

PAPER DETAILS

TITLE: Günes Bacasi Güç Sistemlerinin PV ve Rüzgar Güç Sistemleri ile Karsilastirilmesi

AUTHORS: Faruk KÖSE

PAGES: 121-129

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/539133>

Güneş Bacası Güç Sistemlerinin PV ve Rüzgar Güç Sistemleri ile Karşılaştırılması

Faruk KÖSE

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makina Müh. Bölümü, Konya

fkose@selcuk.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 23.02.2018

Kabul Tarihi: 27.07.2018

Öz

Dünyada ve ülkemizde son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları ve bu kaynaklardan enerji üretim sistemlerine gittikçe artan oranda bir ilgi olduğu görülmektedir. Bu ilgi özellikle güneş ve rüzgar enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum rüzgar ve bilhassa güneş elektrik enerji üretim sistemlerinin kurulum maliyetlerinin azalmasından da kaynaklanmaktadır. Güneş enerji sistemlerinden güneş bacası sistemleri ise gerek yerli teknoloji ve malzeme ile kurulabilmesi ve gerekse sürekli enerji üretebilir olması dolayısı ile son yıllarda bilim dünyasında gittikçe artan bir ilgi odağı olmuştur.

Bu çalışmada ilk olarak güneş bacası elektrik üretim sistemleri hakkında geniş kapsamlı literatür taraması yapılarak bu sistemlerin en verimli ve ekonomik kurulumları üzerinde durulmuştur. İkinci olarak Konya bölgesi örnek seçilerek güneş bacası, güneş fotovoltaiik (PV) ve rüzgar türbinleri ile elektrik üretim sistemlerinin ilk kurulum maliyetleri, verimlilikleri ve seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyetleri (SEM) hesaplanmıştır. Son olarak da bulunan sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırılarak tartışılmış ve güneş bacası elektrik üretim sistemlerinin diğer sistemlerden günümüz şartlarında ilk yatırım maliyetlerinin yüksek ve verimlerinin düşük olmasına rağmen yakın gelecekte umut verici olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş bacası, Güneş enerjisi, Rüzgar enerjisi, Güneş ve rüzgar santrali karşılaştırma.

Comparison of Solar Chimney Power Systems with PV and Wind Power Systems

Faruk KÖSE

Konya Technical University Engineering and Natural Sciences Faculty Mechanical Eng. Department, Konya

fkose@selcuk.edu.tr

Abstract

Renewable energy sources and energy production systems using from these sources attract more and more attention every day in Turkey as well as all over the world. The focus is usually on wind and solar energy systems and this is mainly because of the reduction in cost of energy for these systems. Among the solar energy systems, solar chimney systems have been one of the popular subjects for the researchers because they can be produced with indigenous sources and they can produce energy continuously.

In this study, firstly, a detailed literature review has been performed focusing on most feasible and efficient options. Secondly, levelized cost of energy (LCOE), installations costs and efficiencies of solar chimney, PV solar and wind energy systems have been calculated for Konya region. Finally, calculated results are compared with the values in the literature and the results are discussed. Although the installation costs are still high and efficiency is still low for solar chimney power generations systems compared the other systems, the results are still encouraging for the future.

Keywords: solar chimney, solar energy, wind energy, comparison of wind and solar systems.

1. GİRİŞ

Güneş enerjisinden sıcak su elde edilmesi gibi bazı ısı uygulamalar uzun süredir kullanılmasına rağmen elektrik üretim amaçlı uygulamaların geçmişi çok eski değildir. Güneş bacaları, güneş enerjisini kullanarak elektrik üreten ısı yöntemlerinden birisidir. Diğer ısı yöntemlerinden farklı olarak düşük sıcaklıklarda çalışan bir sistemdir. Güneş

bacaları, büyüklüğüne göre 5 ila 400 MW'a kadar güç çıkışı sağlayabilen büyük ölçekli elektrik üreten güç tesisleridir. Dolayısıyla kuruldukları bölgenin ve ülkenin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamada belli bir görev üstlenirler. Güneş baca santralleri sadece kolektörlerinin kapladığı alanın büyüklüğü hariç büyük alan kaplamazlar ve çevresel rahatsız edici etki ve kirlenici de oluşturmazlar.

*¹Sorumlu yazar: Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makina Müh. Bölümü /Konya

Çalışmada Konya’da Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat kampüsü bölgesinde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verileri [1] ile Konya Meteoroloji bölge müdürlüğünün 10 yıllık güneş ışıma verileri karşılaştırılmıştır. Bölgeyi daha iyi temsil eden ve saatlik veriler halinde olan Konya Meteoroloji bölge müdürlüğü verileri kullanılarak güneş bacası santrali güç ve enerji hesapları yapılacaktır. Aynı bölgede 2000-2010 yılları arasında rüzgar enerjisi potansiyeli çalışmaları da yapılmış olup bu çalışmalardan elde edilen 10 dakikalık ortalamalar halindeki rüzgar hızı, yönü, ortam sıcaklığı, nemi ve basıncı değerleri de kullanılarak rüzgar santral tasarımı ve uygun türbin karşılaştırmaları son gelişmelere göre yapılacaktır. Ayrıca güneş verileri ile günümüzde gittikçe kullanımı artan güneş PV elektrik üretim sisteminin de elektrik üretim ve maliyet hesapları yapılarak, her üç santral maliyet, verim ve birim enerji maliyeti gibi faktörler açısından karşılaştırılacaktır.

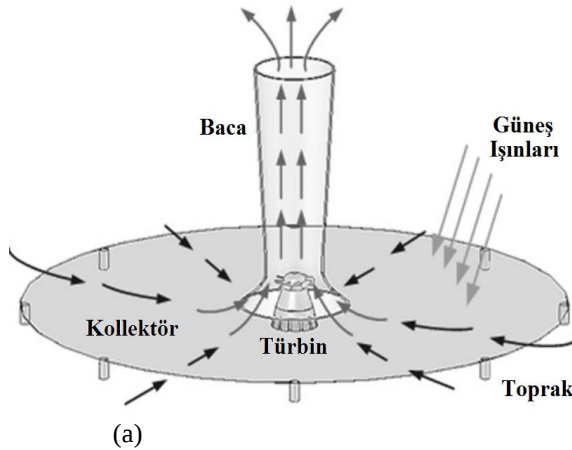
Güneş bacası fikrinin ilk olarak Leonardo Da Vinci (1452-1519) tarafından ortaya koyulduğu tahmin edilmekte olup, Osmanlı bilgini Takiyüddin’in (1521-1585) 1551’de tasarladığı bir buharlaşan su ile çalışan türbin[2] sisteminin güneş bacası şeklindeki tasarımı mevcuttur.

