



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **YEŞİL BİNA YAKLAŞIMINDA RÜZGÂR VE GÜNEŞ BİRLEŞİK SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ**

**OĞUZHAN YILDIZ  
SELİM AKSAR  
YUSUF SAYICI  
ZAFER UTLU  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ**

# YEŞİL BİNA YAKLAŞIMINDA RÜZGÂR VE GÜNEŞ BİRLEŞİK SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

*Thermodynamic Analysis of Wind and Solar Combined Systems in Green Building Approach*

Oğuzhan YILDIZ  
Selim AKSAR  
Yusuf SAYICI  
Zafer UTLU

## ÖZET

Konut sektöründe enerji verimliliğinin artırılması konusundaki yoğun çabalar devam etmektedir. Bu sektörde ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemlerinde enerji tüketimi oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu nedenle binalarda enerjinin daha verimli kullanılması ve enerji kayıplarının azaltılması gerekmektedir. Bu çalışmada yeşil binalardaki elektrik ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar ve güneş enerjisini entegre ederek uygulama binasının elektrik enerji ihtiyacının birleşik sistemden karşılanması sağlanmıştır. Ayrıca sistemde kullanılan bileşenlerin termodinamik analizleri yapılmıştır. Entegre sistemin alt bileşenlerinin enerji ve ekserji verimlilikleri analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yeşil Bina, Birleşik Sistem, Termodinamik Analiz.

## ABSTRACT

The intensive efforts to increase energy efficiency in the housing sector are ongoing. In this sector, energy consumption in heating, cooling and lighting systems is very much used. For this reason, it is necessary to use energy more effectively in the buildings and to reduce energy losses. In this study, the electrical needs of the green buildings were integrated with the wind and solar energy from the renewable energy sources and the electricity demand of the application building was provided from the combined system. In addition, thermodynamic analyzes of the components used in the system have been made. The energy and exergy efficiencies of the subcomponents of the integrated system have been analyzed.

**Keywords :** Green Building, Bivalent System, Thermodynamic Analysis.

## 1.GİRİŞ

Sürdürülebilir çevre, toplum ve ekonomi üçlü ayağının en önemli göstergesi olan enerji kullanımı, taşınması ve depolanmasının da sürdürülebilir nitelikte olması 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 nicelik değil aynı zamanda kalitesinin de incelenmesi ve sistem tasarımının da buna göre yapılması gerekir[1].

Genel olarak ekserji, çevreyle etkileşim halindeki bir sistemin tanımlanan bir ölü duruma göre üretebileceği maksimum işi ifade eder. Enerjinin aksine ekserji ideal şartlar dışında korunumsuzdur. Gerçek bir çevrim sırasında ekserji tüketimi olabileceği gibi tersinmezliklerden kaynaklı olarak ekserji kayıpları da yaşanmaktadır. Bir ekserji analizi için öncelikle ölü durum şartları saptanmalıdır. Bu şartlar sistemin etkileşim içinde bulunduğu ortamın sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşenlerinin tam olarak tanımlanmasını ifade etmektedir. Tanımlanan duruma gelen sistemin, diğer bir ifade ile çevresiyle denge haline gelen, ekserjisi sıfır olur[2].

Ülkemiz gibi Akdeniz kuşağında yer alan ülkeler için en önemli alternatif enerji kaynağı güneştir. Birim yüzey alana gelen günlük enerji miktarı en yüksek güneydoğu Anadolu ve Akdeniz kıyılarında 19 MJ/m<sup>2</sup>gün, en düşük Doğu Karadeniz kıyılarında 12 MJ/m<sup>2</sup>gün olduğu belirtilmiştir. Birim yüzey alanına gelen bu güneş radyasyonunun maksimum olarak ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceğinin bilinmesi, güneş enerjili sistemlerin tasarlanması ve boyutlandırılması, maliyet analizlerinin daha net ortaya konulması için son derece önem taşımaktadır. Güneş enerjisinden maksimum kullanılabilir işin belirlenebilmesi için farklı yaklaşımlar literatürde mevcuttur[3].

## 2. YEŞİL BİNA PARAMETRELERİ

Enerji ve su kaynaklarını daha az ve verimli kullanan, iç yaşam kalitesi ile sağlıklı bir yaşam konforu sunan, insanların verimliliğini artıran ve işletim maliyetlerinin düşük olduğu binalardır.

