

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**BİNAYA BİRLEŞTİRİLMİŞ BİR FOTOVOLTAİK
SİSTEMİN PERFORMANSININ DİNAMİK EKSERJİ
VE EKSERGOEKONOMİK ANALİZ
YÖNTEMLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yusuf Bayer ATLI

Tez Danışmanı : Doç.Dr.Hüseyin GÜNERHAN

İkinci Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Emrah BIYIK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.05.04

Sunuş Tarihi : 17.08.2017

Bornova-İZMİR

2017

Yusuf Bayer ATLI tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Binaya Birleştirilmiş Bir Fotovoltaik Sistemin Performansının Dinamik Ekserji ve Eksergoekonomik Analiz Yöntemleriyle Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 17/08/2017 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

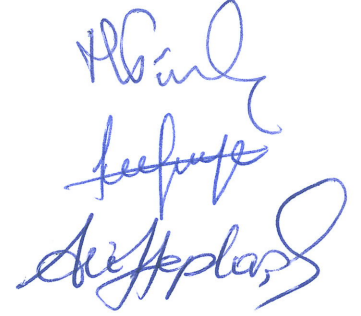
Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Doç.Dr.Hüseyin GÜNERHAN

Raportör Üye : Yrd.Doç.Dr.Lütfiye ALTAY

Üye : Prof.Dr.Arif HEPBAŞLI

İmza

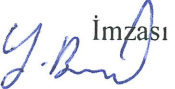


EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “Binaya Birleştirilmiş Bir Fotovoltaik Sistemin Performansının Dinamik Ekserji ve Eksergoekonomik Analiz Yöntemleriyle Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

17/08/2017

İmzası


Yusuf Bayer ATLI

ÖZET**BİNAYA BİRLEŞTİRİLMİŞ BİR FOTOVOLTAİK SİSTEMİN
PERFORMANSININ DİNAMİK EKSERJİ VE
EKSEKONOMİK ANALİZ YÖNTEMLERİYLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

ATLI, Yusuf Baver

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

İkinci Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Emrah BIYIK

Ağustos 2017, 50 sayfa

Binaya Birleştirilmiş Fotovoltaik (BBFV) sistemler modül ve cam teknolojisi ile fotovoltaik teknolojiyi birleştirerek enerji üretilen yeni bir teknolojidir. Bu sistemlerin gelişimi son 10 yılda hızlanmıştır ve dünya çapında birçok yapıda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tezde bir BBFV sisteminin performansını bir yıllık periyodu kapsayacak şekilde enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Tez sırasıyla teorik ve deneysel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Teorik kısımda enerji, ekserji, eksergoekonomi ve belirsizlik analizi için bağıntılar verilmiştir. Deneysel kısımda ise Yaşar Üniversitesi binasının güney batı cephesine 90° açı ile yerleştirilmiş her biri 155 W_p kapasitede olan 48 adet fotovoltaik ünitesinden oluşan bir BBFV sistemden alınan veriler değerlendirilmiş ve 1 yıllık periyodu kapsayan analizler yapılmıştır.

Enerji ve ekserji analizinde elde edilen sonuçların sıcaklıkla olan ilişkisinin tüm verilerle karşılaştırması yapıldığında sıcaklık değerinin sistemin verimine etkisinin önemli oranda olduğu gözlenmektedir. Ekserji analizinde parametrik metod ile çözüm yapılması için 4 farklı denklem kullanılmıştır. Eksergoekonomik analizler gerçekleştirilmiş, EXCEM (Ekserji, Maliyet, Enerji ve Kütle) ve SPECO (Spesifik Ekserji Maliyetlendirmesi) yöntemlerine göre sonuçlar elde edilmiştir. EXCEM yöntemine göre 1 € maliyet başına günlük kaybolan ekserji miktarı 0,003407 kWh olarak elde edilmiştir. SPECO yöntemi ile yapılan analizler

sonucunda sistemden çıkan her 1 kWh ekserji için günlük ortalama 0,8335 € maliyet belirlenmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerlerle ilgili belirsizlikleri hesaplamak için belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Binaya birleştirilmiş fotovoltaik sistemler, Ekserji analizi, Eksergoekonomik analiz, Yenilenebilir enerji.



ABSTRACT

**PERFORMANCE EVOLUATION OF A BUILDING INTEGRATED
PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING DYNAMIC
EXERGY AND EXERGOCOECONOMIC
ANALYSIS METHODS**

ATLI, Yusuf Baver

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Emrah BIYIK

August 2017, 50 pages

Building Integrated Photovoltaic (BIPV) systems are innovative systems that can produce energy by combining glass and module technology and photovoltaic technology. The development of these systems has accelerated over the last decade and they have been used in many buildings around the world.

In this thesis, it was aimed at determining the performance of a BIPV system through energy, exergy and exergoeconomic analysis methods over a one year period. The thesis consists of two parts, namely theoretical and experimental. In the theoretical part, relations were given for exergy, exergoeconomics and uncertainty analyzes of the system. In the experimental part, the data obtained from a BIPV system placed at an angle of 90° to Southwestern façade of one of the buildings of Yaşar University and consisting of 48 PV units, each with a capacity of $155 W_p$, was used to evaluate the performance of the system for one year period.

It was observed that the effect of the temperature value on the efficiency of the system was important when the calculated energy and exergy values of the systems are correlated with the cell and ambient temperature. In the exergy analysis, four different relations were used to undertake a parametric study. Exergoeconomic analyzes were carried out. The results were also obtained using EXCEM (Exergy, Cost, Energy and Mass) and SPECO (Specific Exergy Costing) method. According to the EXCEM method, the daily lost amount of exergy per 1

€ cost was 0,003 kWh. As a result of the analysis made by the SPECO method, the daily average cost of 0.8335€ was determined for every 1 kWh exergy from the system. An uncertainty analysis was performed to determine uncertainties associated with the measured and calculated values.

Keywords: Building integrated photovoltaic systems, Exergy analysis, Exergoeconomic analysis, Renewable energy.



TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmamda beni yönlendiren ve özverili desteklerinden yararlandığım Kıymetli Hocalarım ve Danışmanlarım Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN'a ve Yrd. Doç. Dr. Emrah BIYIK'a, tez sürecinde her konuda yardımcı olan Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI'ya, bu çalışma süresince gerekli verilerin sağlanmasında büyük kolaylık gösteren ayrıca fikirlerinden yararlandığım Ar. Gör. Mustafa ARAZ'a, burada sözü geçen çalışmaya olan desteklerinden ötürü Avrupa Komisyonu tarafından eş olarak desteklenen "REELCOOP - Research Cooperation in Renewable Energy Technologies for Electricity Generation: Elektrik Üretimi İçin Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinde Araştırma İşbirliği" projesine (FP7 ENERGY.2013.2.9.1, hibe no: 608466), son ve en önemli olarak da bu uzun ve zorlu süreçte her zaman olduğu gibi üzerimde çok büyük emekleri olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------|--------------|
| ÖZET | vii |
| ABSTRACT | ix |
| TEŞEKKÜR | xi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xv |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xvii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xviii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR | 3 |
| 3. SİSTEMİN TANITIMI | 10 |
| 3.1 Sistemin Açıklanması | 10 |
| 3.2 Ölçüm Cihazları | 13 |
| 4. TEORİK ANALİZ | 15 |
| 4.1 Enerji Analizi | 15 |
| 4.2 Ekserji Analizi | 15 |
| 4.3 Eksergoekonomik Analiz | 17 |
| 4.3.1 EXCEM Yöntemi | 17 |

İÇİNDEKİLER (devam)

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 4.3.2 SPECO Yöntemi | 18 |
| 4.4 Belirsizlik Analizi | 22 |
| 5. BULGULARIN DEĞERLENDİRMESİ VE TARTIŞMA | 23 |
| 5.1 Enerji Analizi Sonuçları | 23 |
| 5.2 Ekserji Analizi Sonuçları | 27 |
| 5.3 Eksergoekonomik Analiz Sonuçları | 30 |
| 5.4 Belirsizlik Analiz Sonuçları | 32 |
| 6. DEĞERLENDİRME | 33 |
| EK AÇIKLAMALAR | 36 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ | 45 |
| ÖZGEÇMİŞ | 50 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.1 Dünyadaki fotovoltaiik konusundaki çalışmalar | 5 |
| 3.1 Sistemde kullanılan fotovoltaiik modüller | 10 |
| 3.2 Sistemdeki fotovoltaiik modülün ölçüsü | 11 |
| 3.3 Sistemin kurulumu | 12 |
| 3.4 Sistem kurulumunun tamamlanmış hali | 12 |
| 3.5 Kurulu sistemin ölçüleri | 13 |
| 3.6 Ölçüm cihazlarının konumlandırıldığı noktalar | 13 |
| 4.1 EXCEM metodolojisi temel şeması | 17 |
| 4.2 Deneysel sistemin SPECO analizi bileşenleri | 20 |
| 5.1 Aylık ortalama üretilen enerji değerleri | 24 |
| 5.2 Hava sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi | 25 |
| 5.3 Hava sıcaklığının verim üzerindeki etkisi | 25 |
| 5.4 Modül sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi | 26 |
| 5.5 Modül sıcaklığının verim üzerindeki etkisi | 26 |
| 5.6 Aylık ortalama giren ekserji değerleri | 28 |
| 5.7 Hava sıcaklığının giren ekserji üzerindeki etkisi | 28 |
| 5.8 Hava sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi | 29 |

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

| | |
|--|----|
| 5.9 Modül sıcaklığının çıkan ekserji üzerindeki etkisi | 29 |
| 5.10 Modül sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi | 30 |



ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Çizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 2.1 Güneş enerjisinin ekserjisi hakkında dünyada yapılan çalışmalar | 7 |
| 3.1 Ölçüm cihaz bilgileri | 14 |
| 5.1 Aylık ortalama enerji değerleri | 23 |
| 5.2 Aylık ortalama sıcaklık verileri | 24 |
| 5.3 Elde edilen aylık ortalama ekserji değerleri | 27 |
| 5.4 Sistem bileşenlerinin finansal değerleri | 31 |
| 5.5 Çeşitli denklemler için belirsizlik değerlerinin yüzdelik ifadesi | 32 |
| B.1 Eşitliklerdeki ifadeler ve referans an için değerleri | 39 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u> |
|-----------------|---|
| \dot{C} | Ekserji Akışının Maliyet Oranı (€) |
| \dot{c} | Birim Ekserji Başına Ortalama Maliyet (€/kWh) |
| E | Enerji (kWh veya kJ) |
| \dot{E} | Enerji akımı (kJ/s veya kW) |
| I | Akım (A) |
| K | Yatırım Maliyeti (€) |
| L | Uzunluk (m) |
| \dot{L}_{ex} | Ekserjiye Bağlı Kayıp Oranı (kWh) |
| \dot{L}_{en} | Enerjiye Bağlı Kayıp Oranı (kWh) |
| m | Kütle (kg) |
| \dot{R}_{ex} | Ekserji Kayıp Oranı(kWh/€) |
| \dot{R}_{en} | Enerji Kayıp Oranı(kWh/€) |
| T | Sıcaklık (°C veya K) |
| t | Zaman (s) |
| V | Gerilim (V) |
| \dot{W} | Güç (W) |
| ψ | Ekserji Verimi |

Kısaltmalar

| | |
|-------|--|
| ADV | Açık devre voltajı |
| BBFV | Binaya birleştirilmiş fotovoltaik |
| CFD | Computational fluid dynamics (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) |
| CRF | Capital recovery factor (Anapara geri kazanım faktörü) |
| EVA | Ethylene vinyl acetate (Etilen vinil asetat) |
| EXCEM | Exergy, cost, energy, mass (Ekserji , maliyet, enerji, kütle) |
| FV | Fotovoltaik |
| KDA | Kısa devre akımı |
| MTG | Maksimum tepe gücü |
| SPECO | Specific exergy costing (Spesifik ekserji maliyetlendirmesi) |



1. GİRİŞ

Günümüzde petrol, kömür, doğal gaz vb. fosil yakıtlar enerji kaynaklarının büyük bölümünü ve enerji tüketiminin % 85'ini oluşturmaktadır. Geleneksel enerji kaynağı rezervleri olan fosil yakıtlar gün geçtikçe azalırken, tüm dünyadaki enerji tüketimi ve talebi artmaya devam etmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı verilerine göre, günümüzde dünya nüfusunun % 50'den fazlası şehirlerde yaşamaktadır. Aynı zamanda bu şehirler üretilen enerjinin % 60-80'ini kullanmakta ve CO₂ salımının % 75'ini oluşturmaktadır.

Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji üretimi günden güne artan çevre, ülkelerin enerji bağımsızlığı ve yüksek fosil yakıt maliyetlerinden dolayı 2000'lerin başından bu güne önemli bir konu olmuştur. Günümüz modern toplumunda elektrik önemli bir konumda bulunmaktadır. Enerji kaynaklarının korunumu günümüzün en temel ve güncel sorunlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, elektrik üretiminde yenilenebilir enerjilerin payının 2018'de toplam enerji üretiminin % 25'ine kadar çıkması beklenmektedir. Avrupa Birliğinin 2020 hedeflerinin bir parçası olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimindeki payının % 20'ye ulaşması hedeflenmektedir.

Türkiye 2023 yılına kadar elektrik ihtiyacının en az %30'unu yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlamayı hedeflemektedir. Güneş enerjisi 2015 yılı değerlendirmeleri ile yıllık yerli kaynak potansiyeli 1500 kWh/m² olan en önemli alternatif temiz enerji kaynağıdır. Türkiye'de halihazırda kurulu FV (fotovoltaik) gücü 2016 yılı itibarıyla 832,5 MW'a ulaşmıştır ve 2015 yılının kurulu güç değeri olan 248,8 MW'a kıyasla hızla artmaya devam ettiği görülmektedir. Türkiye'nin 2023 hedeflerinin dışında fotovoltaik güneş enerjisine dayalı kurulu güç miktarının 2019 yılına kadar 3.000 MW'a ulaştırılması hedeflenmektedir (T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2016; Türkiye Elektrik Anonim Şirketi, 2017).

Yenilenebilir enerji araştırmalarının büyük bir kısmı elektrik enerjisi üretmek için güneş enerjisini kullanan fotovoltaik sistemlere ayrılmıştır. Fotovoltaik kelimesi ışıktan elektrik üreten fotovoltaik hücrelerin pratik uygulaması ile ilgili araştırma ve teknolojilerde kullanılan bir terimdir. Fotovoltaik hücreler üzerlerine gelen ışığı elektrik akımına dönüştürebilen yarı-

iletken malzemelerden meydana gelen sistemlerdir. Diğer tüm yenilenebilir enerjilere karşı FV teknolojisi hızla büyümektedir ve bu konu hakkında yapılan çalışmalar oldukça fazladır.

FV teknolojisinin bir uygulaması olarak, Binaya Birleştirilmiş Fotovoltaik (BBFV) sistemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Binaya birleştirilmiş fotovoltaik sistemler cam teknolojisi ile fotovoltaik teknolojinin birleşmesinden oluşan enerji üretilebilen bir yeniliktir. Bu sistemlerin gelişimi son 10 yılda hızlanmıştır ve dünya çapında birçok yapı da kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin temel işlevleri olan elektrik enerjisi üretimine ek olarak verimlilik, ekonomik, çevresel, estetik vb. açıdan da yarar sağlamaktadır. Sistemin enerji üretmesinin yanısıra mekanik sağlamlık ve yağmur, kar ve rüzgar gibi hava etkilerine karşı koruma özellikleri vardır. Elektrik üretiminin son kullanıcıya yakınlığı, altyapı yatırımlarının ve elektriksel gücün taşınması ve dağıtılmasından kaynaklanan kayıpların azalmasını sağlar.

