text{ \$/MWh} * 41 \text{ MWh/yıl}$	$\dot{C}_{D,inv} = 31428 \text{ \$/yıl}$
DC Kablo için	$\dot{C}_{D,DC \text{ kablo}} = 35 \text{ \$/MWh} * 14 \text{ MWh/yıl}$	$\dot{C}_{D,DC \text{ kablo}} = 481 \text{ \$/yıl}$
AC Kablo için	$\dot{C}_{D,AC \text{ kablo}} = 35 \text{ \$/MWh} * 13 \text{ MWh/yıl}$	$\dot{C}_{D,DC \text{ kablo}} = 462 \text{ \$/yıl}$
Trafo	$\dot{C}_{D,trafo} = 35 \text{ \$/MWh} * 29 \text{ MWh/yıl}$	$\dot{C}_{D,trafo} = 1015 \text{ \$/yıl}$

7. Sistem bileşenlerinin maliyet performansı yani eksergoekonomik faktörlerin belirlenmesi:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}}$$

Denklemine göre;

$$\text{PV panel için} \quad f_{PV} = \frac{45621}{45621 + 337590} \quad f_{pv} = 0,12$$

$$\text{Evirici için} \quad f_{EVIRICI} = \frac{4554}{4554 + 1428} \quad f_{EVIRICI} = 0,76$$

$$\text{DC kablo için} \quad f_{DC \text{ Kablo}} = \frac{752}{752 + 481} \quad f_{DC \text{ Kablo}} = 0,61$$

$$\text{AC kablo için} \quad f_{AC \text{ Kablo}} = \frac{1701}{1701 + 462} \quad f_{AC \text{ Kablo}} = 0,79$$

$$\text{Trafo için} \quad f_{TRAFO} = \frac{3503}{3503 + 1005} \quad f_{TRAFO} = 0,78$$

8. Geri ödeme süresinin belirlenmesi:

Sistemin yıllık kârı 186891 \$/yıl, sistemin toplam maliyet değeri ise 565670 \$ olarak belirlenmiştir. Sistemin 25 yıllık ömrü esas alınarak yıllık kârları ilk kurulum zamanı değerlerine getirilip kâr değerlerinin toplamının toplam maliyet değerine ulaştığı süre geri ödeme süresi olarak belirlenmiştir. ($i=0,1$)

Yıl	Kâr	Kârın ilk kurulum zaman değeri (\$)	Kalan Borç
0	-	-	-565670\$
1	186891	$\frac{186891}{(1 + 0,1)^1} = 169911\$$	-395769\$
2	186891	$\frac{186891}{(1 + 0,1)^2} = 144455\$$	-241314
3	186891	$\frac{186891}{(1 + 0,1)^3} = 127649\$$	-119666
4	186891	$\frac{186891}{(1 + 0,1)^4} = 116044\$$	+2379

Toplam geri ödemesi 48 ay olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye’de Konya ili iklim koşullarında 1166 MWp nominal güçte, Polikristal panel tipi kullanılan, kurulu güneş enerjisi sistemin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri yapılmıştır. Analiz için kullanılan hesap yöntemi sistemin dört yıllık üretim verilerine ve PVsyst yazılım sonuçlarına göre doğrulanmıştır. Aynı nominal güç için halfcut ve monoperc panel tipi kullanılması durumu araştırılmıştır. Eksergoekonomik analiz için SPECO yöntemini kullanılmıştır. Tüm analizler için aylık ve yıllık sonuçlar elde edilmiştir.

Analizlerin önemli aylık ve yıllık çıktıları aşağıda listelenmiştir:

Değişen güneş radyasyona ve güneşlenme saatlerine bağlı olarak aylara göre tüm panel tipleri için elektrik üretimi en az aralık ayında, en fazla temmuz ayında belirlenmiştir.

Tüm panel tipleri için enerji ve ekserji verimleri en az temmuz ayında, en fazla aralık ayında belirlenmiştir. Aynı ay için en yüksek verim değerleri halfcut, en düşük ise polikristal panel tipi için belirlenmiştir.

Tüm panel tipleri için elektrik maliyet oranı en yüksek ocak ayında, en düşük temmuz ayında belirlenmiştir. Aynı ay için elektrik yüksek halfcut, en düşük ise polikristal panel tipi için belirlenmiştir.