Yeşil binalarda yerel olarak mevcut maddelerin tekrar kullanılması ve kaynakların korunarak sürdürülebilirliğinin sağlanması için gün ışığından faydalanma, ısı verimlilik, güneş enerjisi uygulamaları, su tasarrufu sağlayan tesisat kullanımı, yağmur suyunu tutan ve bakım ihtiyaçlarını azaltan peyzaj gibi yöntemler kullanabilmektedir. Böylece atıkların değerlendirilmesi örneğin çatıya akan yağmur suyunun tekrar kullanılabilmesi gibi, bina iç kalitesinin sağlanması, güneş kolektörlerinden sıcak su ihtiyacının karşılanması mümkün olabilmektedir. Yeşil binalarda yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerjisinden elektrik üreterek binaya alternatif enerji kaynağı sağlanmaktadır.

Yeşil binalar çevre ve insan sağlığı üzerindeki negatif etkileri ortadan kaldırmak için tasarlanan yapılarıdır. Yapılan araştırmalara göre tüketilen toplam elektriğin %72 'sinin, enerjinin %39 'nun, içme suyunun %14'nün binalarda kullanıldığı; karbondioksit salınımının %38'nin, ortaya çıkan atıklarında %30'nun binalardan kaynaklandığı belirtilmektedir. Dolayısıyla, kaynakları daha verimli kullanan, kendine kısmen de olsa yeten, çevreye duyarlı yeşil binaların hayatımıza girmesi son derece önem kazanmaktadır[4].

Yeşil binanın faydalarını sıralayacak olursak;

- a. Kentsel yaşam alanlarına değer katması
- b. Binanın değerini artırması
- c. Yapım aşamasında doğal çevre tahribatının en aza indirilmesi
- d. Temiz teknolojilerin kullanımını ve geliştirilmesine ortam sağlaması
- e. Hafriyat ile ortaya çıkan atık malzemenin değerlendirmeye alınması
- f. Yeşil çatı uygulaması ile yağmur sularının arındırılması
- g. Yağmur sularının kullanımı ile kanalizasyon sisteminin yükünü azaltma
- h. Güneş enerjisinden yararlanma
- i. Doğal ışıktan yararlanma
- j. Yeşil katmanların güneş ışınlarını yansıtması ile sera etkisini oluşturan yansımaları azaltması
- k. Enerji tasarrufu sağlaması
- l. Yeşil katmanları ile oksijen üretmesi
- m. İzolasyon sistemleri ile ısıtma soğutma maliyetlerinin ve karbondioksit salınımının azaltılması [5].

### 3. TERMODİNAMİK ANALİZ

Termodinamik bir sistem analizinde son yıllarda geliştirilen ve kullanılmaya başlanan ekserji kavramı önem kazanmaktadır. Ekserji, termodinamiğin ikinci kanunundan yola çıkarak kütlelerin korunumu ve enerjinin korunumu prensiplerine dayanan ve enerji sistemlerinin tasarım ile analizlerinde kullanılan verimli bir metod olarak tanımlanabilir. Mevcut sistemde iyileştirmelere nerelerden başlanacağına ve hangi noktada en çok enerji kaybının olduğunun bulunabilmesi için kullanılmakta olan enerji analizleri yeterli olmamaktadır. Çünkü enerji analizler enerjinin kalitesi değil ancak miktarı hakkında bilgi edinilebilmesini sağlar.

Çevre sıcaklığında çalışan enerji sistemleri için “kullanılabilir enerji” olarak da bilinen ekserjiyi, enerjinin faydalı kısmı olarak da düşünebiliriz. Yani enerjinin faydalı kısmı, enerjinin başka enerji formuna dönüştürülebilir kısmıdır. Hem ekserji tahribi hem de ekserji kaybı termodinamiğin ikinci kanun analizi ve ekserji analizi ile belirlenmektedir. Termodinamiğin ikinci kanunu hem bir enerji taşıyıcısının gerçek termodinamik değerini hem de proses ya da sistemlerden olan kayıpların ve gerçek termodinamik yetersizliklerin hesaplarının yapılabilmesi sonucu ile bir enerji dengesini tamamlar ve geliştirir. Ekserji tahribi direk olarak sistem içindeki tersinmezliklerin sonucudur.

Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) getirilirse elde edilir. Bu değer sistemin verilen başlangıç halinde yararlı iş potansiyelini veya iş yapma olanağını göstermektedir ve kullanılabilirlik (ekserji) diye adlandırılır.