Son 30 yıldır güneş bacaları ile ilgili çok sayıda bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar; kollektör yüzey alanının ve baca yüksekliğinin artması ile güneş bacalarından elde edilecek enerjinin ve verimin de arttığını ortaya koymuştur. Bacanın yüksekliğinin artması ile bacayı dik tutmak konusunda zorluklar yaşanmaya başlamıştır. 1982 yılında İspanya’da kurulan 200 m yüksekliğindeki güneş bacası rüzgar etkisiyle yıkılmıştır[3]. Bu sorunun çözümü için

eğimli güneş bacaları ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Ancak bu çalışmalar sayıca azdır ve çoğu teorik çalışma olarak kalmıştır.

Güneş bacası güç sistemi; Şekil 2 a)’da görüldüğü gibi kollektör, türbin ve baca olmak üzere üç ana parçadan oluşur [3]. Kollektör içerisinde bulunan hava güneş ışıını sayesinde ısınır ve yükselerek baca içinde bir akış hareketi meydana getirir. Bu sayede güneş enerjisi önce ısı enerjisine daha sonra da hareket enerjisine dönüşmüş olur. Baca veya kollektör girişine konulan türbinler ve jeneratörler ile hareket enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yapılmış olur. Kollektör, güneş ışıınlarının toplanmasını sağlayan ve ısınan havayı tutup yönlendiren kısımdır. Türbin, havaya verilen ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılır. Türbin girişinde ve çıkışındaki hava hızı neredeyse eşittir. Elde edilen güç, türbinden geçen hava miktarına ve basınç düşüm miktarına bağlıdır. Baca, kollektörde ısınan havanın basınç farkı etkisiyle yükselmesini sağlar.

Modern anlamda ilk küçük güneş bacası 1982 yılında İspanya’da Manzaranes bölgesinde kurulmuştur (Şekil 2 b) [4]. Bu prototip; güneş bacası çalışmalarının büyük ölçüde referans alındığı ilk çalışma olması ve güneş bacalarının yapılabilirliği hakkında örnek teşkil etmesi sebebiyle büyük önem arz etmektedir. Santralin baca yüksekliği 194,6 m, çapı 10 m, kollektör çapı 240 m, yüksekliği 1,84 m ve alanı da 46.000 m² olup 4 kanatlı türbin ile yaklaşık 50 kW nominal güç elde edilmiştir. Büyük güçlerdeki güneş bacası santralleri için hesaplamalar Haaf ve ark. tarafından 1983 de yapılmıştır [5]. Çalışmada büyük güçlerde üretilecek güneş bacaları için Tablo 1’de verilen boyut hesaplamaları yapılmıştır.

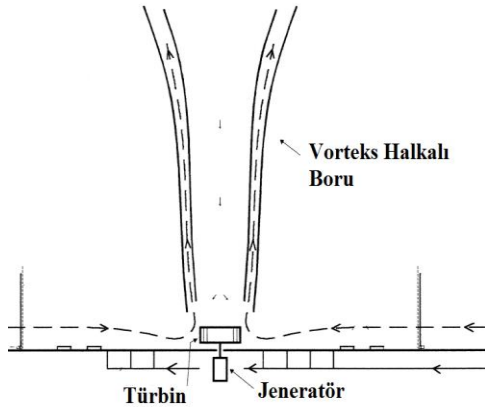


Şekil 2. a) Güneş bacasının şematik gösterimi [3], b) Manzaranes güneş bacası santralinin genel görünümü [4]

Tablo 1. Güneş bacalarının tipik boyutları [5]

Santral Gücü (MW)	5	30	100
Kollektör Çapı (m)	1110	2200	3600
Baca Yüksekliği (m)	445	750	950
Baca Çapı (m)	54	84	115
Kollektördeki Sıcaklık Artışı (°C)	25,6	31	35,7

Florida Üniversitesi'nde tasarlanan ve yapılan güneş bacası prototipinde [6] diğer örneklerden farklı olarak türbin baca çıkışına yerleştirilmiştir. Baca daralan bir yapıdır ve türbinin olduğu kısımda hız artışı sağlanmıştır. Güneş bacası sisteminin verimini artırmak için kasırga benzeri bir girdap üretilerek geleneksel baca, Şekil 3'de görüldüğü gibi halka biçiminde olacak şekilde değiştirilerek bu tip güneş bacası santrali ile 100 MW elektrik gücü üretilebileceği ifade edilmiştir[6]. Eğimli yüzey üzerinde yapılan çalışmada dik kısa bacaya, eksenel hava türbini ekleme sonucunda, güneş bacası sisteminin iyi bir ısıl performansa sahip olduğunu ve güneşe bakan yönlerde inşa edilecek tesislerdeki kolektör verimlerinin %60'lar yerine %85'e kadar ulaşılabilirliği ifade edilmektedir [7].



Şekil 3. Vorteksli güneş bacasının görünümü [6]

Güneş bacası içerisindeki akışın baca içerisinde yükselmesi üç boyutlu nümerik simülasyon sistemi ile modellenmesi Zhou ve ark. tarafından yapılmıştır [8]. Deneysel çalışma amacıyla Isparta ili iklim şartlarına uygun bir güneş bacası tasarlanmış ve baca yüksekliği 15 m, baca çapı 1,2 m, kolektör çapı 16 m olan bir güneş bacası prototipi inşa edilmiştir [9]. Güneş bacası çıkış gücünün doğrudan güneş ışımasını, baca yüksekliği ve kolektör alanına bağlı olduğu gösterilmiştir. Güneş bacası türbininde enerji dönüşümü, rüzgar türbinlerinden farklı olarak su türbinlerinde olduğu gibi türbin girişi ile çıkışı arasında oluşan basınç düşümüne göre olmaktadır ve bu düşüm faktörünün optimum değeri ise 0,8-0,9 aralığındadır [10].

Güneş bacası ve sistem maliyetini düşürerek sistemin ekonomikliğini artırmak için beton ve metalden yapılan sabit baca yerine havada yüzen (esnek) güneş bacaları (HYGB) tasarlanmıştır. Baca yüksekliği 900 m, baca çapı 64 m ve baca içi hava akış hızı 10 m/s için bir HYGB ile yıllık yatay ısımanın 2000 kWh/m² olduğu bölgede, 4 km² kolektör alanına yılda 8000 GWh güneş ışımasının geldiği ve yılda bunun en az % 1 kısmı olan 80 GWh den daha fazla elektrik üretebileceği belirtilerek, 20 MW güçlü bu santralin yapım maliyetinin 40-48 milyon Eurodan daha fazla olmayacağı ifade edilmektedir [11].