Bu sistemlerde FV modülleri binaların dış kabuğu için tamamlayıcı bir kısım oluşturmaktadır. BBFV sistemlerde bina kabuğu üzerinde ek bir kaplama malzemesine gerek olmadan FV paneller doğrudan kabuk eleman vazifesini üstlenmektedir. Bina kabuğundaki yaygın kullanım yerleri genelde, çatı ve cephelerdir. Ancak, binaların uygun koşulları sağlayan hemen hemen her yerinde kullanılabilen BBFV sistemler yer aldıkları yapı bileşenine ve özelliklerine bağlı olarak çok değişik şekillerde uygulanabilir. FV teknolojisi doğrudan FV paneller halinde kullanılabilmesi gibi klasik çatı kaplamaları (kiremit vb.) ile birleştirilerek hem eğimli hem de düz çatılarda uygulanabilir. Cephelerde ise cam, doğal taş, seramik, vb. cephe kaplama malzemeler yerine FV paneller kullanılabilir. FV paneller gün ışığı geçirim istenilen pencereler gibi yerlerde kullanılabilmesi gibi güneş kontrolü istenilen bölgelerde ya da duvarlar gibi saydam olmayan bölümlerde yer alabilir. BBFV'i kullanmak çarpıcı bir yapı oluşturur. Esnekliği, mimarların hayal gücüne tepki verebilecek ve hem etkileyici hem de çevre dostu bir yapıya kavuşacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

260 m²'lik bir monokristal silikon BBFV sistemi, ESP-r bina enerji simülasyon yazılımı kullanılarak güney Çin'de bir kıyı kenti için hesaplamalı olarak modellenmiştir. Sistemin güneye baktığı ve gölgesiz olduğu varsayılmıştır. Her bir FV modülünün kısa devre akımı (KDA), açık devre voltajı (ADV) ve nominal gücü sırasıyla 5 A, 22,03 V ve 85 W'dır. Modüller, 250 mm'lik bir hava boşluğu ile binanın dış duvarına tutturulmuş bir çelik yapı üzerine monte edilmiştir. Örnek çalışmalar için FV / C (BBFV + hücrelerin soğutulması), FV / T (BBFV + hava ısıtması) ve BBFV olmak üzere üç farklı tasarım seçeneği düşünülmüştür. Bu üç senaryonun yıllık enerji üretim miktarı sırasıyla 83,680, 83,584 ve 83,205 MJ olarak bulunmuştur (Chow et al., 2003).

İzmir'deki bir binanın cephesine entegre bir BBFV Trombe duvarı incelenmiştir. Deneyler için, binanın güney cephesinde dört adet yarı şeffaf a-Si FV modülü kullanılmıştır ve modüller ile duvar arasında 0,50 m boşluk bırakılmıştır. Her FV modülü 27 W nominal güce sahipken, MTG (maksimum tepe gücü)'deki voltaj ve akım sırasıyla 36 V ve 0,75 A olarak ölçülmüştür. Kışın ısıtma sağlamak için duvarda bulunan 0.08 m²'lik iki havalandırma deliği vardır. Deneyler, Ocak - Nisan 2008 arasında 4 aylık bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir ve ölçülen veriler bir CFD (Computational fluid dynamics: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) simülasyon modelinin oluşturulması ve geçerliliği için kullanılmıştır. Ölçüm yılı içerisindeki 5 Şubat günü için elektrik ve termal verimlilik sırasıyla % 4,5 ve % 20,3 olarak bulunmuştur. Diğer yandan, doğal havalandırma kütleli debisi, sırasıyla 638,6 W/m² ve 750,88 W/m² ısıtım için 0,013 kg/s ve 0,035 kg/s olarak elde edilmiştir (Koyunbaba et al., 2011).

Singapur'daki ofis binasının çatısı üzerine kurulu olan 142,5 kW_p BBFV sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Sistem, farklı yönlendirme ve eğim açısıyla 22 diziye gruplandırılmış 750 polikristal FV modülünden oluşmaktadır ve her dizi % 95,3 verimliliği olan bir invertöre bağlanmıştır. Dizide 18 modül bulunan iki paralel diziden oluşmaktadır. Bir modülün açık devre akımı değeri 30,8 V iken, kısa devre akımı değeri 8,23 A dir. 200 veri noktasından alınan değerler birleştirilmiş ve her 5 dakikada bir bir bilgisayara kaydedilmiştir. Ortalama aylık enerji üretimi 12,1 MWh, aylık ortalama performans oranı ise 0,81 olarak hesaplanmıştır. Gerçek ve istatistiksel ısıtım miktarı, eğim açısı, FV modülü sıcaklığı, kısmi gölgelendirme ve ısıtım dalgalanmaları arasındaki fark ve

bunların sistem performansına etkileri gibi çeşitli parametreler de çalışmanın içerisinde sunulmuştur (Wittkopf et al., 2012).

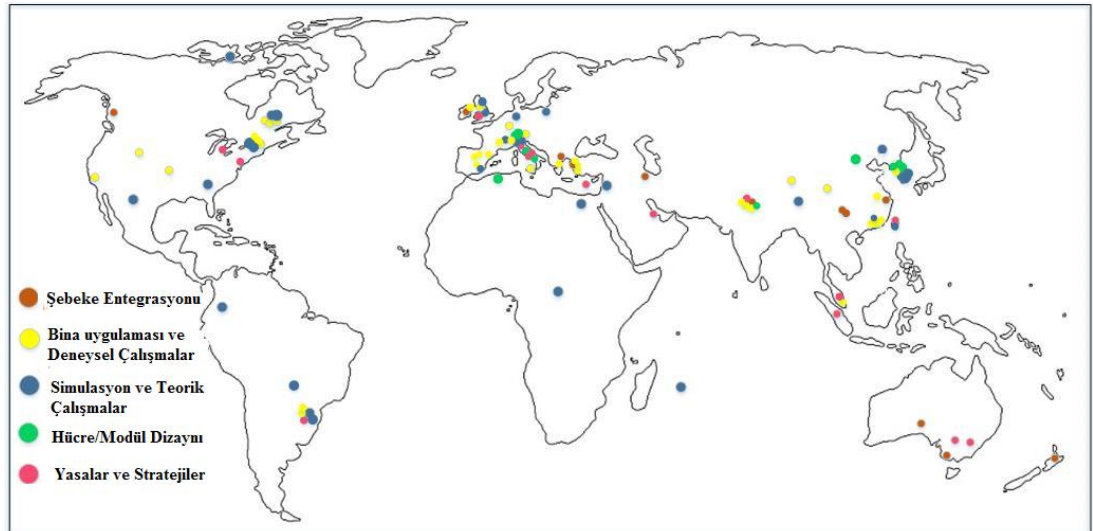
İki girişli akışkan olarak hava kullanılan BBFV/T sisteminin deneysel çalışması yapılmış ve bunlar ısı performans açısından incelenmiştir. Deneysel çalışmada 45° eğimli ve 2 temperli camdan oluşan iki tip monokristal silikon paneli kullanılmıştır. Sonuç olarak iki girişli panelin bir girişli panele kıyasla %5 daha fazla ısı verimliliği gösterdiğini görülmektedir. Yarı saydam panel, bir diğerine göre %7,6 daha fazla termal verimlilik göstermiştir (Yang and Athientis, 2015).

2008 yılında bir üniversite binasına kurulmuş bir BBFV sisteminin gölgeleme etkisi analizi 2008-2015 yılları arasındaki ölçüm temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Sistem toplam alanı 405 m², eğim açısı 60°, nominal gücü 40,3 kW_p olan iki dikey kuleden oluşmaktadır. BBFV sisteminin çalışmasının başlaması ve bitmesi arasında toplam elektrik üretimi 200 MWh'dir. Bina 5 kattan oluşmaktadır ve her katta her dizide üç bağlantılı amorf silikon fotovoltaik bulunmaktadır. Bu çalışma enerji derecelendirmesi (kWh/kW_p) bakımından ölçüldüğünde, yıllık fark % 16 ve aylık % 10-24 arasında değişmektedir. İlk dizinin yıllık enerji derecesi 1072 kWh/kW_p, ikinci sınıf enerji kalitesi de 885 kWh/kW_p olarak bulunmuştur. Mart ve Nisan aylarında maksimum elektrik çıktısı elde edilmiştir. Çalışmadan, eğim açısı azalırsa, enerji derecesi azalır ve gölgeleme efekti çevre sıcaklığı, binanın yönü ve FV'nin eğim açısı gibi önemli bir etkiye sahiptir gibi sonuçlar elde edilmiştir (Eke and Demircan, 2015).

Brezilya'daki Florianopolis Uluslararası Havalimanı'nda BBFV kurulmasıyla elde edilebilecek olan potansiyel enerji talebi azalması durumu değerlendirilmiştir. Terminal binasının yıllık enerji talebinin toplam miktarını ve temin etmek için gerekli olan FV gücünü belirlemek için saatlik enerji tüketimi ve güneş ışınlama verileri analiz edilmiştir. Nominal FV gücü, farklı fotovoltaiklerin enerjisi 557 kW_p ile 1670 kW_p arasında hesaplanmışken, yıllık enerji üretimi miktarı 654,8 MWh ile 1963,2 MWh arasında olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca, büyük, gölgeliksiz ve tipik olarak yatay yapı olan havaalanı binalarının BBFV'ler için ideal kullanım alanı olduğu sonucuna varılmıştır (Rüther and Braun, 2009).

BBFV uygulamalarını enerji üretimi miktarı, nominal güç, verimlilik, tip ve performans değerlendirme yaklaşımları açısından kapsamlı bir şekilde gözden

geçirildiği bu çalışmada konu hakkında çalışacaklar için yol göstermek amaçlanmıştır. Bina uygulaması ve deneysel çalışmalar, simülasyon ve sayısal çalışmalar, hücre modülü tasarım çalışmaları, şebeke entegrasyon çalışmaları ve izlenecek strateji ve güncel politikalar gibi çalışma konularına göre alt gruplara odaklanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, bir çok çalışmanın temelinde sistem verimliliğini artırmak konusu bulunmaktadır bu yüzden son yıllarda yapılan çalışmalar panel verimliliğini arttırmak ve sistem konfigürasyonunu değiştirmek ile ilgilidir. Hesaplama analizi ve simülasyon çalışmaları ise bu alanda sistem analizi ve tasarımı için daha kolay ve daha ucuz oldukları için son yıllarda yapılan çalışmaların büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Simülasyonda en yaygın olarak kullanılan iki yazılım kapsamlı analizler yapılabilmesine olanak sağladığı için TRNSYS (Transient system simulation tool) ve EnergyPlus yazılımlarıdır. Hücre modül tasarımı çalışmaları yeni modüllerde yapılan çalışmalarla düşük modül sıcaklıkları elde ederek daha yüksek verimlilik elde ettiğini göstermiştir. Son yıllarda modülü soğutmak için farklı renkli panel hakkında çalışmalar bulunmaktadır. Diğer yandan, boya duyarlılaştırılmış güneş pilleri teknolojisindeki gelişmeler BBFV uygulamaları için umut verici bir çözüm sunmaktadır. Paydaşlar arasında bilgi paylaşımının artırılması ve teknolojik gelişmelerin artırılması gerektiği, bu konuda yatırımcıları cezbedecek teşvikler verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca Şekil 2.1’de dünya haritası üzerinde FV konusunda yapılan çalışmaların uygulama alanlarına göre bilgi verilmiştir (Bıyık et al., 2017).



Şekil 2.1 Dünyadaki fotovoltaik konusundaki çalışmalar (Bıyık'dan 2017)

Hindistan'ın soğuk iklim koşullarında BBFV/T(Binaya birleştirilmiş fotovoltaik termal) sisteminin kullanımı araştırılmıştır. Önerilen sistem, 65 m²'lik bir alanı kaplayan ve 35°'lik bir eğime sahip olan opak BBFV/T bir sistemidir. Her biri nominal kapasitesi 150 W olan toplamda 7,2 kW_p kapasitedeki 48 panelden oluşmuştur ve bunlar 6 sıraya yayılmıştır. Kanallar boyunca 1,2 kg / s sabit kütleli debi sağlanmıştır. Sistemin performansı, dört paralel ve seri bağlantı kombinasyonu için incelenmiştir. Sistemin elektriksel ve ısı ekserjileri sırasıyla 16209 kWh/y ve 1531 kWh/y olarak bulunmuştur, oysa genel ısı verimliliği % 53,7 dir. Paralel kombinasyonun sabit hava hızı için en iyi performansı sergilediği, buna karşılık seri bağlı sistemin sabit hava kütle akış oranı için daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır (Agrawal and Tiwari, 2010).

Çatıya konumlandırılmış bir BBFV/T sistemi enerji, ekserji ve ekonomik performansını belirlemek amacıyla dinamik olarak modellenmiştir. Sistemin eğim açısı 30°, toplam yüzey alanı 10,4 m x 6,3 m olarak alınmıştır. Önerilen sistem, FV modülleri altından akan havanın 1 kg / s sabit bir kütleli debide aktığı seri olarak bağlı altı kanal içermektedir. Model için, monokristal silikon, polikristal silikon, şerit kristalin silikon, amorf silikon, kadmiyum tellür ve bakır indiyum galyum selenid olmak üzere altı farklı FV hücresi teknolojisi düşünülmüştür. Sonuçlar, BBFV/T sisteminin benzer bir BBFV sistemine kıyasla verimlilik ve ekonomi açısından olumlu olduğunu göstermiştir. Monokristal BBFV/T sisteminin diğer hücre teknolojilerine kıyasla daha fazla enerji ve ekserji verimi olduğu bulunmuştur. Bu sistemin enerji verimliliği % 33,54 iken, ekserji verimi % 7,13 olarak bulunmuştur (Agrawal and Tiwari, 2010).

Fotovoltaik sistemlerin araştırmalarında sistemler çoğunlukla enerji açısından incelense de ekserji araştırmaları da bulunmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Güneş enerjisinin ekserjisi hakkında dünyada yapılan çalışmalar

| Sayı | Yazar | Çalışmanın Adı | Yıl | Lokasyon |
|------|-------------------------------|--|------|------------------------|
| 1 | Basant Agrawal ve G.N. Tiwari | Binaya birleştirilmiş fotovoltaik termal (BBPV/T) sistemlerin yaşam döngüsü maliyet değerlendirmesi | 2010 | Yeni Delhi, Hindistan |
| 2 | Basant Agrawal ve G.N. Tiwari | Soğuk iklim koşulları altında binaya birleştirilmiş fotovoltaik termal (BBFV/T) sistemlerin enerji ve ekserjisini optimize etmek | 2010 | Yeni Delhi, Hindistan |
| 3 | Basant Agrawal ve G.N. Tiwari | Binaya Birleştirilmiş Fotovoltaik Termal Sistemlerin Oluşturulması İçin Bir Enerji ve Ekserji Analizi | 2011 | Yeni Delhi, Hindistan |
| 4 | Kanchan Vats va. | Paketleme faktörünün hava kanalı ile binaya birleştirilmiş yarı saydam fotovoltaik termal (BBYSFV/T) sistemin performansına etkisi | 2012 | Yeni Delhi, Hindistan |
| 5 | M. Abid ve A. Hepbasli | Fotovoltaik modüllerin dinamik ekserjetik analizi ve değerlendirilmesi | 2015 | Riyad, Suudi Arabistan |
| 6 | Akash Kumar Shukla va. | Parametrik ve fotonik enerji yöntemlerini kullanarak BBFV modülünün ekserjetik değerlendirmesi | 2016 | Bhopal, Hindistan |
| 7 | Akash Kumar Shukla va. | Bhopal Hindistan'da açık gökyüzü şartlarında binaya birleştirilmiş yarı saydam fotovoltaik modülün ekserjetik analizi | 2016 | Bhopal, Hindistan |

Çatı ve cephe için binaya entegre yarı şeffaf fotovoltaik modüllerin enerji, ekserji ve enerji üretimi değerlendirildiği çalışmada her biri 75W olan iki binaya entegre yarı şeffaf fotovoltaik modülünden oluşan deneysel sistemin kurulumu yapılmıştır ve çatı ve cephede açık gökyüzünde veriler alınmıştır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında enerji verimliliğinin gün boyunca çatıda %11-18 ve binanın cephesinde %13-18 arasında değiştiği gözlenmektedir. Binaya entegre yarı şeffaf fotovoltaik modülünün elektriksel verimliliğinin maksimum değeri çatıda %85, cephede %72 bulunmuştur. Termal ekserji çatı için yıllık 103,86 kWh cephe için 157,2 kWh elde edilmiştir. Binaya entegre yarı şeffaf fotovoltaik modülünün ekserji verimi, yükselen modül sıcaklığına bağlı olarak ortam sıcaklığı arttıkça azalır. Binaya entegre yarı şeffaf fotovoltaik modülünün ekserji verimi başlangıçta güneş ışığının yoğunluğundaki artışla birlikte artar ve daha sonra pik noktasına ulaştıktan sonra azalır gibi sonuçlar elde edilmiştir (Shukla et al., 2016).

