

Gökçeada'da Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Araştırılması

Uğur YILMAZ, Ayşen DEMİRÖREN, H. Lale ZEYNELGİL

ÖZET

Bu çalışmada, Gökçeada'nın elektrik enerjisi gereksiniminin yenilenebilir enerji kaynakları ile nasıl karşılanabileceği incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili olarak daha önce yapılmış olan çalışmalarda, maliyet analizinin yıllık ortalama değerlere göre yapıldığı ve yıl boyunca oluşan çeşitli değişimlerin sisteme eklenemediği görülmektedir. Bu çalışmada ise, hem bilgisayarda oluşturulan sistemin mümkün olduğu kadar gerçekçi olmasını sağlamak ve hem de elektrik yükü, rüzgâr hızı ve güneş ışınımı gibi zamanla değişen büyüklüklerin etkisini sisteme katmak için HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) programı kullanılmıştır. Karma veya karma olmayan yenilenebilir enerji sisteminin en uygun düzenlenmesini elde etmek için, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve akülerden oluşan sistemler çeşitli senaryolarla modellenmiştir. Bilgisayar benzetimi sonuçlarına göre, Gökçeada için rüzgâr enerjisi sistemi ile enerji maliyeti diğer sistemlerle elde edilen değerlerden daha düşük olmaktadır. Bu sonuç, özellikle şebekeye bağlı çalışma senaryosuna göre fazla enerjinin şebekeye satılması durumunda rüzgâr enerjisinin Gökçeada için avantajlı olduğunu kanıtlar.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Gökçeada, Rüzgâr, Fotovoltaik, Güneş, HOMER

Investigation of the Potential for Electrical Energy Production with Renewable Energy Sources in Gökçeada

ABSTRACT

In this study, requirement for electrical energy of Gökçeada is analyzed that how can it be supplied with renewable energy sources. At relevant studies which are done about renewable energy sources, it is seen that cost analysis are done according to annual average values. But in this study, HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) program is used in order to make the system which is generated with computer to be as real as possible and also the effect of values which vary by the time like electric load, wind speed and solar radiation, to the electric system are modeled. The systems which are composed of solar panels, wind turbines and batteries, are modeled with various scenarios to obtain the optimum configuration of hybrid or non-hybrid renewable energy system. According to the simulation results; it is seen that energy costs of wind energy systems are lower for Gökçeada. It is revealed that wind energy is advantageous in Gökçeada especially with grid sales according to the grid connected scenario.

Keywords: Renewable energy, Gökçeada, Wind, Photovoltaic, Solar, HOMER

1. GİRİŞ

Enerji günlük hayatımızı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Su ve gıda gibi temel yaşam gereksinimleri de enerji kullanımıyla elde edildiği ve taşındığı için, yüksek kaliteli ve kesintisiz enerjiye sahip olmak temel bir gereksinimdir. Öte yandan, petrol fiyatlarının, enerji gereksiniminin, kirliliğin ve sera gazlarının artışı gibi nedenlerle, çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek artmaktadır. Oldukça yüksek bir yenilenebilir enerji potansiyeli olan ülkemizde de, yenilenebilir enerji sistemleri giderek yaygınlaşmaktadır.

Makale 27.04.2010 tarihinde gelmiş 20.01.2011 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

