



Makale / Research Paper

**Evsel Uygulamalar için Birleşik Rüzgar-Güneş-Hidrojen Sisteminin
Termodinamik Analizi**

Yunus Emre YÜKSEL^{*}, Murat ÖZTÜRK^{}**

^{*}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Öğretmenliği Bölümü, Afyonkarahisar

^{**}Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Isparta

yeyuksel@aku.edu.tr, muratozurk@sdu.edu.tr

Received/Geliş: 18.06.2016

Revised/Düzeltilme: 10.08.2016

Accepted/Kabul: 12.08.2016

Özet: Bu çalışmada rüzgar ve güneş enerjisini entegre ederek elektrik ve hidrojen üretimi sağlayan bir çoklu üretim sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır. Üretilen elektrik evsel kullanıma sunulmakta ve kullanım fazlası elektrik ise hidrojen üretmek için proton değişimli membran (PEM) elektrolizöründe kullanılmaktadır. Daha sonra ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere üretilen hidrojen depolanmaktadır. Entegre sistemin alt bileşenlerinin ekserji yıkım miktarları, enerji verimlilikleri ve ekserji verimlilikleri analiz edilmiş ve çizelge ve şekillerde sunulmuştur. Ayrıca sistem performansını etkileyen en önemli parametreler olarak rüzgar hızı ve güneş radyasyon yoğunluğunu incelemek amacıyla da parametrik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan analizlere göre sistemde geliştirilmesi gereken en önemli alt bileşenin fotovoltaik sistem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Analizler sonucunda entegre sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %59.82 ve %47.08 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, en yüksek ekserji kayıp oranı 78 kW ile fotovoltaik alt sistemde meydana geldiği bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Rüzgar, güneş, hidrojen, entegre sistem.

**Thermodynamic Analysis of Integrated Wind-Solar-Hydrogen System for
Residential Applications**

Abstract: In this study, thermodynamic analysis of an integrated system which uses wind and solar energy as energy sources for electricity and hydrogen production is carried out. Produced electricity can be used directly in domestic applications and excess electricity is used in PEM electrolyzer in order to produce hydrogen. The produced hydrogen is stored for later use. Exergy destruction rate, energy efficiency and exergy efficiency of sub-systems and whole system are analyzed and given in tables and figures. In addition, parametric studies are conducted in order to see the effects of wind speed and solar radiation flux on system performance. According to the analyses performed in this study, the energy and exergy efficiencies of integrated system are calculated as 59.82% and 47.08%, respectively. Also, the highest exergy destruction rate is found as 78 kW in photovoltaic sub-system.

Keywords: Wind, solar, hydrogen, integrated system.

Bu makaleye atıf yapmak için

Yüksel, Y.E., Öztürk, M., "Evsel Uygulamalar için Birleşik Rüzgar-Güneş-Hidrojen Sisteminin Termodinamik Analizi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2016, 3(3);401-416.

How to cite this article

Yüksel, Y.E., Öztürk, M., "Thermodynamic Analysis of Integrated Wind-Solar-Hydrogen System for Residential Applications" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2016, 3(3);401-416.

1. Giriş

Sürdürülebilir çevre, toplum ve ekonomi üçlü ayağının en önemli indikatörü olan enerji kullanımı, taşınması ve depolanmasının da sürdürülebilir nitelikler taşıması gerekmektedir. Ancak fosil enerji kaynaklarının tükenmesi, enerji tüketimine bağlı çevre sorunları, sera gazı salınımları ve küresel ısınma, enerji ve ekonomide dışa bağımlılığın artması, doğal ve yerel kaynakların hızla azalması, sosyal ve ekonomik düzenin hızla değişmesine yol açmaktadır. Bahsedilen bu sorunların ortadan kaldırılması için enerji yönetimi konularında acil ve sürdürülebilir, yenilikçi çözümlerin araştırılması ve geliştirilmesi gereklidir. Alternatif enerji kaynaklarının termodinamik analizini yaparken sadece kantitesinin (nicelik) değil aynı zamanda kalitesinin de (ekserji; enerjinin nitelikli işlerde kullanılabilir bölümü) incelenmesi ve sistem dizaynında buna göre yapılması gerekir [1].

Rüzgar, yeryüzünün güneş ile ısıtılmasından dolayı ortaya çıkan doğal konveksiyonla oluşan hava akımıdır [2]. Kutup ve ekvatorial bölgeler arasındaki ısı farkı ve dünyanın hareketi rüzgarı oluşturan ana kuvvetlerdir [3]. Bu hareketin diğer bir sebebi de dünyanın dönmelerinden kaynaklanan kuvvetlerdir. Rüzgar gücü yüzyıllar boyunca farklı yollarla birçok kültür tarafından kullanılmıştır (su pompalamak, buğday öğütmek gibi işlere mekanik enerji sağlamışlardır). Rüzgar enerjisini, elektrik enerjisine dönüştürme değişimi dünyada 1888'de Charles F. Brush tarafından 12 kW'lık rüzgar türbini yapması ile başlamıştır [4].

Rüzgar türbinleri elektrik jeneratörüne mekanik olarak bağlanmış iki veya daha fazla kanattan oluşan rotorda rüzgarın kinetik enerjisini yakalar. Türbin enerjisi yakalamak için yüksek bir kuleye monte edilir. İstenilen güç üretim kapasitesine ulaşmak için çok sayıda rüzgar türbini belirli aralıklarla yerleştirilerek rüzgar tarlası oluşturulur [5]. Açıkça belirtilmelidir ki, kararlı yüksek rüzgarların bulunduğu yerlerde yıllık enerji üretimi daha fazla olmaktadır. Rüzgar türbini tasarımı için iki farklı biçimde rüzgar türbini konfigürasyonları bulunmaktadır. Bunlar yatay eksen rüzgar türbinleri ve dikey eksen rüzgar türbinleri olarak adlandırılabilir. Dikey eksen rüzgar türbinleri genellikle mucidinden dolayı Darrieus rotorları olarak da adlandırılırlar [6]. Özel yapısal avantajlarından dolayı geçmişte çok yoğun kullanılmışlardır. Fakat günümüzde bir çok modern rüzgar türbinleri yatay eksen tasarımı kullanılmaktadırlar. Rotor hariç diğer tüm parçalar yerleştirilmelerinde farklılıklarla birlikte her iki tasarımda aynıdır.

Fotovoltaik (PV) teknoloji güneş enerjisinden elektrik üretmede kullanılır. PV silikon hücreler fotovoltaik etki ile güneş radyasyonunu doğru akıma çeviren elektriksel yarıiletkenlerdir. İlk olarak 1950'lerin sonlarında üretilmiş ve uydular için enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Maliyetlerin düşmesi ile birlikte telekomünikasyon ve denizcilik ekipmanları gibi uzak uygulamaların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmasıyla 1960'li yıllarda gelişmeler başlamıştır. 1970'lerin enerji krizi hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız bireysel ve resmi uygulamalarda PV kullanımı artmıştır. Üretim evresinde, PV hücreler modüllerde (veya panellerde) birleşir. Daha sonra bunlar istenilen yere monte edilerek PV tanzimleri oluşturulur [7]. Yeterli enerjiye sahip olan foton, silikonun atomuna çarptığı zaman elektronun valans bandı kabuğundan, elektrik akımının oluşturduğu iletkenlik bandına hareket ettirir. Bu serbest elektronlar bir noktada birikir ki burası elektriksel akımın oluşmasına yol açar [8]. Bu elektriksel akım hücreye dönmeden önce işi destekleyebilir. PV tanzimindeki seri ve paralel bağlantıların tercih edilen kombinasyonu bu iş için gerekli olan gücü sağlar.

