

# ELEKTRİK VE HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN ENTEGRE SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

**Abbas Alpaslan Koçer**

*Süleyman Demirel Üniversitesi,  
Uluborlu Selahattin Karasoy,  
Meslek Yüksekokulu, Isparta  
alpaslankocer@sdu.edu.tr*

**Murat Öztürk\***

*Doç. Dr.,  
Süleyman Demirel Üniversitesi,  
Teknoloji Fakültesi,  
Mekatronik Mühendisliği Bölümü,  
Isparta  
muratozturk@sdu.edu.tr*

## ÖZ

Bu çalışmanın ana amacı, elektrik ve hidrojen üretim-depolama uygulamaları için güneş havuzu, fotovoltaik güneş sistemi ve rüzgar türbini destekli çok fonksiyonlu sistemin termodinamik analizini sunmaktır. Entegre sistem bileşenleri için enerji ve ekserji verimliliği ile termodinamik kayıplar arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Termodinamik analiz güneş havuzu, fotovoltaik ve rüzgar türbini sistemlerinin ekserji analizlerini içeren entegre sistemin bileşenlerini kapsamaktadır. Enerji analizine bağlı olarak yaklaşık enerji verimlilikleri sırasıyla, güneş havuzunda %56, rüzgar türbininde %59, fotovoltaik sistemde %31, organik Rankine çevriminde (ORC) %16, proton değişimli membran yakıt hücresinde (PEMFC) %29, tüm sistem için maksimum enerji verimi %62 ve ekserji analizine bağlı olarak ekserji verimlilikleri sırasıyla, güneş havuzunda %40, rüzgar türbininde %38, fotovoltaik sistemde %17, organik Rankine çevriminde %25, proton değişimli membran yakıt hücresinde (PEMFC) %27, tüm sistem için maksimum ekserji verimi %46 olarak hesaplanmıştır. Entegre sistemin ekserji tüketiminin ekserji verimliliğine oranının ortam sıcaklığına, güneş radyasyonu akısına ve rüzgar hızına son derece bağlı olduğu; fakat güneş havuzu tabakalarının ekserji farkından az etkilendiği bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif enerji kaynakları, entegre sistem, termodinamik analiz

# THERMODYNAMIC ANALYSIS OF INTEGRATED SYSTEM FOR ELECTRICITY AND HYDROGEN PRODUCTION

## ABSTRACT

The purpose of this study is to present thermodynamic analysis results of the solar pond, photovoltaic and wind based multigeneration energy production system for electricity and hydrogen production. The relationships between thermodynamic losses and energy and exergy efficiencies are investigated. Thermodynamic analysis performed in this paper contains exergy analyses of solar pond, photovoltaic and wind turbine subsystems. Energy efficiencies of solar pond, wind turbine, photovoltaic subsystem, organic Rankine cycle, PEM fuel cell and wholes system are 56%, 59%, 31%, 16%, 29% and 62%, respectively. On the other hand exergy efficiencies of solar pond, wind turbine, photovoltaic subsystem, organic Rankine cycle, PEM fuel cell and wholes system are 40%, 38%, 17%, 25%, 27% and 46%, respectively. The ratio of exergy consumption to exergy efficiency of integrated system is highly dependent to environment temperature, solar radiation flux and wind speed, however the effect of exergy difference on solar pond is very low.

**Keywords:** Alternative energy sources, integrated system, thermodynamic analysis

\* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 25.11.2015

Kabul tarihi : 28.10.2016

Koçer, A. A., Öztürk, M. 2016. "Elektrik ve Hidrojen Üretimi İçin Entegre Sisteminin Termodinamik Analizi," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 681, s. 49-58.

## 1. GİRİŞ

Enerji kullanımı doğrudan kalkınmaya ve refaha bağlıdır. Güvenli ve çevreye duyarlı enerji kullanımının artan talebini karşılamak önemli bir sorundur. Enerji talebinin bir nedeni de kendimizi, ailemizi ve toplumumuzu geliştirme arzusudur. Yeryüzünde yaklaşık yedi milyar insan vardır ve nüfus artışı enerji talebindeki artışa yol açacağı gibi muhtemel enerji kaynaklarının yeterliliğine bağlıdır. Enerji üretim prosesleri ekosistem için zararlı olan birçok kirleniciyi yaydıkları için birçok ülkede artan kirlilik ve ekonomik kalkınma çevre için ciddi etkileri vardır. Fosil yakıtların yanması başta karbondioksit olmak üzere sera gazlarının salınımına neden olmaktadır. Fosil yakıtlara güneş, rüzgar, hidrojen ve nükleer enerji başta olmak üzere çeşitli alternatif opsiyonlar bulunmaktadır. Mevcut doğal enerji kaynaklarının çoğunun kullanılmasında güvenilirlik, kalite ve enerji yoğunluğu gibi sınırlamalar bulunduğu için alternatif kaynakların entegre kullanımı önem kazanmaya başlamıştır [1]. Yüksek verimliliğin yanında işletme maliyetlerinin düşük olması ve enerji üretimi başına kirlilik emisyon potansiyelinin az olması nedeniyle entegre sistemler önemli katkılar yapabilir [2].

Koroneos ve diğerleri [3], alternatif enerji kaynaklarının ekserji analizlerini sunmuşlardır. Güneş termal, rüzgar ve jeotermal güç dönüşüm sistemlerini incelemişler ve sonuçları konvansiyonel güç üretim sistemleri ile karşılaştırmışlardır. Dinçer ve Zamfirescu [4], elektrik, ısı, sıcak su, soğutma, hidrojen ve temiz su gibi ürünleri üretmek için alternatif enerji temelli çeşitli opsiyonları değerlendirmişler ve önerilen sistemlerin enerji ve ekserji analizlerini sunmuşlardır. Çalışkan ve diğerleri [5], birleşik alternatif enerji destekli hidrojen ve elektrik üretim ve depolama sistemlerinin enerji, ekserji ve sürdürülebilirlik yaklaşımlarını kullanarak analiz etmişlerdir.

Munoz ve diğerleri [6], güneş havuzlarındaki deneysel ve teorik gelişmeleri tartışmışlardır. Güneş havuzunun ısı ve kütle transferi yaklaşımları için geliştirmiş oldukları teorik modele göre, güneş havuzu sıcaklığının zamanın fonksiyonu olduğunu ve güneş havuzu tabakalarının kalınlığına bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Karakılıç ve Dinçer [7], güneş havuzu sisteminin ekserji performansını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Güneş havuzu tabakalarının ekserji ve verimlilik ifadelerini termodinamik yasalara bağlı olarak sunmuşlardır. En yüksek enerji ve ekserji verimlilik değerine güneş havuzunda ısı depolamasının yapıldığı en alt bölgede ulaştıklarını bildirmişlerdir.

Al-Sulaiman ve diğerleri [8], organik Rankine çevriminin bulunduğu üç farklı entegre sistemin performansını karşılaştırmışlar ve güneş enerjisi destekli entegre sistemlerin gelecekte kullanım potansiyellerinin artacağını bildirmişlerdir. Wang ve diğerleri [9], düşük sıcaklıklı atık ısı geri kazanımı için ORC

sistemi destekli entegre sistemin termodinamik analizini sunmuşlardır. Aynı zamanda çeşitli işletim parametrelerinin sistem performansı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Öztürk ve Dinçer [10], güneş enerjisi destekli ve hidrojen üretimi yapan çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin termodinamik analizini sunmuşlardır. Bu çalışmada değerlendirilen çok fonksiyonlu sistem Rankine çevrimi, ORC, absorpsiyonlu soğutma ve ısıtma ile hidrojen üretim sistemi olmak üzere dört ana alt sistemden oluşmaktadır. Aynı zamanda sistem performansları değişen dış ortam şartlarına bağlı olarak incelenmiştir. Barelli ve diğerleri [11], PEM yakıt pili temelli evsel kullanıma uygun kojenerasyon sisteminin ekserji analizini ve sistem performansını üzerine sıcaklık, basınç ve nem gibi tasarım parametrelerinin etkisini incelemek için parametrik çalışma sunmuşlardır. Bozkurt ve Karakılıç [12], daha verimli sistem tasarımı için dört adet düzlemsel güneş kolektörü ile entegre edilmiş güneş havuzu sisteminin enerji ve ekserji analizlerinin sonuçlarını sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada, düzlemsel güneş kolektörlerinin güneş havuzunun enerji ve ekserji verimliliği üzerine önemli etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Özlü ve Dinçer [13], güneş ve rüzgar enerjisi destekli çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin tasarımını ve termodinamik analizini sunmuşlardır. Enerji ve ekserji analizleri kullanılarak değişen işletim parametrelerinin çok fonksiyonlu sistemin performansı üzerine olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Rüzgar türbininin maksimum güç çıktısının 48 kW olduğunda, entegre sistemin enerji verimliliğini %43 ve ekserji verimliliğini %65 olarak hesaplamışlardır.