U. YILMAZ, A. DEMİRÖREN, H.L. ZEYNELGİL, İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü Maslak, 34469 İSTANBUL

e-posta :demiroren@itu.edu.tr,

zeynelgil@itu.edu.tr,

Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.3, 215-223

Bu çalışmada, Türkiye'nin en büyük adası olan Gökçeada'nın elektrik enerjisi gereksinimi analiz edilmiş ve bu analizde yenilenebilir enerji sistemleri kullanılmıştır. Gökçeada'nın elektrik yükünü karşılayabilecek en uygun yenilenebilir enerjili karma sistemi belirlemek için, HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) programı kullanılmıştır. HOMER programı NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmiş olup, önerilen ve gerçek dağıtılmış üretim sistemlerinin karşılaştırmalı ekonomik analizini yapmakta ve sistemleri Net Mevcut Maliyetlerine göre sıralamaktadır. Bir sistem, yatırım maliyeti daha yüksek olmasına rağmen, ömür boyu maliyetine göre daha ekonomik olabilir. HOMER incelenen sistem için düzeltilmiş enerji maliyeti (DEM) üzerine olan etkilerini belirlemek amacıyla belirli parametrelerin değerlerinin değiştirilebildiği "duyarlılık analizi" de yapılabilmektedir. Optimizasyon ve duyarlılık analizinde karmaşıklığı arttırmamak ve hesaplamaları hızlandırmak için, HOMER yazılımının benzetim mantığı,

diğer istatistiksel modellerden daha ayrıntılı olmasına rağmen daha basittir. Benzetimi yapılabilen sistemlerin çeşitliliği açısından da HOMER en esnek olanıdır (1).

Yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yapılmış olan çalışmalarda, maliyet analizlerinin yıllık ortalama değerlere göre yapıldığı ve yıl boyunca oluşan değişimlerin sisteme eklenemediği görülmektedir. Bu çalışmada ise, HOMER programının kullanılmasıyla elektrik yükü, rüzgâr hızı ve güneş ışınımı gibi zamanla değişen büyüklüklerin etkisi de modellenmiştir. Bu büyüklüklerin her biri için HOMER programında bir yıl için 8760 adet değer (saatlik veri) oluşturulur. Buna göre, HOMER 1 saatten daha kısa süren geçici değişimleri modelleyemez, ancak bu tip sistemlerin analizi için saatlik verinin yeterli olduğu açıklanmıştır.

Özel bir uygulama senaryosu için HOMER programına girilmesi gereken büyüklükler, yük verisi, yenilenebilir kaynak verisi, sistem bileşenlerinin özellikleri ve maliyetleri ile optimizasyonla ilgili çeşitli bilgileri içerir. HOMER programına girilecek veri için, sistem bileşenlerine ilişkin bilgi literatür araştırmasından ve imalatçılardan elde edilmiştir.

2. GÖKÇEADA'NIN TANITIMI

2.1. Yerleşim ve Nüfus

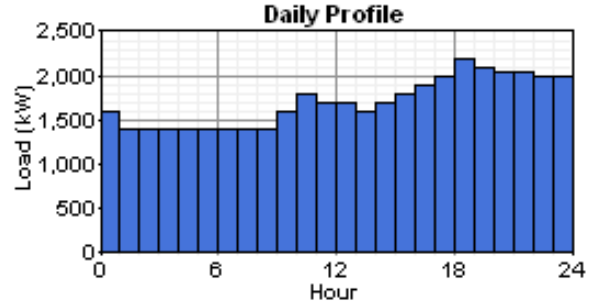
Ege Denizi'nin kuzeyinde bulunan Gökçeada Türkiye'nin en büyük adası olup, $40^{\circ} 14'$ ila $40^{\circ} 05'$ Kuzey enlemleri, $25^{\circ} 39'$ ila $26^{\circ} 00'$ Doğu boylamları arasında yer alır ve yüzölçümü $285,5 \text{ km}^2$ 'dir. Gökçeada'nın nüfusu ise yaklaşık 8600 kişidir (2,3).

2.2. Yük Yapısı ve Elektrik Sistemi

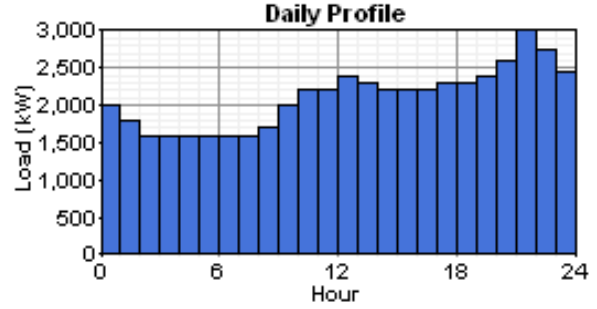
Gökçeada'nın elektrik gereksinimi TEİAŞ'nin Kumlıman Transformatör Merkezi'nden, $31,5 \text{ kV}$ 'luk bir iletim hattı yardımıyla karşılanmaktadır.