Proton değişimli membran (PEM) elektrolizöründe, iki elektrot (bir tanesi pozitif yüklü ve diğeri negatif yüklü) elektrolitli su çözeltisine yerleştirilmiştir. PEM elektroliz hücresine doğru akım voltajı uygulandığı için, hidrojen gazı katotta ve oksijen gazı anotta birikir. Elektroliz 50 yıldan fazla süredir kullanılan basit, verimli ve çevreye karşı olumsuz bir etkisi yoktur [9]. Avantajları ise hareketli parçasının olmaması, genellikle alternatif enerji teknolojileri ile entegre, geniş aralıktaki kapasitede çalışma yeteneği ve doğru akım ile kullanılabilmesidir.

Barelli ve diğerleri [10]; PEM yakıt pili temelli evsel kullanıma uygun kojenerasyon sisteminin ekserji analizini ve sistem performansı üzerine sıcaklık, basınç ve nem gibi tasarım parametrelerinin etkisini incelemek için parametrik çalışma sunmuşlardır. Özlü ve Dinçer [11] 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.

Yüksel ve Öztürk [12] alternatif enerji kaynaklarından hidrojen üretimi için güneş enerjisi destekli kimyasal reaktör sisteminin termodinamik analizini sunmuşlardır. Güneş enerjili kimyasal reaktör sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmışlar, hidrojen üretimi için sistemi etkileyen tasarım parametrelerinin sistemin performansına olan etkilerini incelemişlerdir.

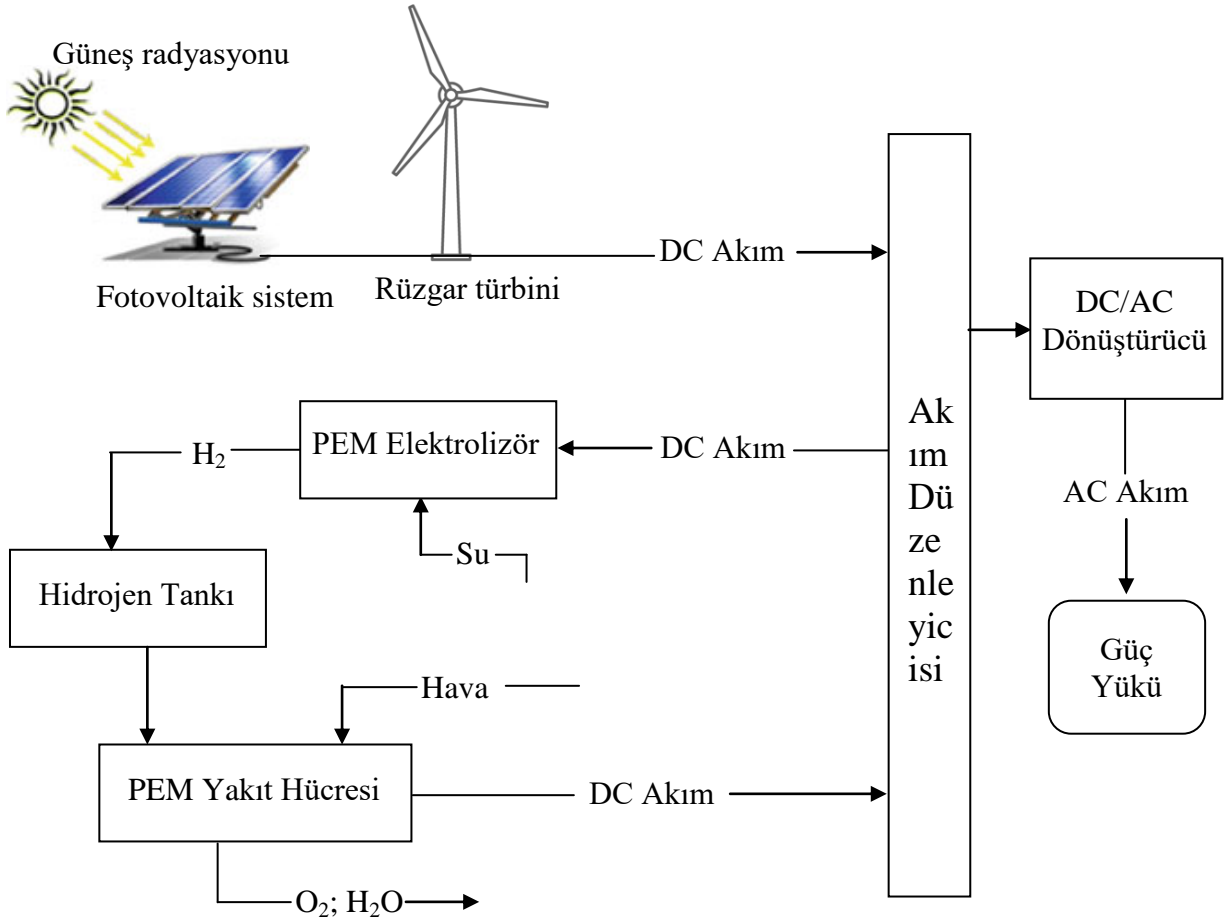
Çevresel problemlerin hızla artan önemi ile birlikte, temiz enerji üretimi daha da önemli olmaya başlamıştır. Güneş ve rüzgar enerjisi temizdir, fakat uygulama yapılacak yerlerde uzun zaman periyotları için genellikle uygun değildir. Mutlaka bu tür enerji kaynakları tek kullanımdan ziyade diğer enerji kaynaklarıyla desteklenmelidir [13].

Bu çalışmada, 36 kW rüzgar türbini ve 20 kW_p fotovoltaik güneş panelinin güç ve hidrojen üretimi için entegre kullanımının tasarımı yapılmış, her bir sistem bileşenin termodinamik analizi sunulmuş ve fazla güç üretiminin depolanması amacıyla hidrojen üretim kapasitesi belirlenmiştir. Sunulan termodinamik analizlerde, entegre sistemi oluşturan her bir alt prosesin enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanarak tersinmezlikler belirlenmiştir. Aynı zamanda, sistem bileşenlerinin performansı üzerine sistem tasarım parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla çeşitli parametrik çalışmalar sunulmuştur.