Parametrik ve fotonik yöntemlerle bir BBFV sisteminin elektriksel performansı, ekserji yıkımını ve ekserji verimliliğini değerlendirmek için ayrıntılı bir inceleme yapılmıştır. Görünür dalga boyu, ekserji verimliliği özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. İklimsel ve işletim parametreleri arasında derin bir korelasyon elde etmek için fotonik enerji yöntemi ve parametrik yöntemler gereklidir. Her iki yöntemde de, ekserji değerlendirmesinin, enerji değerlendirmesinden daha gerçekçi bir değer verdiği gözlemlenmektedir. Fotonik enerji yönteminde, görünür spektrumun dalga boyunun, ekserji verimliliği özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığını gözlemlenmiştir. Bu yöntemin avantajları kolay ve basit olması, deneysel değerlendirme için daha az veri gerekli olmasıdır, dezavantajı ise daha az veri kullanımına bağlı olarak etkinlik değerinin azaltılmasından sorumlu olan en önemli faktör belirlenememesidir. Parametrik methodun avantajı ise verimliliği ve ekserji yıkımını etkileyen başlıca faktörler değerlendirilebilir. Dezavantajları ise analiz için birçok güneş parametresinin ölçülmesi gerekir ve bu süreç uzundur, karmaşık hesaplamalar söz konusudur (Shukla et al., 2016).

Fotovoltaik modüllerin enerji ve ekserji verimliliği, sürdürülebilirlik indeksi ve ekserji maliyetleri açısından performansı araştırılan bir çalışmada deneysel çalışma için sistem Kral Suud Üniversitesi binasının Makina Mühendisliği Bölümü çatısına kurulmuştur. Her biri nominal gücü 200 W, nominal gerilimi 24 V olan 20 polikristalin FV modülünden oluşan sistemin boyutları 0,9 m x 1,48 m'dir. Analizde, ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı, rüzgar hızı, yoğunluk ve hava nemi gibi termodinamik değişkenler göz önüne alınmıştır. Sonuçlara bakıldığında enerji verimliliğinin % 34,09 ile % 52,14 arasında değiştiği belirlenirken, ekserji verimi sırasıyla % 0,16'dan % 15,23'e kadar olan bir aralıkta tespit edilmiştir. FV/T analizi için ekserji verimi, % 1,36 ile % 19,86 arasında değişti ve ortalama değer % 9,65 olarak elde edilmiştir. Sistem için sürdürülebilirlik indeksi 1 ile 1,17 değerleri arasındadır. Elektrik dışında ayrıca yararlı termal çıktı vermesinden dolayı FV/T sistemlerinin ekserji verimi, FV sistemden daha fazladır. Bu nedenle, daha fazla güneş enerjisi elde etmek ve sistemin enerji ve ekserji verimliliğini artırmak için sadece FV yerine bir FV/T sistemi uygulanabilir. Elde edilen diğer bir sonuç ise modül sıcaklığı, ekserji verimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Abid and Hepbaşı, 2015).

(Bkz. Çizelge 2.1)'de görüldüğü üzere ekserji hakkında yapılan çalışmalar sınırlıdır ve son zamanlarda başlamıştır. Bu çalışmalara bakıldığında dinamik

ekserji analizi ve sistemin ekonomik yönden incelenmiş olması yapmış olduğumuz tez çalışmasının özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

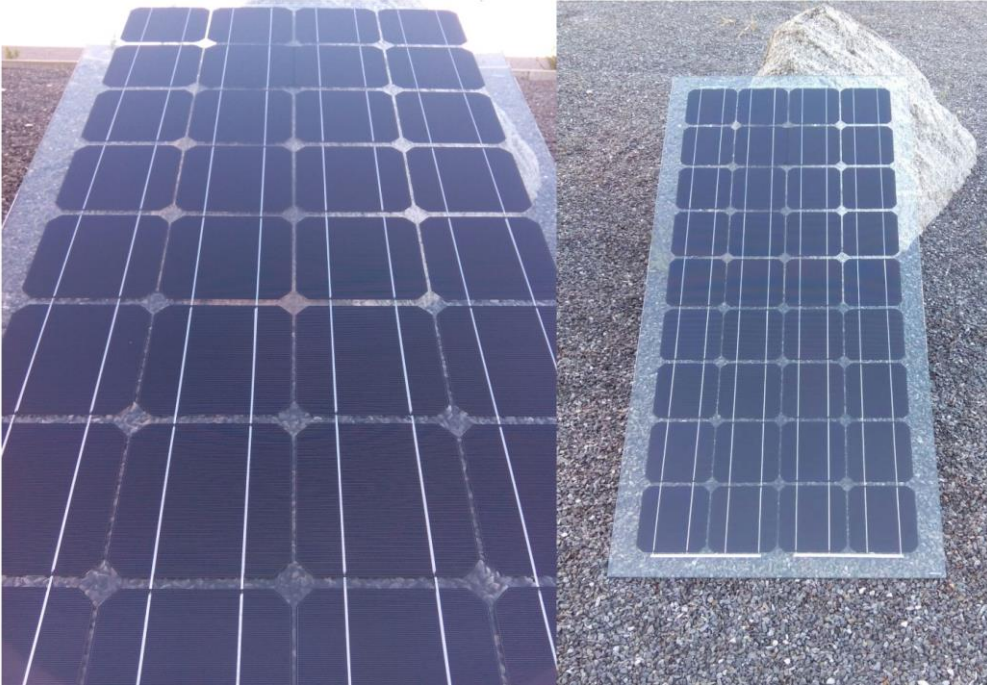


3. SİSTEMİN TANITIMI

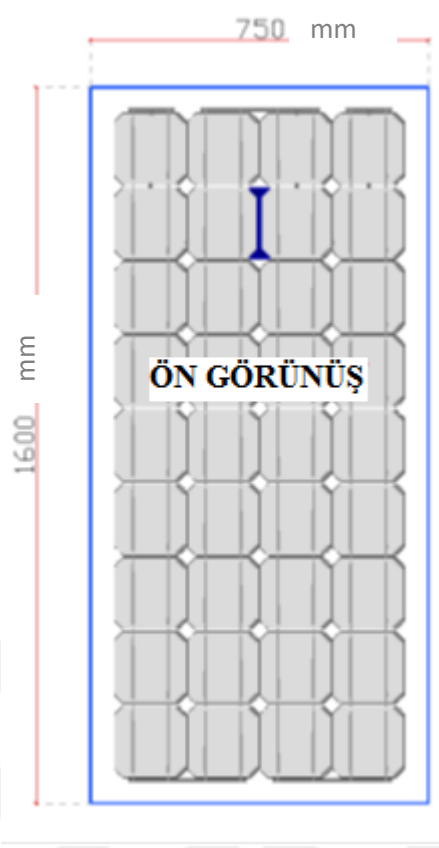
3.1 Sistemin Açıklaması

Yapılan çalışmalar deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. REELCOOP (Research Cooperation in Renewable Energy Technologies for Electricity Generation: Elektrik Üretimi İçin Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinde Araştırma İşbirliği) projesi kapsamında Yaşar Üniversitesi'nde kurulmuş bir BBFV sistemi üzerinden alınan veriler ışığında gerçekleştirilmiştir.

Sistem her biri $155 W_p$ kapasitedeki 48 adet fotovoltaik ünitesinden oluşmaktadır. Bu ünite Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Modüllerin nominal tepe gücü (P_{mpp}) $155 W_p$, açık devre voltajı (V_{oc}) 23 V, kısa devre akımı (I_{sc}) 8,62 A'dir. Her biri 1600 x 750 mm boyutlarındadır. Üniteler cam/cam konfigürasyonunda monokristal fotovoltaik teknolojisi ile tasarlanmış ve üretilmiştir. Modül işlem sıcaklığı $-40 - 85$ °C arasındadır. %30 saydamlık özelliği ile 4 + 4 mm olan cam tabakalar ve EVA (Ethylene Vinyl Acetate: Etilen Vinil Asetat) kapsüllü film ile çift kat lamine temperli bir cam özelliği taşımaktadır. Camın boyutları ile ilgili teknik çizim Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Sistemde kullanılan fotovoltaik modüller



Şekil 3.2 Sistemdeki fotovoltaik modülün ölçüsü

Modülden ayrı olarak tüm sistemi ele aldığımızda, sistem Yaşar Üniversitesi binasının güney batı cephesine yatayla 90° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir ve Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'deki gibi kurulumu sağlanmıştır. Elektriksel kurulum 2 dizi ve her bir dizide 24 FV olacak şekilde birbirinden bağımsız iki adet 7 kW'lık inverter'e bağlanmıştır. Bağlantı kurulumlarında 0,5 m'lik solar güneş paneli kablolar kullanılmıştır. Aşağıda belirtilmiş olan tüm değerler bir dizi için yapılan hesaplamalardır. Sırasıyla sistemin bir dizisi için açık devre voltajı, kısa devre akımı maksimum gerilim ve akım ifadeleri aşağıda belirtildiği gibidir;

$$V_{oc} = 24 \cdot (22,64 \text{ V}) = 543 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 8,62 \text{ A}$$

$$V_m = 24 \cdot (18,43 \text{ V}) = 442 \text{ V}$$

$$I_m = 8,4 \text{ A}$$

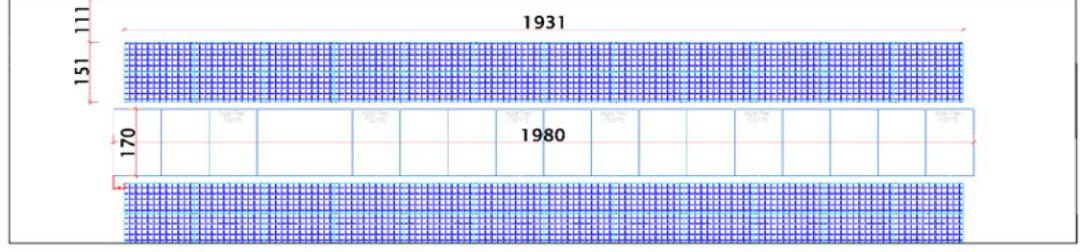


Şekil 3.3 Sistemin kurulumu



Şekil 3.4 Sistem kurulumunun tamamlanmış hali

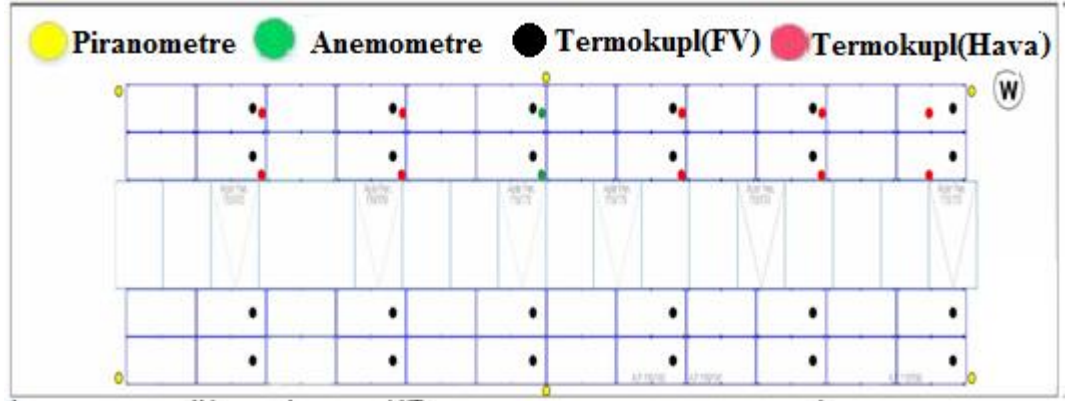
Sistemin teknik resim olarak önden görünüşü ve ölçüleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kurulu sistemin ölçüleri

3.2 Ölçüm Cihazları

Sistemden verilerin alınabilmesi için sistemin çeşitli noktalarından veri almak amacıyla ölçüm cihazları konulmuştur. FV yüzey sıcaklığı, T-tipi termokupl kullanılarak 24 noktada ölçülmektedir. Üst dizedeki FV'lerin arkasındaki hava sıcaklığı 12 noktada ölçülmektedir. (Bunların 2 tanesi term-anemometreler kullanılarak ölçülürken gerisi T tipi termokupllarla ölçülmektedir). Cephe üzerindeki gölgelendirme etkileri nedeniyle, 6 lokasyonda güneş ışınlarının ölçülmektedir: Bunlardan 4 tanesi köşelerde, 2 tanesi de her dizenin ortasındadır. Üst dizenin yanında bir hava istasyonu bulunmaktadır. Rüzgar hızı ve yönü, hava sıcaklığı ve nemi bu noktada ölçülmektedir. Sistemdeki veri alma cihazlarının konulduğu noktalar Şekil 3.6 gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Ölçüm cihazlarının konumlandırıldığı noktalar

Sistemdeki cihazların ölçüm adı, ölçüm türü, ölçüm aralığı ve hassasiyet değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Ölçüm cihaz bilgileri

| ÖLÇÜM ADI | ÖLÇÜM TÜRÜ/CIHAZI | ÖLÇÜM ARALIĞI | HASSASİYET |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------|--|
| <i>Yüzey Sıcaklık Ölçümü</i> | T Tipi Termokupl | 0 ÷ 100 °C | ± 0,5 °C |
| <i>Isıl Anenometre</i> | Sıcaklık | -10 ÷ +60 °C | ± 0,3 °C |
| | Hava Hızı | 0 ÷ 2 m/s | ± (0.06 m/s+ ölçümün %2'si) |
| <i>Küresel Işınım Sensörü</i> | Piranometre | 0 ÷ 1500 W/m ² | Hassasiyet: 6,93 Toplam Belirsizlik:% 0,34 Beklenen Belirsizlik:% 0,69 |
| <i>Meteoroloji İstasyonu</i> | Sıcaklık | -40 ÷ +60 °C | ±0,1 °C |
| | Bağıl Nem | 0 ÷ %100 | ± %2 |
| | Rüzgar Hızı | 0,28 ÷ 50 m/s | < 0,1 m/s |
| | Rüzgar Yönü | 0 ÷ 360° | ± 0,3° |
| <i>Akım ve Gerilim Ölçümü</i> | İnverter | 0 - 7175 W | ± 0,02 W |

4. TEORİK ANALİZ

Sistemin değerlendirilebilmesi ve rasyonel sonuçların elde edilmesi amacıyla bir takım teorik analizler yapılmıştır. Bu analizler enerji, ekserji ve eksergoekonomik olarak gruplandırılmaktadır.