#### 3.1. Enerji ve Ekserji Analizi

Ekserji analizinde baz alınan çevrenin, sistemlerden ve tersinmezlikten bağımsız, homojen, prosesler sonucu değişmeyen sabit parametrelere sahip olduğu kabul edilmektedir. Genellikle  $T_0=25^\circ\text{C}$  ve  $P_0=1$  atm olarak varsayılan çevre parametreleri gerçek uygulamalarda, ortalama dış hava sıcaklığı ve basıncı olarak referans alınabilmektedir. Sistemin çevre ile mekanik, termal ve kimyasal dengede bulunması, iş üretebilecek bir enerjinin bulunmadığını ifade eder ve “ölü hal” olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, sistem ile çevrenin basınç, sıcaklık ve kimyasal potansiyel değerleri eşittir[6].

Güneş ve rüzgar enerjisi destekli elektrik 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 kütlelerin korunumu ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

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

Burada  $\dot{m}$  kütle akış hızını, g ve  $\zeta$  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 dengesini 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 dengesini aşağıdaki eşitlikle verilir.

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

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.

$$\sum_i \dot{m}_\zeta + ex_g + Ex_Q = \sum_e \dot{m}_\zeta ex_\zeta + Ex_w + Ex_D \quad (4)$$

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

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i \quad (5)$$

$$Ex_W = \dot{W} \quad (6)$$

$$Ex_D = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (7)$$

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.

$$ex_{f,i} = (h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0) \quad (8)$$

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.

$$BT = \frac{Ex_{D,i}}{Ex_{D,\text{toplam}}} \quad (9)$$

### 3.1.1 Rüzgar Türbini

V hızıyla hareket eden  $\dot{m}$  kütleli havanın kinetik enerjisi aşağıdaki ifade ile verilir.

$$K_s = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad (10)$$

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;

$$\dot{m} = (\rho AV) \quad (12) \quad (\text{kg/sn})$$

Güç ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho \dot{m} V^2 \quad (13)$$

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

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (14)$$

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.

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

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.

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

Burada “L<sub>m</sub>” merkezden itibaren maksimum rotor genişliğini ve “h<sub>r</sub>” 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.

$$P_0 = \frac{1}{2} \dot{m} (V^2 - V_0^2) \quad (17)$$

Burada “P<sub>0</sub>” rotor tarafından sağlanan mekaniksel gücü veya türbin çıktı gücünü, “V” rotor bıçaklarına girişindeki rüzgar hızını ve “V<sub>0</sub>” rotor bıçaklarını terk eden rüzgar hızını göstermektedir [14]. Makroskobik ölçekte rotor bıçaklarının kanat yüzeyindeki V’den “V<sub>0</sub>” 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;

$$\dot{m} = \rho A \frac{V+V_0}{2} \quad (\text{kg/sn}) \quad (18)$$

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

$$P_0 = \frac{1}{2} \left[ \rho A \frac{V+V_0}{2} \right] (V^2 - V_0^2) \quad (19)$$

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

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \frac{(1+\frac{V_0}{V})[1-(\frac{V_0}{V})^2]}{2} \quad (20)$$

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

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (21)$$

Burada “C<sub>p</sub>” rotor bıçakları tarafından sağlanan girdi rüzgar hızı gücünün kesrini göstermektedir. Geriye kalan güç çıkan rüzgarda kaybolmakta veya kullanılamamaktadır. Genel olarak “C<sub>p</sub>” faktörü rotor veya rotor veriminin güç katsayısı olarak adlandırılır ve Denklem (20)’ye bağlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$C_p = \frac{(1+\frac{V_0}{V})[1-(\frac{V_0}{V})^2]}{2} \quad (22)$$

Verilen bir girdi rüzgar hızı için “C<sub>p</sub>” nin değeri çıktı rüzgar hızının girdi rüzgar hızına oranına (V<sub>0</sub>/V) bağlıdır. Güç katsayısının (V<sub>0</sub>/V) oranına karşı çizilen eğriye bağlı olarak C<sub>p</sub>’nin maksimum değer fonksiyonu tekdir. (V<sub>0</sub>/V) oranı 1/3 olduğu zaman “C<sub>p</sub>” 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.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 0.59 \quad (\text{Watt}) \quad (23)$$

“C<sub>p</sub>” 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 alınırsa, birim süpürme alanı için rüzgar türbininin maksimum güç çıktısı aşağıda verildiği

gibi basit bir ifade ile tanımlanabilir.