2. Sistem Tasarımı

Rüzgar-güneş-hidrojen entegre sistemlerinin evsel uygulamalarının iyileştirilmesi üzerine farklı çalışmalar sürdürülmektedir. Sunulan bu çalışmada Şekil 1'de gösterilen entegre bir sistem önerilmiş, sistem bileşenleri tanımlanmış ve sistem tasarım parametrelerinin entegre sistem üzerine olan etkisi incelenmiştir. Rüzgar türbini ve güneş fotovoltaik sistemi elektrik üretim modülünün iki ana bölümünü oluşturmaktadır. Proton değişimli membran (PEM) su elektroliz sistemi, rüzgar ve güneş enerjisi alt sistemlerinden üretilen ve evsel uygulamalarda kullanılmayan fazla enerjinin depolanması amacıyla hidrojen üretimi için kullanılmaktadır. Hidrojen elektriksel güç üretiminin kullanım değerinden büyük olduğu gün boyunca depolanır ve gece de evsel elektrik ihtiyacını karşılamak üzere PEM yakıt hücresine gönderilir.

Kesikli ve değişken yoğunluklu rüzgar hızı ve güneş ışınım yoğunluğu birleşik sistemin performansını etkiler. Ancak uygun tasarım ve enerji depolama sistemi kullanılarak evsel kullanımlar için elektrik ihtiyacı kesintisiz olarak karşılanabilir. Rüzgar türbini ve güneş fotovoltaik sistemden üretilen fazla elektrik sıvılaştırılmış hidrojen tanklarında hidrojen olarak depolanabilir. Hidrojen oldukça küçük hacimlerde krojenik sıcaklıklarda sıvı halde depolanabilir. Genellikle hidrojen sıvılaştırma prosesi hidrojen alt ısı değerinin yaklaşık %30'unu harcar. Hidrojen aynı zamanda basınçlı kaplarda ve metal hibritler yardımıyla sıkıştırılmış gaz olarak depolanabilir. Evsel uygulamalarda, yakıt hücresi sistemleri rüzgar-güneş-hidrojen birleşik sistemine uygulandığı zaman, genellikle büyük ölçekte hidrojen depolama sistemine gerek yoktur. Bundan dolayı evsel uygulamalarda genellikle sıkıştırılmış gaz hidrojen depolama sistemi tercih edilebilir. Sıkıştırılmış gaz olarak hidrojenin depolanması sürecinde, fiziksel ekserjinin bir kısmı basınç ve sıcaklık düşmelerinden dolayı kaybolur.



Şekil 1. Birleşik rüzgar-güneş-hidrojen sisteminin şematik sunumu

3. Termodinamik Analiz

Güneş ve rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sisteminin termodinamik değerlendirmesi termodinamiğin I. Yasasına bağlı enerji ve II. Yasaya bağlı ekserji analizi olmak üzere iki kısımda incelenecektir. Sırasıyla kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemlerini kapsayan ilkeler entegre sistemin iyileştirme potansiyelini araştırmak için incelenmiştir. Kararlı hal durumu için kütle korunumu ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

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

Burada \dot{m} kütle akış hızını, g ve ζ 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.

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

Kararlı hal şartları için entropi dengesi aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\sum \dot{m}_g h_g + \frac{\dot{Q}}{T_{kaynak}} + \dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta + \frac{\dot{Q}_{kayıp}}{T_{sınır}} \quad (3)$$

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

$$\sum_i \dot{m}_g ex_g + \dot{E}x_Q = \sum_s \dot{m}_c ex_c + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (4)$$

Isı ve iş akımlarının ekserji ifadeleri ile ekserji yıkımı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) \dot{Q}_i \quad (5)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (6)$$

$$\dot{E}x_D = T_o \dot{S}_{ürretim} \quad (7)$$

Kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserji ihmal edildiği için fiziksel ekserji sistem bileşenleri için tanımlanmıştır. Akışın fiziksel ekserjisi farklı aşamalar (i.inci) için aşağıdaki gibi verilir.

$$ex_{fz,i} = (h_i - h_o) - T_o (s_i - s_o) \quad (8)$$

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. Aynı zamanda, her bir sistemin tersinmezliğinin tüm sistemin tersinmezliğine oranı olan bağıl tersinmezlik (BT) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$BT = \frac{E_{x_{D,i}}}{E_{x_{D,toplam}}} \quad (9)$$

3.1. Rüzgar Türbini

V hızıyla hareket eden m kütleli havanın kinetik enerjisi aşağıdaki ifade ile verilir.

$$K_E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (10)$$

Hareket eden havanın gücü birim zamandaki kinetik enerjinin akış hızıdır. Buna bağlı olarak aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}V^2 \quad (11)$$

Burada küle akış hızı (\dot{m}) aşağıdaki gibi alınır;

$$\dot{m} = \rho AV \quad (12)$$

Güç ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (13)$$

Burada P hareket haindeki havanın mekaniksel gücünü, ρ havanın yoğunluğunu (kg/m^3), A rotor bıçakları tarafından süpürülen alanı (m^2) ve V havanın hızını (m/s) göstermektedir. Rüzgar gücü bıçakları süpüren hava yoğunluğu ile lineer olarak değişmektedir. Gaz kanununa bağlı olarak hava yoğunluğu (ρ) basınç ve sıcaklıkla değişmektedir.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (14)$$

Burada p hava basıncını, R gaz sabitini ve T ise hava sıcaklığını göstermektedir. Güç denkleminde görüldüğü üzere rüzgar türbininin çıktı gücü rotor süpürme alanı ile lineer olarak değişmektedir. Dikey eksen türbin için rotor süpürme alanı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (15)$$

Burada D rotor çapıdır. Darrieus dikey eksen makineleri için, eliptik integraller içerdiği için süpürme alanının belirlenmesi oldukça karmaşıktır. Yine de, bıçak yüzey şekli parabole benzediği için süpürme alanı için aşağıda verilen basit ifade kullanılabilir.

$$A = \frac{2}{3} L_m h_r \quad (16)$$

Burada L_m merkezden itibaren maksimum rotor genişliğini ve h_r ise rotor yüksekliğini göstermektedir. Rotor bıçakları tarafından sağlanan gerçek güç giriş ve çıkış akımı rüzgar güçleri arasındaki farktır. Denklem (11) kullanılarak bu ifade aşağıdaki gibi yazabilir.

$$P_o = \frac{1}{2} \dot{m} (V^2 - V_o^2) \quad (17)$$

Burada P_o rotor tarafından sağlanan mekaniksel gücü veya türbin çıktı gücünü, V rotor bıçaklarına girişindeki rüzgar hızını ve V_o rotor bıçaklarını terk eden rüzgar hızını göstermektedir [14]. Makroskobik ölçekte rotor bıçaklarının kanat yüzeyindeki V 'den V_o 'a kadar olan havanın hızı sabit değildir. Bu nedenle, dönen bıçaklardaki havanın kütle akış hızı ortalama hız ile hava yoğunluğunun çarpımı şeklinde tanımlanması uygundur. Matematiksel olarak bu durum aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\dot{m} = \rho A \frac{V+V_o}{2} \quad (18)$$

Elektrik jeneratörünü tahrik eden rotor tarafından sağlanan mekaniksel güç aşağıda ki gibi verilebilir.

$$P_o = \frac{1}{2} \left[\rho A \frac{(V+V_o)}{2} \right] (V^2 - V_o^2) \quad (19)$$

Denklem (19) cebirsel olarak aşağıda verildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A V^3 \frac{(1+\frac{V_o}{V}) [1-(\frac{V_o}{V})^2]}{2} \quad (20)$$

Bıçaklar tarafından sağlanan güç aşağıda verildiği gibi girdi rüzgar hızına bağlı fonksiyon olarak en genel ifade ile yazılabilir.