Khalid ve diğerleri [14], güç, ısıtma, soğutma, sıcak su ve sıcak hava üretimi için biyokütle ve güneş enerjisi destekli entegre sistemin tasarımını ve teorik analizini sunmuşlardır. İncelemesi yapılan prosesin performansının incelenmesinde enerji ve ekserji analizini kullanmışlar, aynı zamanda çeşitli sistem parametrelerinin tüm sistemin ve alt sistemlerinin enerji ve ekserji verimlilikleri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin enerji verimliliğini %66,5 ve ekserji verimliliğini ise %39,7 olarak hesaplamışlardır. Çalışmanın sonraki bölümlerinde, değişen dış ortam sıcaklığının sistemin enerji ve ekserji verimliliklerine olan etkilerini de detaylı olarak incelemişlerdir.

Biçer ve Dinçer [15], hidrojen üretimi ile beraber güç üretimi, soğutma ve ısıtma uygulamalarını destekleyebilen güneş ve jeotermal kaynakları kullanan yeni bir kombine sistemi önermişler ve pratik uygulamalar için termodinamik analizini sunmuşlardır. Çevrimin performansını değerlendirmek için enerji ve ekserji analizlerini sunmuşlar ve çeşitli sistem parametrelerinin tüm sistemin ve aynı zamanda alt sistemlerin enerji ve ekserji verimlilikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir.

Sunulan bu çalışmada, elektrik ve hidrojen üretimi için güneş ve rüzgar enerjisi destekli çok fonksiyonlu sistemin tasarımı

enerji ve ekserji analizleri kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Tasarlanan sistem, güneş havuzu sistemi, rüzgar türbini, güneş fotovoltaik sistem, organik Rankine çevrimi, PEM elektrolizi, hidrojen ve oksijen depolama sistemi ve PEM yakıt pili sisteminden oluşmaktadır. Yapılan analizlerde, çok fonksiyonlu enerji üretim sistemini oluşturan her bir alt sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanarak her bir sistem elemanının tersinmezlikleri tespit edilmiş, sistemin ne kadar başarılı bir şekilde işletilebileceğinin teorik analizi sunulmuş ve ortaya çıkan sonuçlar yorumlanmıştır. Sistemin daha iyi anlaşılması için dış ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve güneş radyasyonu gibi işletim koşullarının değişimleri parametrik çalışmalar ile incelenmiştir.

## 2. SİSTEM TANITIMI

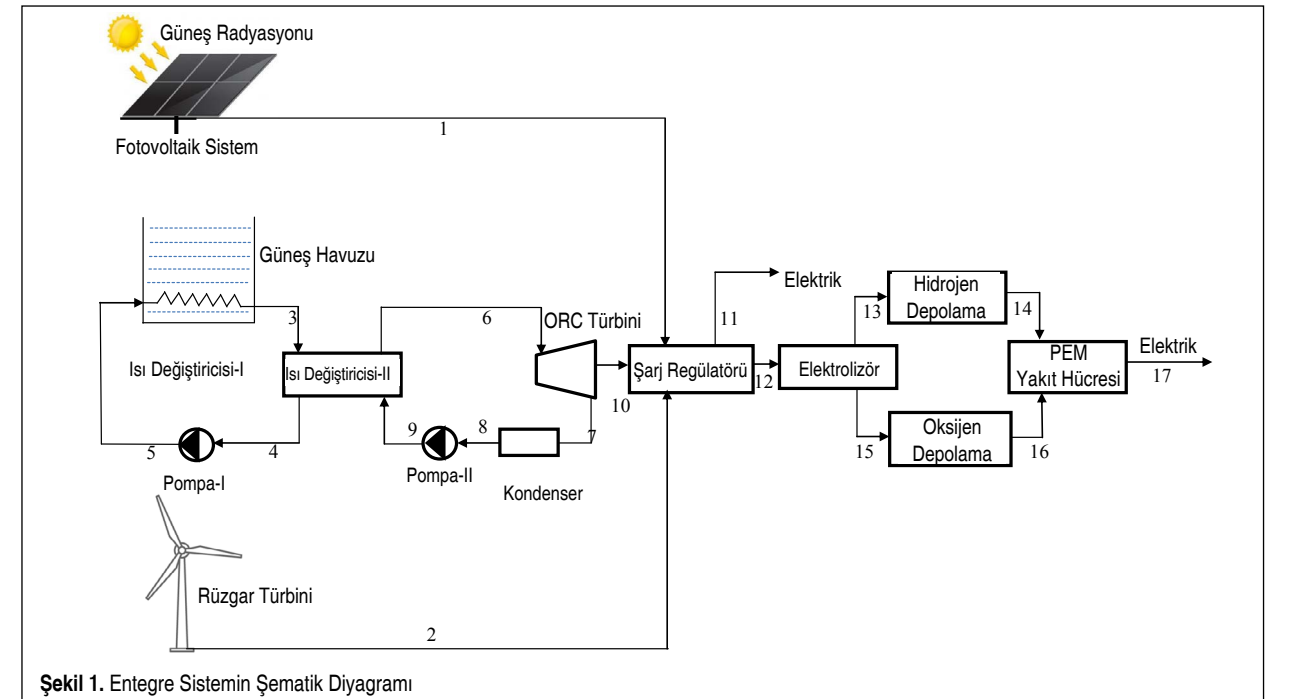
Güneş havuzu, güneş enerjisini toplama ve depolamada kullanılan sistemdir. Doğal güneş havuzlarına benzer şekilde oluşturulan yapay güneş havuzları genellikle üç bölgeden oluşmaktadır. Güneş havuzlarında en üst kısma üst konvektif bölge (ÜKB), orta kısma konvektif olmayan bölge (KOB) ve alt kısma ise alt konvektif bölge (AKB) veya depolama bölgesi adı verilir. Depolama bölgesi ısı katmanlı olabilen homojen, konsantrasyon çözeltisinin bulunduğu kısımdır. Depolama bölgesinin hemen üzerindeki KOB, ısı yalıtımı sağlayan ve tuz gradyanı içeren katmandır. Yüzey homojendir ve düşük yoğunlukta tuzlu sudan oluşur. Havuzun en alt kısmına ulaşan güneş ışığı hapsedilir ve daha sonra, biriken termal enerji havuzdan ısı değiştiricisi yardımıyla sıcak su halinde çekilir.

Fotovoltaik güneş enerjisi teknolojisi, güneş ışığını doğrudan

elektrik enerjisine çevirir ve doğru akımlı elektrik elde edilir. Üretilen elektrik enerjisi hemen kullanılabilir gibi, alternatif akıma çevrilebilir veya sonra kullanılmak üzere depolanabilir. Fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri çevreye zarar vermeden çalışırlar ve hareketli parçaları yoktur. Güneş ışığıyla çalışan fotovoltaik cihazları son yıllarda farklı alanlarda geniş uygulama potansiyeli bulmuştur. Fotovoltaik sistemler fosil yakıtla çalışan santrallerden veya nükleer enerji santrallerinden farklı olarak modüler yapıya sahiptirler.