4.1 Enerji Analizi

Bir sistem için enerji dengesi; “*sisteme giren enerji – sistemden çıkan enerji = sistemde depolanan enerji*” şeklinde tanımlanabilir. Enerji verimi tanımı ise sistem bileşeninin çıkışındaki enerji miktarının giren enerji miktarına oranı olarak ifade edilmektedir ve Denklem 4.1’de belirtildiği gibidir.

$$\eta = \frac{\dot{E}_c}{\dot{E}_g} \quad (4.1)$$

Sistem için enerji verimliliği denklemi Denklem 4.2’de belirtilmiştir. Burada enerji verimi (η), fotovoltaikten elde edilen güç çıkışı ($P_{\text{çıkış}}$), gelen güneş ışınımı (G), fotovoltaik yüzey alanı (A), maksimum gerilim (V_m), maksimum akım (I_m) olarak ifade edilir (Şahin vd., 2007).

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{G.A} = \frac{V_m.I_m}{G.A} \quad (4.2)$$

4.2 Ekserji Analizi

Ekserji belirli bir haldeki sistemde varolan enerjinin iş potansiyeli, sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş olarak tanımlanır ve başka bir ifade ile ekserji herhangi bir termodinamik yasanına karşı gelmeden, bir düzeneğin verebileceği işin miktarındaki üst sınırı temsil etmektedir. Ekserjinin bir diğer tanımı ise iş yapabilme yeteneği ya da sahip olunan fırsatlar olarak da ifade edilir (Çengel and Boles, 1989).

Ekserji ifadesi ekserji verimi (Ψ_{FV}) ile tanımlanır. Bu ifade çıkan ekserji miktarının giren ekserji miktarına oranı şeklinde tanımlanabilir. Bu çalışmada kullanılan Denklem 4.3’deki ifadede, sistemin veya modülün ekserjisinin (\dot{E}_X), güneş enerjisinin ekserjisi ($\dot{E}_{X_{\text{güneş}}}$) ile güneş ışınımı (I_S) ve modül alanı ($A_{\text{modül}}$) çarpımına bölümünü olarak tanımlanmıştır (Shukla vd., 2016).

$$\Psi_{FV} = \frac{\dot{E}_X}{\dot{E}_{x_{güneş}} \cdot I_s \cdot A_{modül}} \quad (4.3)$$

Öncelikle sistemin ekserjisi (\dot{E}_X) tanımlanırsa; maksimum gerilim (V_m), maksimum akım (I_m), ortam sıcaklığı (T_{ortam}), modül sıcaklığı ($T_{modül}$) ve modül alanı ($A_{modül}$) olarak ifade edilebilir. Bu ifade aşağıda Denklem 4.4 ile verildiği gibidir (Shukla vd., 2016).

$$\dot{E}_X = V_m \cdot I_m - \left[1 - \left(\frac{T_{ortam}}{T_{modül}} \right) \right] \cdot h_{ca} \cdot A_{modül} \cdot (T_{modül} - T_{ortam}) \quad (4.4)$$

h_{ca} değeri Denklem 4.5 ile hesaplanır. Burada rüzgar hızı (V_W) olarak ifade edilmektedir.

$$h_{ca} = 5,7 + 3,8 \cdot V_W \quad (4.5)$$

Denklem 4.3'te bulunan güneş enerjisinin ekserjisi ($\dot{E}_{x_{güneş}}$) ifadesinin dört farklı denklemi bulunmaktadır. Analizlerde bu dört farklı denklemi de kullanarak farklı sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Buradaki farklı yaklaşımlar (Petela, 1964) Denklem 4.6 ifadesinde, (Spanner, 1964) Denklem 4.7 ifadesinde, (Nobusawa, 1980) Denklem 4.8 ifadesinde, (Jeter, 1981) Denklem 4.9 ifadesinde belirtilmiştir.

İlgili formüllerde ortam sıcaklığı (T_o), güneşin sıcaklığı ($T_{güneş}$) olarak alınmıştır.

$$\dot{E}_{x_{güneş}} = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_o}{T_{güneş}} \right)^4 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_{güneş}} \quad (4.6)$$

$$\dot{E}_{x_{güneş}} = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_{güneş}} \quad (4.7)$$

$$\dot{E}_{x_{güneş}} = 0,95 \quad (4.8)$$

$$\dot{E}_{x_{güneş}} = 1 - \frac{T_o}{T_{güneş}} \quad (4.9)$$

Çeşitli formül yaklaşımları sadece belirsizlik analizinde karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Sistemin aylık ve yıllık analizleri yapılırken kullanılan ilgili denklemlerde yalnızca Denklem 4.6'dan yararlanılmıştır.

4.3 Eksergoekonomik Analiz

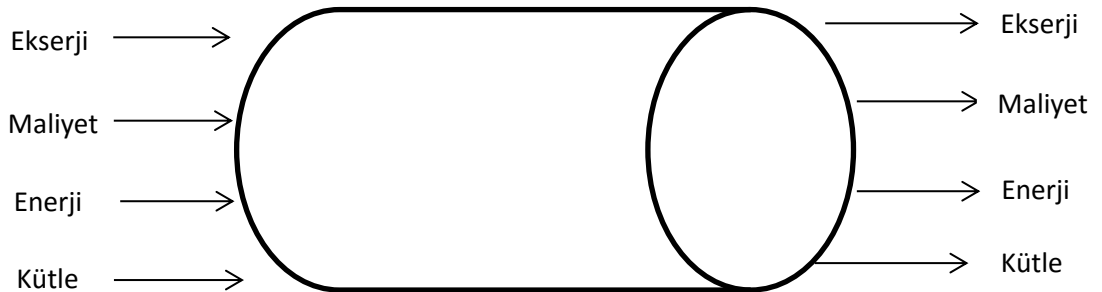
Ekserji ve ekonominin bir kombinasyonu olan eksergoekonomik analiz günümüzde çeşitli enerji ile ilgili sistemlerini incelemek ve optimize etmek için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır (Hepbaşlı and Alsuhaibani, 2011).

Yenilenebilir enerji sistemleri için maliyet ve amortisman süresi çok önemlidir. Bir sistemden elde edilen ürün (ısı, elektrik vb.) oluşturma süreci ve bu süreç sonunda ortaya çıkacak ürünün miktarına bağlı olarak bu ürünün oluşturma maliyetinin etkin bir şekilde kullanılması, sistemin ilk yatırım ve bakım işletme – maliyetleri önemli parametrelerdir. Burada bahsedilen maliyetler iki temel başlık şeklinde ifade edilebilir; birincisi ilk yatırım ve kurulum için yapılan ücretler, ikincisi ise bakım onarım maliyetleri olarak düşünülebilir.

Bu analiz için bir çok yöntem vardır ancak biz bu çalışmada EXCEM (exergy, cost, energy, mass: ekserji, maliyet, enerji, kütle) ve SPECO (Specific Exergy Costing: spesifik ekserji maliyetlendirmesi) olarak adlandırılan iki yöntem incelenmiştir.

4.3.1 EXCEM Yöntemi

Eksergoekonomik analizi yapabilmek adına sistemleri ve süreçleri değerlendirmek için dört temel parametre içeren metodoloji verilmiştir: Ekserji, maliyet, enerji ve kütle. Bu metodolojiye ekserji, ücret, enerji ve kütle kelimelerinin yabancı lisandaki kısaltması olarak adlandırılmasıyla EXCEM (exergy, cost, energy, mass) analizi denir. Şekil 4.1’de EXCEM metodolojinin temel şeması gösterilmiştir (Dinçer and Rosen, 2007).



Şekil 4.1 EXCEM metodolojisi temel şeması (Dinçer’den 2007)

Bir EXCEM analizinin temelini oluşturan temel gerekçe, bir sistemin performansının anlaşılması, EXCEM tarafından temsil edilen miktarların her birinin akışını, bir sistemin içindeki ve dışındaki tüm noktalarda incelemeyi gerektirir. Bu incelenen noktalardan yararlanarak EXCEM analizi yapılabilir. Denklem 4.10'dan ekserji kayıp oranı sonucunu Denklem 4.11'den ise enerji kayıp oranı sonucu elde edilebilir (Dinçer and Rosen, 2007).

$$\dot{R}_{ex} = \frac{L_{ex}}{K} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da \dot{R}_{ex} ekserji kayıp oranını L_{ex} ve K ise sırasıyla ekserjiye bağlı kayıp oranı ve yatırım maliyetini ifade etmektedir.

$$\dot{R}_{en} = \frac{L_{en}}{K} \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'de \dot{R}_{en} enerji kayıp oranını L_{en} ve K ise sırasıyla enerjiye bağlı kayıp oranı ve yatırım maliyetini ifade etmektedir.

4.3.2 SPECO Yöntemi

Bu yöntem; (Lazzaretto and Tsatsaronis, 1996, 2006) tarafından geliştirilmiş bir eksergoekonomik analiz yöntemidir. Üç adımdan oluşur:

1. Sisteme ait tüm bileşenlerin giriş ve çıkışlarındaki ekserji akımı değerlerinin belirlenmesi,
2. Yakıt ve ürün olarak ifade edilen ekserji akımlarının her bir sistem için ayrı ayrı hesaplanması,
3. Bulunan ekserji akımı değerlerine maliyetlerin tayinidir.

Buradaki ilk iki adım ekserji analizi ile hesaplanmaktadır. Bunları saptadıktan sonra son basamakta maliyetler tayin edilir.

Sisteme giren ve çıkan madde ve enerji akımlarıyla ısı ve iş yolu ile meydana gelen ekserji değerleri maliyet akımına aşağıdaki gibi dönüştürülür (Bejan et al. 1996).

Sisteme girenlerin maliyeti

$$\dot{C}_g = c_g \cdot \dot{E}x_g \quad (4.12)$$

Sistemden çıkanların maliyeti

$$\dot{C}_ç = c_ç \cdot \dot{E}x_ç \quad (4.13)$$

İş maliyeti

$$\dot{C}_w = c_w \cdot \dot{W} \quad (4.14)$$

Isı maliyeti

$$\dot{C}_q = c_q \cdot \dot{E}x_q \quad (4.15)$$

Burada \dot{C} , c ve $\dot{E}x$ ifadeleri sırasıyla ekserji akışının maliyet oranı, birim ekserji başına ortalama maliyet ve ekserji oranı olarak tanımlanmıştır.

Ekserji maliyetlendirmesi mali denge denklemleri ile yapılır. Herhangi bir sistem bileşenine uygulanan maliyet dengesi, çıkan tüm ekserji akımlarının giren ekserji akımlarıyla ilk yatırım ve işletme - bakım maliyetleri toplamına eşit olduğunu gösterir. Bu ifade aşağıdaki Denklem 4.16'da gösterilmiştir.

$$\sum_k \dot{C}_{ç,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum_k \dot{C}_{g,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k \quad (4.16)$$

Sistem bileşeni çıkışında, ürün ekserji akımı anlamında birden fazla akım olduğunda, çözüm için maliyet denge denkleminin tek başına yeterli olmayıp, çözümün yapılabilmesi için ilave yardımcı denklemlere ihtiyaç vardır. Çözüm için denklem yazılabilmesi için F ve P kuralı olarak bilinen yöntemler kullanılır. (Ballı , 2008). Ancak bu tezde ele alınan sistem için böyle bir gereklilik yoktur. Bu sebeple bu iki kurala da değinilmeyecektir.

Çalışmada kullanılan sistem herhangi bir iş veya ısı enerjisi üreten bir sistem olmadığı için maliyet denge denkleminde bu ifadeler 0 değerinde olacaktır. Buna ek olarak sistemin SPECO analizi gerçekleştirilmesi adına Şekil 4.2'de olduğu gibi sistem iki bileşenden oluşturulur ve analiz bu bileşenlere göre yapılır.



Şekil 4.2 Deneysel sistemin SPECO analizi bileşenleri

Mali denge denklemleri için sistemin ilk bileşeni olan fotovoltaik sistem ele alınır, burada sadece güneş ışınımı girdisi olmakta, çıkış olarak DC akımında elektrik elde edilmektedir. Bu bilgiler ışığında mali denge denklemi yazılırsa aşağıda verilen Denklem 4.17 ile sistemin maliyet denge denklemi elde edilir.

$$\dot{C}_c = \dot{C}_g + \dot{Z}_{iYD,FV} + \dot{Z}_{BiM,FV} \quad (4.17)$$

Başka bir ifade ile;

$$c_c \cdot \dot{E}x_c = c_g \cdot \dot{E}x_g + \dot{Z}_{iYD,FV} + \dot{Z}_{BiM,FV} \quad (4.18)$$

olarak yazılabilir.

Burada $\dot{Z}_{iYD,FV}$ ifadesi fotovoltaik için seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti olarak, $\dot{Z}_{BiM,FV}$ ifadesi ise fotovoltaik sistemin bakım-işletme onarım maliyeti olarak tanımlanmaktadır.

Seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyetinin hesabı için CRF (capital recovery factor: anapara geri kazanım faktörü) yöntemi olarak adlandırılan yöntem kullanılır. Bu yöntem bir yıllık ödemenin şimdiki değeri belli bir dönem sonundaki yıllık ödeme toplamının efektif faiz oranıyla yıllık ödeme başlangıcında yatırılmış olması durumundaki parasal değer olarak ifade edilir ve aşağıda Denklem 4.19'da gösterildiği gibidir ve ilk yatırım geri kazanım faktörü buna göre hesaplanır.

$$CRF = \frac{i \cdot (i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (4.19)$$

Denklemdaki i ve n ifadeleri sırasıyla yıllık faiz oranı ve sistemin ömrü olarak tanımlanmıştır. Buna göre \dot{Z}_{iYD} ve \dot{Z}_{BiM} ifadeleri denklem olarak ifade edilirse sırasıyla Denklem 4.20 ve Denklem 4.21 elde edilir.

$$\dot{Z}_{IYD} = \frac{\text{ilk yatırım geri kazanım faktörü } x \text{ ilk yatırım maliyeti}}{\text{sistemin yıllık tam yükte çalıştığı süre}} \quad (4.20)$$

$$\dot{Z}_{BİM} = \frac{\text{bakım işletme maliyeti}}{\text{sistemin yıllık tam yükte çalıştığı süre}} \quad (4.21)$$

Sistemin diğer bileşeni olan inverter tüm sistem genelinde değerlendirildiğinde yitirgen bileşen (dissipative component) olarak adlandırılabilir. Yitirgen bileşen bir bileşenden doğrudan yararlanılmadan ekserji yok eden bileşenler olarak tanılanmaktadır (Lazzaretto and Tsatsaronis, 2006).

Sistemdeki inverter bileşeninin DC elektrik akımını AC elektrik akımına dönüştürmesi işlevi düşünüldüğünde, sistemin diğer bileşeni gibi üretim amacını gerçekleştiren bir cihaz değildir. Bu nedenle literatürdeki yitirgen elemanlar için kullanılan denklemi kullanarak bu bileşene uygun olan denklemi elde ederiz. Yitirgen bileşenler için mali denge denklemi Denklem 4.22’de belirtilmiştir.

$$\dot{C}_{\zeta} + \dot{C}_{HDB} = \dot{C}_g + \dot{C}_{Y\zeta S} + \dot{Z}_{IYD,YE} + \dot{Z}_{BİM,YE} \quad (4.22)$$

Denklem 4.22’deki \dot{C}_{HDB} ifadesi hayali dağıtım biriminin maliyet oranı, $\dot{C}_{Y\zeta S}$ ifadesi ise yardımcı çalıştırma sıvısı maliyet oranını belirtir. Lazzaretto ve Tsatsaronis (2002) tarafından ifade edilen denklem bir akış ve dağıtım içeren sistem için ele alınmıştır ancak incelenen sistemde herhangi bir akış ve dağıtım bulunmamaktadır. Bu sebeple Denklem 4.22’deki \dot{C}_{HDB} ve $\dot{C}_{Y\zeta S}$ ifadeleri 0 değerinde alınacaktır ve buna ek olarak $\dot{Z}_{BİM,YE}$ değeri inverterin bakım onarım maliyeti olmadığı için bu değerde 0 alınacaktır. Bu bilgiler ışığında inverter bileşeninin mali denge denklemi Denklem 4.23’teki gibidir.

$$c_{\zeta} \cdot \dot{E}x_{\zeta} = c_g \cdot \dot{E}x_g + \dot{Z}_{IYD,YE} \quad (4.23)$$

4.4 Belirsizlik Analizi

Ölçülen değerlerin doğruluğu ve buna ilişkin hata analizleri yapılan çalışmalar için oldukça önemlidir. Bunu sağlayabilmek amacıyla hata analizinin yapılabilmesi için belirsizlik analizi adı verilen bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre elde edilen bağımsız değişkenlerden dolayı ortaya çıkan Δz belirsizliği çeşitli durumlar için farklı formüllerle ifade edilir (Penn Üniversitesi, 2017).