HOMER bir yılda bulunan 8760 saatin her biri için enerji dengeleme hesapları yaparak bir sistemin bilgisayar benzetimini oluşturur. Bütün yıl için saatlik yük dağılımı mevcut değilse, HOMER programında, tipik bir güne ilişkin değerler yük dağılımlarının rastlantısal olarak sentezinde kullanılır. Bu çalışmada, günden güne ve zaman adımları arasında % 5' lik rastlantısal oranları kullanılmıştır.

Gökçeada'nın yük dağılımları TEİAŞ'nin Kumlıman Transformatör Merkezi'nden elde edilmiştir. Kış ve yaz dönemi yük dağılımları için sırasıyla 05.01.2007 ve 08.08.2007 tarihli veriler kullanılmış olup, elde edilen yük dağılımları sırasıyla Şekil 1 ve 2'de verilmiştir. Buna göre, minimum yük talebi kış döneminde, 01:00 ila 08:00 saatleri arasında ve en büyük yük talebi yaz döneminde, 21:00 ila 22:00 saatleri arasında oluşmaktadır. Yaz döneminde yük talebi daha fazladır, çünkü Gökçeada turistik bir ada olup, nüfusu yazın artmaktadır.



Şekil 1. Kış dönemi için yük dağılımı



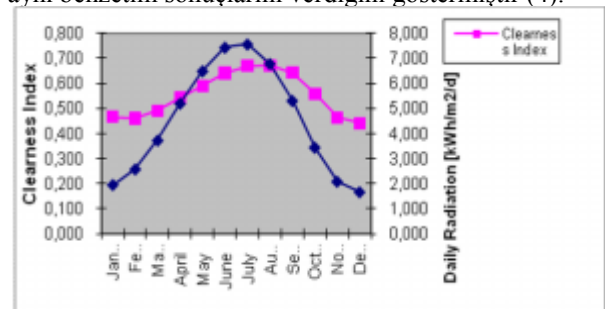
Şekil 2. Yaz dönemi için yük dağılımı

2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Durumu

2.3.1. Güneş Işınımı

Gökçeada'nın aylık güneş ışınımı değerleri HOMER ile NASA'dan elde edilmiş ve Şekil 3'te verilmiştir. HOMER Graham algoritmasını kullanarak bir yıldaki her bir saat için güneş ışınımı değerlerinin sentezini yaparak gerçekçi saatlik veriler üretir ve sadece enlem ile aylık ortalama değerler gerektiği için kullanımı kolaydır. HOMER'da Gökçeada'nın merkezinin koordinatları ($40^{\circ} 11'$ Kuzey enlemi ve $25^{\circ} 54'$ Doğu boylamı) kullanılmıştır.

Eğer bir saatte hava bulutlu ise, sonraki saatte de havanın bulutlu olma olasılığı yüksektir. Sentezde, bütünsel ortalamaları yansıtan belirli istatistiksel özellikler kullanılarak veri yaratılmaktadır ve özel bir yer için üretilen veriler güneş enerjisinin gerçek karakteristiğini tam olarak göstermez. Ancak, yapılan denemeler sentezle elde edilen verilerin gerçek verilerle hemen hemen aynı benzetim sonuçlarını verdiğini göstermiştir (4).



Şekil 3. Gökçeada için ortalama güneş ışınımı verisi

2.3.2. Rüzgâr Hızları

HOMER programında, rüzgâr hızı verisi aşağıdaki güç-yasası bağıntısı kullanılarak extrapolasyon yöntemi ile elde edilir:

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (1)$$

burada $V(z)$ istenen z yüksekliği için rüzgâr hızı kestirimi, $V(z_r)$ z_r sınır tabaka yüksekliğindeki rüzgâr hızı ve α güç-yasası indeksidir. Gökçeada'nın Aydıncık bölgesi için, $\alpha = 0.19$ olmaktadır. Bu değer yüzeyin pürüzlülük etkisini de içermektedir, çünkü 10 m ve 30 m yükseklikteki anemometreler ile ölçüm yapılarak ve Eşitlik (1) kullanılarak elde edilmiştir (5).