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

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.

$$Ex_k = E_{\text{üretilen}} \quad (\text{Watt}) \quad (25)$$

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

$$Ex_{\text{akış}} = \dot{m}_r (\Delta h - T_0 \Delta s) \quad (\text{Watt}) \quad (26)$$

$$\Delta h = C_{p,0} (T_{r2} - T_{r1}) \quad (\text{Kj/Kg}) \quad (27)$$

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

$$T_{g,rüz-soğ} = 13,12 + 0,6215 T_0 - 11,37 V_r^{0,16} + 0,3965 T_0 V_r^{0,16} \quad (^\circ\text{C}) \quad (28)$$

Toplam entropi farkı aşağıdaki gibi verilebilir

$$\Delta s = C_{p,0} \ln \left( \frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) - R \ln \left( \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \right) - \frac{Q_{\text{kayıp}}}{T_0} \quad (\text{Kj/Kg.K}) \quad (29)$$

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

$$\dot{Q}_{\text{kayıp}} = \dot{m}_r C_{p,0} \left( T_0 - \frac{T_{r1} + T_{r2}}{2} \right) \quad (30)$$

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

$$Ex_{RT} = E_{\text{üretilen}} + \dot{m}_r C_{p,0} (T_{r2} - T_{r1}) + \dot{m}_r T_0 \left[ C_{p,0} \ln \left( \frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) - R \ln \left( \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \right) - \frac{Q_{\text{kayıp}}}{T_0} \right] \quad (31)$$

### 3.1.2 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 bağlı olarak verilebilir.

$$P_m = -11,017 + 0,34 \cdot S_t \cdot 2,73^{-0,003 T_0} \quad (32)$$

Toplam güneş radyasyonu aşağıda verilen ifade yardımı ile hesaplanabilir

$$S_t = \left[ 1 + 0,33 \cdot \cos \left( \frac{360^\circ n}{365,25} \right) \right] S_0 \quad (\text{W/m}^2) \quad (33)$$

Burada  $S_0$  güneş sabiti ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) ve  $n$  ise 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır. Güneş pili sisteminin ekserjisi dengesi aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$Ex_{PV} = Ex_{\text{elek}} - Ex_{\text{ısı}} \quad (\text{Watt}) \quad (34)$$

Fotovoltaik sisteminin elektrik ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$Ex_{elek} = V_m I_m \quad (\text{VA}) \quad (35)$$

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

$$Ex_{ısı} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{PV}}\right) \dot{Q} \quad (\text{Watt}) \quad (36)$$

Burada  $T_{PV}$  fotovoltaik sisteminin yüzey sıcaklığını vermektedir. Fotovoltaik sistemin yüzeyinden taşınımıyla oluşan ısı transferi aşağıda verilen ifade kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{Q} = h_{c,PV} A_{PV} (T_{PV} - T_0) \quad (\text{Watt}) \quad (37)$$

$$h_{c,PV} = 5,7 + 3,8V_{PV} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (38)$$

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

$$Ex_{PV} = V_m I_m - \left[ \left(1 - \frac{T_0}{T_{PV}}\right) (5,7 + 3,8V_{PV}) A (T_{PV} - T_0) \right] \quad (\text{Watt}) \quad (39)$$

### 3.2. Enerji ve Ekserji Verimlilikleri

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

$$\eta_{en} = \frac{\text{Elde edilen iş}}{\text{Harcanan enerji}} \quad (40)$$

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

$$\eta_{PV} = \frac{W_{PV}}{S_t A_{PV}} \quad (41)$$

$$\eta_{rüzgar\_türbini} = \frac{W_{RT}}{E_{girdi}} \quad (42)$$

$$\eta_{sistem} = \frac{W_{net,PV} + W_{net,WT}}{S_t A_{PV} E_{girdi}} \quad (43)$$

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

$$\psi = \frac{\text{Elde edilmek istenen ekserji}}{\text{Sağlanan ekserji}} \quad (44)$$

Veya

$$\psi = \frac{Ex_f}{Ex_g} = 1 - \frac{Ex_D}{Ex_g} \quad (45)$$

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

$$\psi_{PV} = \frac{Ex_{PV}}{Ex_{güneş-PV}} \quad (46)$$

$$\psi_{rüzgar\_türbini} = \frac{Ex_{RT}}{Ex_{girdi}} \quad (47)$$

$$\psi_{sistem} = \frac{Ex_{net,PV} + Ex_{net,WT}}{Ex_{güneş-PV} + Ex_{girdi}} \quad (48)$$



## 4. UYGULAMA

### 4.1. Binanın Tanıtılması

“Yeşil” tasarım için başlangıç noktası, rahat, eğlenceli, sağlıklı, çalışma ve dinlenme koşulları sunan bir yapıda artan verimliliğin farkında olunmasıdır. Rahat bir ortamda faaliyet gösteren bireylerde daha dikkatli çalışabilmekte, işe, derse, vs. daha iyi odaklanıp çalışan kontrolü ve termal rahatlığın fizyolojik etkilerinden yararlanabilmektedirler.