Güneş kolektöründe, çevredeki ortam havasını türbine girmeden önce ısıtmak için güneş vorteks motoru (GVM)

kullanılabilir. Kolektör altındaki zemin toprağının direkt ısıtılması yerine, termik enerji depolama olarak faz değişim malzemelerinin kullanılmasıyla sistem çalışma süresi uzatılabilir. Bir GVM'nun verimliliği % 30 kadar olabileceği ifade edilmektedir[12]. Çünkü bir vorteks fiziksel bir bacadan çok daha büyük bir yüksekliğe uzanabilirken, geleneksel güneş baca santralının maksimum verimi baca yüksekliği sınırlamaları nedeniyle %1,5 civarındadır[12]. GVM'nun çalışması, atmosferin tabandan ısıtıldığı ve tepesinde soğutulduğu prensibine dayanmaktadır. Yapay vorteks üretimi ile, fiziksel güneş bacasını ortadan kaldırmak ve güneş baca santrallerinin ilk kurulum maliyetini azaltmak amaçlanmaktadır. Güneş enerjisini vorteksin oluşması ve GVM modelinin işletilmesi için ısı kaynağı olarak kullanma fikri elektrik enerjisi üretimi için uygun ve umut verici olduğu belirtilmiştir [13]. Betonarme güneş bacalı, eğimli kolektörlü ve yüzer bacalı üç tip sisteme 5-200 MW aralığında on iki farklı tasarım optimizasyon modeli uygulanmıştır[14]. Baca yüksekliği optimize edilmiş ve ilgili toplayıcı alanı buna göre hesaplanmıştır. Geri ödeme süreleri, elektrik fiyatı ve her santralin tepe gücü kapasitesi arasındaki ilişkiler geliştirilerek yüzen baca güç santralleri yıllık işletme maliyetinin en yüksek ve yıllık gelirin de en yüksek oranına sahip olmasına rağmen geri ödeme süreleri, incelenen diğer tasarımlara kıyasla en kısadır. Hassasiyet analizi, aynı güneş radyasyonu ve elektrik fiyatında, 200 MW'lık eğimli kolektörlü tasarımının basit geri ödeme süresinin (6,62 yıl), 5 MW'lık yüzen bacalı tasarımının yaklaşık iki katı geri ödeme süresine (3,27 yıl) sahip olacağını göstermiştir[14].

2. MATERYAL VE METOD

Güneş bacası elektrik santralleri genellikle kolektör, türbin ve baca olmak üzere üç ana parçadan oluşurlar. Kolektör içerisinde bulunan hava güneş ışımasını sayesinde ısınır ve yükselerek baca içinde bir akış hareketi meydana getirir. Baca girişine konulan türbin ve jeneratör vasıtasıyla hareket enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yapılmış olur. Dolayısıyla güneş bacası elektrik santralinde kullanılan parçaların üretimi ve malzemeleri yüksek bir teknoloji gerektirmeyip yerel olarak da üretilebilecek şekilde olup, bu durum güneş bacasından üretilen elektrik enerjisi üretim maliyetinin düşük olmasını sağlar.

Kolektör, yerden birkaç metre yüksekliğindeki saydam çatıyla desteklenmiş çevresi açık büyük bir güneş toplayıcısıdır. Güneş bacası ise kolektörün merkezine yerleştirilen silindirik rijit, esnek veya eğimli yapılabilen ısınan havayı basınç farkı ile atmosfer içerisinde yeryüzünden yukarıya taşıyan hava bacasıdır. Türbin/ler ve jeneratör/ler de güneş bacasının çevresindeki belirli bir bölüme yerleştirilen uygun jeneratörler ve hava türbinleridir.

Güneş ışınları kolektörün altındaki toprağı ve içindeki havayı ısıtır. Ilık hava atmosferdeki havadan daha hafif olur ve güneş bacasından yükselmeye eğilimlidir. HYGB'nın uç kısmındaki balonların içinde bulunan helyum veya hidrojen

gazı, havadan daha hafiftir[11]. HYGB, sağlamlaştırılmış beton güneş bacası yapısının düşük maliyetli alternatifidir. HYGB kolayca 1 km yüksekliğe kadar inşa edilebilir. 20 MW güçlü ve yılda 80 GWh elektrik üretebilecek HYGB santralinin yapım maliyeti 40-48 milyon € civarında olacağı belirtilmektedir [11].

Güneş bacası tasarımında son yıllarda eğimli yani kollektörü eğimli olan güneş bacasının toplam baca verimine olan ilave etkisi de göz önüne alınmaktadır. Tasarım parametreleri olarak; baca çapı, baca yüksekliği, kollektör yüzey alanı ve kollektör eğim açısının optimum değerleri alınmakta, çevre sıcaklığı ve güneş ışınımı gibi meteorolojik verilerden de faydalanılmaktadır. Tasarım parametreleri giriş değeri olarak kullanılıp literatürdeki denklemler yardımıyla teorik güç ve verim değerleri elde edilmektedir. Farklı giriş değerleri ile hesaplanan güç ve verim değerleri arasında optimum olanı seçilmektedir. Genel olarak güneş bacasının çıkış gücü, sisteme giren güneş enerjisinin toplam verimle çarpılmasıyla denklem (1)'deki gibi hesaplanır [4].

$$P = Q \cdot \eta_{top} \quad (1)$$

Burada; P, güneş bacasının çıkış gücü; Q, sisteme giren güneş enerjisi; η_{top} , toplam (genel) verimdir. Toplam verim ise kollektör, baca ve türbin verimlerinden oluştuğu için güç ifadesi denklem (2)'deki gibi düzenlenebilir [4].

$$P = Q \cdot \eta_{kol} \cdot \eta_{bc} \cdot \eta_{tr} \quad (2)$$

Burada, η_{kol} , kollektör verimi; η_{bc} , baca verimi ve η_{tr} , türbin verimidir. (2) numaralı denklemdeki kollektör ve baca verimi ifadeleri denklem (3) ve (4) ile hesaplanabilir [4].

$$\eta_{kol} = \frac{Q}{A_{kol} \cdot G} \quad (3)$$

Burada, A_{kol} , kollektör yüzey alanı; G, kollektör yüzeyine gelen anlık toplam güneş ışınımıdır.

$$\eta_{bc} = \frac{\dot{m} \Delta p_{ges}}{\dot{m} C_p \Delta T} = \frac{g H_{bc}}{C_p T_0} \quad (4)$$

(4) ifadesinde, g, yer çekimi ivmesi; H_{bc} , baca yüksekliği; C_p , havanın sabit basınçtaki özgül ısı ve T_0 , çevre sıcaklığıdır. Bu verim diğer güneş enerjili güç sistemleri ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Örneğin, 1000 m baca yüksekliğine sahip olan bir güneş bacasının verimi %3,5'e ancak çıkabilmektedir [11].