Rüzgâr türbini (RT) gücünün hesabı için, rüzgâr hızlarına ilişkin bilgi gerekir. Saatlik rüzgâr hızı ölçümleri bulunmadığında, saatlik veri aylık ortalama değerlerden sentez yoluyla üretilebilir. HOMER programının rüzgâr hızı verisi üreticinin kullanımı, güneş verisi üreticinden biraz daha zordur, çünkü aşağıdaki dört parametre gerekmektedir:

- **Weibull k değeri (k):** Yıl boyunca rüzgâr hızları dağılımının ölçümüdür. k 'nın değeri kaçınılmaz olarak 2'dir, çünkü k değeri rüzgâr rejimlerinin çoğunu oldukça doğru bir şekilde göstermek için kullanılmaktadır. Düşük k değerleri daha geniş rüzgâr hızı dağılımlarına karşılık düşer. Rüzgâr hızının daha dar bir bölgede değişme eğiliminde olduğu rüzgâr rejimleri daha yüksek k değerlerine sahiptir. Bu çalışmada, k değeri 1,94 olarak alınmıştır. Bu değer Aydıncık bölgesinde ölçülen yıllık k değerlerinin ortalamasıdır (6).

- **Bağımlılık faktörü (r_1):** Rüzgârın rastgeleliğinin ölçüsüdür. Daha yüksek r_1 değerleri bir saatteki rüzgâr hızı değişiminin doğrudan doğruya önceki saatteki rüzgâr hızına bağlı olduğunu, daha düşük değerler ise rüzgâr hızının saatten saate rastgele değişme eğiliminde olduğunu gösterir. Bölgesel coğrafik özellikler bu parametreye etki etmektedir. Bağımlılık faktörü topoğrafyası karmaşık olan bölgelerde daha düşük, topoğrafyası daha düzgün olan bölgelerde ise daha yüksek değerler alır. Bu çalışmada, bağımlılık faktörü 0,8 olarak alınmıştır.

- **Günlük değişim faktörü (δ):** Rüzgâr hızının gün içinde saatlere ne kadar bağlı olduğunu ölçüsüdür. Örneğin, pek çok yerde öğleden sonraki saatlerde sabah saatlerine göre daha rüzgârlı olma eğilimi vardır. Daha yüksek δ değerleri gün içinde zamana nispeten çok bağımlılık olduğunu gösterir. Bu çalışmada, günlük değişim faktörü 0,3 olarak alınmıştır.

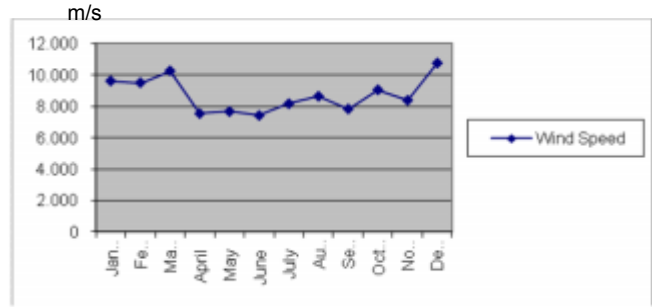
- **Puvant rüzgâr hızının saati:** Yıllık ortalamaya göre günün en rüzgârlı saatidir. Bu çalışmada, puvant rüzgâr hızı saati 11:00 olarak alınmıştır (6).

Gökçeada Türkiye'nin en rüzgârlı bölgelerinden biri olup, adada bulunan rüzgâr ölçüm istasyonlarının yerlerini içeren bir harita Şekil 4' de verilmiştir. Bu çalışmada, kaynak (5)' ten alınan ve adanın Aydıncık bölgesine ilişkin rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır (Şekil 5). Bu değerler 50 m'lik yüksekliğe ilişkindir. Bu nedenle,

HOMER benzetimlerinde anemometre yüksekliği 50 m olarak alınmıştır.