Bu tasarım yapı ile ilgili imar kurallarına ve yönetmeliklerine uygun, amaç ve ihtiyaçlarına cevap verebilen özelliklerde çevre ve iklim şartları ile enerji ekonomisine duyarlı bir anlayışla tasarlanmış bir mimari yapıdır.

Yeşil binanın toplam kapalı alanı 80 m<sup>2</sup> müstakil bina olup içerisinde mutfak lavabo ve oturma alanları bulunmaktadır. Uygulama binası Şekil 1 de gösterilmiştir.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı enerji tüketim değerlerine göre ev içi elektrik tüketim paylarına bakıldığında, ilk sırayı %30 payla buzdolabı almaktadır. Buzdolabını %28 oranla aydınlatma takip ederken, %10 ile elektrikli fırınlar üçüncü sıraya yerleşiyor. Televizyon, ailenin elektrik tüketiminde %10, çamaşır makinesi %7, bulaşık makinesi %6, ütü %4, elektrikli süpürge %3 ve saç kurutma makinesi %2 paya sahiptir.



**Şekil 1.** Hibrid sistem (rüzgâr ve güneş enerjisi) ve yeşil bina.

Bir evin günlük, enerji tüketim miktarları Tablo 1 de gösterilmiştir. Buradaki değerler belirlenirken orta büyüklükte bir aile ve ev düşünülmüş, değerler bu şartlara göre hesaplanmıştır. Ayrıca düşünülen bu evde tüm elektrikli aletlerin olduğu ve aktif olarak kullanıldığı varsayılarak bir evde tüketilebilecek enerji miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

**Tablo 1.** Bir dairenin günlük, haftalık ve aylık ortalama elektrik tüketim değerleri

Saat	Buzdolabı (Watt)	Aydınlatma (Watt)	Ütü, Bulaşık ve Çamaşır Makineleri (Watt)	Mutfak (Watt)	Televizyon Bilgisayar (Watt)	Toplam (Watt)
0-1	30	15	*			45
1-2	30	15	*			45
3-4	30	15	*			45
4-5	30	15	*			45
5-6	30	15	*			45
6-7	30	15	*			45
7-8	30		*	100		130
8-9	30		*			30
9-10	30		*			30
10-11	30		*		200	230
11-12	30		800		200	1030
12-13	30		500		200	730
13-14	30		*	100		130
14-15	30		*			30
15-16	30		*			30
16-17	30		*			30
17-18	30		*			30
18-19	30		*	100	200	330
19-20	30	100	*	100	200	430
20-21	30	100	*		400	530
21-22	30	75	*		400	505
22-23	30	75	*		200	305
23-24	30	50			100	180
Toplam	720	505	1300	400	2100	5025

#### 4.2. Sistem Bileşenlerinin İncelenmesi

Yaptığımız bu çalışmada, İstanbul iklim şartlarında Yeşil bir binanın elektrik ihtiyacını güneş ve rüzgâr enerjisi kullanılarak karşılanması incelenmiştir. Sistem oluşturulurken kullanılan bileşenler aşağıda sıralanmıştır;

1. 4\*100Watt gücünde Polikristal Fotovoltaik Panel
2. 1adet 1 kW gücünde Rüzgâr türbini
3. Rüzgâr regülatörü
4. Solar Regülatör
5. Alüminyum Alt Konstrüksiyon
6. AC ve DC Kablo
7. Aküler
8. İnverter kullanılmıştır.

##### 4.2.1. Güneş ve kolektörlerin incelenmesi

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlere "Fotovoltaik Sistemler" denir. Verimleri panel tipine göre değişmekle birlikte % 15-20 arasındadır Türkiye şartlarında güneşlenme süresi; kışın 7 saat, sonbaharda 9 saat ve yazın 11 saattir. Panel camının kirli olması, güneş ışınlarının geliş açısının dik olmaması, havanın çok sıcak veya çok soğuk olması panel verimini düşürecektir. Uygulama bölgesinin Güneş enerjisinin aylara göre ışınlam değerleri Tablo 3 de gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Uygulama bölgesinin Güneş enerjisinin aylara göre ışınım değerleri (cal/cm<sup>2</sup>.h) [8].