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (21)$$

Burada C_p rotor bıçakları tarafından sağlanan girdi rüzgar hızı gücünün kesrini göstermektedir. Geriye kalan güç çıkan rüzgarda kaybolmakta veya kullanılamamaktadır. Genel olarak C_p faktörü rotor veya rotor veriminin güç katsayısı olarak adlandırılır ve Denklem (20)'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$C_p = \frac{(1 + \frac{V_o}{V})[1 - (\frac{V_o}{V})^2]}{2} \quad (22)$$

Verilen bir girdi rüzgar hızı için C_p 'nin değeri çıktı rüzgar hızının girdi rüzgar hızına oranına (V_o/V) bağlıdır. Güç katsayısının (V_o/V) oranına karşı çizilen eğriye bağlı olarak C_p 'nin maksimum değer fonksiyonu tekdir. (V_o/V) oranı 1/3 olduğu zaman C_p 'nin maksimum değeri 0.59'dur. Çıktı rüzgar hızı girdi rüzgar hızının 1/3'üne eşit olduğu zaman bu rüzgar oranında rüzgardan maksimum güç elde edilir. Bu şartlar altında aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho A V^3 0.59 \quad (23)$$

C_p değeri iki bıçaklı türbinler için yüksek hızlarda 0.5'in altındadır ve daha fazla bıçaklı rüzgar türbinlerinde düşük hızlarda 0.2 ile 0.4 arasında değişmektedir. Pratik olarak maksimum rotor verimi 0.5 olarak alınır, birim süpürme alanı için rüzgar türbininin maksimum güç çıktısı aşağıda verildiği gibi basit bir ifade ile tanımlanabilir.

$$P_{max} = \frac{1}{4} \rho V^3 \quad (24)$$

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.

$$\dot{E}_{x_k} = \dot{E}_{\text{üretilen}} \quad (25)$$

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

$$\dot{E}_{x_{akış}} = \dot{m}_r (\Delta h - T_o \Delta s) \quad (26)$$

$$\Delta h = C_{p,o} (T_{r2} - T_{r1}) \quad (27)$$

Burada T_{r1} ve T_{r2} sırasıyla rüzgar türbini girişindeki ve çıkışındaki rüzgar soğutma sıcaklığını göstermektedir. Rüzgar soğutma sıcaklığı aşağıdaki gibi hesaplanır [15].

$$T_{\text{g,rüz-soğ}} = 13,12 + 0,6215T_o - 11,37\theta_r^{0,16} + 0,3965T_o\theta_r^{0,16} \quad (28)$$

Toplam entropi farkı aşağıdaki gibi verilebilir [16].

$$\Delta s = C_{p,o} \ln \left(\frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) - R \ln \left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}} \right) - \frac{\dot{Q}_{kayıp}}{T_o} \quad (29)$$

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

$$\dot{Q}_{kayıp} = \dot{m}_r C_{p,o} \left(T_o - \frac{T_{r1} + T_{r2}}{2} \right) \quad (30)$$

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

$$\dot{E}x_{RT} = \dot{E}_{\text{üretilen}} + \dot{m}_r C_{p,o} (T_{r2} - T_{r1}) + \dot{m}_r T_o \left[C_p \ln \left(\frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) - R \ln \left(\frac{p_{r2}}{p_{r1}} \right) - \frac{\dot{Q}_{\text{kayıp}}}{T_o} \right] \quad (31)$$

3.2 Fotovoltaik Sistem

Fotovoltaik modülleri üzerine yapılan deneysel çalışmalara göre böyle bir sistemden üretilebilecek maksimum elektrik üretimi güneş hücresi üzerine gelen toplam güneş radyasyonu (S_t) ve çevre sıcaklığına bağlı olarak bağlı olarak verilebilir [17].

$$P_m = -11,017 + 0,34 \cdot S_t \cdot 2,73^{-0,003 \cdot T_o} \quad (32)$$

Toplam güneş radyasyonu aşağıda verilen ifade yardımı ile hesaplanabilir [18].

$$S_t = \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360^\circ n}{365,25} \right) \right] S_o \quad (33)$$

Burada S_o güneş sabiti ($\cong 1373 \text{ Wm}^{-2}$) ve n ise 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır. Güneş pili sisteminin ekserjisi dengesi aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{PV} = \dot{E}x_{\text{elek}} - \dot{E}x_{\text{ısı}} \quad (34)$$

Fotovoltaik sisteminin elektrik ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{\text{elek}} = V_m I_m \quad (35)$$

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

$$\dot{E}x_{\text{ısı}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_{PV}} \right) \dot{Q} \quad (36)$$

Burada T_{PV} fotovoltaik sisteminin yüzey sıcaklığını vermektedir. Fotovoltaik sistemin yüzeyinden taşınım ile oluşan ısı transferi aşağıda verilen ifade kullanılarak hesaplanabilir [18].

$$\dot{Q} = h_{c,PV} A_{PV} (T_{PV} - T_o) \quad (37)$$

$$h_{c,PV} = 5,7 + 3,8 \vartheta_{PV} \quad (38)$$

Burada ϑ_{PV} fotovoltaik sistemin hemen üzerindeki rüzgar hızıdır. Denklem (34) ve (38) arasındaki ifadeleri kullanarak fotovoltaik sistemin ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{E}x_{PV} = V_m I_m - \left[\left(1 - \frac{T_o}{T_{PV}} \right) (5,7 + 3,8 \vartheta_{PV}) A (T_{PV} - T_o) \right] \quad (39)$$

3.3. PEM Elektrolizör

Saf hidrojen üretimi için proton değişimli membran (PEM) elektrolizör sistemi Şekil 1'de verilmiştir. Elektrolizörü işletmek için elektriksel güç ve ısı enerjisi birlikte PEM elektrolizöre

elektrokimyasal reaksiyonları karşılamak üzere verilir. Katot hücresinde üretilen hidrojen oda sıcaklığına kadar soğutulur ve daha sonraki kullanımlar için hidrojen tankında tepolanır. PEM elektrolizörünün net enerji ihtiyacı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta G = \Delta H - T_r \Delta S \quad (40)$$

Burada ΔG Gibbs serbest enerji değişimidir, ΔH entalpi değişimidir, T_r reaksiyon sıcaklığıdır, ΔS entropi değişimidir ve $T_r \Delta S$ ısı enerjisi ihtiyacını verir. Hidrojen kütle akış hızı aşağıda verilen ifadeden hesaplanabilir [19];

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2, O, tepkiyen} \quad (41)$$

Burada J ve F akım yoğunluğu ve Faradaysabitidir. PEM elektrolizörünün elektroliz voltajı aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$V = V_o + V_{akt,a} + V_{akt,c} + V_{ohm} \quad (42)$$

Burada V_o , $V_{akt,a}$, $V_{akt,c}$ ve V_{ohm} sırasıyla tersinir voltaj, anot aktivasyon potansiyeli, katot aktivasyon potansiyeli ve ohmik potansiyeldir. Nerst denklemini kullanarak tersinir voltaj aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_o = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_g - 298) \quad (43)$$

Burada T_g PEM elektrolizör sıcaklığıdır. PEM'de ki ohmik potansiyel membran boyunca hareket eden hidrojen iyonlarına bir direncin oluşmasına neden olur. PEM kalınlığı ve sıcaklığı ile nemlilik derecesi PEM iyonik direnç üzerine önemli etkileri vardır. PEM iyonik iletkenliği aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir [20];

$$\sigma_{PEM} [\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (44)$$

Burada $\lambda(x)$ PEM'de ki x uzaklığındaki yerde bulunan H₂O içeriğidir ve PEM elektrot sınırlarında ki su içeriğinin terimlerinde tanımlanır.