Aşağıdaki eşitlik durumlarına göre denklem analizi yapılmıştır.

$z = x \pm y$ şeklindeki toplama veya çıkarma işlemlerinde belirsizlik değeri;

$$\Delta z = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4.24)$$

$z = x \cdot y$ ya da $z = \frac{x}{y}$ şeklindeki çarpma veya bölme işlemlerinde belirsizlik değeri;

$$\frac{\Delta z}{|z_{mak}|} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x_{mak}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y_{mak}}\right)^2} \quad (4.25)$$

$z = c \cdot x$ şeklinde bir c sabitiyle çarpılan değişkenin belirsizlik değeri;

$$\Delta z = |c| \cdot \Delta x \quad (4.26)$$

$z = x^n$ şeklinde üstel ifade bulunan değişkenin belirsizlik değeri;

$$\Delta z = |n| \cdot x^{n-1} \cdot \Delta x \quad (4.27)$$

şeklindedir.

Burada Δx , x değişkenin ölçüm cihazından kaynaklı duyarlılık değeri x_{mak} ise x değişkenin referans an için değeri olarak ifade edilir.

5. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

5.1. Enerji Analizi Sonuçları

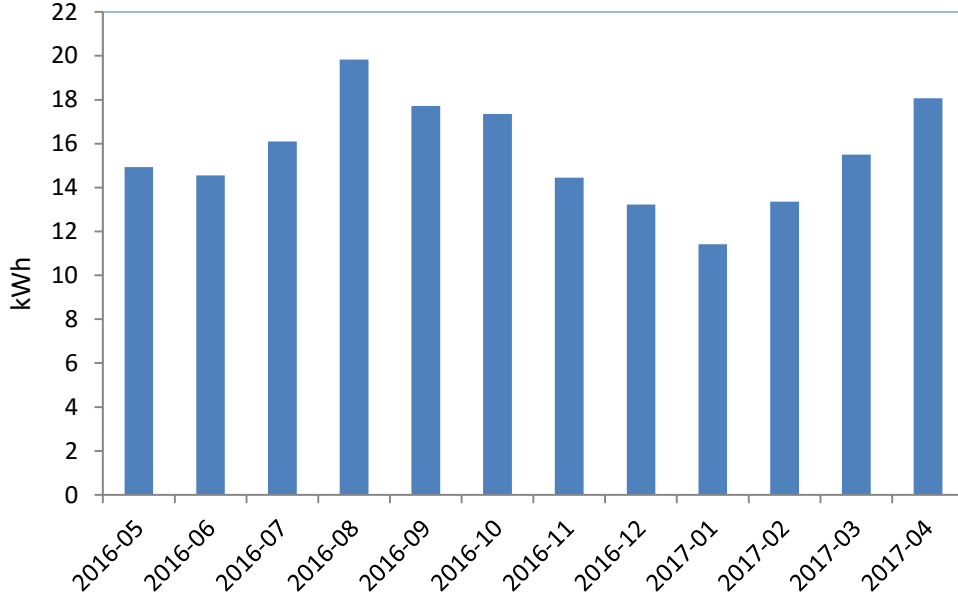
Bir sistem için enerji dengesi; “*sisteme giren enerji – sistemden çıkan enerji = sistemde depolanan enerji*” olarak tanımlanmaktadır. Enerji verimi tanımı 4. Bölümde bahsedildiği gibi sistem bileşenin çıkışındaki enerji miktarının giren enerji miktarına oranı olarak ifade edilmektedir. Yapılan çalışmalarda elde edilen bir yıllık veriler enerji verimi açısından çeşitli şekillerde incelenmiştir. Buna ek olarak çeşitli sistem parametreleri ile olan ilişkisi de grafiklerle verilecektir. Denklem 4.1’de verilen enerji verimi ifadesi genel bir tanımı ifade etmektedir. Sistemimiz için uygun olan denklem 4.2 ifadesine göre işlemler yapılmıştır.

Tüm sistemin aylara göre ortalama olarak gelen güneş enerjisi, üretilen enerji ve enerji verimi ifadesi aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Aylık ortalama enerji değerleri

| Yıl - Ay | Gelen Enerji (kWh) | Üretilen Enerji (kWh) | Enerji Verimi (%) |
|----------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 2016-05 | 137,54 | 14,93 | 10,86 |
| 2016-06 | 133,42 | 14,55 | 10,91 |
| 2016-07 | 146,97 | 16,10 | 10,95 |
| 2016-08 | 155,97 | 19,82 | 12,71 |
| 2016-09 | 167,29 | 17,71 | 10,59 |
| 2016-10 | 137,55 | 17,35 | 12,62 |
| 2016-11 | 113,99 | 14,44 | 12,67 |
| 2016-12 | 109,61 | 13,22 | 12,07 |
| 2017-01 | 97,92 | 11,41 | 11,66 |
| 2017-02 | 121,09 | 13,35 | 11,03 |
| 2017-03 | 137,48 | 15,49 | 11,27 |
| 2017-04 | 154,22 | 18,06 | 11,71 |

Burada belirtilen sistemden ortalama üretilen enerji değerleri Şekil 5.1’de belirtilmiştir.



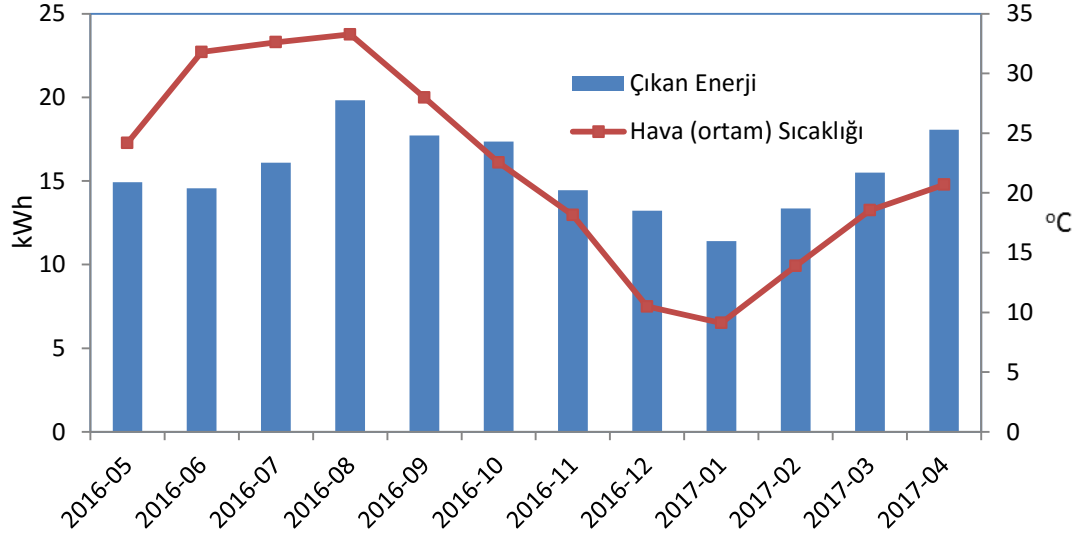
Şekil 5.1 Aylık ortalama üretilen enerji değerleri

Sistemin sıcaklık değerlerinin tespiti, sistem üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Bu aylık ortalama sıcaklık verileri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Aylık ortalama sıcaklık verileri

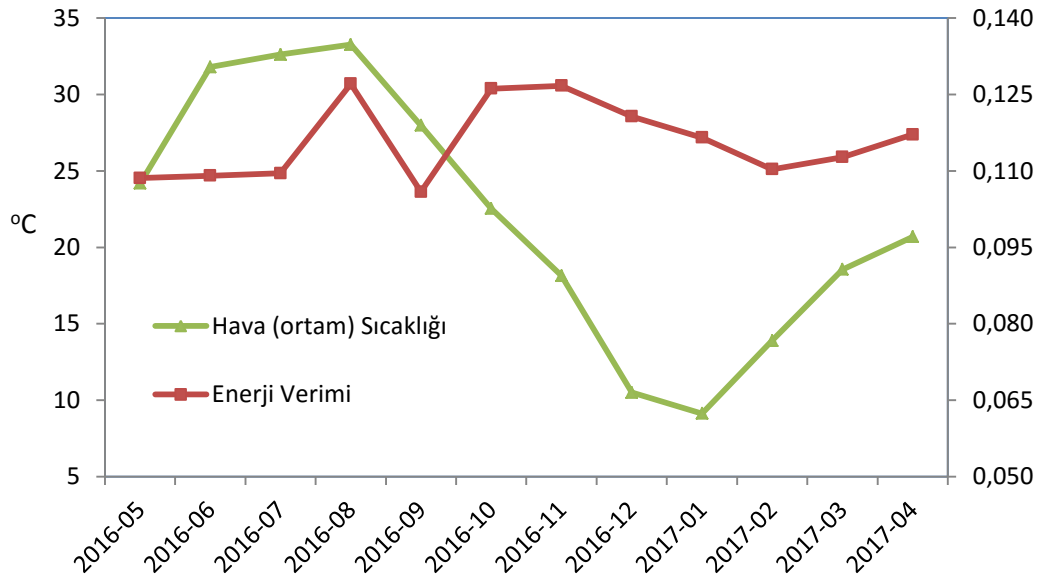
| Yıl - Ay | Modül Sıcaklığı (°C) | Hava (ortam) Sıcaklığı (°C) | FV arkası sıcaklık (°C) |
|----------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 2016-05 | 29,13 | 24,18 | 25,51 |
| 2016-06 | 35,94 | 31,80 | 32,84 |
| 2016-07 | 36,92 | 32,61 | 33,59 |
| 2016-08 | 38,07 | 33,26 | 34,30 |
| 2016-09 | 33,85 | 27,97 | 29,21 |
| 2016-10 | 28,05 | 22,53 | 23,62 |
| 2016-11 | 23,45 | 18,14 | 19,61 |
| 2016-12 | 15,04 | 10,49 | 11,46 |
| 2017-01 | 12,63 | 9,11 | 11,00 |
| 2017-02 | 17,75 | 13,88 | 11,07 |
| 2017-03 | 19,55 | 18,54 | 10,51 |
| 2017-04 | 21,40 | 20,68 | 12,24 |

Hava sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi aylık ortalama değerlere göre Şekil 5.2’de belirtilmiştir.



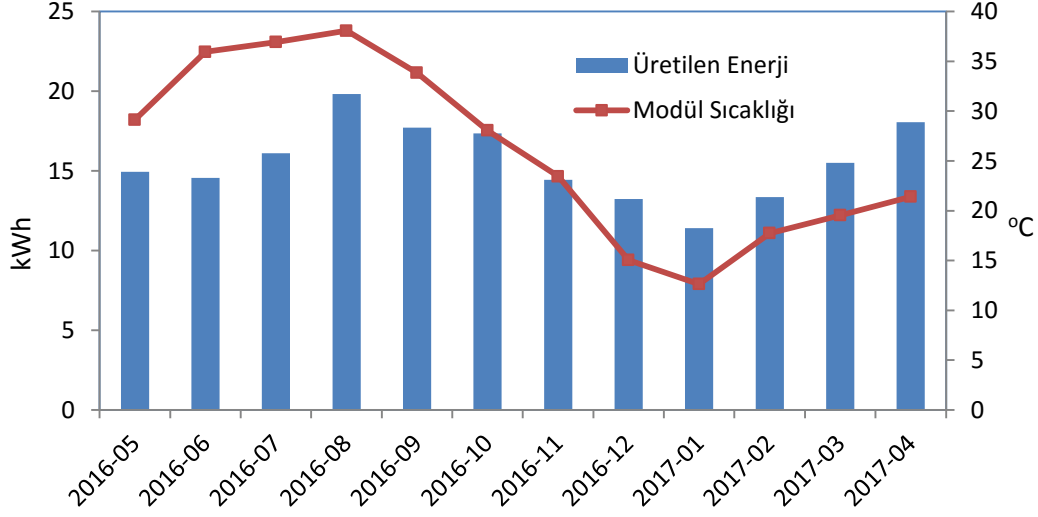
Şekil 5.2 Hava sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi

Hava sıcaklığının verim üzerindeki etkisini Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’deki veriler ışığında tespit edilir. Buna göre ortam sıcaklığının enerji verimi üzerindeki etkisi Şekil 5.3’de verilmiştir.



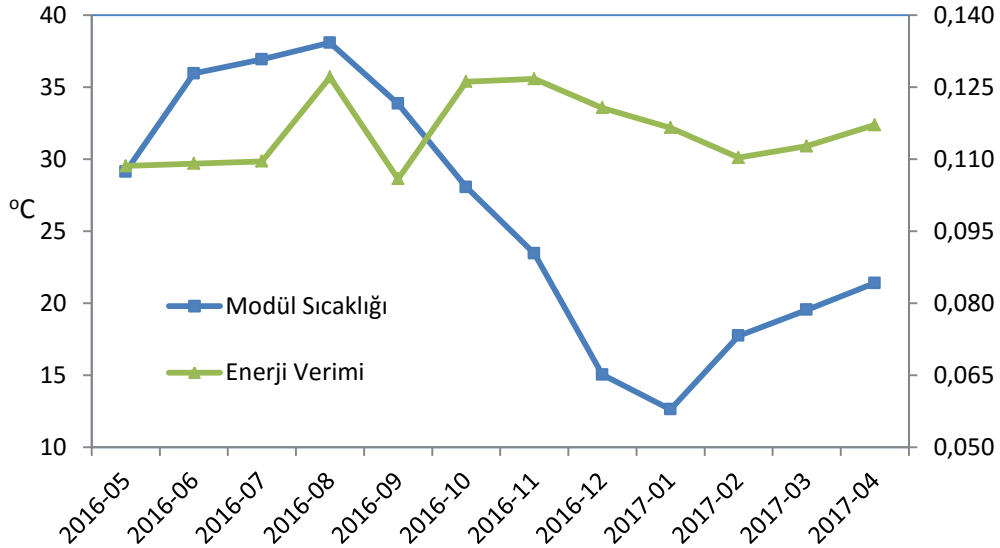
Şekil 5.3 Hava sıcaklığının verim üzerindeki etkisi

Modül sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi aylık ortalama değerlere göre aşağıdaki Şekil 5.4’de belirtilmiştir.



Şekil 5.4 Modül sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi

Modül sıcaklığının verim üzerindeki etkisi Şekil 5.5’te belirtilmiştir.