AYLAR	SAATLİK ORTALAMA TOPLAM IŞINIM																
	4 5	5 6	6 7	7 8	8 9	9 10	10 11	11 12	12 13	13 14	14 15	15 16	16 17	17 18	18 19	19 20	GÜNLÜK TOPLAM
OCAK				1	5	11	16	18,5	18,5	17	13,5	8,5	3				112
ŞUBAT				3	7,5	13	19	22	24	23	29	13,5	6,5	1,5			152
MART			2	8	16	23	30	35,5	36	33	33	21	13	5	1		253
NİSAN		1	7	15	24,5	32,5	40,5	43	42,5	40	34	26,5	18	9	2		336
MAYIS		4,5	13	22	32,5	42,5	47,5	52	53	50	43,5	35	24,5	14	5		438
HAZİRAN	1	6	15	26	36	45	51	55	55	52	47	39	29,5	18,5	8,5	2	487
TEMMUZ		5	14,5	25	35	44	50	54	54,5	52	48	40	30,5	19	8	1	481
AĞUSTOS		2,5	9	20	29	36	43	48	50	47	43	35	24	13	4		404
EYLÜL			6	16	26,5	34	40	43	43	41	36	27	16	6	1		336
EKİM			2	9	17	24	28	30,5	30,5	27	21	14	6	1			210
KASIM				4	10,5	16,5	21	23,5	23	20	15	9	3				146
ARALIK				2	5,5	11,5	17	19	19	16,5	12,5	7	2				111

Sistemimizde 4 tane 100 W değerinde panel kullanılmaktadır. Bu uygulama için polikristal silikon hücre tipli **SL100CE-18P** modeli güneş paneli seçilmiş ve Şekil 2 de gösterilmiştir.

**Şekil 2.** Sistemde Kullanılan Güneş Panelleri[1].

Üretilecek enerji miktarı mevsimlere göre değişecektir. Panellerin teknik özellikleri ise Tablo 3 de verilmiştir.

**Tablo 3.** Sistemde kullanılan güneş panelinin teknik özellikleri[1].

Güneş Paneli Teknik Bilgileri	
Maksimum Güç:	100 W
Günlük Çıkış Değeri:	220 W
Maksimum Güç Voltajı:	19,12 V
Açık Devre voltajı:	22,68 V
Maksimum Güç Akımı:	5,23 A
Kısa Devre Akımı:	5,6 A
Modül Boyutu:	1005x 668x35 mm
Ağırlık:	8 kg
Hücre adedi	4x9

#### 4.2. 2. Rüzgar türbin sisteminin incelenmesi

Sistemimizde 1kw 'lık rüzgâr türbini kullanılmıştır. Yeni nesil Fiber katkılı ABS yapılı 2,3 metre çapında 3 kanadı sayesinde 3m/sn rüzgâr hızında çalışmaya başlar. Kuyruk kısmı sayesinde rüzgârı her yerden yakalayabilmektedir. Türbin çıkışı 3 faz olduğu için kablo kayıplarını en aza indirger. Rüzgâr kanatları özel tasarım sayesinde gürültü kirliliği en az seviyededir.



**Şekil 3.** Temiz enerji sisteminde kullandığımız rüzgâr türbini[1].

Elektrik üretim sisteminde kullanmış olduğumuz rüzgâr türbinine ait görüntü Şekil 3. üzerinde, teknik detaylar Tablo 4 üzerinde gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Sistemde kullandığımız rüzgâr türbini teknik özellikleri[1].

Rüzgâr Türbini Teknik Özellikleri	
Gövde Yapısı	Döküm Alüminyum
Kanatlar	Fiber katkılı ABS
Kanat kolları	Blok Alüminyum
Kanat çapı	2,30 m
Kanat sayısı	3
Başlangıç hızı	3 m/s
Anılan Rüzgâr hızı	10 m/s
Maksimum rüzgâr hızı	35 m/s
Akü koruma voltaj eşiği	28,4 V DC
Frenleme	Elektromanyetik

#### 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yaptığımız bu çalışmada, İstanbul iklim şartlarında Yeşil bir binanın elektrik ihtiyacını güneş ve rüzgâr enerjisi kullanılarak karşılanması incelenmiştir. Dolayısıyla özellikle kış aylarında güneş panellerinden gelen enerjinin yetersiz olduğu durumlardaki enerji açığını kapatmak ve sadece güneş panelleriyle kurulacak bir sistem yerine, sisteme dâhil edilen bir rüzgâr türbini ile birlikte oluşan hibrid sistem üzerinden daha iyi sonuçlar alınmaktadır.