Sistemin en kârlı olduğu ay her üç panel tipi için temmuz ayı iken en az kâr ocak ayında elde edilmiştir. Aynı ay için en yüksek kâr polikristal, en az kâr halfcut panel tipi için belirlenmiştir.

Sistemin nominal gücünün her üç panel tipi için aynı olmasından dolayı yıllık elektrik üretimi birbirine yakın değerler olarak belirlenmiştir. Lakin gerekli panel alanı en fazla polikristal, en az halfcut panel tipi için belirlenmiştir.

Yıllık enerji ve ekserji verimleri en yüksek halfcut en düşük polikristal panel tipi için belirlenmiştir.

Yıllık değerlere göre tüm sistemin toplam yıllık ekserji yıkımı en fazla ekserji yıkımı diğer elemanlarla mukayese edilemeyecek şekilde en fazla PV panellerde meydana gelmiştir. Bunu sırasıyla evirici, trafo ve kablolar izlemiştir.

En yüksek yıllık yatırım oranı sırasıyla PV panellerde, eviricide, trafoda ve kablolarda belirlenmiştir.

Bu en yüksek ekserji yıkım maliyet değerleri PV panel için hesaplanmıştır.

Diğer sistem elemanlarında ise ekserji yıkım maliyeti panellere nazaran yok denecek kadar azdır. Ekserji yıkım maliyeti en yüksek polikristal, en az monoperc panelde belirlenmiştir.

Sistem elemanları arasında eksergoekonomik faktör değerleri PV paneller için 0.1, evirici ve trafo için için 0.7, kablolar 0.6 civarında belirlenmiştir. Eksergoekonomik faktörün 1 'e yakın olması sermaye maliyetinin ekserji yıkım maliyetine göre daha baskın olduğu 0 'a yakın olması tam tersi bir anlam taşımaktadır.

Yıllık elektrik üretim maliyeti polikristal, halfcut ve monoperc için sırasıyla 35 \$/MWh, 41\$/MWh ve 37 \$/MWh olarak belirlenmiştir. Geri ödeme süreleri ise aynı sırasıyla 48 ay, 63 ay ve 53 ay olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak kurulu olan polikristal panel tipi kullanılan sistem panel veriminin diğerlerine göre düşük olmasına rağmen kurulum maliyetinin düşük olmasından dolayı yıllık en yüksek kârın elde edildiği ve geri ödeme süresi en kısa olan sistem olmuştur. Lakin sistem için gerekli panel alanı diğerlerine göre daha fazladır. Halfcut panel için ise en gerekli en az panel alanına ihtiyaç duyulmasına ve panel veriminin yüksek olmasına rağmen en düşük kârın elde edildiği ve geri ödeme en uzun sistem olması durumunun önüne geçememiştir. Güneş enerjisi sistemini kurulacağı arazinin satış veya kiralama maliyeti arazinin konumuna ve özelliklerine göre değişecektir. Bu yüzden arazi maliyeti kurulum maliyetine dâhil edilmemiştir. Arazi maliyetinin düşük olduğu konumlarda halfcut panel kullanılması durumunda panel alanı gereksinimi daha az olmasına bağlı olarak sistemden daha yüksek yıllık kâr elde edilmesi ve geri ödeme süresinin daha az olması durumu mümkün olacaktır.