Şekil 5.5 Modül sıcaklığının verim üzerindeki etkisi

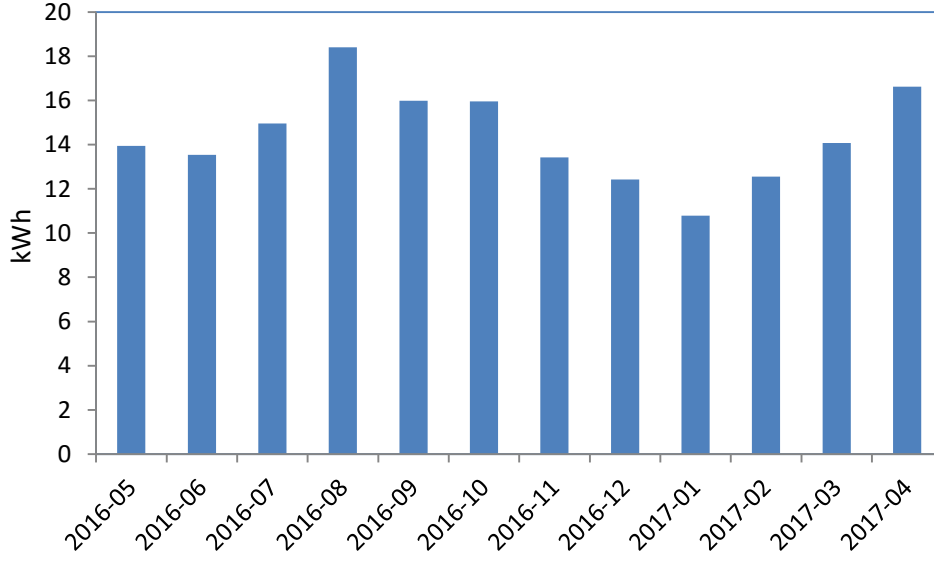
5.2. Ekserji Analizi Sonuçları

Ekserji belirli bir haldeki sistemde varolan enerjinin iş potansiyeli, sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş olarak tanımlanır ayrıca ekserji ifadesi ekserji verimi (Ψ_{FV}) ile tanımlandığı Bölüm 4.2’de belirtilmiştir. Bu ifade çıkan ekserji miktarının giren ekserji miktarına oranı şeklinde tanımlanabilir. Burada elde edilecek sonuçlar için kullanılacak eşitlik Denklem 4.3’tür. Elde edilen aylık ortalama ekserji değerleri Çizelge 5.3’te belirtilmiştir.

Çizelge 5.3 Elde edilen aylık ortalama ekserji değerleri

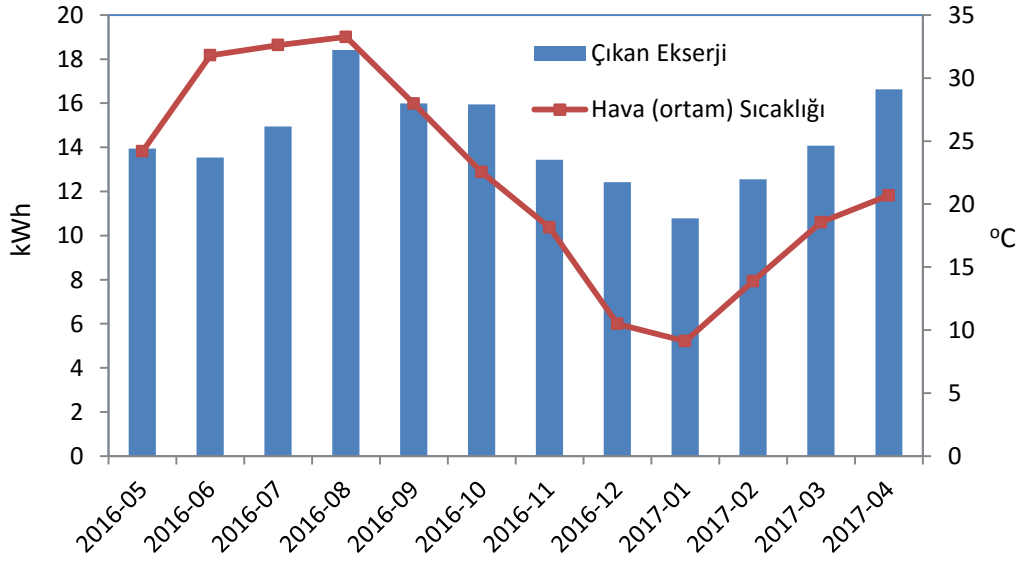
| <i>Yıl - Ay</i> | Giren Ekseji (kWh) | Çıkan Ekserji (kWh) | Ekserji Verimi (%) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 2016-05 | 128,43 | 13,94 | 10,86 |
| 2016-06 | 124,37 | 13,53 | 10,88 |
| 2016-07 | 136,99 | 14,95 | 10,92 |
| 2016-08 | 145,35 | 18,41 | 12,67 |
| 2016-09 | 156,07 | 15,98 | 10,24 |
| 2016-10 | 128,43 | 15,95 | 12,42 |
| 2016-11 | 106,57 | 13,43 | 12,60 |
| 2016-12 | 102,67 | 12,42 | 12,10 |
| 2017-01 | 91,76 | 10,78 | 11,75 |
| 2017-02 | 113,36 | 12,55 | 11,08 |
| 2017-03 | 128,51 | 14,07 | 10,95 |
| 2017-04 | 144,12 | 16,63 | 11,54 |

Tabloda belirtilen sistemden ortalama giren ekserji değerleri Şekil 5.6 ile verilmiştir.



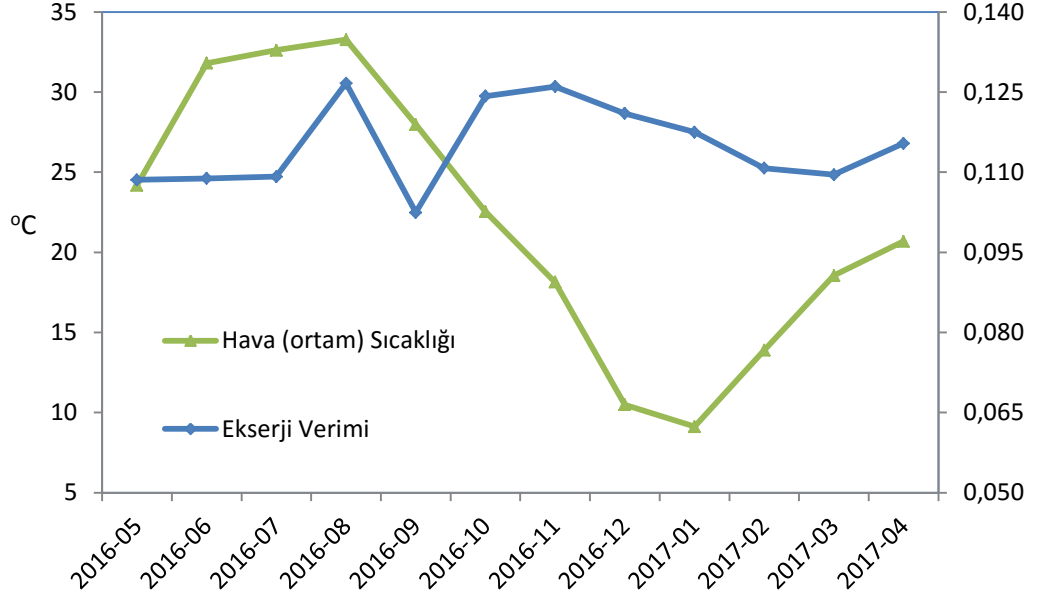
Şekil 5.6 Aylık ortalama giren ekserji değerleri

Aylık ortalama sıcaklık verileri Çizelge 5.2 ile verilmişti. Hava sıcaklığının giren ekserji üzerindeki etkisi aylık ortalama değerlere göre Şekil 5.7'de belirtilmiştir.



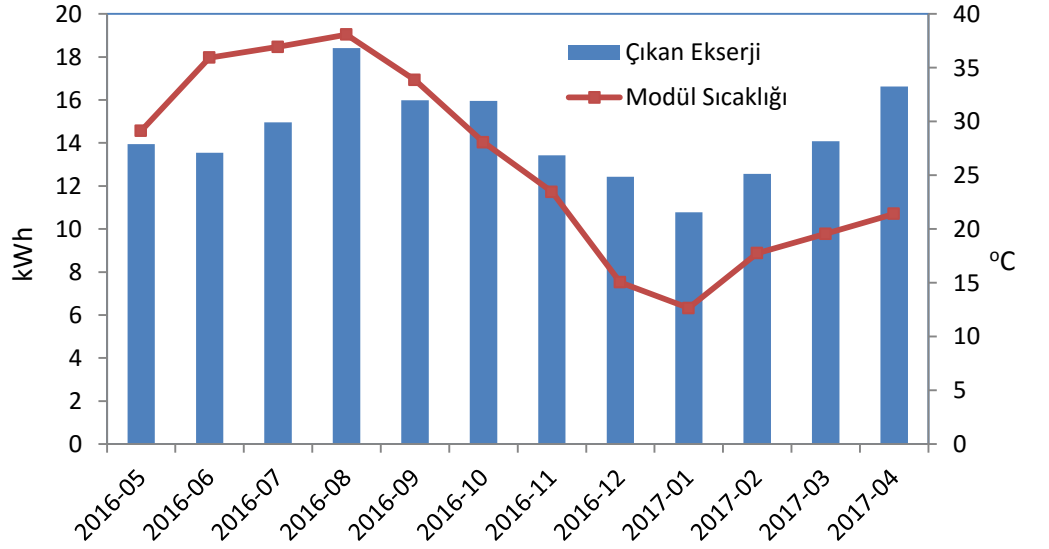
Şekil 5.7 Hava sıcaklığının giren ekserji üzerindeki etkisi

Ortam sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi Şekil 5.8 ile verilmiştir.



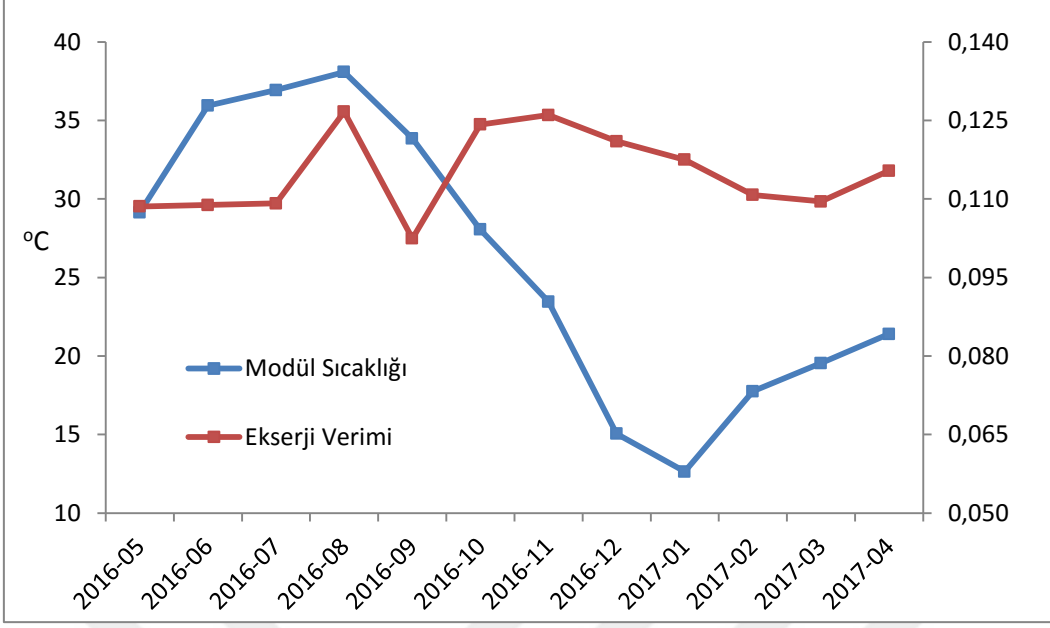
Şekil 5.8 Hava sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi

Modül sıcaklığının çıkan ekserji üzerindeki etkisi aylık ortalama değerlere göre Şekil 5.9 ile verilmiştir.



Şekil 5.9 Modül sıcaklığının çıkan ekserji üzerindeki etkisi

Modül sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 Modül sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi

5.3. Eksergoekonomik Analiz Sonuçları

Eksergoekonomik analizin sonuçlarının değerlendirilmesi için çalışmada iki farklı yöntem gösterilmiştir. Bunlar EXCEM ve SPECO yöntemleridir. Çalışmanın eksergoekonomik sonuçlarını elde ederken bu iki yöntemin teorik analizini deneysel çalışmadan elde edilen veriler ışığında çözümlenmiştir. Çalışmada kullanılacak finansal veriler Çizelge 5.4’de belirtilmiştir.

Fiyatlandırma işlemi analiz sonuçlarında elde edilecek olan Avrupa Para Birimi “Euro” üzerinden tespit edilebilmesi amacıyla Türk Lirası üzerinden ödenen bedeller satın alınma tarihi olan 04/02/2016 tarihi için Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası efektif satış kuru değeri 1 €=3.2513 TL üzerinden dönüştürülmüştür.

Eksergoekonomik analiz günlük analiz olarak yapılmıştır. Ayrıca kullanılacak veriler 01/09/2016 tarihi tüm gün boyunca gerçekleşen deneysel çalışmanın sonuçlarını kapsamaktadır.

Çizelge 5.4 Sistem bileşenlerinin finansal değerleri

| | | |
|--|--------------------------------------|------------|
| | <i>Panel Bedeli</i> | 14003,06 € |
| Panel | <i>Taşımacılık Bedeli</i> | 12000 € |
| | <i>Sigorta</i> | 61,61 € |
| İnverter | <i>İnverter Bedeli</i> | 4018 € |
| Montaj Ekipmanı ve İşçilik (Kablolar, Toprak Hattı vb.) | <i>Ekipman ve İşçilik Bedeli</i> | 11336 € |
| <i>Ücretler Toplamı (K)</i> | | 41418,67 € |

İlk yöntem olarak EXCEM yönteminin sonuçlarını hesaplamak için aşağıda verilmiş olan Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 eşitlikleri kullanılmıştır.

$$\dot{R}_{ex} = \frac{\dot{L}_{ex}}{K} \quad (5.1)$$

$$\dot{R}_{en} = \frac{\dot{L}_{en}}{K} \quad (5.2)$$

\dot{L}_{ex} ifadesi ekserji kayıp oranını ifade etmektedir. Bu sebeple sistemdeki gelen güneş ışınımının ekserji değeri ile sistemden çıkan diğer bir değişle üretilen ekserji değerinin farkı ekserji kayıp oranını vermektedir.

01/09/2016 tarihi için toplam gelen güneş enerjisinin ekserji değeri 160,44 kWh, üretilen ekserji değeri ise 19,33 kWh olarak elde edilmiştir. K ifadesi yatırım maliyetini diğer bir değişle ücretler toplamını ifade etmektedir ve bu değer Çizelge 5.4 belirtildiği üzere 41418,67 € değerindedir. Bu durumda \dot{R}_{ex} ifadesi aşağıdaki gibi bulunur;

$$\dot{R}_{ex} = \frac{(160,44 - 19,33)}{41418,67} = 0,003407 \frac{kWh}{\text{€}}$$

Bu ifade 1€ harcanarak birim maliyet başına kaybolan ekserji miktarı anlamına gelmektedir ve sistemdeki için birim maliyet olan 1€ başına kaybolan ekserji miktarı 0,003 kWh olarak elde edilmiştir.

EXCEM yöntemi ile enerji açısından analiz yapılırsa, L_{en} enerji kayıp oranı ifadesi sisteme gelen güneş ışınımının enerji değeri ile üretilen enerji değerinin farkı enerji kayıp oranını vermektedir. 01/09/2016 günü için toplam gelen güneş enerjisinin enerji değeri 172,08 kWh, üretilen enerji değeri ise 20,35 kWh olarak elde edilmiştir. K ifadesi yatırım maliyetidir ve bu değer Çizelge 5.4'de belirtildiği üzere 41418,67 € değerindedir. Bu durumda \dot{R}_{en} ifadesi aşağıdaki gibi bulunur;

$$\dot{R}_{en} = \frac{(172,08 - 20,35)}{41418,67} = 0,003 \frac{kWh}{\text{€}}$$

Bu ifade 1 € harcanarak birim maliyet başına kaybolan enerji miktarı anlamına gelmektedir ve sistemimiz için birim maliyet başına kaybolan enerji miktarı 0,003 kWh olarak elde edilmiştir.