Sıcaklık, basınç ve nem gibi meteorolojik değişkenler rüzgarın meydana gelmesinde önemli rol oynamaktadırlar. Rüzgar, atmosferin alt kısmındaki ve yerkürenin hemen üzerindeki farklı soğuma ve ısınma olgularından dolayı meydana gelir. Meteorolojik sistemler bir bölgeden diğerine hareket ederler ve farklı hızlarda rüzgar üretilmesine neden olur. Hava kütlesi üzerine oluşan basınç kuvveti ise rüzgarda kinetik enerji değişimine yol açar [16]. Rüzgar türbini uygulamalarında rüzgar hızı sistemin verimli çalışması için önemlidir. Rüzgar hız sapmaları ve değişebilirlik zamana ve yere bağlıdır. Bu tür karakteristiklerin net bir şekilde anlaşılması için rüzgar hız modellemesinin yapılması önemlidir. Atmosfer sınır tabakasının belirlenmesi ve modellenmesi rüzgar gücünün belirlenmesinde önemli bir unsurdur.

Çevre sorunlarının giderek arttığı göz önünde bulundurulursa, alternatif enerji kaynaklarına bağlı temiz enerji üretimi daha da önemli hale gelmektedir. Fakat güneş ve rüzgar enerjisi belli bir bölgede uzun süre kalıcı değildir. Bu nedenle, alternatif kaynaklarının entegre bir şekilde kullanılması sürdürülebilirlik yaklaşımı için gereklidir. Bu çalışmada verilen



Şekil 1. Entegre Sistemin Şematik Diyagramı

yenilenebilir enerji destekli entegre sistem beş ana alt bölümden oluşmaktadır. Bunlar; i) fotovoltaik güneş pili sistemi, ii) güneş havuzu, iii) rüzgar türbini, iv) ORC ve v) hidrojen üretim, depolama ve kullanım sistemidir. Şekil 1’de entegre sistemin şematiki sunulmuştur. Fotovoltaik sisteme ulaşan güneş radyasyonu elektrik enerjisine dönüştürülür. Aynı zamanda güneş radyasyonunun termal enerjisinden yararlanmak için güneş havuzu kullanılabilir. Havuzun ilk katmanından itibaren yol alan güneş radyasyonu ısı enerji depolamasının yapıldığı AKB’ye ulaşır. Güneş havuzu tuzlu su ile doldurulmadan önce bölgeye yerleştirilmiş olan ısı değiştiricisi yardımıyla faydalı ısı çekilerek ORC tahrik edilmektedir. Sistemi sürdürülebilir yapmak için rüzgar türbini entegre edilmiştir. Güneş ve rüzgar enerjisi destekli çoklu üretim sisteminin diğer bir önemli amacı da hidrojen enerjisi üretmektir. Kesintisiz güç sağlamak için, depolanan hidrojen, güneş ve rüzgar enerjisinin güç üretmede yetersiz kaldığı zamanlarda veya üretilen enerjinin az olduğu durumlarda güç üretmek için PEM yakıt pillerinde kullanılabilir.

### 3. TERMODİNAMİK ANALİZ

#### 3.1 Denge Denklemleri

Bu bölümde, termodinamik yasalara bağlı olarak bazı tanımlayıcı açıklamalar entegre sistemin analizi için verilmiştir. Sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge denklemlerini kapsayan ilkeler [17] entegre sistemin iyileştirme potansiyelini araştırmak için incelenmiştir. Kararlı hal durumu için kütle dengesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (1)$$

Burada  $\dot{m}$ , kütle akış hızını;  $g$  ve  $\varphi$  ise alt indisleri sırasıyla, sisteme giren ve çıkan madde akımını göstermektedir. Enerji denge denklemi genel olarak verilen prosesin değişim özelliğini açıklamada uygulanır. İncelemesi yapılan prosesin enerji dengesi termodinamiğin birinci yasasına göre sistem içinde korunur. Kinetik ve potansiyel enerji etkilerinin ihmal edilmesiyle kararlı hal şartları için enerji denge denklemi aşağıdaki gibi verilir.

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_\varphi h_\varphi \quad (2)$$

Ekserji analizi, enerji kaynaklarının ekonomik ve etkin kullanımını için stratejiler oluşturmada destekleyicidir ve enerji üretim sistemlerinin dizaynlarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Entegre sistemin termodinamik analizi için kullanılan ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi verilir.

$$\sum \dot{m}_g ex_g + \dot{E}x_Q = \sum \dot{m}_\varphi ex_\varphi + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (3)$$

Isı ve iş akımlarının ekserji ifadeleri ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) \dot{Q} \quad (4)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (5)$$

Kinetik ve potansiyel ekserji ihmal edildiği için fiziksel ve kimyasal ekserji, sistem bileşenleri için tanımlanmıştır. i.inci akışın fiziksel ekserjisi aşağıdaki gibi verilir.

$$ex_{fz,i} = (h_i - h_o) - T_o (s_i - s_o) \quad (6)$$

Kimyasal ekserji ise maddenin kimyasal dengesinden kimyasal yapısının uzaklığı ile bağlantılıdır. Yakıtların spesifik kimyasal ekserjileri molar kimyasal ekserji ( $\xi_i$ ) ve ilgili yakıtın alt ısı değeri (LHV<sub>y</sub>) kullanılarak tanımlanır. Hidrojen için  $\xi_{H_2} = 0,985$  olarak hesaplanmıştır [17].

$$\dot{E}x_{km}^y = \xi_i LHV_y \quad (7)$$

Ekserji analizi bakış açısından hareketle, alternatif enerji kaynakları tarafından desteklenen entegre sistemin performansını değerlendirmek için sistem ile sistemin tüm bileşenlerinin hem ürün ve hem de girdi ilişkisinin belirlenmesi gereklidir. Entegre güç üretim sisteminin her bir komponentinin ekserji yıkım miktarları yukarıda verilen ifadeler kullanılarak ilgili formüller türetilmiş ve Tablo 1’de sunulmuştur. Buradan elde edilen ekserji denge denklemleri tüm sistemin ve sistem komponentlerinin ekserji yıkım oranlarının hesaplanmasında kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda, yukarı-

Tablo 1. Entegre Sistem Komponentlerin Ekserji Yıkım Denklemleri

Sistem Komponenti	Ekserji Yıkım Denklemleri
PV Güneş Pili	$\dot{E}x_{PV}^D = \dot{E}x_{güneş-PV} - \dot{E}x_{PV}$
Rüzgar Türbini	$\dot{E}x_{RT}^D = \dot{E}x_{girdi} - \dot{E}x_{RT}$
Güneş Havuzu	$\dot{E}x_{GH}^D = \dot{E}x_{güneş-GH} - \dot{E}x_{GH}^Q$
Isı Değiştiricisi I	$\dot{E}x_{HEX-I}^D = \dot{E}x_{GH}^Q + \dot{m}_5 ex_5 - \dot{m}_3 ex_3$
Isı Değiştiricisi II	$\dot{E}x_{HEX-II}^D = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_9 ex_9 - \dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_6 ex_6$
Pompa I	$\dot{E}x_{pompa-I}^D = \dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_5 ex_5 + \dot{W}_{pompa-I}$
ORC Türbin	$\dot{E}x_{ORC-türbin}^D = \dot{m}_6 ex_6 - \dot{m}_7 ex_7 - \dot{W}_{ORC-türbin}$
Kondanser	$\dot{E}x_{kondanser}^D = \dot{m}_7 ex_7 - \dot{m}_8 ex_8 - \dot{E}x_{kondanser}^Q$
Pompa II	$\dot{E}x_{pompa-II}^D = \dot{m}_8 ex_8 - \dot{m}_9 ex_9 + \dot{W}_{pompa-II}$
Sarj Regülatörü	$\dot{E}x_{sarj-regülatörü}^D = \dot{E}x_{10}^W - \dot{E}x_{11}^W - \dot{E}x_{12}^W$
Elektrolizör	$\dot{E}x_{elektrolizör}^D = \dot{E}x_{12}^W - \dot{E}x_{13}^H_2 - \dot{E}x_{15}^O_2$
Hidrojen Depolama	$\dot{E}x_{H_2-depolama}^D = \dot{E}x_{13}^H_2 - \dot{E}x_{14}^H_2$
Oksijen Depolama	$\dot{E}x_{O_2-depolama}^D = \dot{E}x_{15}^O_2 - \dot{E}x_{16}^O_2$
PEM Yakıt Pili	$\dot{E}x_{PEM}^D = \dot{E}x_{14}^H_2 + \dot{E}x_{16}^O_2 - \dot{E}x_{PEM}^Q - \dot{W}_{PEM}$

daki kabullere bağlı olarak sistemin alt bileşenleri için enerji ve ekserji analiz ifadeleri aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