Şekil 4. Rüzgâr ölçüm istasyonlarının yerlerinin de gösterildiği Gökçeada haritası (2,6)



Şekil 5. Aydıncık için ortalama rüzgâr hızları

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE RÜZGÂR ENERJİSİ SİSTEMLERİ

3.1. Güneş Enerjisi (PV) Sistemi

Güneş pili güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürmek için tasarlanmış bir yarıiletken cihazdır. Güneş pilleri istenen gerilim ve akım değerlerini elde etmek için bir modül oluşturacak şekilde birleştirilir. PV dizileri ise, elektrik enerjisi üretmek üzere bir araya getirilmiş bir PV modülleri grubudur. PV modülleri doğru gerilim ve akım üretir.

HOMER PV dizilerini kapladıkları alana göre değil anma güçlerine göre inceler; dolayısıyla, maliyet hesabı yapılırken verimin bilinmesi gerekmez. Bu şekilde, HOMER PV dizisi çıkışının gelen güneş ışınımı ile doğru orantılı olduğunu varsayar; örneğin, eğer ışınım $0,75 \text{ kW/m}^2$ ise, PV dizisi anma çıkış değerinin % 75' ini üretecektir. Ortam sıcaklığı arttıkça PV modüllerinin verimi azalır. PV modüllerinin maruz kaldığı sıcaklık bölgesinde üretilen güç kabaca doğrusal değildir. İmalatçılar bu karakteristik için, genellikle $^{\circ}\text{C}$ başına toplam güç değişiminin bir yüzdesi olarak ifade edilen bir değer verir. Örneğin, eğer bir modül $-0,50\%/^{\circ}\text{C}$ ' lik bir sıcaklık katsayısına sahip ise, bu modül sıcaklıktaki her 1°C 'lik artışta % 0,5 daha az güç üretecektir. PV modülleri güneş ışığına maruz kalırlar, güneş tarafından üretilen kızılötesi ışınları soğururlar ve ısınırlar. Aynı zamanda, modüller koyu renklidir ve hiç rüzgâr esmediğinde sıcaklıkları 80°C gibi oldukça yüksek değerlere ulaşabilmektedir. HOMER'in PV giriş sayfasının bir bozulma faktörüne sahip olması önemli bir özelliktir.

Bu özellik verimdeki azalmayı gidermek için kullanılır, çünkü gerçek çalışma koşulları standart deney koşullarına göre daha elverişsizdir. En önemli etken dizi sıcaklığıdır, fakat toz ve iletken kayıplarının da küçük bir etkisi vardır. Bu kayıpları ve PV modüllerinin kirlenmesinden kaynaklanan kayıpları hesaba katmak için, PV dizisi çıkışına uygulanan bir ölçeklendirme faktörü olan bozulma faktörü kullanılır ve Gökçeada için bu faktör % 90 olarak kabul edilmiştir. Çok sıcak iklimlerde daha düşük bir değer kullanılması gerekir (7). PV dizisinin ürettiği güç aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \cdot \left(\frac{I_T}{I_s} \right) \quad (2)$$

burada f_{PV} bozulma faktörü, Y_{PV} PV dizisinin toplam kurulu gücü, I_T güneş ışınımı ve $I_s = 1 \text{ kW/m}^2$ dir (4).

3.2. Rüzgâr Enerjisi Sistemi

Bu çalışmadaki bilgisayar benzetimlerinde, Türkiye’de kullanılan ve HOMER’in veri tabanında da bulunan GE 1.5sl tipi rüzgâr türbini kullanılmıştır. GE 1.5sl tipi rüzgâr türbininin ana parçaları ısı transfer ünitesi, kontrol paneli, generatör, yağ soğutucu, kuplaj, hidrolik el freni, ana gövde, darbe gürültü yalıtımı, dişli kutusu, yön saptırma sürücüsü, rotor mili, yatak mahfazası, rotor göbeği, kanat açısı kontrolü, burun konisi, havalandırma ve kabin olup, bu türbine ilişkin teknik veriler aşağıdaki gibidir (8):