Yukarıdaki denklemler kullanılarak mekanik güç denklem (5)'deki gibi bulunabilir [4].

$$P_{mek} = \Delta p_{tr} \cdot \eta_{kol} \cdot \eta_{bc} \cdot A_{kol} \cdot G \quad (5)$$

Burada, Δp_{tr} , türbindeki basınç düşüştür. Buradan elde edilen mekanik güç türbin verimiyle çarpılırsa elde edilecek elektrik gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{elk} = P_{mek} \cdot \eta_{tr} \quad (6)$$

Baca sistemin en önemli ünitesidir. Kollektördeki ısınan havanın yukarı çıkması öncelikle sıcaklık artışı ΔT ve bacanın hacmiyle yani baca çapı ve baca yüksekliği ile doğru orantılıdır.

Büyük güneş bacası sistemlerinde kollektörde yaklaşık 35 K'lık bir sıcaklık artışına ulaşılabilir. Bu sayede baca içerisindeki hava hızı $v=15$ m/s hıza ulaşabilir. Kollektörde ısınarak bacaya yönelen hava baca boyunca basınç düşüşüne neden olur. Bu basınç düşüşü,

$$\Delta p_{top} = \rho g H_{bc} \frac{\Delta T}{T_0} \quad (7)$$

ile ifade edilmiştir[11]. Burada T_0 çevre sıcaklığıdır. Teorik olarak bacalı sistemin maksimum verimi, kollektördeki ΔT sıcaklık farkına bağlıdır. Burada da bacanın yüksekliği etkilidir.

Kaynak (4)'e göre bacanın kendisinin bir termal motor olarak veriminin hava sıcaklığı artışına (ΔT) bağlı olmadığını gözlemlemek ilginçtir. Verimlilik tanımına (denklem 4) göre, pay baca üstüne kadar kaldırma kuvveti içerir, payda ise ısıyı gösterir (alır).

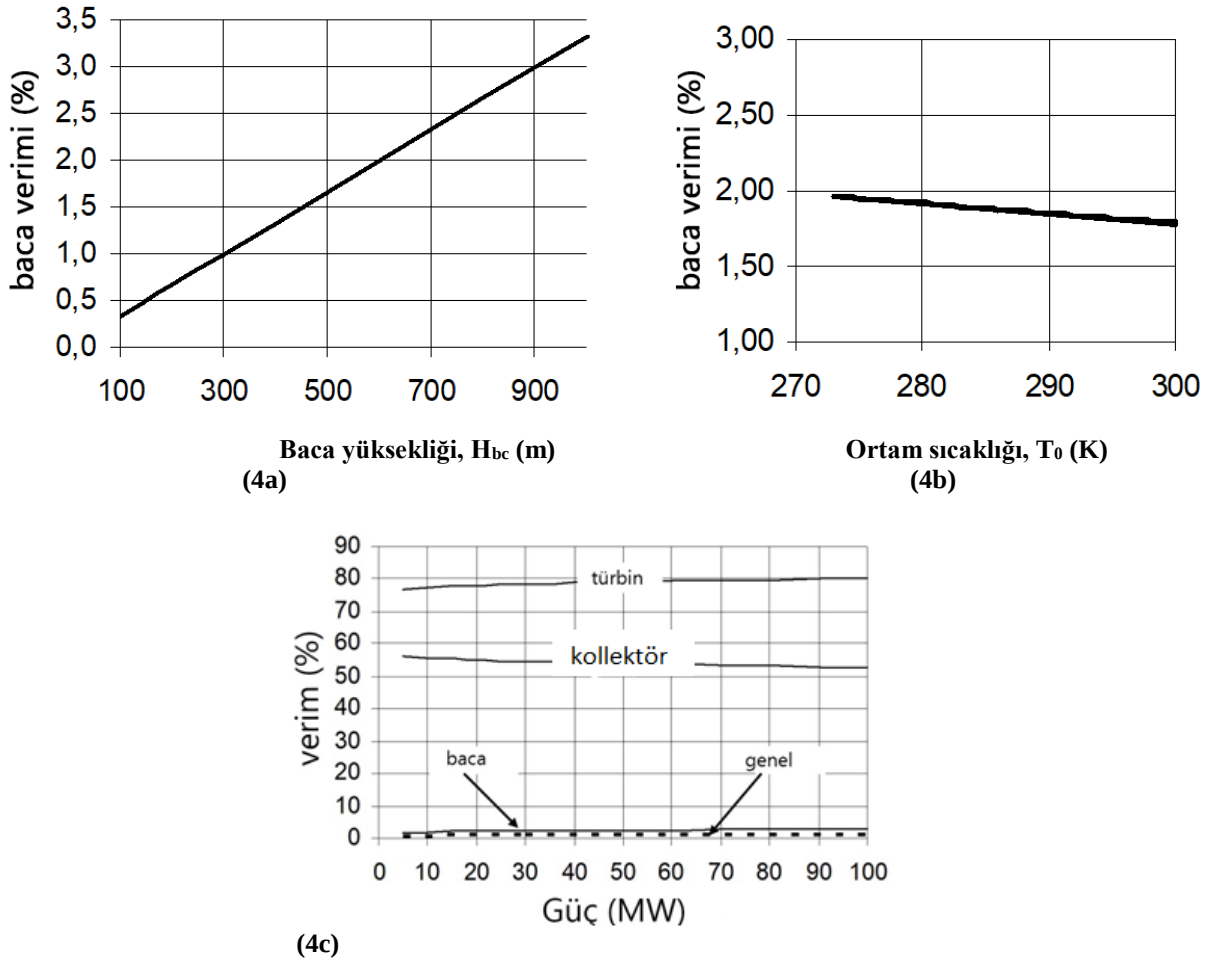
Toplayıcının, tesisin önemli bir parçası olarak toplayıcı alanı (A_{kol} , m^2) üzerindeki mevcut güneş ışınımı (G , W/m^2)'nin yararlı termal akışa dönüştürülmesi görevi vardır. Tanım olarak, toplayıcı verimliliği aşağıdaki gibidir [11]:

$$\eta_{kol} = \frac{\dot{Q}}{A_{kol} G} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_{kol} G} = \frac{\rho_{kol} \cdot v_{kol} \cdot A_{kol} \cdot C_p \cdot \Delta T}{A_{kol} G} \quad (8)$$

Kaynak [4] 'e göre elde edilen veriler, tek bir cam tavan için toplayıcı verimi, ΔT ve G verildiği zaman, aşağıdaki denklem (9) daki gibi hesaplanabilir:

$$\eta_{kol} = \eta_{kol}(G, \Delta T) = -13.116 \left(\frac{\Delta T}{2G} \right)^2 - 6.3364 \left(\frac{\Delta T}{2G} \right) + 0.72 \quad (9)$$

Baca beton veya çelik gibi farklı malzemelerden yapılabilir. Baca verimliliğine yükseklik etkisi Şekil (4a)'da, ortam sıcaklığının etkisi Şekil (4b)'de ve bütün verimler ve genel verim (toplam, sistem) Şekil (4c)'de gösterilmiştir. Üretilen elektrik enerjisi üzerindeki ortam sıcaklığı etkisi çok az olup, bu durum referans [15]'te ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 4. Güneş bacası genel (toplam, sistem) verimine: (4a) baca yüksekliğinin H_{bc} ($T_0=293K$) ve (4b) ortam sıcaklığının T_0 ($H_{bc}=550$ m) ve (4c) güneş bacası bileşenlerinin etkisi [15].