#### 3.2 Alt Sistemlerin Termodinamik Analizi

##### 3.2.1 Güneş Havuzu

Güneş havuzu sistemindeki enerji akımları Şekil 2’de gösterilmiştir. Güneş havuzu için enerji denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{Q}_{güneş} - \dot{Q}_{kayıp,çevre} - \dot{Q}_{kayıp,i} - \dot{Q}_{kayıp,izolasyon} = \dot{Q}_{depolanan} \quad (8)$$

Burada alt indis i, sırasıyla güneş havuz tabakalarıdır (ÜKB, KOB ve AKB). Güneş havuzunun en üst tabakasından çevreye olan ısı kaybının ekserjisi aşağıdaki gibi verilir.

$$\dot{Q}_{kayıp,çevre} = k_{ÜKB} A_{havuz} (T_{ÜKB} - T_o) \quad (9)$$

Tabakalardan olan ısı kaybı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{Q}_{kayıp,i} = k_y A_{y,i} (T_i - T_{yan,i}) \quad (10)$$

İzolasyon bölgesinden olan ısı kaybı aşağıdaki gibi verilir.

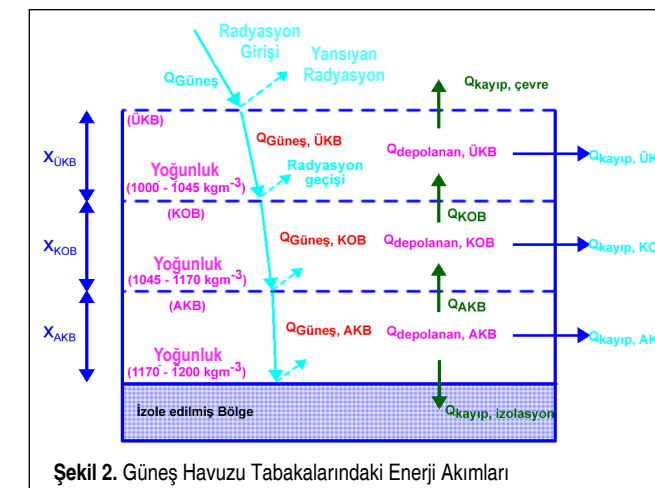
$$\dot{Q}_{kayıp,izolasyon} = k_{AKB} A_{havuz} (T_{AKB} - T_{izolasyon}) \quad (11)$$

Güneş havuzu için ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{Güneş}^Q - \dot{E}x_{kayıp,çevre}^Q - \dot{E}x_{kayıp,i}^Q - \dot{E}x_{kayıp,izolasyon}^Q = \dot{E}x_{Depolanan}^Q + \dot{E}x^D \quad (12)$$

Burada  $\dot{E}x_{Güneş,ÜKB}^Q$  ÜKB yüzeyine ulaşan güneş radyasyonunun ekserjisidir ve aşağıdaki gibi alınmıştır [18].

$$\dot{E}x_{Güneş,ÜKB}^Q = S_T \left[ 1 - \frac{4T_o}{3T_s} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_o}{T_s} \right)^4 \right] A_{havuz} \quad (13)$$



Şekil 2. Güneş Havuzu Tabakalarındaki Enerji Akımları

Burada  $T_o$ , güneşin yüzey sıcaklığını ( $\approx 5777$  K) göstermektedir. ÜKB’den çevreye transfer edilen ısı transferinin ekserjisi aşağıdaki gibi verilebilir [7].

$$\dot{E}x_{ÜKB}^Q = m_{ÜKB} C_{p,ÜKB} \left[ (T_{ÜKB} - T_o) - T_o \left( \ln \frac{T_{ÜKB}}{T_o} \right) \right] \quad (14)$$

Burada  $m_{ÜKB}$ , ÜKB’deki su-tuz karışımın kütlelerini ve  $C_{p,ÜKB}$ , ÜKB’nin spesifik ısısını göstermektedir. Herhangi bir katmanından yalıtımlı duvara doğru olan ısı kaybının ekserjisi aşağıdaki gibi verilebilir [7].

$$\dot{E}x_{kayıp,i}^Q = m_i C_{py,i} m_i C_{py,i} \left[ (T_i - T_{yd,i}) - T_o \left( \ln \frac{T_i}{T_{yd,i}} \right) \right] \quad (15)$$

Güneş havuzunun en altında yer alan izolasyon bölgesinden transfer olan ısının ekserjisi aşağıdaki gibi verilebilir [7].

$$\dot{E}x_{kayıp,izolasyon}^Q = m_{AKB} C_{p,izolasyon} \left[ (T_{AKB} - T_{izolasyon}) - T_o \left( \ln \frac{T_{AKB}}{T_{izolasyon}} \right) \right] \quad (16)$$

##### 3.2.2 Fotovoltaik Sistem

Fotovoltaik modülleri üzerine yapılan deneysel çalışmalara göre, böyle bir sistemden üretililecek maksimum elektrik üretimi güneş hücresi üzerine gelen toplam güneş radyasyonu ( $S_t$ ) ve çevre sıcaklığına bağlı olarak verilebilir [19].

$$P_m = -11,017 + 0,34 S_t 2,73^{-0,003 T_o} \quad (17)$$

Toplam güneş radyasyonu aşağıda verilen ifade yardımı ile hesaplanabilir [20].

$$S_t = \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360^\circ n}{365,25} \right) \right] S_o \quad (18)$$

Burada  $S_o$ , güneş sabiti ( $\approx 1373$  Wm<sup>-2</sup>) ve n ise 1 Ocak’tan itibaren gün sayısıdır. Güneş pili sisteminin ekserjisi dengesi aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{PV} = \dot{E}x_{elek} - \dot{E}x_{ısı} \quad (19)$$

Fotovoltaik sisteminin elektrik ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{elek} = V_m I_m \quad (20)$$

Fotovoltaik yüzeyinden çevreye olan ısı kaybını içeren ekserji ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{ısı} = \left( 1 - \frac{T_o}{T_{PV}} \right) \dot{Q} \quad (21)$$

Burada  $T_{PV}$ , fotovoltaik sisteminin yüzey sıcaklığını vermektedir. Fotovoltaik sistemin yüzeyinden taşınım ile oluşan

ısı transferi aşağıda verilen ifade kullanılarak hesaplanabilir [20].

$$\dot{Q} = h_{c,PV} A_{PV} (T_{PV} - T_o) \quad (22)$$

$$h_{c,PV} = 5,7 + 3,8\vartheta_{PV} \quad (23)$$

Burada PV, fotovoltaik sistemin hemen üzerindeki rüzgar hızıdır. Denklem (19) ve (23) arasındaki ifadeleri kullanarak fotovoltaik sistemin ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{PV} = V_m I_m - \left[ \left( 1 - \frac{T_o}{T_{PV}} \right) (5,7 + 3,8\vartheta_{PV}) A (T_{PV} - T_o) \right] \quad (24)$$