Nominal güç	: 1.500 kW
Çalıştırma rüzgâr hızı	: 3,5 m/s
Durdurma rüzgâr hızı	: 20 m/s
Nominal rüzgâr hızı	: 14 m/s
Rotor kanatlarının sayısı	: 3
Rotor çapı	: 77 m
Rotor süpürme alanı	: 4657 m ²
Rotor hızı (değişken)	: (11,0 – 20,4) d/d
Güç kontrolü	: Aktif kanat açısı kontrolü
Göbek yükseklikleri	: (61,4 – 100) m

4. EKONOMİK ANALİZ

4.1. Yıllık Faiz Oranı

HOMER programına girilen kazanç oranı yıllık gerçek faiz oranıdır. Bu, anlık maliyetler ile yıllık hale getirilmiş maliyetler arasındaki dönüşümü sağlamak için kullanılan indirim oranı olup, anma faiz oranına aşağıdaki eşitlikle bağlıdır:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (3)$$

burada, i gerçek faiz oranı, i' anma faiz oranı ve f yıllık enflasyon oranıdır. Türkiye için, $i' = \% 15,25$ (18 Şubat 2008) ve $f = \% 8,4$ (2007 yılı yıllık enflasyon oranı) değerleri kullanılarak gerçek faiz oranı % 6,3 olarak bulunmuştur (9,10).

4.2. Düzeltilmiş Enerji Maliyeti

HOMER düzeltilmiş enerji maliyetini (DEM) sistemin ürettiği faydalı elektrik enerjisinin kWh başına ortalama maliyeti olarak tanımlar ve

$$DEM = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim,AC} + E_{prim,DC} + E_{grid,sales}} \quad (4)$$

bağıntısı ile hesaplar; burada, $C_{ann,tot}$ toplam yıllık maliyet (\$/yıl), $E_{prim,AC}$ beslenen AC yük miktarı (kWh/yıl), $E_{prim,DC}$ beslenen DC yük miktarı (kWh/yıl) ve $E_{grid,sales}$ şebekeye toplam satış (kWh/yıl) değerleridir. Toplam yıllık maliyet her bir sistem elemanının yıllık maliyeti ile diğer yıllık maliyetlerin toplamıdır. Bu önemli bir büyüklüktür, çünkü HOMER düzeltilmiş enerji maliyeti ve toplam net şimdiki maliyet hesabı için bu değeri kullanır (4).

4.3. Net Şimdiki Maliyet

Net şimdiki maliyet (NŞM) sistemin kuruluş ve projenin ömrü boyunca işletme maliyetidir. Toplam şimdiki maliyet HOMER'in ana ekonomik çıktısıdır. Bütün sistemler net şimdiki maliyete göre sıralanır ve bütün diğer ekonomik çıktılar net şimdiki maliyeti bulmak amacıyla hesaplanır. Net şimdiki maliyet

$$C_{NŞM} = \frac{C_{ann,tot}}{SGF(i, R_{proj})} \quad (5)$$

bağıntısı ile hesaplanır; burada, $C_{ann,tot}$ toplam yıllık maliyet (\$/yıl), SGF sermaye geri kazanım faktörü, i gerçek faiz oranı (%) ve R_{proj} projenin ömrü (yıl) olmaktadır (4). Sermaye geri kazanım faktörü yıllık gelir gider akışının şimdiki değerini hesaplamak için kullanılır ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$SGF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (6)$$

burada i gerçek faiz oranı (%) ve N yıl sayısıdır. Bu çalışmada projenin ömrü 20 yıl olarak alınmıştır.