Geleneksel bir güneş bacası santralinde, özelliklerine göre rüzgar türbinleri ve gaz türbinleri arasında kategorize edilebilecek eksenel türbinler kullanılır. Türbin ünitesinin ana görevi, mevcut çalışma potansiyelinin verimli güç dönüşümüdür. Güneş bacası enerji santralindeki ana türbin kaybı, uygun türbin verimliliğinin (η_{tr}) aşağıdaki gibi tanımlandığı (iç akış sürtünme kaybının yanı sıra) çıkış kinetik enerjisidir:

$$\eta_{tr} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T \eta_{bc} - \dot{m} v_{bc}^2 / 2}{\dot{m} C_p \Delta T \eta_{bc}} = 1 - \frac{v_{bc}^2 / 2}{C_p \Delta T \eta_{bc}} \quad (10)$$

Genel türbin sistemi verimliliği çeşitli araştırmacılara göre farklıdır. Referans [4] ve [5]'e göre, türbin verimliliği, büyük nominal güçteki tesisler için %40'tan %90'a kadar değişmektedir. Çok yüksek hava akış hızları türbin verimliliğini olumsuz etkilediğinden uygun değildir.

Tüm güneş bacası enerji santrali çalışma rejimi, en yüksek üretilen elektrik gücünün $P_{tr.mak}$ belirli hava şartları için elde edilebileceği bir rejimdir. Böyle bir rejimde türbin teorik gücünün sadece 2/3'üne izin verilir, çünkü böyle bir

çalışma rejimi için [4] 'e göre, kütle akışı ve 1 kg'lık hava başına özgül iş (çalışma) ürünü en yüksek düzeydedir. Daha sonra, [4] 'e göre kanat, iletim (transmisyon) ve jeneratör kaybı hesap içine alındığında, elektrik gücü (P_{elk}) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{elk} = P_{tr.mak} \cdot \eta_{tr} = \frac{2}{3} \eta_{kol} \frac{g}{C_p T_0} H_{bc} A_{kol} G \cdot \eta_{tr} \quad (11)$$

Tesis boyutlarının (H_{bc} ve D_{bc}) büyütülmesiyle çıkış gücü artmaktadır. Sistemden aynı çıkış gücü elde etmek için güneş bacası yüksekliği (H_{bc}) artırılıp, kollektör alanı (A_{kol}) azaltılmalı veya tersi olarak baca yüksekliği azaltılıp, kollektör alanı artırılmalıdır.

Rüzgar türbininin güç ifadesi (12) de aşağıdaki gibidir [16].

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi \cdot D^2}{4} V_r^3 \cdot C_p \quad (12)$$

Burada, P, türbin gücü (W); ρ , hava yoğunluğu (kg/m³); D, rüzgar türbini çapı (m); V_r , rüzgar hızı (m/s) ve C_p , rüzgar türbini güç katsayısıdır.

Güç sistemi enerji üretimi ve maliyet ifadeleri:

Türbinden yıllık üretilecek elektrik enerjisi (E, Wh/yıl) miktarı da (13) ifadesi ile hesaplanır [16,17].

$$E = P \cdot Z \cdot N \cdot C_F \quad (13)$$

Burada, P, türbin gücü (W); Z, günlük çalışma süresi (saat, h); N, yıllık çalışma süresi (gün, yıl); C_F , kapasite faktörüdür (%), rüzgar türbininin bölge şartlarında tam güçte çalışma oranı).

Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (SEM, LCOE), bir enerji santralının yatırım, işletme, bakım vb. masrafları dahil edilerek hesaplanan enerji birim maliyetidir. Bir diğer deyişle maliyeti karşılamak için enerjinin satılması gereken minimum fiyattır. Sadeleştirilmiş SEM şu şekilde hesaplanabilir [18]:

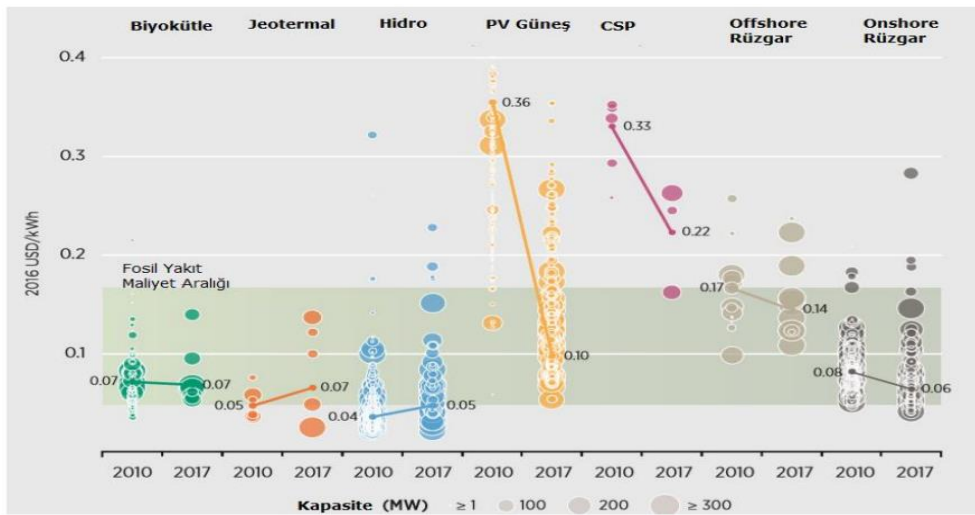
$$SEM = \{(GYM \times GKO + SİB) / (8760 \times C_F)\} + (YM \times IK) + DİB \quad (14)$$

Burada; Gecelik yatırım maliyeti (GYM): Dolar cinsinden kW başına yatırım maliyetidir (\$/kW). Sermaye geri kazanım oranı (GKO): Faiz ve vadeye göre alınan kredi veya yatırımın geri ödeme hesabını yapmaya yarayan orandır ve (15) ifadesi ile hesaplanır [18].