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_k}{D} x + \lambda_k \quad (45)$$

Burada D PEM kalınlığı, λ_a anotta ki su içeriğidir, λ_k katot membran iç yüzeyindeki su içeriğidir. PEM elektrolizörün tüm ohmik direnci aşağıdaki gibi hesaplanabilir [20];

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (46)$$

Ohm kanununa bağlı olarak PEM'in ohmik potansiyeli aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_{ohm, PEM} = J R_{PEM} \quad (47)$$

PEM elektrolizörünün aktivasyon potansiyeli ise aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$V_{akt,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{o,i}} \right), \quad i = a, k \quad (48)$$

Burada J_o değişim akım yoğunluğu olup aktivasyon potansiyelini belirlemede önemli bir yere sahiptir ve aşağıda verildiği gibi hesaplanır [19];

$$J_{o,i} = J_i^{ref} \exp\left(-\frac{V_{akt,i}}{RT}\right), \quad i = a, c \quad (49)$$

Burada J_i^{ref} ekponansiyel faktördür, $V_{akt,i}$ PEM elektröklizörünün anot ve katot tarafları için aktivasyon enerjileridir, alt indis a ve k ise sırasıyla anot ve katottur.

3.4. PEM Yakıt Hücresi

PEM yakıt hücresine gönderilen hidrojen ve oksijenin mol kesrini bulmak için aşağıda verilen denklemler kullanılabilir.

$$x_{H_2} = \frac{1 - x_{H_2O,A}}{1 + (x_A/2)(1 + \xi_A/(\xi_A - 1))} \quad (50)$$

$$x_{O_2} = \frac{1 - x_{H_2O,K}}{1 + (x_K/2)(1 + \xi_K/(\xi_K - 1))} \quad (51)$$

Burada x_A ve x_K , anot ve katot kuru gaz mol kesridir ve bu çalışmada sırasıyla 0.01 ve 3.76 olarak alınmıştır. ξ_A ve ξ_K , anot ve katot stokiometrisidir ve bu çalışmada sırasıyla 1.5 ve 3 olarak alınmıştır. PEM yakıt hücresinin sıcaklığına bağlı olarak suyun doyma basıncı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [21].

$$\log_{10} P_{doy} = -2.1794 + 0.02953T_h - 9.1837 \times 10^{-5} T_h^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T_h^3 \quad (52)$$

Burada T_h hücre sıcaklığıdır. Yukarıda verilen denklemden hesaplanan doyma basıncı daha sonra aşağıda verilen denklemler kullanılarak anot ve katot tarafındaki suyun mol kesrini hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$x_{H_2O,A} = \frac{P_{doy}}{P_A} \quad (53)$$

$$x_{H_2O,K} = \frac{P_{doy}}{P_K} \quad (54)$$

Yakıt hücresinin spesifik alanı başına güç çıktısı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\dot{W}_{YH} = Ix(V_{ters} - v_{akt,a} - v_{akt,k} - v_{ohmik} - v_{kon}) \quad (55)$$

Burada I yakıt hücresinden üretilen akımı, V_{ters} tersinir voltajı, v_{akt} aktivasyon voltajını, alt indis a ve k sırasıyla anot ve katotu, v_{ohmik} ohmik voltajı ve v_{kon} ise konsantrasyon kutuplaşma voltajını göstermektedir. Tersinir voltaj değeri aşağıda verilen ifadeden hesaplanabilir.

$$V_{ters} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{yh} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} x T_{yh} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (56)$$

Burada T_{yh} yakıt hücresi sıcaklığıdır. Anot ve katottaki aktivasyon voltajları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$v_{akt,a} = \frac{RT_{yh}}{\alpha_a n F} \ln\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad (57)$$

$$v_{akt,k} = \frac{RT_{yh}}{\alpha_k n F} \ln\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad (58)$$

Burada R ideal gaz sabitidir. α_a ve α_k , anot ve katot transfer katsayısıdır ve bu çalışmada sırasıyla 0.5 ve 1 olarak alınmıştır. n elektron sayısıdır ve F Faraday katsayısıdır. Ohmik voltajı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_{ohmik} = IR_{ohmik} \quad (59)$$

Burada R_{ohmik} ohmik direnci olup aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$R_{ohmik} = \frac{d_{mem}}{\sigma_{mem}} \quad (60)$$

Burada d_{mem} membran kalınlığıdır ve bu çalışmada 0.017 cm olarak alınmıştır. Proton geçirgenli membranın öz direnci ise aşağıda verildiği gibi bulunur.

$$\sigma_{mem} = (0.005139\lambda_{mem} - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{yh}} \right) \right] \quad (61)$$

Burada λ_{mem} membran su içeriğini göstermektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\lambda_{mem} = 0.043 + 17.18a_s - 39.85a_s^2 - 39.85a_s^3 \quad (62)$$

Burada a_s membrandaki su aktivitesini göstermektedir ve aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$a_s = x_{H_2O} \left(\frac{P}{P_{doy}} \right) \quad (63)$$

3.5 Enerji ve Ekserji Verimlilikleri

Termodinamiğin I. Yasasına göre enerji verimliliği aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{\text{Elde edilen iş}}{\text{Harcanan enerji}} \quad (64)$$

Yukarıdaki ifade fotovoltaik sistem, rüzgar türbini, hidrojen üretim sistemi ve entegre sistemin enerji verimliliği için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta_{PV} = \frac{W_{PV}}{S_{tAPV}} \quad (65)$$

$$\eta_{rüzgar_türbini} = \frac{W_{RT}}{E_{girdi}} \quad (66)$$

$$\eta_{hidrojen} = \frac{W_{PEM}}{W_{net}} \quad (67)$$

$$\eta_{sistem} = \frac{W_{net,PV} + W_{net,WT}}{S_{tAPV} + E_{girdi}} \quad (68)$$

Bir sistemin ekserji verimliliği Termodinamiğin II. Yasasına göre aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\psi = \frac{\text{Elde edilmek istenen ekserji}}{\text{Sağlanan ekserji}} \quad (69)$$

veya

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{\dot{E}}}{\dot{E}x_g} = 1 - \frac{\dot{E}x_D}{\dot{E}x_g} \quad (70)$$