5. GÖKÇEADA İÇİN İNCELENEN SENARYOLAR

Bu çalışmada; Gökçeada'nın elektrik enerjisi gereksinimini farklı enerji kaynaklarından karşılamak için çeşitli senaryolar göz önüne alınmıştır. Her senaryo için, toplam net şimdiki maliyet ve düzeltilmiş enerji maliyeti bulunmuştur. Para dönüşümleri ve yakıt fiyatları için Çizelge 1'de verilen ve 04.04.2008 tarihine ilişkin değerler kullanılmıştır (11,12). Sistem maliyetleri için Çizelge 2'de verilen değerler kullanılmış olup, personel giderleri, ulaşım maliyeti, arsa kirası (bedeli), vergi ve diğer maliyetler ihmal edilmiştir. PV modülleri, bataryalar, eviriciler ve şarj regülatörleri için yıllık bakım ve onarım maliyetleri 10 \$ olarak alınmıştır (13,14). Rüzgâr türbininin sermaye masrafı 1000 \$/kW olarak alınmıştır (15). Her bir kW'lık PV modülü için sermaye masrafının 7000 \$ olduğu varsayılmıştır. HOMER benzetimlerinde Hoppecke 20 OPzS 2500 bataryaları kullanılmış olup, ekonomik incelemelerde ise MUTLU Akü'nün 20 OPzS 2500 modelinin fiyatı kullanılmıştır (16). İki model de 2500 Ah kapasiteye sahip olup, özdeş oldukları kabul edilebilir. Sermaye masrafının her batarya için 1500 \$, çeviriciler için 1000 \$/kW ve Diesel generatörler için 200 \$/kW olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 1. Benzetimlerde Kullanılan Değerler

\$ (TL)	€ (TL)	Diesel (TL)	Diesel (\$)
1,286	2,022	2,89	2,247278

Çizelge 2. Bilgisayar benzetimlerinde kullanılan sistemlerin maliyet değerleri

		Sermaye Masrafı (\$)	Yenileme Masrafı (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)
Rüzgâr Türbinleri	1 kW	1000	1000	Sermaye masrafının %2'si
FV Modülleri	1 kW	7000	7000	10
Bataryalar	1 adet	1500	1500	10
Çeviriciler	1 kW	1000	1000	10
Diesel Generatörler	1 kW	200	160	3 (\$/saat)

5.1. Sadece Rüzgâr Enerjisi Sistemi

Bu senaryoda, Gökçeada'nın bütün elektrik yükü rüzgâr enerjisi ile karşılanmakta olup, sistemin HOMER modeli Şekil 6'da verilmiştir. Rüzgâr hızı her zaman yeterli olmayabilir, bu nedenle yedek güç için bataryalar ve çeviriciler kullanılması gerekir. Bu durumda sistemin maliyeti artar, fakat bütün enerji gereksinimi yenilenebilir enerji ile sağlanabilir.

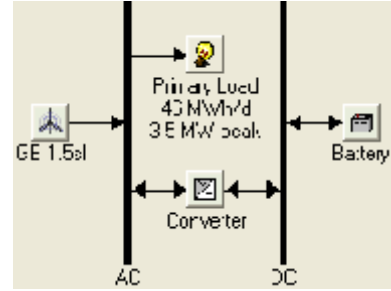
GE 1.5sl tipi rüzgâr türbininin anma gücü 1,5 MW ve sermaye masrafı 1.500.000 \$ olup, işletme ve bakım masrafı 30.000 \$ (sermaye masrafının % 2'si) olmaktadır. Bilgisayar benzetimi sonuçlarına göre, optimum çalışma için 7 adet rüzgâr türbini, 9.500 adet batarya ve 3.500 kW'lık çevirici gerekmektedir. Buna göre, sistemin NŞM 32.537.056 \$ ve enerjinin maliyeti 0,174 \$/kWh olmaktadır. Çizelge 3'ten görüldüğü gibi, maliyet dağılımındaki en büyük değer batarya maliyetidir. Gerçekte, rüzgâr türbininin kontrol sistemi nedeniyle fazla elektrik enerjisi üretimi olmaz; ancak, bilgisayar benzetimlerine göre fazla enerji üretilmektedir. HOMER benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir:

Sistem yapısı

Rüzgâr türbini	: 7 adet
Batarya	: 9.500 adet
Evirici	: 3.500 kW
Doğrultucu	: 3.500 kW

Maliyet özeti

Toplam net şimdiki maliyet	: 32.537.056 \$
----------------------------	-----------------