$$GKO = (i(1 + i)^n) / [(1 + i)^n - 1] \quad (15)$$

Burada; i, yıllık vade (faiz) oranı (%) ve n, amortisman süresi (yıl) dir [18]. Sabit İşletme ve Bakım maliyeti (SİB): Çalışanların maaşları, primler, idari harcamalar, planlanmış bakımlar gibi kullanıma göre değişmeyen yıllık işletme ve bakım maliyetleridir (\$/kW-yıl). Değişken İşletme ve Bakım maliyeti (DİB): Su, elektrik, malzeme değişimi gibi kullanıma göre değişecek maliyetlerdir (\$/kWh). Kapasite faktörü (C_F): Belirli bir periyotta üretilen toplam enerjinin tam kapasitede üretilebilecek enerjiye oranıdır. Bakım, arıza, güvenlik vb. sebeplerden dolayı reel üretim ideal üretime göre kesintiye uğrar. Kapasite faktörü 0-1 arasındadır. Yakıt maliyeti (YM): Yenilenebilir enerji santralleri için 0 alınır[18]. Isı katsayısı (IK): 1 kWh'lik elektrik üretmek için kullanılan (yakılan) enerji miktarıdır. Yenilenebilir santraller için 0 alınır (Btu/kWh). 8760: 1 yılda bulunan saat miktarıdır.

Yenilenebilir enerji maliyetleri düştükçe elektrik üretim ihtiyacını karşılamada yenilenebilir kaynaklar daha rekabetçi hale gelmektedir ve 2017 yılında devreye alınan projeler için maliyetler düşmeye devam etmiştir. Projelerin çoğunun üretim maliyeti fosil yakıt maliyetleri aralığına gerilemiştir. Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (SEM) fosil yakıt maliyeti aralığının en düşük seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 5) [19].



Şekil 5. Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2010 ve 2017 yıllarına ait birim enerji üretim maliyetleri [19]

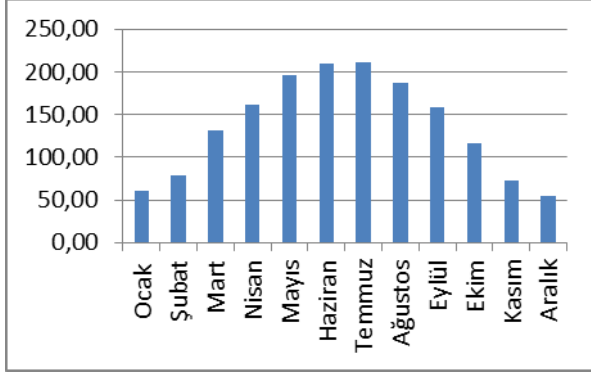
Ağırlıklı SEM ortalaması yeni hidroelektrik santrallerinde 0,05 \$/kWh, karasal (onshore) rüzgarda 0,06 \$/kWh, biyoenerji ve jeotermalde 0,07 \$/kWh seviyelerine inmiştir. PV Güneş maliyetlerinin 2010 yılından itibaren düşüşü dikkat çekmiştir. SEM 2010 yılından itibaren %73 azalarak 2017 yılında 0,01 \$/kWh seviyesine inmiştir. PV hiçbir destek almadan konvansiyonel kaynaklar ile rekabetçi hale gelmiştir. Deniz üstü rüzgar santrali (Offshore) ve yoğunlaştırılmış güneş santrali (CSP) teknolojilerinde maliyet düşüşleri görülse de hala emeklilik dönemindeyim (SEM Offshore: 0,14 \$/kWh, CSP: 0,22

\$/kWh). Offshore ve CSP alanında gerçekleştirilen ihaleler sonucunda 2020 sonrasında devreye alınacak santraller için maliyetlerin 0,06 \$/kWh ile 0,10 \$/kWh aralığına düşmesi mümkün görülmektedir[19].

3. GÜNEŞ BACASI VE PV HESAPLAMALARI

Bu çalışmada güneş bacası santrali tasarlanacak bölge olarak güneş ölçüm verilerinin bulunduğu Konya yer olarak seçilmiştir. Ancak Konya Meteoroloji bölge müdürlüğünün 10 yıllık güneş ışınlama ölçüm verileri daha yüksek değerleri

göstermesine rağmen, sonucun daha emniyetli çıkması ve herkese açık veriler olması dolayısıyla hesaplamada kaynak [1]'de verilen Güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA) verileri kullanılmış ve bu verilere göre aylık ışıma değerleri Şekil 6'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6. Konya aylık ortalama güneş elektrik üretimi değerleri, kWh/m²-ay [20]

Beton baca, beton ve çeliğin ağırlığı ve mukavemeti ile ilgili bir inşaat yükseklik sınırına (yaklaşık 1000 m) sahiptir. Yüzer güneş bacalarının böyle bir sınırı yoktur. Kaynak [15]'e göre bu yükseklik etkisi ile orantılı olarak oluşan basınç farkı sıcak havayı atmosferin üst

katmanlarına kadar çekerek, güneş enerjisi santrali verimliliğini %4,5'dan % 7'ye çıkarır. Baca yüksekliğinin artması ile aynı çıkış gücü için güneş kolektör alanı 4,5 ila 7 kat daha küçülür ve dolayısıyla toplam maliyet de düşer. Bu durumda ilgili baca yüksekliğinin 3-4,5 km yüksekliğinde olması halinde HYGB sistemi maliyeti 850 \$/kW, eşdeğer beton güneş bacası santrali de 3.500 \$/kW olup, sistemden üretilebilecek yıllık elektrik enerjisinin 3000 kWh/kW ve sistem ömrü 30 yıl kabulüne göre hesaplar yapılmıştır. Beton bacalı ve HYGB sistem hesapları 5, 30, 100 ve 200 MW güçler için sistem maliyeti, yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi, 0,1 \$/kWh fiyat ile yıllık elde edilecek gelir, ilk yatırım maliyetinin %1'i yıllık bakım ve işletme maliyeti kabulü ile basit sistem geri ödeme süresi (BGÖS) ve birim seviyelendirilmiş elektrik enerjisi maliyeti (SEM) değerleri hesaplanarak Tablo 2.'de verilmiştir. Güneş fotovoltaik sistem (PV) hesapları da 1250 \$/kW birim maliyeti, yıllık elektrik üretimi 1600 kWh/kW[1, 20], sistem ömrü 20 yıl, sistem verimliliği %14 ve diğer değerler güneş bacası sistemi ile aynı alınarak yapılmıştır. Bulunan sonuçlar literatürde verilen sonuçlar ile uyumlu olup SEM değeri en düşük PV sistemi için 0,062 \$/kWh olarak elde edilirken, BGÖS de 2,92 yıl ile HYGB için elde edilmiştir.