Diğer eksergoekonomik hesaplama yöntemi olan SPECO yöntemine göre hesaplama yapmak için bir önceki yönteme kıyasla daha detaylı bir takım denklemler kullanılacaktır. Denklem sayısının çok olmasından kaynaklı olarak denklem çözümü Ek Açıklamalar-A kısmında detaylı olarak incelenmiştir.

5.4. Belirsizlik Analizi Sonuçları

Belirsizlik analizinin yapıldığı işlemler Ek Açıklamalar-B kısmında detaylı olarak verilmiştir. Ek Açıklamalar-B bölümünde yapılan çözümler neticesinde sistem ölçümlerinde kullanılan tüm formüllerin belirsizlik değerinin yüzdelik ifadeleri karşılaştırılmalı olarak Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Çeşitli denklemler için belirsizlik değerlerinin yüzdelik ifadesi

| | |
|-------------|---------|
| Denklem 4.6 | %0,5008 |
| Denklem 4.7 | %0,5009 |
| Denklem 4.8 | %0,5009 |
| Denklem 4.9 | %0,5009 |

6. DEĞERLENDİRME

Binaya Birleştirilmiş Fotovoltaik (BBFV) sistemlerin gelişimi son 10 yılda hızlanmış ve bu konuda yapılan çalışmalar önem kazanmıştır. Bu çalışmada bir BBFV sisteminin performansını belirli bir periyodu kapsayacak şekilde enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yöntemleri ile tespit etmek amaçlanmıştır. Tüm sistem bir bütün olarak ele alındığında bir çok deneysel veriden yola çıkarak çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında sistemin bileşen değerlerinden yola çıkarak teorik analiz çalışmaları da yürütülmüş olup çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar 2016 Mayıs ayından 2017 Nisan ayına sonuna kadar olan bir yıllık süreyi kapsamaktadır.

Enerji analizinin sonuçlarına bakıldığında aylık ortalama üretilen enerji değeri Ağustos ayında en yüksek olduğu gözlenmiştir. Burada üretilen enerjinin ikinci en yüksek seviyede olduğu ay Nisan ayıdır ve Nisan ayını 2016 yılının Eylül ayı takip etmektedir. Tüm aylık ortalama üretilen enerji değerlerinin sıcaklık üzerindeki etkisi Şekil 5.2 üzerinden incelendiğinde, hava sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi sıcaklık arttıkça arttığı gözlenmektedir ancak bu doğrusal bir artış değildir. Özellikle yılın sonbahar aylarında hava sıcaklığı önemli oranda düşmüş olmasına rağmen üretilen enerji de aynı oranda önemli bir azalma olmamaktadır. Hava sıcaklığının verim üzerindeki etkisi belirlenmek üzere Şekil 5.3 incelendiğinde, hava sıcaklığının arttıkça yine aynı şekilde verimin de arttığı ancak üretilen enerji üzerinde olduğu gibi 20 – 30°C arasındaki sıcaklık azalmasının verim üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır. Özellikle sıcaklık yaklaşık olarak 20°C'nin altına düştüğünde verimin de düştüğü gözlenmiştir.

Modül sıcaklığının etkisi incelendiğinde modül sıcaklığındaki artış hava sıcaklığı ile benzer olarak artış gözlenmektedir. Modül sıcaklığı üretilen enerji ve dolayısıyla enerji verimi üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Bununla beraber modül üzerindeki sıcaklık yaklaşık 20°C'nin altına düştüğünde üretilen enerji miktarında da önemli bir azalma gözlenmektedir. Şekil 5.5 modül sıcaklığının verim üzerindeki etkisi için grafiğe bakıldığında ise sıcaklık artışının verim üzerindeki etkisi yüksektir ancak sıcaklığı yaklaşık 20°C'nin altına düştüğünde verim üzerinde gözle görülür önemli bir düşme gözlenmiştir, bu durum gelen güneş enerjisinin hava sıcaklığı üzerinde olan doğal etkisinin bir özelliğidir. Buna ek olarak bazı aylardaki veriler değerlendirildiğinde gelen ışınım miktarındaki değişimlerden dolayı sıcaklık arttıkça verimin arttığı görülmüştür .

Ekserji analizi yapıldığında ise en yüksek çıkan ekserji miktarı değeri Ağustos ayında gözlemlenmiştir. Bu değeri Nisan ayı takip etmektedir. Bu durum Ağustos ve Nisan aylarında gelen güneş ışınımı miktarının yüksek olmasıyla açıklanabilir. Gelen ekserji miktarı açısından yorumlandığında Haziran ve Temmuz aylarında gelen ekserji miktarının, ekim ayındaki değerle yaklaşık olarak benzer olduğu gözlenmiştir ancak Ekim ayında çıkan ekserji miktarı değeri diğer iki aya göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi hava sıcaklığı değerinin diğer iki aya göre daha düşük olmasıdır. Buna ek olarak hava sıcaklığının ekserji verimi üzerindeki etkisi enerji verimi grafiklerinde açıklandığı gibi bir önceki çıkan sonuçlara paralel bir sonuç çıkmaktadır. Sıcaklık yükseldiğinde artış meydana gelse bile özellikle 20 – 30°C arasındaki sıcaklık azalmasının verim üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır. Yaklaşık 20°C sıcaklık altına düştüğümde verimde önemli azalmalar gözlenmektedir. Şekil 5.9 modül sıcaklığının çıkan ekserji üzerindeki etkisi grafiği incelendiğinde ise modül sıcaklığının çıkan ekserji ile hemen hemen paralellik gösterdiği gözlenmektedir. Bu durum binaya birleştirilmiş fotovoltaikler konusunda ilerleme kaydedilmesi diğer bir değişle sistem veriminin artırılması konusunun modül sıcaklığının etkisinin araştırılması ve incelenmesine bağlıdır.

Sistemin üzerinde yapılan çalışmanın sonuçlarını eksergoekonomik yöntemler ile çözümlendiğinde elde edilen çözümleri iki başlık üzerinden tespit edilebilir. EXCEM yöntemi sonuçları ve SPECO yöntemi sonuçları olarak iki ayrı sonuç değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçların ifadesi günlük analiz olarak yapılmıştır. Kullanılan veriler 01/09/2016 tarihi tüm gün boyunca gerçekleşen deneysel çalışmanın sonuçlarını kapsamaktadır.

EXCEM yöntemine göre elde edilen ekserji kayıp oranı \dot{R}_{ex} ifadesi $0,003407 \frac{kWh}{\epsilon}$ olarak hesaplanmıştır. Bu ifade 1€ harcanarak birim maliyet başına kaybolan ekserji miktarı anlamına gelmektedir ve sistemimiz için birim maliyet başına günlük kaybolan ekserji miktarı $0,003407 \frac{kWh}{\epsilon}$ olarak elde edilmiştir.

SPECO yöntemine göre elde edilen c_c ifadesi sistemin birim çıkış ekserjisinin başına ortalama maliyetini ifade eder ve bu değer 0,8335 € olarak bulunmuştur. Diğer bir ifade ile sistemden çıkan her 1 kWh ekserji için günlük ortalama 0,8335 € maliyet belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda ölçüm değerlerinin doğruluğu ve buna ilişkin hata analizleri yapılan çalışmaların sonuçlarının doğru değerlendirilmesi adına önemlidir. Bu veri değerlendirmesindeki ifadelerin doğruluğunun tespit edilmesi amacıyla hata analizinin yapılabilmesi için belirsizlik analizi adı verilen bir yöntem kullanılmaktadır. Belirsizlik analizi sonuçları değerlendirilirse sistemin incelendiği denklemler için 4 farklı denklem bulunmaktadır. Bu denklemler için belirsizlik değerlerinin yüzdelik ifadeleri sırasıyla %0,500898, %0,500904, %0,500905, %0,500904 olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar birçok açıdan ele alındığı için tek bir noktaya veya sonuca varmak mümkün değildir. Enerji ve ekserji ifadesinde elde edilen sonuçların binaya birleştirilmiş fotovoltaik sistemlerin gelişiminin hızla devam ettiği ve bunun sadece gelen ışınım miktarıyla değil sıcaklık vb. parametreler ile olan ilişkisinin önemli bir parametre olduğunu bizlere söylemektedir. Sıcaklığın elde edilen verilerle karşılaştırmasına bakıldığında bu verilerin sistemin verimine etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Bu tezde çalışılmış olan fotovoltaikler konusu hakkında son yıllarda benzer çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların birçoğu hali hazırdaki sistemlerin verimini arttırmaya yönelik olup bu konuda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanım payının %22,6 (2014) seviyesinden 2020 yılında %26,0 ve 2040 yılında da %29,0'a ulaşacağı öngörüldüğü düşünüldüğünde ve buna ek olarak önümüzdeki yıllarda binaya entegre fotovoltaik teknolojisinin yapılarda daha az yer kaplaması ve estetik açıdan tercih edilebilir olmasından dolayı daha ucuz ve hane halkı tarafından daha fazla kullanımına sebep olacağı ve bu konuda yapılan çalışmalarda devlet teşviklerinin artırılması ilgili teknolojinin daha hızlı gelişime yol açacağı açıktır.

Sistem sadece üretilen enerji ve ekserji değerleri üzerinden tanımlanmamıştır. Çalışmamızda sistemin ekonomik yönden açıklanmasının bir ifadesi olarak eksergoekonomik yöntemler kullanılmıştır. Burada elde edilen sonuçlara bakıldığında sistemin ekonomik yönden açıklanması yapılmıştır. Tüm bunlara ek olarak sistemin verilerinden elde edilen sonuçların doğruluğu ve hata analizi konusunda bilgi edinebilmek amacıyla belirsizlik analizi yöntemi kullanılmıştır. Burada sistemin elde edilen sonuçlarındaki hata değerleri ve farklı formüller için bu hata değerlerinin yüzdelik ifadeleri elde edilmiştir. Bu sonuç değeri bize sistemin hesaplarındaki hata oranlarını vermektedir.

EK AÇIKLAMALAR-A

Buradaki eşitliklerin çözümünde 01/09/2016 tarihi referans alınmıştır ve analizler günlük analiz olarak ilgili günün tüm verileri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.2’de belirtilen sistemimize uygun denklemler belirlenmiştir. FV kısmının çözüm işlemi daha önce Denklem 4.18’de belirtilen ifadenin hesaplaması ile gerçekleştirilmiştir.

$$c_{\check{c}} \cdot \dot{E}x_{\check{c}} = c_g \cdot \dot{E}x_g + \dot{Z}_{iYD,FV} + \dot{Z}_{BiM,FV}$$

Yukarıda verilen ifadede c_g gösterimi güneşin birim ekserji başına ortalama maliyetini gösterir ve bu değer 0’dır. $\dot{E}x_{\check{c}}$ ifadesi ise sistemin fotovoltaik kısmı ele alındığında çıkan ekserjinin değeridir ve DC elektrik akımı olan bu değer 20,30 kWh’dir. $\dot{Z}_{iYD,FV}$ değerini hesaplayabilmek için CRF yöntemi formülü olan ve bir önceki bölümde verilen Denklem 4.19 kullanılmıştır.

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

Bu denklemdeki parametreler i yıllık faiz oranı en çok işlem gören devlet tahvilinin faizidir ve bu değer çalışmanın hesaplamalarının yapıldığı 2017 yılı Nisan ayı için %10,9 olarak elde edilmiştir. n sistemin ömrünü ifade etmektedir ve bu değer sistemimiz için 25 yıldır.

$$CRF = \frac{0,109 \cdot (0,109 + 1)^{25}}{(0,109 + 1)^{25} - 1} = 0,11787422$$

CRF değerini elde edilmesinden sonra \dot{Z}_{iYD} değerini Denklem 4.2’ye göre elde edilir.

$$\dot{Z}_{iYD,FV} = \frac{(0,11787422) \cdot (41418,67)}{365} = 13,37587235 \frac{\text{€}}{\text{gün}}$$

$\dot{Z}_{BiM,FV}$ ifadesini elde edebilmek için Denklem 4.21’deki ifadenin çözümü yapılmıştır. Bunun için yıllık bakım işletme maliyetinin $40 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$ olduğunu göz önüne alarak işlemler gerçekleştirilirse aşağıdaki sonuca ulaşılır;

$$\dot{Z}_{BiM,FV} = \frac{40 \cdot (7,44)}{365} = 0,815342466 \frac{\text{€}}{\text{gün}}$$

Denklem 4.18'e elde edilen değerler yazılırsa c_c ifadesi aşağıdaki gibi bulunur.

$$c_c \cdot (20,305916) = 0 + 13,37587235 + 0,815342466$$

$$c_c = 0,698870928 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Şekil 4.2'de belirtildiği gibi sistemin diğer kısmı olan inverter bölümü için hesaplaması adına temel olarak kullanılacak formül Denklem 4.23'de belirtilmiştir. $\dot{Z}_{iYD,YE}$ ifadesini elde etmek için aşağıdaki gibi bir dizi işlemler yapılacaktır.

İnverterin her 10 yılda bir değiştirilmesi işlemi gereklidir. İnverterin değeri 4018 € dur. $\dot{Z}_{iYD,YE}$ ifadesinin bulunabilmesi için bu bakım maliyetlerinin günümüz değerlerinde yıllık olarak bedelini hesaplanmalıdır. Bunun için Denklem 5.3 ve Denklem 5.4 eşitliklerini kullanmalıyız;

$$P_1 = F/(i + 1)^{n1} \quad (5.3)$$

$$P_2 = F/(i + 1)^{n2} \quad (5.4)$$

. Burada P inverter'in ileri yıllardaki faiz oranı ile yıllık olarak günümüz değerini, F inverterin bedelini ve n ise inverterin kullanım ömrünü ifade eder.

Denklem 5.3 ve Denklem 5.4 çözümlenirse aşağıdaki sonuca ulaşılır;

$$P_1 = 4018/(0,109 + 1)^{10} = 1427,88 \text{ €}$$

$$P_2 = 4018/(0,109 + 1)^{20} = 507,43 \text{ €}$$

Toplam maliyet ise ilk yatırım maliyeti ile inverterin değişim ücretinin toplamıdır. Bu değer 5953,322428 € olarak elde edilir. Bu ifade aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\dot{Z}_{iYD,YE} = \frac{(0,11787422) \cdot (5953,322428)}{365} = 1,922 \frac{\text{€}}{\text{gün}}$$

Bilinen tüm değerlere göre işlem yapıldığında sonuç aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$c_{\text{ç}} \cdot (19,331) = (0,69) \cdot (20,30) + 1,922$$

$$c_{\text{ç}} = 0,833 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Bu ifade sistemin birim çıkış ekserjisinin başına ortalama maliyetini ifade eder. Diğer bir ifade ile sistemden çıkan her 1 kWh ekserji için ortalama 0,833 € maliyet belirlenmiştir.



EK AÇIKLAMALAR-B

Ekserji verimi hesaplamasının belirsizlik değerini elde edilebilmesi amacıyla yapılacak hesaplamalarda Denklem 4.3’de belirtilen pay ve payda için değerleri ayrı ayrı hesaplayıp sonrasında tüm sistem için hesaplamalar yapılmıştır. Tüm hesaplamalar için alınacak değerlerin referansı 1 Eylül 2016 tarihi 13:05 saati için değerlendirilmiştir. Bu değerler Çizelge 5.5’te belirtilmiştir.

Δz_{pay} Denklem 4.3’de payın duyarlılık değerini belirtmektedir. Δz_{pay} ifadesinin hesaplanabilmesi için ilgili formül iki kısma ayrılır. Δz_{pay1} denklemdeki $V_m \cdot I_m$ ifadesini karşılamaktadır. Δz_{pay2} ifadesi ise denklemin geri kalanını ifade etmektedir. Bu durumda Δ_{pay} ifadesi denklem 4.24’e göre Denklem 5.5’te ifade edilmiştir.