Bu sistem için ayrıca ekserji çevresel faktör analizinin yapılabilir. Türkiye ve dünyada farklı bölgeler içinde aynı hesaplamalar yapıp, sonuçlarının karşılaştırılması sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abid M., Hepbasli A. 03 Nov 2015, Dynamic Exergetic Analysis and Evaluation of Photovoltaic Modules, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.
- Aghbashlo M, Tabatabaei M, Mohammadi P, Pourvosoughi N, Nikbakht AM, Goli SAH. 2015, Improving exergetic and sustainability parameters of a DI diesel engine using polymer waste dissolved in biodiesel as a novel diesel additive. *Energy Convers Manage*;105.
- Aksungur K.M., Kurban M., Başaran Filik Ü., Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi.
- Al-Shagea E., Sezen S., Özdemir E., 2021, Lisanssız Elektrik Üretiminde Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemlerin Performans Analizi, International Marmara Sciences Congress (Spring) Proceedings Book.
- Anand S. Joshi, Ibrahim Dincer *, Bale V. Reddy, 2009, Thermodynamic assessment of photovoltaic systems, Elsevier, *Solar Energy* 831139–1149.
- Ayadi O., Jamra M., ve ark. 2021, An Experimental Comparison of Bifacial and Monofacial PV Modules, 2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC).
- Bayrak F., Abuhamdeh N., K.A. Alnefaie and H. F. Oztop, 2017, A review on exergy analysis of solar electricity production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 755-770.
- Bejan A., G. Tsatsaronis, and M. Moran,, 1995, Thermal design and optimization. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Biçek E., Çelik H.E., 2020, Fotovoltaik Sistemin Güç Üretiminin Meteorolojik Değişkenler ile Modellenmesi: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Örneği, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt 25, Sayı 3*, 135-146.
- Ciach R., J. ĩelazny, 2005, Photovoltaic material and technology, Foundation of development in material science, Cracow, (in Polish).
- Copiello, S., Grillenzoni, C. 2017. Solar Photovoltaic Energy and Its Spatial Dependence. 4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2017), 25-29 September, Berlin, Germany, 86-90.
- Çengel Y.A., Boles M.A., 2008, ' Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik.' Palme Yayıncılık, 7.Baskı.
- Dincer İ., Joshi S.A., Reddy B.V., 5 March 2009, Thermodynamic assessment of photovoltaic systems, Elsevier.

- El-Emam R.S. and I. Dincer, 2013, Exergy and exergoeconomic analyses and optimization of geothermal organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, 59 435-444.
- Gaur A. And Tiwari G.N., 2014, Exergoeconomic and Enviroeconomic Analysis of Photovoltaic Modules of Different Solar Cells, Hindawi Publishing Corporation *Journal of Solar Energy* Volume, Article ID 719424, 8 pages.
- GÜYAD, Güneş Enerjisi Yatırımcıları Derneği, yıl sonu değerlendirme raporlar, 2020-2021, http://www.guyad.org/?_dil=1. [Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2022]
- Hepbaslı A. At al., 2018, Thermoeconomic Analysis and Evaluation of a Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) System Based on Actual Operational Data, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature S. Nižetić, Papadopoulos (eds.), *The Role of Exergy in Energy and the Environment, Green Energy and Technology*.
- Hepbaslı A., Biyik E., et al., 5-6 November 2016, Exergoeconomic assessment of a building integrated photovoltaic (BIPV) system: a case study of Yasar University, İzmir, Turkey, *The International Conference of SDB16, Chongqing, China*.
- Hepbaslı A., M. Araz, E. Biyik, R. Yao, M. Shahrestani, E. Essah, Li Shao, A. C. Oliveira, T. Caño, E. Rico, and J. L. Lechón, 2018, Thermoeconomic Analysis and Evaluation of a Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) System Based on Actual Operational Data, *Role of Exergy in Energy and the Environment, Green Energy and Technology*, Chapter 63 .
- Hofierka, J., Süri, M. 11-13 September 2002. *The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications. Proceedings of The Open Source GIS - GRASS Users Conference, Trento, Italy*, 1-19.
- İzgi E., Akkaya Y.E., 2012, Exergoeconomic analysis of a solar photovoltaic system in İstanbul, Turkey, *Tübitak* .
- Kanchan, V., Tiwari, G. N., 2012, Energy and exergy analysis of a building integrated semi transparent photovoltaic thermal (BISPVT) system, *Applied Energy*, pages 409-416.
- Kara M., Ercan Y., R. Yumusak, A. Curebal, and T. Eren, (2022) , Facility Location Selection in Renewable Hybrid Power Plant Implementation, , *International Journal of Engineering Research and Development*, 14 (1) 208-227.
- Lazaretto A. and G. Tsatsaronis, (2006), SPECO: A Systematic and General Methodology for Calculating Efficiencies and Costs in Thermal Systems, *Energy* 31 1257-1289.
- Joshi H. (2021), Mono vs Mono-Perç Solar Panels: The Ultimate Guide, <https://solarfunda.com/mono-vs-mono-perc-solar-panels> adresinden alındı. [Ziyaret Tarihi: 6 Haziran 2022]