Yeşil binaya kurduğumuz bu sistem üzerinde, güneş enerjisinden elektrik üreten 100 Watt değerinde 4 adet güneş paneli ve 1 kW gücünde bir adet rüzgâr türbini kullanılmıştır. Bu iki sistemden üretilen

elektriği depolamak için 4 adet 105 Ah 12V akü grubu ile desteklenmiştir. Paneller den ve rüzgâr türbinin den gelen akımları depolamak için bir adet güneş regülatörü ve bir adet rüzgâr türbini invertörü kullanılmıştır. Regülatör gelen akımı düzenleyerek akülerin tam dolmasını veya tam boşalmasını önleyen cihazdır. Rüzgâr türbini invertör'ü ise türbinin ürettiği alternatif akımı (AC), doğru akıma (DC) çevirerek aküye besleme yapan cihazdır.

Bu sistem ile yeşil binanın günlük enerji ihtiyacı yapılan araştırmalarda Türkiye'de **orta ölçekli bir ailenin** günlük ortalama elektrik tüketimi **5 kWh** olarak bulunmuştur. Günde Rüzgâr türbininden 8 m yükseklikte ortalama 3,42 m/sn hızla 9 saat çalışması durumunda ve 4 adet 100 W 'lık güneş panellerinin 9 saat güneşlendiğini varsayarsak gereken enerji ihtiyacının 0,42 'sini oluşturduğumuz bu hibrid sisteminden sağlamış oluruz.

Yapılan çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılarak yeşil bina uygulamasının elektrik ihtiyacının yukarıda detaylı olarak verilen termodinamik eşitliklerin evsel kullanım için önerilen rüzgâr-güneş alt sistemlerine uygulanmasıyla bütünleşmiş sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Entegre sistemin analizini yapmak için aşağıda verilen kabuller yapılmıştır.

- Tüm prosesler kararlı haldedir.
- Kinetik, potansiyel ve kimyasal enerji ve ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Dış ortam sıcaklığı 25°C ve basıncı 101.3 kPa olarak alınmıştır.
- Analizler aralık ayı verileri kullanılarak yapılmıştır.
- Rüzgâr hızı 3,42 m/s ve güneş ışınım değeri 1367 W/m<sup>2</sup> için yapılmıştır.
- 2400 Watt kapasiteli çevirici kullanılmıştır

Yukarıda verilen kabuller kullanılarak yapılan analizlere bağlı olarak Tablo 5'de birinci kanun verimi, ekserji verimi ve ekserji kayıpları sistem bileşenleri verilmiştir.

**Tablo 5.** Hibrid Sistemin Ekserji Yıkımları ve Enerji, Ekserji verimleri.

Sistem	$\dot{E}_{x_D}$ (W)	$\eta$	$\psi$
Fotovoltaik Sistem	144,72	0,1286	0,1024
Rüzgâr Türbini	160,18	0,5899	0,2180
Entegre Sistem	304,09	0,3592	0,1420

Analizler sonucunda, termodinamiğin ikinci yasasının bir göstergesi olarak rüzgar ve güneş entegre sistemin ekserji yıkımının 304,09 W olduğu ve en yüksek ekserji yıkımının rüzgar türbini sisteminde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, en yüksek enerji ve ekserji verimliliğine rüzgâr türbini alt sisteminin sahip olduğu görülmektedir. Bu veriler bize sistem performans geliştirme çalışmalarının özellikle rüzgâr türbini üzerine yoğunlaştırılması gerektiğini göstermektedir.

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 geçilmeli.

**Tablo 6.** Entegre sistemin haricinde güneş enerjisinin bir günlük verileri incelendiğinde saatlik güneş ışınım değerlerinin panele düşme açıları doğrultusunda ekserji verimliliği bulunmuştur.

Güneş	$S_t$ (w/m <sup>2</sup> )	Güneş Açısı ( ° )	$E_{XPV}$ (w)	$\psi$
08:00-09:00	63,96	-60	144,72	0,1131
09:00-10:00	133,65	-45		
10:00-11:00	197,57	-30		
11:00-12:00	220,82	-15		
12:00-13:00	220,82	0		
13:00-14:00	191,77	15		
14:00-15:00	145,28	30		
15:00-16:00	81,35	45		
16:00-17:00	23,24	60		