Tablo 2. Beton ve HYGB güneş bacası ile güneş PV sistemlerinin karşılaştırılması

Tesis Tipi /Özellik	Beton bacalı sis.	Beton bacalı sis.	Beton bacalı sis.	HYGB sistem	HYGB sistem	HYGB sistem	HYGB sistem	Güneş PV
Gücü, kW	5.000	30.000	100.000	5.000	30.000	100.000	200.000	10.000
Kapasite Faktörü, C_F (%)	1,0	1,3	1,8	1,8	3,0	4,5	5,3	14,0
Tesis Maliyeti, Bin \$	17.500	105.000	350.000	4.250	25.500	85.000	170.000	12.500
Yıllık Elektrik Üretimi, MWh/yıl	15. 000	90. 000	300. 000	15.000	90. 000	300. 000	600. 000	1.600
BGÖS, yıl	13,21	13,21	13,21	2,92	2,92	2,92	2,92	8,47
Birim maliyet, \$/kW	3.500,0	3.500,0	3.500,0	850,0	850,0	850,0	850,0	1.250,0
SEM, \$/kWh	2,489	1,825	1,369	0,332	0,196	0,133	0,111	0,062

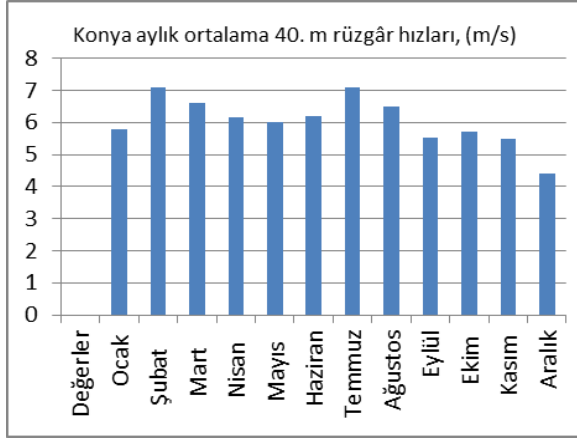
4. RÜZGAR SANTRALİ HESAPLAMALARI

Bu çalışmada rüzgar elektrik santrali tasarlanacak bölge olarak rüzgar ölçüm verilerinin bulunduğu Konya Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat kampüsü seçilmiştir. Bölgede üniversite sınırları içerisinde bulunan 1240 m rakımlı Yüv tepeye 2004 Aralık ayında kurulan 40 m yüksekliğindeki rüzgar enerjisi ölçme sistemi ile 2007 Mart sonuna kadar ölçümler yapılmıştır.

Ölçme sisteminde 10., 20. ve 40. m'lerde 3 anemometre, 40.m'de 1 yön ölçer ve 3.m de de sıcaklık, basınç ve nem ölçerler olup Şekil 7.'de ölçme sistemi 40.m

anemometresine göre bulunan bölge aylık ortalama rüzgar hızı grafiği verilmiştir [17, 21].

Bölgede 40.m'de yıllık ortalama rüzgar hızı 6.0 m/s olarak ölçümler sonucu belirlenmiş olup, 10.m ve 20. m rüzgar hızı verileri de kullanılarak daha yüksek seviyelerdeki rüzgar hızları da hesaplanmıştır. Rüzgar türbini hesaplamalarında önceki yıllarda türbin imalatçısı ve satıcısı firmalardan alınan güç verileri, fiyatlar, elektrik satış bedeli değerleri kullanılmış olup, kapasite faktörü değerleri bölge rüzgar ve türbin verileri kullanılarak yapılmıştır. Türbin firma isimleri direkt verilmeyip A-E arası büyük harfler ile ve aynı firma ürünleri aynı harflerle verilmiştir.



Şekil 7. Konya S.Ü.Kampüsü rüzgâr hızı aylık ortalamaları[17, 21]

Tablo 3. Konya S.Ü. Alaeddin Keykubat kampüsü rüzgar verilerine ve farklı rüzgar türbinlerine göre bölge rüzgar enerjisi verimlilik, BGÖS ve SEM değerleri.

Türbin Kodu, Gücü, Çapı / Karakteristik Özellik	A 0.9 54, 75	B 0.75 57, 75	B 2.3 113, 80	C 3.0 122, 89	C 2.0 100, 80	D 1.5 100, 80	D 2.0 100, 80	E 1.5 86, 80
Kapasite Faktörü, C_p (%)	23	27,3	35,5	32,9	32,4	40,1	32,7	29,4
Türbin Gücü, kW	900	750	2300	3000	2000	1500	2000	1500
Yıllık Elektrik Üretimi, MWh	1.808	1.792	7.128	8.533	5.657	5.256	5.767	3.854
Birim Güç Maliyeti, \$/kW	1715	1762	1762	1338	1297	2079	1575	1544
Basit Geri Ödeme Süresi, Yıl	11,71	10,12	7,04	6,45	6,29	8,14	7,57	8,13
Toplam Maliyet, Bin \$	8.576,3	8.809,6	7.950,3	6.689,6	6.483,7	10.394,6	7.950,3	7.615,9
5 MW Güç İçin Yıllık Elektrik Üretimi, MWh	10.046	11.946	15.495	14.221	14.143	17.520	14.417	12.846
SEM, c\$/kWh	7,00	6,06	5,34	3,82	4,44	5,75	5,36	5,80

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada güneş bacası elektrik üretim sistemleri hakkında geniş kapsamlı literatür taraması yapılarak bu sistemlerin en verimli ve ekonomik kurulumları üzerinde durulmuştur. Konya bölgesi örnek seçilerek güneş bacası, güneş fotovoltaik (PV) ve rüzgar enerjisi (türbinler) ile elektrik üretim sistemlerinin ilk kurulum maliyetleri, verimlilikleri ve seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyetleri hesaplanmıştır. Beton bacalı ve HYGB sistem hesapları 5,

30, 100 ve 200 MW güçler için sistem maliyeti, yıllık üretililecek elektrik enerjisi, 0,1 \$/kWh fiyat ile yıllık elde edilecek gelir, ilk yatırım maliyetinin %1-2'si yıllık bakım ve işletme maliyeti kabulü ile basit sistem geri ödeme süresi ve birim seviyelendirilmiş elektrik enerjisi maliyeti (SEM) değerleri hesaplanmıştır. Güneş fotovoltaik sistem (PV) hesapları da 1250 \$/kW birim maliyeti, yıllık elektrik üretimi 1600 kWh/kW [1, 20], sistem verimliliği %14 ve diğer değerler güneş bacası sistemi ile aynı alınarak yapılmıştır.