- Nami H., S.M.S. Mahmoudi and A Nemati, 2017, Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO₂ and an Organic Rankine Cycle (GT-HRSG/SCO₂) Applied Thermal Engineering, 110 1315–1330.
- Ogbonnaya C., Turan A., Abeykoon C., 2019, Energy and exergy efficiencies enhancement analysis of integrated photovoltaic-based energy systems, Elsevier, Journal of Energy Storage, December .
- Özcan, M. 2020. “IRENA Yenilenebilir Enerji İstatistikleri 2020” raporunu yayımladı”, <https://temizenerji.org/2020/07/22/irena-yenilenebilir-enerji-istatistikleri2020raporunu-yayimladi>.
- Pathak, M.J.M., Sanders, P.G., Pearce, J.M, 2014, Optimizing limited solar roof access by exergy analysis of solar thermal, photovoltaic, and hybrid photovoltaic thermal systems, Applied Energy, no.120, s.115-124 .
- Pearsall, N., 2017 The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment. Woodhead Publishing, 366p, Cambridge.
- Petela R., 1964, Exergy of heat radiation, ASME J. Heat Transfer, 86 187–192.
- Rahnama E., Ashbashlo M., Tabatabaei M., Rosen M.A., 1 September 2019, Spatio-temporal solar exergoeconomic and exergoenvironmental maps for photovoltaic systems, Elsevier, Energy Conversion and Management Volume 195, Pages 701-711.
- Rahnama E. , M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, M. Khanali, and M. A. Rosen, 2019, Spatio-temporal solar exergoeconomic and exergoenvironmental maps for photovoltaic systems, Energy Conversion and Management, (195) 701-711.
- Shukir S.S., September December , 2021, Half-Cut Cell Solar Panels to Reduce the Effect of High Temperature and Shadow on the Productivity of Solar Panels, Journal of Alternative and Renewable Energy Sources, Volume 7 , Issue 3 .
- Sudhakar K. & Tulika Srivastava (2014) Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module, International Journal of Ambient Energy, 35:1, 51-57.
- Sukumaran S., Sudhakar K., 2018 Performance analysis of solar powered airport based on energy and exergy analysis, Elsevier Energy (149) 1000-1009.
- T. Markvart, L. Castaner, 2011 Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Elsevier, Oxford, 2006.B. Parida, S. Iniyar, R. Goic, A review of solar photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15/3 1625-1636.
- T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi Enerji-Güneş, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>. [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2022]

Tsatsaronis G (2007) Definition and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. Energy 32(4):249–253.

Venkateswari R. and Sreejith S., Factors influencing the efficiency of photovoltaic system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101 (2019) 376-394.

Vikipedi , ^ "UN Demographic Yearbook" (PDF). 12 Haziran 2016 tarihinde kaynağından (PDF) arşivlendi.
https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye#cite_note-160.

Yürük, M. 2012. Fizik Hakkında Herşey. Erişim Tarihi: 11.05.2019.
<http://fizikmustafa.blogspot.com/2012/03/fotoelektrik-etki.html>.