### 3.2.3 Rüzgar Türbini

Rüzgar türbini içerisinde geçen rüzgarın yavaşlaması iki aşamada i) rüzgar türbini rotoru içerisinde geçmeden önce, ve ii) geçtikten sonra olmaktadır [14]. Birim zamanda rotor üzerinden geçen hava kütlesi  $m_r$  olmak şartıyla, momentum hız değişimi  $[m_r (\vartheta_{r1} - \vartheta_{r2})]$  ortaya çıkan itmeye eşittir. Burada  $\vartheta_{r1}$  ve  $\vartheta_{r2}$  rotordan önemli bir uzaklıkta içeriye doğru ve dışarıya doğru rüzgar hızını göstermektedir. Türbini tarafından üretilen güç aşağıdaki gibi verilir.

$$P_{rt} = m_r (\vartheta_{r1} - \vartheta_{r2}) \bar{\vartheta} \quad (25)$$

Aynı zamanda rüzgardaki kinetik enerjinin değişim miktarı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E_{k,r} = \frac{1}{2} m_r (\vartheta_{r1}^2 - \vartheta_{r2}^2) \quad (26)$$

Denklem (25) ve (26)'da verilen ifadeler eşit olması gerektiğinden rotor tarafından ortaya çıkan güç aşağıdaki gibi yazılır.

$$P_{rt} = \rho_h A_{rt} \bar{\vartheta} (\vartheta_{r1} - \vartheta_{r2}) \bar{\vartheta} \quad (27)$$

Ortalama hız ifadesi yukarıdaki denklemde yerine konulursa;

$$P_{rt} = \rho_h A_{rt} (\vartheta_{r1} - \vartheta_{r2}) \left( \frac{\vartheta_{r1} + \vartheta_{r2}}{2} \right)^2 \quad (28)$$

ifadesi elde edilir. Yukarıda verilen ifadeyi daha genel bir şekle dönüştürmek için katsayısı  $\alpha = \vartheta_{r2} / \vartheta_{r1}$  şeklinde tanımlanırsa, Denklem (28) aşağıdaki gibi verilebilir.

$$P_{rt} = \frac{\rho_h A_{rt} \vartheta_{r1}^3}{2} \left[ (1 + \alpha)(1 - \alpha^2) \right] \quad (29)$$

Denklemin sağ tarafında çarpım halinde verilen ikinci ifade rotor güç katsayısıdır ( $C_p$ ).

$$P_{rt} = \frac{\rho_h A_{rt} \vartheta_{r1}^3}{2} C_p \quad (30)$$

$(\vartheta_{r2} / \vartheta_{r1})$  oranı 1/3'ü eşit olduğu zaman  $C_p$ , maksimum değeri olan 0,59'a ulaşır [21]. Rüzgar türbini sisteminde yükseklik değişmediği ve rüzgar türbininde kimyasal reaksiyon olmadığı için potansiyel ve kimyasal ekserji değişiminin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Toplam kinetik ekserji farkı üretilen elektrik enerjisini vereceği için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_k = \dot{E}_{\text{üretilen}} \quad (31)$$

Aynı zamanda rüzgar türbinin ekserjisi, türbin kanatlar boyunca akan havanın akış ekserjisine bağlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{E}x_{akış} = \dot{m}_r (\Delta h - T_o \Delta s) \quad (32)$$

$$\Delta h = C_{p,o} (T_{r2} - T_{r1}) \quad (33)$$

Burada  $T_{r1}$  ve  $T_{r2}$  sırasıyla, rüzgar türbini girişindeki ve çıkışındaki rüzgar soğutma sıcaklığını göstermektedir. Rüzgar soğutma sıcaklığı aşağıdaki gibi hesaplanır [22].

$$T_{g,rüz-soğ} = 13,12 + 0,6215T_o - 11,37\vartheta_r^{0,16} + 0,3965T_o\vartheta_r^{0,16} \quad (34)$$

Toplam entropi farkı aşağıdaki gibi verilebilir [17].

$$\Delta s = C_{p,o} \ln \left( \frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) - R \ln \left( \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \right) - \frac{\dot{Q}_{kayıp}}{T_o} \quad (35)$$

Burada  $P_{r1}$  ve  $P_{r2}$  sırasıyla, rotor bıçağına girişteki ve çıkıştaki basıncı göstermektedir.

$$\dot{Q}_{kayıp} = \dot{m}_r C_{p,o} \left( T_o - \frac{T_{r1} + T_{r2}}{2} \right) \quad (36)$$

Genel olarak rüzgar türbini sisteminin ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}x_{RT} = \dot{E}_{\text{üretilen}} + \dot{m}_r C_{p,o} (T_{r2} - T_{r1}) + \dot{m}_r T_o \left[ C_p \ln \left( \frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) - R \ln \left( \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \right) - \frac{\dot{Q}_{kayıp}}{T_o} \right] \quad (37)$$

### 3.3 Enerji ve Ekserji Verimlilikleri

Bu çalışmada incelenen fotovoltaik sistem, güneş havuzu, rüzgar türbini, organik Rankine çevrimi, hidrojen üretim ve depolama alt sistemi ile tüm birleşik sistem için enerji verimlilik denklemleri aşağıdaki gibi türetilmiştir.

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{PV}}{S_t A_{PV}} \quad (38)$$

$$\eta_{güneş\_havuzu} = \frac{\dot{Q}_{HEX-1}}{S_t A_{GH}} \quad (39)$$

$$\eta_{rüzgar\_türbini} = \frac{\dot{W}_{RT}}{\dot{E}_{girdi}} \quad (40)$$

$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net,ORC}}{\dot{Q}_{HEX-1}} \quad (41)$$

$$\eta_{hidrojen} = \frac{\dot{W}_{PEM}}{\dot{W}_{net,12}} \quad (42)$$

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{W}_{net,PV} + \dot{W}_{net,WT} + \dot{W}_{net,ORC}}{S_t A_{PV} + S_t A_{GH} + \dot{E}_{girdi}} \quad (43)$$

Alt bileşenlerin ve tüm sistemin ekserji verimlilikleri için kullanılan denklemler aşağıda verildiği gibi türetilmiştir.

$$\Psi_{PV} = \frac{\dot{E}x_{PV}}{\dot{E}x_{güneş-PV}} \quad (44)$$

$$\Psi_{güneş\_havuzu} = \frac{\dot{E}x_{HEX-1}^Q}{\dot{E}x_{güneş-GH}} \quad (45)$$

$$\Psi_{rüzgar\_türbini} = \frac{\dot{E}x_{RT}}{\dot{E}x_{girdi}} \quad (46)$$

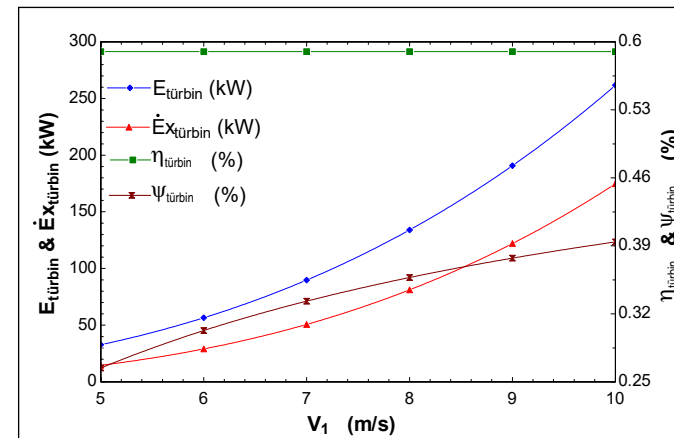
$$\Psi_{ORC} = \frac{\dot{E}x_{ORC}^W}{\dot{E}x_{HEX-1}^Q} \quad (47)$$