Bu tanımlamalara bağlı olarak fotovoltaik sistem, rüzgar türbini, hidrojen üretim sistemi ve entegre sistemin ekserji verimliliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{E}x_{PV}}{\dot{E}x_{güneş-PV}} \quad (71)$$

$$\psi_{rüzgar_türbini} = \frac{\dot{E}x_{RT}}{\dot{E}x_{girdi}} \quad (72)$$

$$\psi_{hidrojen} = \frac{\dot{E}x_{PEM}^W}{\dot{E}x_{net}^W} \quad (73)$$

$$\psi_{sistem} = \frac{\dot{E}x_{net,PV} + \dot{E}x_{net,WT}}{\dot{E}x_{güneş-PV} + \dot{E}x_{girdi}} \quad (74)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Bir önceki bölümde ve alt bölümlerinde detaylı olarak verilen termodinamik eşitliklerin evsel kullanım için önerilen rüzgar-güneş-hidrojen alt sistemlerine uygulanmasıyla entegre sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Termodinamik analizler, Engineering Equation Solver (EES) bilgisayar yazılım programı [22] kullanılarak yapılmış ve çalışılan parametrelerin termodinamik özellikleri de bahsi geçen yazılım paketi sayesinde belirlenmiştir. Entegre sistemin analizini yapmak için aşağıda verilen kabuller yapılmıştır;

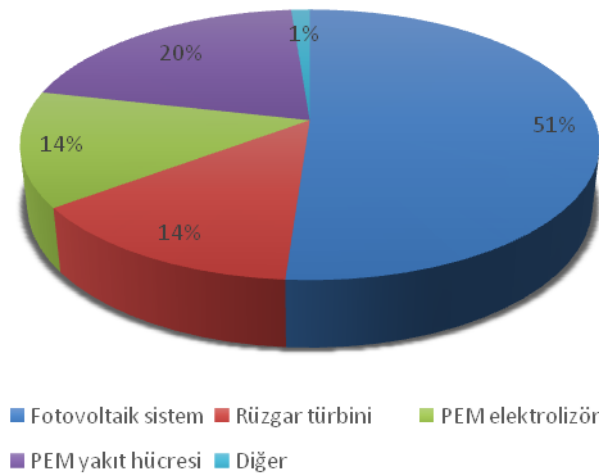
- Tüm prosesler kararlı haldedir.
- Kinetik, potansiyel ve kimyasal enerji ve ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Sisteme veya sistemden olan ısı kayıpları ile basınç düşmeleri ihmal edilmiştir.
- Dış ortam sıcaklığı 25 °C ve basıncı 101.3 kPa olarak alınmıştır.
- Analizler rüzgar hızı 5.5 m/s ve güneş ışınım değeri 800 W/m² için yapılmıştır.

Yukarıda verilen kabuller kullanılarak yapılan analizlere bağlı olarak Çizelge 1’de birinci kanun verimi, ekserji verimi ve ekserji kayıpları sistem bileşenleri ve tüm sistem için verilmiştir. Analizler sonucunda, termodinamiğin ikinci yasasının bir göstergesi olarak rüzgar-güneş-hidrojen entegre sistemin ekserji yıkımının 152.58 kW olduğu, aynı zamanda en yüksek ekserji yıkımının fotovoltaik güneş enerjisi sisteminde olduğu görülmektedir. Fotovoltaik sistemi sırasıyla PEM yakıt hücresi, PEM elektrolizör ve rüzgar türbini takip etmektedir. Aynı zamanda, en yüksek enerji ve ekserji verimliliğine rüzgar türbini alt sisteminin sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Entegre sistemin ekserji kayıpları ile enerji ve ekserji verimlilikleri

Sistem	$\dot{E}x_D$ (kW)	η	ψ
Fotovoltaik sistem	78	0.1985	0.1074
Rüzgar türbini	20.85	0.8574	0.7058
PEM elektrolizör	21	0.6128	0.5358
PEM yakıt hücresi	30.85	0.4258	0.3485
Entegre sistem	152.58	0.5982	0.4708

Termodinamiğin ikinci yasasına göre hesaplanan ekserji kayıplarının yüzdesel değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere rüzgar-güneş-hidrojen entegre sisteminin ekserji kayıplarının yaklaşık yarısı yani %51 gibi önemli bir oranı güneş fotovoltaiik sisteminden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, bize sistem performans geliştirme çalışmalarının özellikle güneş fotovoltaiik güneş pili üzerinde yoğunlaştırılması gerektiği göstermektedir. Zaten günümüzde güneş fotovoltaiik sistemlerinin verimliliğinin artırılması için farklı çalışmalar yürütülmektedir. Daha gelişmiş bir dizayn, farklı katmanlı güneş hücrelerinin kullanılması, daha yüksek bir enerji toplama kapasitesi gibi etkilerin daha da etkin bir şekilde geliştirilmesi ile bu tip sistemlerin performanslarının daha da hızlı artacağı beklenilmektedir. İkinci en büyük ekserji kaybı ise %20 oranında PEM yakıt hücresinde olmaktadır. Bu kaybın en büyük sebebi ise yakıt hücresinden dışarıya doğru olan ısı kaybıdır. PEM yakıt hücresinde ki bu atık ısı farklı sistemler kullanılarak konutun ısıtılmasında da kullanılabilir. Böylelikle ısı geri kazanımı uygulandığı için entegre sistemin hem enerji verimliliği hem de ekserji verimliliği artırılabilir.



Şekil 2. Alt bileşenlerin ekserji kayıplarının yüzdesel gösterimi

Entegre sistem ve bileşenlerinin ekserji değerleri, ekserji ifadesinin tanımından da görüleceği gibi referans noktası şartlarına bağlıdır. Enerji üretim, taşınım ve iletim sistemlerine ekserji yıkım analizi yapılmadan önce mutlaka referans noktası şartları belirlenmeli sonra sistem analizine geçilmelidir. Referans şartların bu önemli etkisi göz önünde bulundurarak, incelemesi yapılan rüzgar-güneş-hidrojen entegre sisteminin referans noktası sıcaklığı (T_0) ile alt sistemlerin bağlı