EKLER

Farklı PV paneller için hesaplamaların toplu Exel tabloları

Polikristal Panel İçin

Enerji ve Ekserji Hesaplamaları														
POLİKİSTAL														
MWh														
OcakŞubatMartNisanMayısHaziranTemmuzAğustosEylülEkimKasımAralık														
Exel	Pmax	96,5	107,2	160,6	183,5	213,5	218,4	238,4	236,2	207,1	161,2	127,2	95,7	2046
	Q in	516,4	582,7	898,6	1053,1	1249,4	1310,6	1454,5	1427,6	1234,7	925,6	704,3	514,8	11872
	Ex in	484,6	546,5	841,9	985,6	1167,9	1223,7	1357,1	1332,2	1153,5	865,9	660	483	11102
	P DC kablo kayıp	1,0	1,1	1,6	1,8	2,1	2,2	2,4	2,4	2,1	1,6	1,3	1,0	20
	P evirici kayıp	2,9	3,2	4,8	5,4	6,3	6,5	7,1	7,0	6,2	4,8	3,8	2,8	61
	P AC kablo kayıp	0,9	1,0	1,5	1,8	2,1	2,1	2,3	2,3	2,0	1,5	1,2	0,9	20
	P Trafo kayıp	2,0	2,2	3,4	3,8	4,5	4,6	5,0	4,9	4,3	3,4	2,7	2,0	43
	Üretim	89,7	99,7	149,3	170,6	198,5	203,1	221,7	219,6	192,6	149,9	118,3	89,0	1902
	Güneşlenme saati	279	252	310	330	372	360	372	372	330	279	270	248	3774
	Voc1sc	126,1	140,2	210	239,9	279,3	285,6	311,7	309	270,8	210,9	166,3	125,1	2675
	Ex,d trns	358,5	406,3	631,9	745,7	888,6	938,1	1045,4	1023,2	882,7	655	493,7	357,9	8427
	Ex,d FF	29,7	3,2	33,0	49,4	56,5	65,7	67,2	73,4	63,7	62,7	49,6	39,2	593
	Ex,d term	16,1	22,1	47,8	63,0	74,4	84,8	100,7	97,5	72,3	44,0	25,1	13,6	661
	Ex out PV	80,4	85,1	112,8	120,5	139,1	133,6	137,7	138,7	134,8	117,2	102,1	82,1	1384
	Ex,d DC cab	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,0	0,8	14
	Ex,d İNV	2,4	2,5	3,4	3,6	4,1	4,0	4,1	4,1	4,0	3,5	3,0	2,4	41
	Ex,d AC cab	0,8	0,8	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,1	1,0	0,8	13
	Ex,d Trafo	1,7	1,8	2,4	2,5	2,9	2,8	2,9	2,9	2,8	2,5	2,1	1,7	29
	Ex out syst	74,8	79,1	104,9	112,0	129,3	124,2	128,0	129,0	125,3	109,0	94,9	76,3	1287
Pvsist	Ür PV	101,6	120,2	156,2	164,2	186,8	195,9	203,4	204,2	180,3	150,5	121,5	102,3	1887
	Üretim	100,2	118,6	154,2	161,9	184,2	193,1	200,4	201,1	177,7	148,5	119,9	100	1860
Saha	Üretim	102,1	125,5	159,1	170,2	206,4	203	226,3	218,4	192,4	176,1	125,4	91,4	1996
Eksergoekonomik Değerler														
Zsis_aylık	4883	4411	5426	5776	6511	6301	6511	6511	5776	4883	4726	4341	66058	
Celec	54	44	36	34	33	31	29	30	30	33	40	49	35	
Aylık Gelir	11933	13256	19860	22692	26402	27008	29481	29209	25610	19934	15730	11834	252948	
Aylık Kar	7050	8846	14434	16916	19890	20706	22970	22697	19834	15051	11004	7494	186891	
Enerji verimi														
Ekserji verimi	17,4	17,1	16,6	16,2	15,9	15,5	15,2	15,4	15,6	16,2	16,8	17,3	16,0	
	15,4	14,5	12,5	11,4	11,1	10,2	9,4	9,7	10,9	12,6	14,4	15,8	11,6	
Eksergoekonomik Değerler														
Sistem Ömrü	25													
Yıllık Faiz Oranı	0,1													
CRF	0,110168072													
Bakım Faktörü	1,06													
Sis Maliyet	565670	Zsis yıllık	66058											
PV Maliyet	390660	Zpv	45621											
İnv Maliyet	39000	Zinv	4554											
DC Cab Maliyet	6440	ZDC C	752											
AC Cab Maliyet	14570	ZAC C	1701											
Trafo	30000	Z trafo	3503											
Amortisman değerleri Değerler														
Total		565670												
Yıl														
0			-565670											
1	186891	169901	-395769	1										
2	186891	154455	-241314	2										
4	186891	127649	-113666	3										
5	186891	116044	2379	0,979502	48	Ay								