$$\Psi_{hidrojen} = \frac{\dot{E}x_{PEM}^W}{\dot{E}x_{net-12}^W} \quad (48)$$

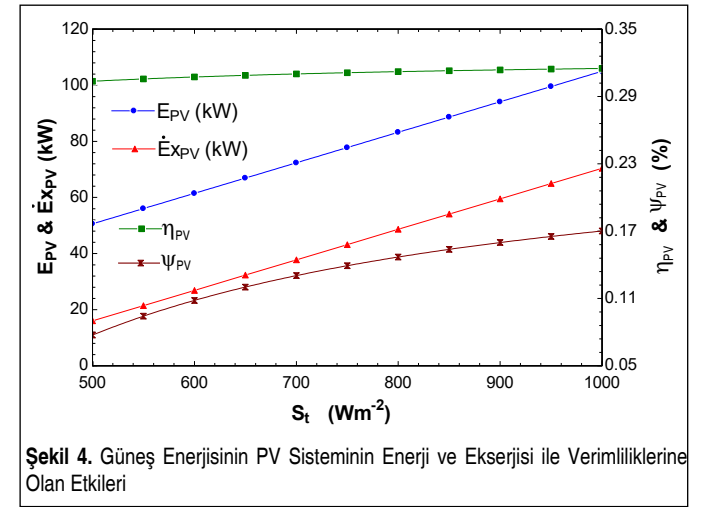
$$\Psi_{sistem} = \frac{\dot{E}x_{net,PV} + \dot{E}x_{net,RT} + \dot{E}x_{net,ORC}}{\dot{E}x_{güneş-PV} + \dot{E}x_{güneş-GH} + \dot{E}x_{girdi}} \quad (49)$$

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Güneş havuzu, fotovoltaik sistem ve rüzgar türbini destekli entegre sisteminde bulunan akışların sıcaklık, basınç, kütle akış hızı, entalpi, entropi, enerji ve ekserji değerleri EES

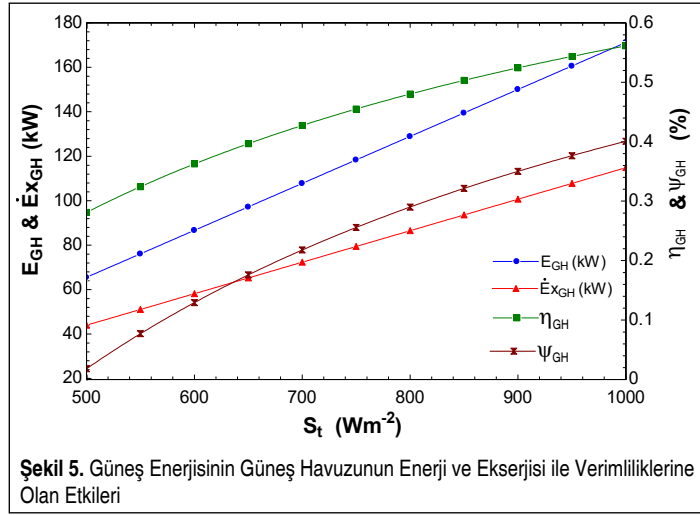


Şekil 3. Rüzgar Hızının Türbinin Enerji ve Ekserjisi ile Verimliliklerine Olan Etkileri



(Engineering Equation Solver) bilgisayar yazılım programı [23] kullanılarak hesaplanmıştır. Termodinamik modelleme çalışmasında referans sıcaklığı ve basıncı sırasıyla, 25 °C ve 101,3 kPa olarak alınmış ve ısı değiştiricisi akışkan olarak su ve izobütan seçilmiştir. Termodinamiğin ikinci kanununun bir göstergesi olan ekserji kayıpları incelendiğinde ise en yüksek ekserji kaybı 164 kW ile güneş havuzu sisteminde ortaya çıkmaktadır. Güneş havuzu sistemini, organik Rankine çevrimi 106 kW, güneş fotovoltaik sistemi 78 kW ve diğerleri takip etmektedir. Bu sonuç, iyileştirme çalışmalarının özellikle güneş havuzu sistemi üzerinde yoğunlaşması gerektiği anlamına gelmektedir. Günümüzde, performansı yüksek güneş havuzu sistemleri konusunda deneysel ve teorik araştırmalar devam etmektedir. İyi bir sistem dizaynı, yüksek bir enerji depolama kapasitesi ve ısı kaybını azaltma gibi etmenlerin daha da geliştirilmesi sonucunda bu tip sistemler enerji depolama konusunda oldukça fayda sağlayacaktır.

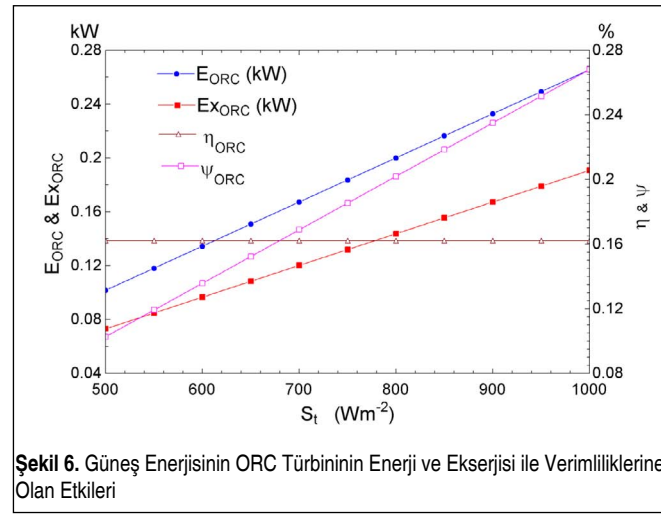
Bu çalışmada, tasarımı yapılan entegre sistemin performansının değişen dış şartlar altında nasıl bir davranış sergilediğini incelemek için çeşitli parametrik çalışmalar yapılmıştır. Entegre sistemin ilk parametrik incelemesi rüzgar türbini için yapılmış ve bu çalışmada sistem analizi için havanın yoğunluğu 1,255 kg/m<sup>3</sup>, türbinin yarıçapı 15 m, ortalama rüzgar hızı 7 ms<sup>-1</sup> ve Cp 0,59 olarak alınmıştır. Şekil 3'te, 5 ile 10 ms<sup>-1</sup> aralığında değişen rüzgar hızına karşılık rüzgar türbinin enerji ve ekserji değeri ile türbinin enerji ve ekserji verimliliğinin nasıl değiştiği sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi, rüzgar hızı 5 ms<sup>-1</sup> değerinden 10 ms<sup>-1</sup> değerine yükseldiğinde enerji üretim değeri 32 kW'dan 261 kW değerine çıkarken, ekserji üretim değeri ise 14,5 kW'dan 175 kW değerine yükselmiştir. Ekserji analizinde sistemde oluşan kayıplar dikkate alındığı için sistemin ürettiği güç hakkında daha net bilgi vermektedir. Rüzgar enerjisinden sağlanan enerji ve ekserji değeri türbinine ulaşan rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğu için ortalama rüzgar hızı değerinin ne kadar önemli



Şekil 5. Güneş Enerjisinin Güneş Havuzunun Enerji ve Ekserjisi ile Verimliliklerine Olan Etkileri

olduğu görülmektedir. Aynı zamanda rüzgar türbininin enerji verimliliği sabit kaldığı halde, türbinin ekserji verimliliği ise artan rüzgar hızıyla birlikte bir miktar arttığı görülmüştür. Sunulan çalışmada inceleme yapılan rüzgar türbininin seçilen çalışma parametreleri altında enerji verimliliği %58,74 olarak hesaplandığı halde, değişen rüzgar hızına bağlı olarak rüzgar türbininin ekserji verimliliğinin %27,12'den %45,26'ya kadar yükseldiği görülmektedir. Benzer olarak, Ghosh ve Dinçer [24] yapmış oldukları çalışmada rüzgar türbininin ekserji verimliliğini %60 olarak hesaplamışlardır.