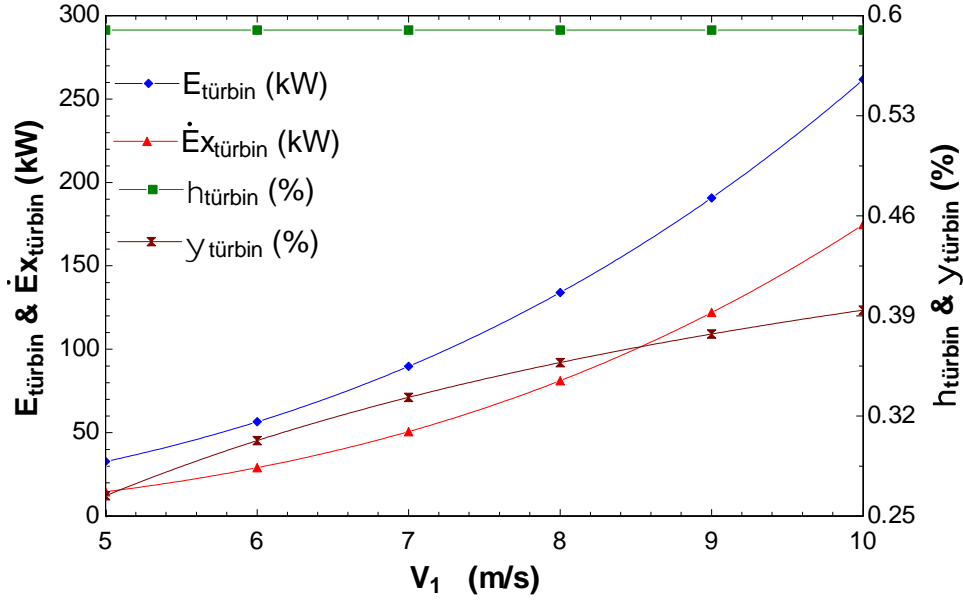
tersinmezlik değişimleri Çizelge 2’de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, maksimum bağlı tersinmezlik sonucu tüm referans sıcaklığı değerlerin de güneş fotovoltaiik sistem için ve aynı zamanda en düşük değeri de rüzgâr türbini sistemi için bulunmuştur.

Çizelge 2. Alt sistem bileşenlerinin bağlı tersinmezlikleri üzerine referans sıcaklığın etkisi

Sistem bileşenleri	Referans sıcaklığı (°C)			
	0	10	20	30
Fotovoltaiik sistem	0.5684	0.5685	0.5686	0.5687
Rüzgâr türbini	0.1165	0.1162	0.1159	0.1156
PEM elektrolizör	0.1224	0.1221	0.1218	0.1215
PEM yakıt hücresi	0.1813	0.1809	0.1805	0.1801

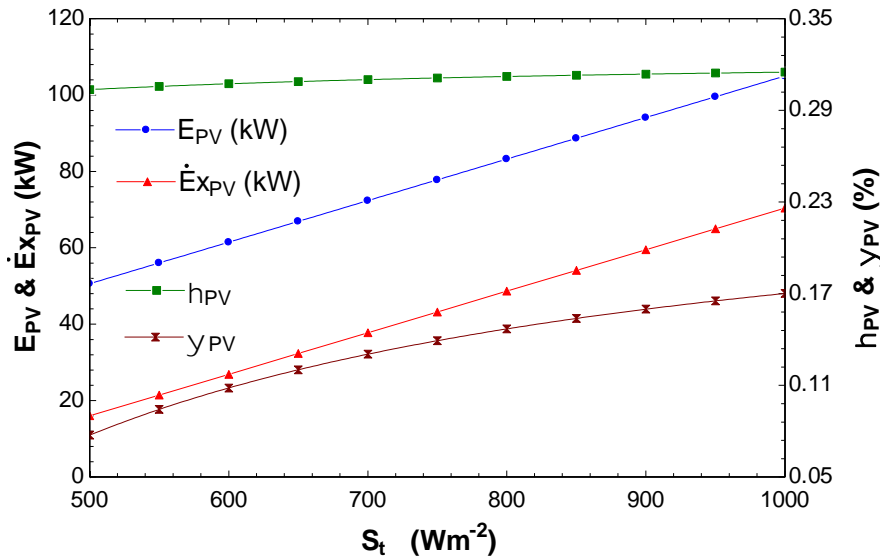
Yapılan parametrik çalışmalar da sistem tasarım parametrelerini etkileyen dış ortam şartlarının rüzgâr hızı ve güneş enerjisi yoğunluğuyla değiştiği belirlenmiştir. Şekil 3 rüzgâr hızının türbinde

meydan gelen enerji ve ekserji miktarlarına etkisini göstermektedir. Ayrıca şeklin sağ tarafında enerji ve ekserji verimliliğindeki değişim gösterilmiştir. Rüzgâr hızı 5 m/s'den 10 m/s'ye çıktıkça türbinden üretilen enerji miktarı yaklaşık 30 kW değerinden yaklaşık 260 kW değerine artmaktadır. Benzer şekilde ekserji miktarı da yaklaşık 20 kW değerinden 160 kW değerine çıkmıştır. Rüzgâr hızının artışı türbinin enerji verimliliğini etkilemezken, ekserji verimliliği %28'lerden %39 civarına artmıştır. Ekserji verimliliğinin artmasının nedeni de sistemin ana kaynaklarından biri olan rüzgâr türbininin ürettiği enerjinin artan rüzgâr hızı ile artmasıdır.



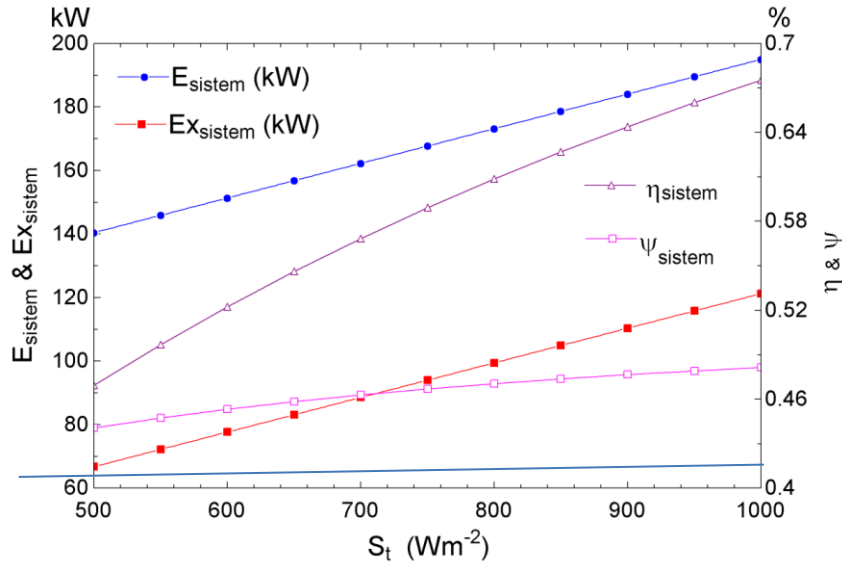
Şekil 3. Rüzgâr hızının rüzgâr türbinin enerji, ekserji ve verimliliklerine olan etkisi

Güneş enerjisinin fotovoltaik sistemin enerji, ekserji miktarları ile enerji ve ekserji verimliliklerine etkisi Şekil 4'de verilmiştir. Güneş radyasyonu 500 Wm^{-2} değerinden 1000 Wm^{-2} değerine yükseldikçe, üretilen enerji miktarı 51 kW'tan yaklaşık 100 kW değerine yükselmektedir. Aynı değerler arasında ekserji miktarı da 16 kW değerinden 64 kW değerine kadar yükselmektedir. Benzer şekilde enerji ve ekserji verimlilikleri incelendiğinde, enerji verimliliği hemen hemen hiç değişmezken, ekserji verimliliği %8,5'ten %17 civarına çıkarak yaklaşık iki kat artmaktadır. Bunun nedeni fotovoltaik sisteme düşen güneş radyasyonunun üretilen elektrik miktarı ile doğrudan alakalı olmasıdır.