## 5. SONUÇ

Yüksek verimlilikleri, düşük maliyetleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle entegre enerji üretim sistemleri son dönemde giderek artmaktadır. Ancak alternatif enerji sistemlerinin farklı çıktı ürünleri sağlamak amacıyla entegre halde kullanımı fosil yakıt kökenli sistemlere göre daha yeni oldukları için hala gelişim aşamasındadır. Çağımızın en büyük sorunların biri olan enerji problemini azaltmanın yolu enerji tasarrufu sağlamak, enerjiyi verimli kullanmak ve enerjiyi temiz kaynaklardan elde etmektir. Türkiye'de **orta ölçekli bir ailenin** günlük ortalama elektrik tüketimi **5 kWh** olarak bulunmuştur. Bu enerjinin, Rüzgâr türbininden 8 m yükseklikte ortalama 3,42 m/sn hızla 9 saat çalışması durumunda ve 4 adet 100 W 'lık güneş panellerinin 9 saat güneşlendiğini varsayarsak gereken enerji ihtiyacının %42 'sini oluşturduğumuz bu hibrid sisteminden sağlamış oluruz.

## KAYNAKLAR

- [1]YÜKSEL, Y.E. ÖZTÜRK, M., "Evsel Uygulamalar için Birleşik Rüzgar-Güneş-Hidrojen Sisteminin Termodinamik Analizi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2016.
- [2]KÖKEY İ. "Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi Ve Rüzgar Enerji Santrallerinin Performans Değerlendirmesinde ekserji Analizinin Önemi" ICCI 2013.
- [3]ÖZTÜRK, M. ELBİR, A. ÖZEK, N. "Akdeniz Bölgesine Gelen Güneş Radyasyonunun Ekserji Analizi" International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011.
- [4]ERSÖZ, Ö. KOÇAR, G. ve ark "Güneş enerji destekli biyogaz sistemlerinde ekserji analizi yaklaşımı" Mühendis ve Makine Cilt:51 Sayı:607
- [5]ABUŞKA, M. "Güneş Enerjisi Ve Uygulamaları Ders Notları" Celal Bayar Üniversitesi.
- [6]KINCAIY, O. "Güneş Enerjisi Ders Notları" Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [7][www.eseryesilbina.com](http://www.eseryesilbina.com)
- [8][www.yapi-insaat.com](http://www.yapi-insaat.com)
- [9][www.cevreanaliz.blogspot.com.tr/2012/10/ruzgar-enerjisi.htm](http://www.cevreanaliz.blogspot.com.tr/2012/10/ruzgar-enerjisi.htm)

## ÖZGEÇMİŞ

### Oğuzhan YILDIZ

1989 yılı İstanbul doğumludur.2009 yılında İstanbul üniversitesi makine bölümünden ön lisans mezunu olmuştur ve bir süre sektörde çalıştıktan sonra 2014 yılında İstanbul Aydın üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur.2014 yılında mezun olup aynı yıl içinde teknik muayene hizmetleri veren özel bir şirkette teknik yöneticilik yapmaktadır. Isı ve alternatif enerji kaynaklarına yönelik çalışmalarına devam etmektedir. İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrencisidir.

### Selim AKSAR

1990 yılı İstanbul doğumludur. 2014 yılında İstanbul Aydın üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur.2014 yılında mezun olup aynı yıl içinde teknik muayene hizmetleri veren özel bir şirkette teknik yöneticilik yapmaktadır. Isı ve alternatif enerji kaynaklarına yönelik çalışmalarına devam etmektedir. İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrencisidir.

### Yusuf SAYICI

1991 yılı İstanbul doğumludur. 2012 yılında Marmara üniversitesi makine bölümünden ön lisans mezunu olmuştur. 2014 yılında İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2015 yılında periyodik muayene hizmetleri veren özel bir şirkette çalışmaya başlamış ve bu sektörde çalışmaları devam etmektedir. İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrencisidir.

### Zafer UTLU

1966 Isparta doğumludur. Ege Üniversitesinden 1999 yılında Yüksek Lisans ve 2003 yılında Doktor unvanını almıştır. 2010 Yılında Makine Mühendisliği alanında Doçent olmuştur. 1988-2010 yılları arasında Türk Silahlı Kuvvetlerinin çeşitli Eğitim-Öğretim kademelerinde görev yapmıştır. 2010 yılından beri İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Bölüm Başkanı ve Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. 2015 yılında Makine Mühendisliği Termodinamik alanında Profesör olmuştur. Çalışma alanlarının bir bölümü; Isıl Sistemler, Yenilebilir Enerji Uygulamaları, Termodinamik analiz, Isıl sistemlerin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizi, Biyodizel yakıt üretim sistemleri, Sıfır enerjili bina sistemleri ve Atık ısı kazanım sistemleri ve termofotovoltaik uygulamalar, Yazar ve ortak yazarlık yaptığı 120 den fazla yayını bulunmaktadır.