Sunulan bu çalışmada termodinamik analizi yapılan entegre sistemin ikinci parametrik incelemesi, fotovoltaik sistem için yapılmıştır. Sistemin analizi için gerekli olan parametreler sırasıyla, fotovoltaik sistem üzerine gelen güneş radyasyonu  $850 \text{ Wm}^{-2}$  ve modül sıcaklığı  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  alınmıştır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, 500 ile  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  aralığında değişen güneş radyasyonuna ve hesaplama sonuçlarına bağlı olarak fotovoltaik sistemin enerji ve ekserji analizi ile birlikte sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sunulmuştur. Güneş radyasyonu  $500 \text{ Wm}^{-2}$ 'den  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ 'ye yükseldiği anda fotovoltaik sistemin enerji üretim değeri  $51 \text{ kW}$ 'den  $105 \text{ kW}$  değerine çıkarken, sistemin ekserji üretim değeri ise  $16 \text{ kW}$ 'den  $70 \text{ kW}$  değerine kadar hemen hemen doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir. Fotovoltaik sistemden sağlanan maksimum enerji ve ekserji üretim değeri fotovoltaik sistemin yüzey alanına ulaşan güneş radyasyonu değeri ile doğru orantılı olarak değiştiği için ortalama güneş radyasyonu değerinin önemli olduğu görülmüştür. Şekil 4'te belirtildiği üzere, fotovoltaik sistemin enerji verimliliği güneş radyasyonu değerinin değişmesine rağmen hemen hemen sabit kaldığı halde, sistemin ekserji verimliliği ise %0,7'den %17'ye kadar artmıştır. Fotovoltaik sistem için ekserji verimliliği güneş radyasyonunun ekserjisini ve sistem kayıplarını içerdiği için enerji verimliliğinden daha fazla güvenilir bilgiyi sunmaktadır. Benzer sonuçlar Çalışkan vd. [5] tarafından hesaplanmıştır. Sundukları çalışmada, fotovoltaik güneş pili sistemin ekserji verimliliğinin artan dış ortam sı-

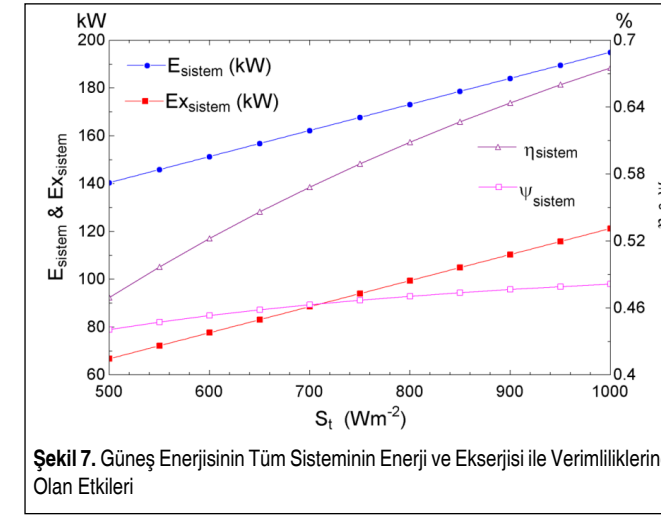


Şekil 6. Güneş Enerjisinin ORC Türbininin Enerji ve Ekserjisi ile Verimliliklerine Olan Etkileri

caklığına bağlı olarak %9,67'den %9,74 değerine değiştiği hesaplanmıştır.

Entegre sistemin üçüncü parametrik çalışması, güneş havuzu sisteminin değerlendirilmesi için yapılmıştır ve sistem analizi için güneş havuzu üzerine ulaşan toplam güneş radyasyonu  $850 \text{ Wm}^{-2}$ ; ÜKB, KOB ve AKB tabakalarının sıcaklıkları ise sırasıyla,  $25$ ,  $55$  ve  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , güneş havuzu yüzey alanı  $150 \text{ m}^2$  alınmıştır. Şekil 5'te,  $500$  ile  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  aralığında değişen güneş radyasyonuna bağlı olarak güneş havuzu sisteminin enerji ve ekserji analizi sonuçları ile enerji ve ekserji verimliliğinin değişimi sunulmuştur. Güneş radyasyonu  $500 \text{ Wm}^{-2}$ 'den  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ 'ye yükseldiği anda güneş havuzu tabakalarında toplanan faydalı enerjinin arttığı belirlenmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, AKB bölgesinde toplanan enerji miktarı, artan güneş radyasyonuna bağlı olarak  $65 \text{ kW}$ 'den  $170 \text{ kW}$ 'ye ve ekserjisi ise  $44 \text{ kW}$ 'den  $115 \text{ kW}$ 'ye ulaşmaktadır. Güneş havuzu sisteminden sağlanan maksimum enerji ve ekserji üretim değeri güneş havuzu sisteminin yüzey alanına ulaşan güneş radyasyonu miktarı ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Aynı zamanda güneş havuzu sisteminin enerji verimliliğinin %28'den %56'ya ve ekserji verimliliğinin %5'ten %39'a ulaştığı görülmektedir. Güneş havuzu sisteminin yalıtımına ve ısı değiştiricisi verimine bağlı olarak etkinliği iyileştirilebilir.

Entegre sistemin dördüncü parametrik incelemesi, ORC sisteminin değerlendirilmesi için yapılmıştır. Şekil 6'da,  $500$  ile  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  aralığında değişen güneş radyasyonunu için ORC sisteminin enerji ve ekserji analizi ile sistemin enerji ve ekserji verimliliklerinin sonuçları sunulmuştur. Güneş radyasyonu değeri  $500 \text{ Wm}^{-2}$ 'den  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ 'ye arttığında sisteminin enerjisi  $0,1 \text{ kW}$ 'den  $0,26 \text{ kW}$ 'ye, sistemin ekserjisi ise  $0,07 \text{ kW}$ 'den  $0,19 \text{ kW}$ 'ye yükseldiği görülmektedir. Değişen güneş radyasyonu değerlerine karşı sistemin enerji verimliliği %16,21 değerinde sabit kaldığı görülürken, ekserji verimliliğinin ise %10,27'den %26,81'e yükseldiği görülmektedir.



Şekil 7. Güneş Enerjisinin Tüm Sisteminin Enerji ve Ekserjisi ile Verimliliklerine Olan Etkileri

ORC sisteminin enerji ve ekserji üretiminin güneş havuzu yüzey alanına ulaşan güneş radyasyonu değeri ile doğru orantılı olduğu için güneş radyasyonu değerinin önemli olduğu görülmektedir.

Elektrik ve hidrojen üretimi için bu çalışmada sunulan entegre sistemin değişen güneş radyasyonu altında ki enerji ve ekserji analizi ile enerji ve ekserji verimliliklerinin değişimi hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik sistemi, rüzgar türbini ve güneş havuzu ile birleşik ORC sistemlerinin ayrı ayrı kullanımı yerine, entegre kullanımında ekserji kayıplarının azaldığı ve buna bağlı olarak ekserji verimliliğinin de arttığı ortaya konmuştur. Şekil 7'de, güneş radyasyonu değeri  $500 \text{ Wm}^{-2}$ 'den  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ 'ye yükseldiği anda entegre sistemin enerji verimliliği %49,93'ten %67,54'e artarken ve ekserji verimliliği ise %44,05'ten %48,15'e arttığı görülmektedir. Aynı zamanda, entegre sistemin enerjisi  $140,11 \text{ kW}$ 'den  $194,24 \text{ kW}$  değerine yükselirken, sistemin ekserjisi ise artan güneş radyasyonu değerine bağlı olarak  $63,65 \text{ kW}$ 'den  $116,84 \text{ kW}$  değerine yükseldiği hesaplanmıştır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, güneş havuzu, fotovoltaik ve rüzgar türbini güç dönüşüm sistemlerinin çalışma parametreleri sunulmuş, güneş ve rüzgar enerjisi destekli entegre sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Ekserji analizinin, incelemesi yapılan sistemdeki gerçek kayıpların yerleri ve büyüklükleri hakkında yeterli bilgiyi sundukları, ekserji verimliliğinin sistem performansının değerlendirilmesi ve birbirleri ile karşılaştırılmasında önemli bir araç oldukları belirlenmiştir. Aynı zamanda, ekserji analizini kullanarak sistem performansının ne kadar artırılacağı hakkında daha önemli bilgileri sunabileceği, yapılan bu çalışmada gösterilmiştir. Sunulan çalışmanın ikinci önemli yaklaşımı ise üç alternatif güç dönüşüm