Şekil 4. Güneş enerjisinin fotovoltaik sisteminin enerji, ekserji ve verimliliklerine olan etkisi

Son olarak rüzgar türbini, fotovoltaik güneş paneli ve hidrojen üretim entegre sisteminin verimlilikleri analiz edilmiştir ve sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. Güneş enerjisi yoğunluğunun 500 Wm^{-2} değerinden 1000 Wm^{-2} değerine yükselmesi üretilen enerji miktarını 140 kW ’tan yaklaşık 190 kW değerine yükseltmektedir. Yine aynı aralıkta ekserji miktarı 68 kW ’tan 115 kW ’a kadar artmaktadır. Güneş enerjisi yoğunluğunun artışı tüm sistemin enerji verimliliğini %49’dan %67’ye kadar artırmakta, ekserji verimliliğini ise %45’den %48’e kadar artırmaktadır.



Şekil 5. Güneş enerjisinin tüm sisteminin enerji ve ekserjisi ile verimliliklerine olan etkileri

5. Sonuçlar

Yüksek verimlilikleri, düşük maliyetleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle entegre enerji üretim sistemleri son dönemde giderek popüler olmaktadır. Ancak alternatif enerji sistemlerinin farklı çıktı ürünleri sağlamak amacıyla entegre halde kullanımı fosil yakıt kökenli sistemlere göre daha yeni oldukları için hala gelişim aşamasındadır. Bu çalışmada sunulan entegre sistemdeki fotovoltaik sistemin enerji ve ekserji verimliliğinin düşük olması, bu tür sistemlerin üzerinde iyileştirmeler yapılması gerektiğinin bir göstergesidir. Çağımızın en büyük sorunlarından biri olan enerji problemini azaltmanın yolu enerji tasarrufu sağlamak, enerjiyi verimli kullanmak ve enerjiyi temiz kaynaklardan elde etmektir. Bu yüzden entegre sistemlerin önemi giderek artmaktadır. Bu çalışmada analiz edilen güneş ve rüzgar kaynaklı entegre üretim sisteminin termodinamik analizi yapılmış ve tablo ve şekillerle sunulmuştur. Ayrıca entegre sistemin enerji üretim performansını etkileyen bazı parametreler de ayrıca analiz edilmiştir. Çalışmada yapılan analizlerden çıkarılacak sonuçlar başlıca şu şekilde ifade edilebilir;

- En yüksek ekserji kaybı fotovoltaik sistemde (78 kW) gerçekleşmektedir.
- Ekserji kaybına bağlı olarak, entegre sistemde enerji ve ekserji verimliliği en düşük olan alt sistem fotovoltaik sistemdir. Enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %20 ve %11’dir.
- Entegre sistemin genel performansı fotovoltaik sistemlerin verimliliğinin artmasıyla artabilir.
- Farklı sıcaklık aralıklarında, en yüksek bağıl tersinmezlik değerleri fotovoltaik sistemde meydana gelmiştir.
- Rüzgar hızı entegre sistemin performansını olumlu yönde etkilemektedir. Rüzgar hızı 5 m/s ’den 10 m/s ’ye çıktıkça, rüzgar türbininin ekserji verimliliği %28’den %39’a çıkmaktadır.
- Güneş radyasyonu 500 Wm^{-2} değerinden 1000 Wm^{-2} değerine yükseldikçe, fotovoltaik sistemin ekserji verimliliği %8,5’ten %17 civarına çıkarak yaklaşık iki kat artmaktadır.

- Güneş radyasyonunun 500 Wm^{-2} değerinden 1000 Wm^{-2} değerine artışı tüm sistemin ekserji performansını %45 değerinden yaklaşık %48 değerine kadar artırmıştır.

Kaynaklar

- [1]. Öztürk M., Dinçer, İ., “Thermodynamic assessment of an integrated solar power tower and coal gasification system for multi-generation purposes”, *Energy Conversion and Management*, 2013, 76, 1061-1072.
- [2]. Cox K.E., Williamson K.D., *Hydrogen: Its technology and implications*, Volume 1, CRC Press, Cleveland, Ohio, 1977.
- [3]. Cassedy, E.S., *Prospects for sustainable energy: A critical assessment*. Cambridge University Press, 2000.
- [4]. International Energy Agency (IEA), *Renewables for power generation: Status and prospects*, Paris, France, 2003.
- [5]. Global Wind Energy Council, *Global wind report*. Brussels, Belgium, 2012.
- [6]. Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*. Wiley, NY, 2011.
- [7]. Simoes M.G., Farret, F.A., *Renewable Energy Systems; Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, New York, 2004.
- [8]. Markvart T., Castaner L., *Solar Cells; Materials, Manufacture and Operation*, Elsevier, Oxford, United Kingdom, 2006.
- [9]. Veziroğlu T.N., Barbir F., *Hydrogen Energy Technologies: Emerging Technology Series*. United Nations Industrial Development Organization, Austria, 1998.
- [10]. Barelli L., Bidini G., Gallorini F., Ottaviano A., “An energetic–exergetic analysis of a residential CHP system based on PEM fuel cell”, *Applied Energy*, 2011, 88, 4334-4342.
- [11]. Özlü S., Dinçer İ. “Development and analysis of a solar and wind energy based multigeneration system”, *Solar Energy*, 2015, 122, 1279–1295.
- [12]. Yüksel Y.E., Öztürk M., “Thermodynamic Analysis of an Integrated Solar-based Chemical Reactor System for Hydrogen Production” *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2015, 2(2); 19-27.
- [13]. Öztürk M., Dinçer, İ., “Thermodynamic analysis of a solar-based multi-generation system with hydrogen production”, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51, 1235-1244.
- [14]. Öztürk M., “Energy and Exergy Assessments for Potential Wind Power in Turkey” *International Journal of Exergy*, 2011, 8(2), 211-226.
- [15]. Nelson C.A., Tew M., Phetteplace G.E., “Review of the federal interagency process used to select the Wind Chill Temperature (WCT) index”. 18th International Conference on Interactive Information, Orlando, 196–198. 2002.
- [16]. Dinçer İ., Rosen M.A., *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, New York, 2013.
- [17]. Akyüz E., Coşkun C., Oktay Z., Dinçer İ., “A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency”, *Energy*, 2012, 44, 1059-1066.
- [18]. Zamfirescu C., Dinçer İ., “How much exergy one can obtain from incident solar radiation?”, *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(044911), 1-5.
- [19]. Ahmadi P., Dinçer İ., Rosen M.A. “Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 38(4), 1795-1805.
- [20]. Ni M., Leung M.K., Leung D.Y. “Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant” *Energy conversion and management* 2008, 49, 2748-2756.
- [21]. Ay M., Midilli A., Dinçer İ., “Exergetic performance analysis of a PEM fuel cell” *International Journal of Energy Research* 2006, 30, 307–321.
- [22]. F-Chart Software. *Engineering Equation Solver*. <http://www.fchart.com/ees/> (06.06.2016)