Hulfcut Panel İçin

Enerji ve Ekserji Heaplamaları		HALFCUT													
		MWh													
		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık		
Exel	Pmax	97,1	108	161,5	184,3	214,1	218,6	238,3	236,2	207,4	161,8	128	96,4	2052	
	Q İn	413,7	466,7	719,8	843,6	1000,8	1049,9	1165,1	1143,6	989,2	741,4	564,1	412,4	9510	
	Ex İn	388,2	437,8	674,4	798,5	935,5	980,3	1087	1067,1	924	693,6	528,7	386,9	8902	
	P DC kablo kayıp	1,0	1,1	1,6	1,8	2,1	2,2	2,4	2,4	2,1	1,6	1,3	1,0	21	
	P evirici kayıp	2,9	3,2	4,8	5,5	6,4	6,5	7,1	7,0	6,2	4,8	3,8	2,9	61	
	P AC kablo kayıp	0,9	1,0	1,6	1,8	2,1	2,1	2,3	2,3	2,0	1,6	1,2	0,9	20	
	P Trafo kayıp	2,0	2,3	3,4	3,9	4,5	4,6	5,0	4,9	4,3	3,4	2,7	2,0	43	
	Üretim	90,3	100,4	150,2	171,4	199,1	203,3	221,6	219,6	192,8	150,4	119,0	89,6	1908	
	Çünleşme saat	279	252	310	330	372	360	372	372	330	279	270	248	3774	
	Voc İsc	120,2	133,6	199,8	227,9	264,8	270,4	294,7	292,2	256,5	200,2	158,3	119,3	2538	
	Ex,d trns	268	304,2	474,6	570,6	670,7	709,9	792,3	774,9	667,5	493,4	370,4	267,6	6364	
	Ex,d FF	23,0	25,6	38,3	43,7	50,7	51,8	56,5	56,0	49,1	38,3	30,3	22,8	486	
	Ex,d term	10,3	14,2	30,7	40,5	47,7	54,5	64,6	62,6	46,4	28,3	16,1	8,7	425	
	Ex out PV	86,8	93,8	130,8	143,8	166,4	164,1	173,7	173,6	161,0	133,5	111,9	87,7	1627	
	Ex,d DC cab	0,9	0,9	1,3	1,4	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,3	1,1	0,9	16	
	Ex,d İNV	2,6	2,8	3,9	4,3	4,9	4,9	5,2	5,2	4,8	4,0	3,3	2,6	48	
Ex,d AC cab	0,8	0,9	1,3	1,4	1,6	1,6	1,7	1,7	1,5	1,3	1,1	0,8	16		
Ex,d Trafo	1,8	2,0	2,7	3,0	3,5	3,4	3,6	3,6	3,4	2,8	2,3	1,8	34		
Ex out syst	80,7	87,2	121,6	133,7	154,7	152,6	161,5	161,4	149,7	124,1	104,0	81,5	1513		
Pvsist	Ür PV	106,4	126,7	167,9	177,4	203,7	210,6	220,2	222,5	196,3	159,8	127,2	107	2026	
	Üretim	104,8	124,9	165,4	174,8	200,6	207,4	216,7	219	193,3	157,4	125,4	105,4	1995	
	Zsis aylık	5716	5163	6351	6761	7621	7375	7621	7621	6761	5716	5532	5081	77319	
	Celec	63	51	42	39	38	36	34	35	35	38	46	57	41	
	Aylık Gelir	12007	13355	19971	22791	26476	27032	29468	29209	25647	20008	15829	11921	253715	
	Aylık Kar	6292	8193	13620	16030	18855	19657	21847	21587	18886	14292	10297	6840	176396	
	Enerji verimi	21,8	21,5	20,9	20,3	19,9	19,4	19,0	19,2	19,5	20,3	21,1	21,7	20,1	
	Ekserji verimi	20,8	19,9	18,0	16,7	16,5	15,6	14,9	15,1	16,2	17,9	19,7	21,1	17,0	
Eksergoekonomik Değerler															
	Sistem Ömrü	25													
	Yıllık Faiz Oranı	0,1													
	CRF	0,110168													
	Bakım Faktörü	1,06													
	Sis Maliyet	662100	Zsis yıllık	77319											
	PV Maliyet	498960	Zpv	58268											
	İnv Maliyet	43000	Zinv	5021											
	DC Cab Maliyet	4700	ZDC C	549											
	AC Cab Maliyet	8096	ZAC C	945											
	Trafo	29000	Z trafo	3387											
Amortisman değerleri Değerler															
	Total		662100												
	Yıl														
	0			-662100											
	1	176396	160360	-501740	1										
	2	176396	145782	-355958	2										
	4	176396	120481	-235476	3										
	5	176396	109528	-125948	4										
	6	176396	99571	-26377	5										
	7	176396	90519	64142	0,291397	63	Ay								