Çizelge B.1 Eşitliklerdeki ifadeler ve referans an için değerleri

| Formüldeki ifade | Değeri |
|----------------------------|----------------------------|
| $V_m \cdot I_m$ | 2518 W |
| T_{ort} | 307,19 K |
| $T_{güneş}$ | 6000 K |
| $h_{ca}=5,7+3,8 \cdot V_w$ | 11,221 W/m ² .K |
| $A_{modül}$ | 57,6 m ² |
| $T_{modül}$ | 317,47 K |
| I_s | 350,49 W/m ² |
| V_w | 1,45286 m/s |

$$\Delta_{pay} = \sqrt{\Delta_{pay1}^2 + \Delta_{pay2}^2} \quad (5.5)$$

Δz_{pay1} ifadesi denklemde inverter cihazının duyarlılık değerini karşıladığı için 0,02 değerindedir. Δz_{pay2} ifadesinin genel denklemi aşağıdaki Denklem 5.6’daki gibidir.

$$\frac{\Delta z_{pay2}}{|z_{pay2,maks}|} = \sqrt{\left(\frac{\Delta z_1}{z_{1,maks}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z_2}{z_{2,maks}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z_3}{z_{3,maks}}\right)^2} \quad (5.6)$$

z_1 ifadesi Denklem 4.4'deki $\left[1 - \left(\frac{T_{ortam}}{T_{modül}}\right)\right]$, z_2 ifadesi ise Denklem 4.4'deki h_{ca} kısmı ve son olarak z_3 ifadesi ise Denklem 4.4'deki $(T_{modül} - T_{ortam})$ kısmı tanımlamaktadır. Denklemdeki $A_{modül}$ ifadesi ise hassaslık değeri olmayan sabit değer olduğu için tüm sistem hesaplamalarına katılmamıştır. Denklem 5.6'daki değerler çözümlenirse değerler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\Delta z_1}{z_{1,maks}} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{307,19}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{317,48}\right)^2} = 2,586 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\Delta z_2}{z_{2,maks}} = \frac{3,8 \cdot \Delta V_m}{5,7 + 3,8 \cdot \Delta V_m} = \frac{(3,8) \cdot (0,06)}{5,7 + (3,8) \cdot (0,06)} = 0,02033$$

$$\frac{\Delta z_3}{z_{3,maks}} = \frac{\sqrt{(0,5)^2 + (0,1)^2}}{317,48 - 307,19} = 0,0495$$

Denklem 5.5 için değerleri yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{\Delta z_{pay2}}{|z_{pay2,maks}|} = \sqrt{(2,586 \cdot 10^{-6})^2 + (0,02033)^2 + (0,0495)^2} = 0,05356$$

Buradan Δz_{pay2} ifadesi çekilirse;

$$\Delta z_{pay2} = |z_{pay2,maks}| \cdot (0,05356) = (215,338) \cdot (0,05356) = 11,5335$$

Pay kısmının duyarlılık değeri Denklem 4.24'e göre uygun olarak yazılırsa aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\Delta_{pay} = \sqrt{(0,02)^2 + (11,5335)^2} = 11,534$$

Bu aşamadan sonra tüm sistem hesaplaması için payda kısmının duyarlılık değerinin hesaplanması gereklidir. Sistemdeki ekserji temel formülünün payda kısmı için 4 farklı ifade kullanılmaktadır. Sistemin duyarlılık değerlerini karşılaştırmalı hesaplayabilmek için bu 4 farklı denklem içinde Δ_{payda} değeri hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalarda $\frac{T_o}{T_{güneş}}$ ifadesi bütün formüllerde bulunduğu için bu ifadenin duyarlılık değerlerinin tespit edilmesi işlemleri kolaylaştıracaktır.

$$\frac{T_o}{T_{güneş}} = \frac{307,19}{6000} = 0,0512$$

Aşağıda verilen denklemlerde Δz_5 ifadesi ilgili formüllerdeki $\frac{T_o}{T_{güneş}}$ ifadesinin duyarlılık değeridir. Burada güneşin sıcaklık değeri sabit olarak kabul edildiği için duyarlılık değeri 0 olarak alınır. Bu sebeple Δz_4 ortam sıcaklığı olan T_o ifadesinin duyarlılık değeri belirtilmelidir.

$$\frac{\Delta z_5}{z_{5,maks}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta z_4}{z_{4,maks}}\right)^2 + 0}$$

$$\Delta z_5 = z_{5,maks} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta z_4}{z_{4,maks}}\right)^2 + 0} = 0,0511 \cdot \frac{0,1}{307,19} = 1,667 \cdot 10^{-5}$$

Payda da kullanılan ilk formül Denklem 4.8 denklem için içerisinde sabit değerler olması sebebiyle duyarlılık değeri 0 alınacaktır. Denklem 4.6 için aşağıdaki Denklem 5.7'deki elde edilir.

$$\frac{\Delta_{payda,petela}}{\Delta_{payda,petela,maks}} = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \left(\frac{T_o}{T_{güneş}}\right)^3 \cdot \Delta z_5 \quad (5.7)$$

Denklem 5.7 düzenlenirse aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\frac{\Delta_{payda,petela}}{\Delta_{payda,petela,maks}} = \sqrt{\left[\left(\frac{4}{3}\right) \cdot \left(\frac{307,19}{6000}\right)^3 \cdot 1,667 \cdot 10^{-5}\right]^2 + \left[\frac{4}{3} \cdot (1,667 \cdot 10^{-5})\right]^2}$$

$$\frac{\Delta_{payda,petela}}{\Delta_{payda,petela,maks}} = 2,223 \cdot 10^{-5}$$

Aynı işlem diğer payda formülü olan Denklem 4.7 için yazılırsa Denklem 5.8 elde edilir.

$$\frac{\Delta_{payda,spanner}}{\Delta_{payda,spanner,maks}} = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \Delta z_5 \quad (5.8)$$

Denklem 5.8 düzenlenirse aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\frac{\Delta_{payda,spanner}}{\Delta_{payda,spanner,maks}} = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot (1,667 \cdot 10^{-5}) = 2,222 \cdot 10^{-5}$$

Denklem 4.9 için yazılırsa aşağıdaki gibi Denklem 5.9 elde edilir;

$$\frac{\Delta_{payda,jeter}}{\Delta_{payda,jeter,maks}} = \Delta Z_5 \quad (5.9)$$

burada elde edilen değerler uygulanırsa Denklem 5.9 için aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\frac{\Delta_{payda,jeter}}{\Delta_{payda,jeter,maks}} = 1,667 \cdot 10^{-5}$$

Bulunan bütün değerleri kullanarak tüm sistem için duyarlılık değerini hesaplamak adına farklı formüller için yapılan payda duyarlılık hesabı tüm sistem için uygulanabilir. Denklem 4.6 için tüm sistem denklem çözümü Denklem 5.10 şeklinde olur;

$$\frac{\Delta_{tüm sistem}}{\Delta_{tüm sistem,maks}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{pay}}{\Delta_{pay,maks}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{payda,petela}}{\Delta_{payda,petela,maks}}\right)^2} \quad (5.10)$$

Denklem 4.8 için tüm sistem denklem çözümü Denklem 5.11 şeklinde olur;

$$\frac{\Delta_{tüm sistem}}{\Delta_{tüm sistem,maks}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{pay}}{\Delta_{pay,maks}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{payda,petela}}{\Delta_{payda,petela,maks}}\right)^2} \quad (5.11)$$

$$\Delta_{tüm sistem,petela} = (0,12241) \cdot \sqrt{(5,00905 \cdot 10^{-3})^2 + (2,223 \cdot 10^{-5})^2}$$

Burada Denklem 4.6 kullanıldığında tüm sistem için duyarlılık değeri elde edilir.

$$\Delta_{tüm sistem,petela} = 6,13164 \cdot 10^{-4}$$

Duyarlılık sonucu referans tarih için elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında elde edilen tüm sistem için formülasyonun ölçüm belirsizliği değeri % 0,5008 olarak elde edilmektedir.

Denklem 4.7 için tüm sistem çözümünü Denklem 5.12 ile elde edilir;

$$\frac{\Delta_{\text{tüm sistem,spanner}}}{\Delta_{\text{tüm sistem,spanner,maks}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{pay}}}{\Delta_{\text{pay,maks}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{payda,spanner}}}{\Delta_{\text{payda,spanner,maks}}}\right)^2} \quad (5.12)$$

Burada $\Delta_{\text{tüm sistem,spanner}}$ ifadesi çekilirse Denklem 5.13 elde edilir;

$$\Delta_{\text{tüm sistem,spanner}} = \Delta_{\text{tüm sistem,maks}} \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{pay}}}{\Delta_{\text{pay,maks}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{payda,spanner}}}{\Delta_{\text{payda,spanner,maks}}}\right)^2} \quad (5.13)$$

elde edilen değerler yerine yazılırsa;

$$\Delta_{\text{tüm sistem,spanner}} = (0,1202) \cdot \sqrt{(5,00905 \cdot 10^{-3})^2 + (2,222 \cdot 10^{-5})^2}$$

Tüm sistemin duyarlılık değeri hesaplanacak olursa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\Delta_{\text{tüm sistem,spanner}} = 6,021439 \cdot 10^{-4}$$

Duyarlılık sonucu referans tarih için elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında tüm sistem için formülasyonun ölçüm belirsizliği değeri % 0,5009 olarak elde edilmektedir.

Denklem 4.8 için tüm sistemin çözümü için gerekli denklem çözümü Denklem 5.14 üzerinden elde edilebilir;

$$\frac{\Delta_{\text{tüm sistem}}}{\Delta_{\text{tüm sistem,maks}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{pay}}}{\Delta_{\text{pay,maks}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{payda,nobusawa}}}{\Delta_{\text{payda,nobusawa,maks}}}\right)^2} \quad (5.14)$$

Bir önceki denklem için yapılan işlemler bu denklem içinde yapılırsa;

$$\Delta_{\text{tüm sistem,nobusawa}} = (0,1200595) \cdot \sqrt{(5,00905 \cdot 10^{-3})^2 + \left(\frac{0}{19179,069}\right)^2}$$

Tüm sistemin duyarlılık değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\Delta_{\text{tüm sistem,nobusawa}} = 6,013844 \cdot 10^{-4}$$

Duyarlılık sonucu referans tarih için elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında elde edilen tüm sistem için formülasyonun ölçüm belirsizliği değeri % 0,5009 olarak elde edilmektedir.

Denklem 4.9 için tüm sistem denklem çözümü aşağıdaki Denklem 5.15 üzerinden elde edilebilir.

$$\frac{\Delta_{\text{tüm sistem}}}{\Delta_{\text{tüm sistem,maks}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{pay}}}{\Delta_{\text{pay,maks}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{payda,jeter}}}{\Delta_{\text{payda,jeter,maks}}}\right)^2} \quad (5.15)$$

$$\Delta_{\text{tüm sistem,jeter}} = (0,120211) \cdot \sqrt{(5,00905 \cdot 10^{-3})^2 + (1,667 \cdot 10^{-5})^2}$$

Tüm sistemin duyarlılık değeri aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$\Delta_{\text{tüm sistem,jeter}} = 6,021439 \cdot 10^{-4}$$

Duyarlılık sonucu referans tarih için elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında elde edilen tüm sistem için formülasyonun ölçüm belirsizliği değeri % 0,5009 olarak elde edilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abid, M. and Hepbaşlı, A.**, 2015, Dynamic Exergetic Analysis and Evaluation of Photovoltaic Modules, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Kingdom of Saudi Arabia, 15p.
- Agrawal, B. and Tiwari, G.**, 2010a, Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions, Applied Energy, India, 10p.
- Agrawal, B. and Tiwari, G.**, 2010b, Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems, Energy and Buildings, India, 10p.
- Ballı, Ö.**, 2008, Kojenarasyon sistemlerinin enerji, kullanılabilirlik(ekserji) ve eksergoekonomik analiz yöntemleri kullanılarak performansının değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 203s.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M.**, 1996, Thermal design and optimization, Wiley, New York.
- Bıyık, E., Araz, M., Hepbaşlı, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliviera, A.C., Caño, T., Rico, E., Lechón, J.L., Andrade, L., Mendes, A. and Atlı, Y.B.**, 2017, A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems, Engineering Science and Technology, Turkey, 26p.
- Chow, T.T., Hand, J.W. and Strachan, P.A.**, 2003, Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building, Applied Thermal Engineering, Hong Kong, 15p.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A.**, 1989, Termodinamik - Mühendislik Yaklaşımıyla, Literatür Yayıncılık, Turkey, 945s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dinçer, İ. and Rosen, M.A.**, 2007, Exergy, Elsevier Science, 576p.
- Eke, R. and Demircan, C.**, 2015, Shading effect on the energy rating of two identical PV systems on a building façade, Solar Energy, Turkey, 10p.
- Hepbaşlı, A. and Alsuhaibani, Z.**, 2011, Exergetic and exergoeconomic aspects of wind energy systems in achieving sustainable development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Kingdom of Saudi Arabia, 16p.
- Jeter, S.M.**, 1981, Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation, Solar Energy, 26:231–236.
- Koyunbaba, B.K, Yılmaz, Z. and Ulgen, K.**, 2011, An approach for energy modeling of a building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system, Energy and Buildings, Turkey, 9p.
- Lazzaretto, A. and Tsatsaronis, G.A.**, 1996, A general process-based methodology for exergy costing, ASME advanced energy systems division, vol. 36, New York, 28-413p.
- Lazzaretto, A. and Tsatsaronis, G.A.**, 2006, SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, Energy, Italy, 33p.
- Nobusawa, T.**, 1980, Introductory Text of Exergy, Tokyo: Ohmsha (in Japanese).
- Penn Üniversitesi**, 2017, “Averaging, Errors and Uncertainty”, http://virgo-physics.sas.upenn.edu/uglabs/lab_manual/Error_Analysis.pdf (Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2017)
- Petela, R.**, 1964, Energy of heat radiation, J. Heat Transfer, 86:187–192.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rüther, R. and Braun, P.**, 2009, Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates, Solar Energy, Brazil, 9p.
- Shukla, A.K, Sudhakar, K. and Baredar, P.**, 2016a, Exergetic analysis of building integrated semitransparent photovoltaic module in clear sky condition at Bhopal India, Case Studies in Thermal Engineering, İndia, 10p.
- Shukla, A.K., Sudhakar, K. and Baredar, P.**, 2016b, Exergetic assessment of BIPV module using parametric and photonicenergy methods: A review, Energy and Buildings, İndia, 12p.
- Spanner, DC.**, 1964, Introduction to Thermodynamics, London: Academic Press, London
- Şahin, A.D., Dinçer, İ. and Rosen, M.A.**, 2007, Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems, Solar Energy Materials & Solar Cells, Turkey, 7p.
- Türkiye Elektrik Anonim Şirketi**, 2017, “Elektrik Üretim Sektör Raporu”, http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2f1%2fDocuments%2fSekt%c3%b6r%20Raporu%2fEUAS-Sektor_Raporu2016.pdf (Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2017)
- T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı**, 2016, “Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü 2016 Yılı Faaliyet Raporu”, http://www.eie.gov.tr/document/2016_f_r.pdf (Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2017)
- Wittkopf, S., Valliappan, S., Liu L., Ang, K.S., Chye, S. and Cheng, J.**, 2012, Analytical performance monitoring of a 142.5 kW_p grid-connected rooftop BIPV system in Singapore, Renewable Energy, Singapore, 12p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yang, T. and Athienitis, A., 2015, Experimental investigation of a two-inlet air-based building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system, Applied Energy, Canada, 10p.





ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1992 yılında Manisa ili Soma ilçesinde doğmuştur. 2006 yılında lise eğitimine başladığı Soma Anadolu Öğretmen Lisesinden 2010 yılında mezun olmuştur. Ardından 2010 yılında yüksek öğrenimine Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde başlamıştır ve bu öğrenimini 2014 yılında tamamlamıştır.

2015 yılında Şubat ayında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Termodinamik Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.