Tablo 4. Beton ve Esnek bacalı (HYGB) güneş bacası ile güneş PV ve rüzgar elektrik üretim sistemlerinin karşılaştırılması

Tesis Türü	Sistem Verimi/ Kapasite Faktörü(C_p), %	İlk Yatırım Maliyeti, \$/kW	S. Elek. Enerji Maliyeti (SEM), c\$/kWh
Rüzgar Türbini (dişli kutusuz)	40,1	2079	5,7
Rüzgar Türbini (dişli kutulu)	32,4	1297	4,4
Güneş PV, GES	14,0	1250	6,2
Güneş Bacası, betonarme	1,8	3500	136,0
Güneş Bacası esnek (HYGB)	5,3	850	11,1

Bulunan sonuçlar literatürde verilen sonuçlar ile uyumlu olup üç güç sisteminden SEM değeri en düşük değer 3,82 c\$/kWh ile C tip olarak verilen 3 MW güçteki dişli kutulu rüzgar türbini, ikinci en düşük PV sistemi için 6,2 c\$/kWh

olarak elde edilmiş olup türbinlerin A tipi hariç diğerlerinin hepsinin SEM değeri PV den düşük çıkmıştır. Basit geri ödeme süresi en düşük değeri de (BGÖS) de 2,92 yıl ile HYGB için elde edilmiş olup rüzgar türbinlerinde 6,29 ile

11,71 yıl arası, PV'de 8.47 yıl olmuştur. Güneş bacası sistemlerinde SEM değeri PV'de 6,2 c\$/kWh ile en düşük olurken, HYGB sistemi 200 MW güç için 11,1 c\$/kWh ile ikinci olup güç düştükçe SEM değeri büyümektedir. Genel olarak bakıldığında rüzgar türbinleri sistem verimlerinin en yüksek olması ve SEM değerlerinin en düşük olması gibi bir avantaja sahip olmalarına rağmen büyük hareketli parçalardan oluşmaları ve maliyetlerinin yüksekliği olumsuz yönleridir. Güneş PV sistemleri kolay kurulum ve gittikçe düşen yatırım maliyetleri ile dikkat çekerlerken, güneş bacası sistemleri ise büyük güçlü kurulum zorunlulukları ve yeni geliştirilecek tiplerinde geri ödeme sürelerinin kısa olması dikkat çeken yönleridir.

Güneş bacası sistemleri için ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve sistem veriminin yükseltilmesi için de baca yüksekliğinin artırılmasının gerekmesi bu sistemin kullanımını kısıtlayan iki faktördür. Bu iki faktörün olumsuzluklarının aşılması için HYGB ve suni vorteks motoru sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanılabilir hale getirilmesi önem arz etmektedir. Bu tür tesisler maliyet açısından rekabetçi olması için büyük olmak zorundadır. Güneş bacaları ağırlıklı olarak kumdan, taştan ve güneş enerjisi ile yapılan beton ve camdan oluşurken, ekolojik zarar ve kaynak tüketimi yoktur. Gelişmekte olan ülkeler için özellikle faydalı olan yönü rüzgar türbinleri gibi ileri bir teknolojiye fazla ihtiyaç duymayan yerel teknoloji ve imkanlarla yapılabilecekleri ve ithal petrol ve kömürün bağımlılığını azaltma yönünde katkı sağlayacak olmalarıdır. Güneş bacası elektrik üretim sistemleri günümüz şartlarında diğer sistemlerden hala ilk yatırım maliyetleri yüksek ve verimleri düşük olmalarına rağmen yakın gelecekte umut verici oldukları sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No.2004/121) tarafından desteklemiştir.

6. KAYNAKLAR

[1] GEPA, URL: <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/pages/42.aspx>
 [2] wikipedia, URL: <http://tr.wikipedia.org>
 [3] A. Koonsrisuk, "Comparison of Conventional Solar Chimney Power Plants And Sloped Solar Chimney Power Plants Using Second Law Analysis", *Solar Energy*, 98, 78–84, 2013.
 [4] J. Schlaich, R. Bergemann, W. Schiel, G. Weinrebe, , "Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems–Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation", *Journal of Solar Energy Engineering of ASME*, Vol.127, 117-124, 2005.
 [5] W. Haaf, "Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of The Pilot Plant in Manzanares", *International Journal Solar Energy*, 2, 3–20, 1983.
 [6] N. Pasumathi, S.A. Sherif, "Experimental and

Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model–Part I: Mathematical Model Development", *International Journal Energy Resources*, 22, 277–288, 1998.
 [7] E. Bilgen, J. Rheault, "Solar Chimney Power Plants For High Latitudes", *Solar Energy*, 79, 449–458, 2005.
 [8] X.P. Zhou, "Analysis of Chimney Height For Solar Chimney Power Plant", *Applied Thermal Engineering*, 29, 178–185, 2009.
 [9] İ.Üçgöl, A.Koyun, "Experimental Investigations on Performance and Design Parameters of Solar Chimney", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 16, Sayı 3, 255-264, 2010.
 [10] S.Nizetic, B. Klarin, "A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants", *Applied Energy*, 87, 587-591, 2010.
 [11] A.R.Gün, M.Kurban, "Güneş Bacası Sistemlerinin Analizi ve Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16 -18 May 2011, Elazığ, Turkey, (2011).
 [12] A. T. Mustafa, H. H. Al-Kayiem & S. I. U. Gilani, "A Review of The Vortex Engine, The Sustainable City VIII, Vol. 2, 911-920, 2013.
 [13] A.T. Mustafa, H.H. Al-Kayiem & S.I.U. Gilani, "A Review of Convective and Artificial Vortices for Power Generation", *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Vol. 10, No. 5, 650–665, 2015.
 [14] A.Babkir, "Techno-economic optimization for the design of solar chimney power plants", *Energy Conversion and Management*, 138 (2017) 461–473, 2017.
 [15] Nizetic, S., Ninic, N., Analysis of overall Solar Chimney power plant efficiency, *Strojarstvo* 49 (2007), 233-240, 2007.
 [16] F. Kose, M.N. Kaya, "Analysis on Meeting The Electric Energy Demand of an Active Plant With Awind-Hydro Hybrid Power Station in Konya, Turkey; Konya water treatment plant", *Renewable Energy*, v.55, p.196-201, July 2013.
 [17] F. Kose, M. H. Aksoy, M. Ozgoren, "An Assessment of Wind Energy Potential to Meet Electricity Demand and Economic Feasibility in Konya, Turkey", *International Journal of Green Energy*, 11: 559–576, 2014.
 [18] "Simple Levelized Cost of Energy (LCOE) Calculator Document," National Renewable Energy Laboratory, [Online]. Available: http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_documentation.html, 28 Mar. 2016.
 [19] IRENA, URL:<http://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>.
 [20] PVGIS, URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
 [21] F. Köse, "Konya Bölgesinin Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi", S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) Araştırma Projesi, proje no: 2004-121, 2009, Konya.