Monoperc Panel İçin

		Enerji ve Ekserji Heaplamları												
		MONOPERC												
		MWh												
		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	
Exel	Pmax	97,1	108	161,5	184,3	214,1	218,6	238,3	236,2	207,4	161,8	128	96,4	2052
	Q İn	425,3	479,9	740,1	867,3	1028,9	1079,4	1197,9	1175,7	1017	762,2	580	424	9778
	Ex İn	399,1	450,1	693,3	811,7	961,8	1007,8	1117,6	1097,2	950	713,1	543,6	397,8	9143
	P DC kablo kayıp	1,0	1,1	1,6	1,8	2,1	2,2	2,4	2,4	2,1	1,6	1,3	1,0	21
	P evirici kayıp	2,9	3,2	4,8	5,5	6,4	6,5	7,1	7,0	6,2	4,8	3,8	2,9	61
	P AC kablo kayıp	0,9	1,0	1,6	1,8	2,1	2,1	2,3	2,3	2,0	1,6	1,2	0,9	20
	P Trafo kayıp	2,0	2,3	3,4	3,9	4,5	4,6	5,0	4,9	4,3	3,4	2,7	2,0	43
	Üretim	90,3	100,4	150,2	171,4	199,1	203,3	221,6	219,6	192,8	150,4	119,0	89,6	1908
	Güneşlenme saa	279	252	310	330	372	360	372	372	330	279	270	248	3774
	Voc*Isc	126,1	140,1	209,5	239	277,7	283,5	309,1	306,5	269	209,9	166	125,1	2662
	Ex,d trns	302	342,1	531,8	627,4	747,7	789,2	879,3	861	742,6	551,3	415,6	301,4	7091
	Ex,d FF	28,9	32,1	48,0	54,8	63,6	65,0	70,8	70,2	61,6	48,1	38,0	28,7	610
	Ex,d term	10,6	14,6	31,5	41,6	49,1	56,0	66,5	64,4	47,7	29,0	16,6	9,0	437
	Ex out PV	86,5	93,4	130,0	142,7	165,0	162,6	171,8	171,8	159,7	132,8	111,4	87,4	1615
	Ex,d DC cab	0,9	0,9	1,3	1,4	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,3	1,1	0,9	16
	Ex,d İNV	2,6	2,8	3,9	4,2	4,9	4,8	5,1	5,1	4,7	3,9	3,3	2,6	48
	Ex,d AC cab	0,8	0,9	1,2	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,3	1,1	0,8	16
	Ex,d Trafo	1,8	2,0	2,7	3,0	3,5	3,4	3,6	3,6	3,3	2,8	2,3	1,8	34
	Ex out syst	80,4	86,8	120,9	132,7	153,4	151,2	159,7	159,7	148,5	123,5	103,6	81,3	1502
Pvsist	Ür PV	105,6	124,7	161,6	169,9	193,2	203,4	211	211,5	186,5	156	126,3	107,1	1957
	Üretim	104	122,8	159,1	167,3	190,3	200,3	207,7	208,2	183,6	153,6	124,4	105,5	1927
	Zsis_aylık	5169	4669	5744	6114	6893	6670	6893	6893	6114	5169	5003	4595	69927
	Celec	57	46	38	36	35	33	31	31	32	34	42	51	37
	Aylık Gelir	12007	13355	19971	22791	26476	27032	29468	29209	25647	20008	15829	11921	253715
	Aylık Kar	6838	8686	14227	16676	19583	20362	22576	22316	19533	14839	10826	7326	183788
	Enerji verimi	21,2	20,9	20,3	19,8	19,3	18,8	18,5	18,7	19,0	19,7	20,5	21,1	19,5
	Ekserji verimi	20,2	19,3	17,4	16,3	16,0	15,0	14,3	14,6	15,6	17,3	19,1	20,4	16,4
Eksergoekonomik Değerler														
	Sistem Ömrü	25												
	Yıllık Faiz Oranı	0,1												
	CRF	0,110168												
	Bakım Faktörü	1,06												
	Sis Maliyet	598800	Zsis yıllık	69927										
	PV Maliyet	431568	Zpv	50398										
	İnv Maliyet	43000	Zinv	5021										
	DC Cab Maliyet	5208	ZDC C	608										
	AC Cab Maliyet	8085	ZAC C	944										
	Trafo	29000	Z trafo	3387										
Amortisman değerleri Değerler														
	Total		598800											
	Yıl													
	0			-598800										
	1	183788	167080	-431720	1									
	2	183788	151891	-279828	2									
	4	183788	125530	-154298	3									
	5	183788	114118	-40180	4									
	6	183788	103744	63564	0,387302	53	Ay							