sisteminin entegre bir şekilde kullanılması için önerilen prostestir. Buradaki dizayn parametreleri termodinamik modellemenin sonuçlarına bağlı olarak ortaya konmuştur. Entegre prosesin her bir alt sisteminin güç üretimi, ekserji verimliliği ve ekserji yıkımları belirlenmiş ve birleşik tüm sistem sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda, çalışma sıcaklığı, güneş radyasyon akısı ve rüzgar hızına bağlı olarak, sistem bileşenlerinin sistem performansı ve ekserji yıkım hızlarını incelemek için parametrik çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmada belirlenen ana sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri sistemin anlaşılmasında ve modellenmesinde önemlidir ve denge denklemlerinin kullanılmasıyla sistem bileşenlerinin verimliliklerinin belirlenmesi gibi daha geniş kapsamlı sonuçlara ulaşılabilir.
- Entegre sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri %62,68 ve %47,37 olarak bulunmuştur.
- Ekserji analizi sonuçlarına göre en büyük ekserji yıkımına güneş havuzu sisteminin sahip olduğu görülmektedir. Bunu takiben organik Rankine çevrim sisteminin ve fotovoltaik güneş pili sisteminin en büyük ikinci ve üçüncü ekserji yıkım değerlerine sahiptir.
- Entegre sistemi oluşturan bileşenlerin ekserji yıkım miktarlarının azaltılması ekserji verimliliğini arttırmaktadır. Verimlilik artışı, üretim prosesi süresince çevreye salınan emisyonların azaltılmasında, daha düşük çevresel etki değerlerinin elde edilmesinde ve sürdürülebilir sistemlerin kullanıma sunulmasında önemlidir.
- Ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve güneş radyasyonu akısındaki artış ile birlikte sistemlerin ekserji verimliliğinin iyileştiği görülmüştür.

## SEMBOLLER

A	yüzey alanı ( $\text{m}^2$ )
AKB	alt konvektif bölge
$C_p$	spesifik ısı ( $\text{J/gK}$ )
$ex$	spesifik ekserji akışı ( $\text{kJ/kg}$ )
$\dot{E}x_D$	ekserji yıkım hızı ( $\text{kW}$ )
$\dot{E}x_Q$	ısınmın ekserjisi ( $\text{kW}$ )
$\dot{E}x_W$	işin ekserjisi ( $\text{kW}$ )
h	entalpi ( $\text{kJ/kg}$ )
k	ısı kayıp katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
KOB	konvektif olmayan bölge
$\dot{m}$	kütle akış hızı ( $\text{m/s}$ )
ORC	organik Rankine çevrimi
P	basınç ( $\text{kPa}$ )

$P_{rt}$	rüzgar türbini gücü (kW)
$\dot{Q}$	ısı transfer hızı (kW)
$s$	entropi (kJ/kgK)
$S_t$	güneş radyasyonu (W/m <sup>2</sup> )
$T$	sıcaklık (K, °C)
ÜKB	üst konvektif bölge
$V$	hacim (m <sup>3</sup> )
$\dot{W}$	iş transfer hızı (kW)

**Alt indis**

ç	çıkan
g	giren
km	kimyasal
o	referans durum

**Yunan alfabesi**

$\vartheta$	rüzgar hızı
$\eta$	enerji verimliliği
$\psi$	ekserji verimliliği
$\xi$	molar kimyasal ekserji
$\rho$	yoğunluk

**KAYNAKÇA**

1. **De Oliveira, J. S.** 2012. Exergy: Production, Cost and Renewability, Springer, London, 2012.
2. **Ozturk, M., Dincer, I.** 2013. "Thermodynamic Assessment of an Integrated Solar Power Tower and Coal Gasification System for Multi-Generation Purposes," Energy Conversion and Management, vol. 76, p. 1061-1072.
3. **Koroneos, C., Spachos, T., Moussiopoulos, N.** 2013. "Exergy Analysis of Renewable Energy Sources," Renewable Energy, vol. 28, p. 295-310.
4. **Dincer, I., Zamfirescu, C.** 2012. "Renewable Energy Based Multigeneration Systems," International Journal of Energy Research, vol. 36 (15), p. 1403-1415.
5. **Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A.** 2013. "Energy, Exergy and Sustainability Analyses of Hybrid Renewable Energy Based Hydrogen and Electricity Production and Storage Systems: Modeling and Case Study," vol. Applied Thermal Engineering, vol. 61 (2), p. 784-798.
6. **Munoz, F., Almanza, R.** 1992. "A Survey of Solar Pond Developments," Energy, vol. 17 (10), p. 927-938.
7. **Karakilcik, M., Dincer, I.** 2008. "Exergetic Performance Analysis of a Solar Pond," International Journal of Thermal Science, vol. 47, p. 93-102.
8. **Al-Sulaiman, F. A., Hamdullahpur, F., Dincer, I.** 2011. "Performance Comparison of Three Trigeration Systems Using Organic Rankine Cycles," Energy, vol. 36, p. 5741-5754.
9. **Wang, J., Yan, Z., Wang, M., Li, M., Dai, Y.** 2013. "Multi-Objective Optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) for Low Grade Waste Heat Recovery Using Evolutionary Algorithm," Energy Conversion and Management, vol. 71, p. 146-158.
10. **Ozturk, M., Dincer, I.** 2013. "Thermodynamic Analysis of a Solar-Based Multi-Generation System with Hydrogen Production," Applied Thermal Engineering, vol. 51, p. 1235-1244.
11. **Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., Ottaviano, A.** 2011. "An Energetic-Exergetic Analysis of a Residential CHP System Based on PEM Fuel Cell," Applied Energy, vol. 88, p. 4334-4342.
12. **Bozkurt, I., Karakilcik, M.** 2015. "Exergy Analysis of a Solar Pond Integrated with Solar Collector," Solar Energy, vol. 112, p. 282-289.
13. **Ozlu, S., Dincer, I.** 2015. "Development and Analysis of a Solar and Wind Energy Based Multigeneration System," Solar Energy, vol. 122, p. 1279-1295.
14. **Khalid, F., Dincer, I., Rosen, M. A.** 2015. Energy and Exergy Analyses of a Solar-Biomass Integrated Cycle for Multigeneration," Solar Energy, vol. 112, vol. 290-299.
15. **Bicer, Y., Dincer, I.** 2015. Development of a New Solar and Geothermal Based Combined System for Hydrogen Production," Solar Energy, vol. 127, p. 269-284.
16. **Freris, L. L.** 1990. Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall, New York.
17. **Dinçer, İ., Rosen, M. A.** 2013. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Elsevier, New York.
18. **Petela, R.** 2003. "Exergy of Undiluted Thermal Radiations," Solar Energy, vol. 74, p. 469-488.
19. **Akyüz, E., Coşkun, C., Oktay, Z., Dinçer, İ.** 2012. "A Novel Approach for Estimation of Photovoltaic Exergy Efficiency," Energy, vol. 44, p. 1059-1066.
20. **Zamfirescu, C., Dincer, I.** 2009. "How Much Exergy One can Obtain from Incident Solar Radiation?," Journal of Applied Physics, vol. 105, p. 44911.
21. **Patel, M. R.** 1999. Wind and Solar Power Systems, CRC Press, New York.
22. **Nelson, C. A., Tew, M., Phetteplace, G. E.** 2002. "Review of the Federal Interagency Process used to Select the Wind Chill Temperature (WCT) Index," 18th International Conference on Interactive Information, 13-17 January 2002, Orlando, p. 196-198.
23. F-Chart Software. "Engineering Equation Solver," <http://www.fchart.com/ees/>, son erişim tarihi: 15.09.2015.
24. **Ghosh, S., Dincer, I.** 2014. "Development and Analysis of a New Integrated Solar-Wind-Geothermal Energy System," Solar Energy, vol. 107, p. 728-745.