Şekil 6. Sistemin HOMER modeli

5.2. Sadece PV Sistemi

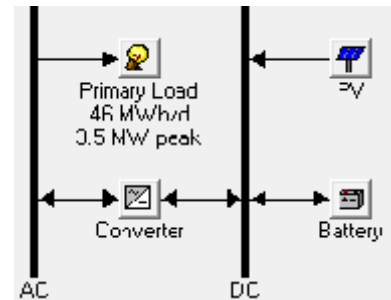
Bu senaryoda, Gökçeada'nın bütün elektrik yükü güneş enerjisi ile karşılanmakta olup, sistemin HOMER modeli Şekil 7'de verilmiştir. Sistemin NŞM 223.835.376 \$ ve enerjinin maliyeti 1,20 \$/kWh olmaktadır. Çizelge 4'ten görüldüğü gibi, PV dizisi maliyeti maliyet dağılımındaki en büyük değerdir. Bu senaryo için de fazla elektrik üretimi söz konusudur. HOMER benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir:

Sistem yapısı

PV Dizisi	: 25.000 kW
Batarya	: 32.750 adet
Evirici	: 3.200 kW
Doğrultucu	: 3.200 kW

Maliyet özeti

Toplam net şimdiki maliyet	: 223.835.376 \$
Düzeltilmiş enerji maliyeti	: 1,20 \$/kWh



Şekil 7. Sistemin HOMER modeli

Çizelge 3. Maliyet Dağılımı

Bileşen	Başlangıç Sermayesi (\$)	Yıllık Sermaye (\$/yıl)	Yıllık Yenileme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Yakıt Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
GE 1.5sl	10.500.000	937.858	0	210.000	0	1.147.858
Batarya	14.250.000	1.272.807	42.919	95.000	0	1.410.726
Çevirici	3.500.000	312.619	0	35.000	0	347.619
Toplam	28.250.000	2.523.284	42.919	340.000	0	2.906.203

Çizelge 4. Maliyet Dağılımı

Bileşen	Başlangıç Sermayesi (\$)	Yıllık Sermaye (\$/yıl)	Yıllık Yenileme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Yakıt Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
PV Dizisi	175.000.000	15.630.963	-921.193	250.000	0	14.959.770
Batarya	49.125.000	4.387.835	0	327.500	0	4.715.335
Çevirici	3.200.000	285.823	0	32.000	0	317.823
Toplam	227.324.992	20.304.620	-921.193	609.500	0	19.992.928

5.3. RT+PV Karma Sistem

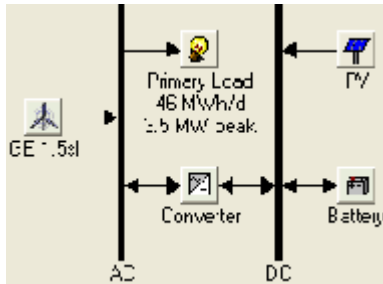
Bu senaryoda, Gökçeada'nın elektrik yükü rüzgâr ve güneş enerjisi birlikte kullanılarak karşılanmaktadır. Bu durumda, sistemin HOMER modeli Şekil 8'de verilmiştir. Bu durumda, sistemin NŞM 34.014.936 \$ ve enerjinin maliyeti 0,182 \$/kWh olmaktadır. Maliyet dağılımları Çizelge 5'te ve HOMER benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir:

Sistem yapısı

PV Dizisi	: 500 kW
Rüzgâr türbini	: 6 adet GE 1.5sl
Batarya	: 10.000 adet
Evirici	: 3.000 kW
Doğrultucu	: 3.000 kW

Maliyet özeti

Toplam net şimdiki maliyet	: 34.014.936 \$
Düzeltilmiş enerji maliyeti	: 0,182 \$/kWh



Şekil 8. Sistemin HOMER modeli

Çizelge 5. Maliyet Dağılımı

Bileşen	Başlangıç Sermayesi (\$)	Yıllık Sermaye (\$/yıl)	Yıllık Yenileme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Yakıt Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
FV Dizisi	3.500.000	312.619	-18.424	5.000	0	299.195
GE 1.5sl	9.000.000	803.878	0	180.000	0	983.878
Batarya	15.000.000	1.339.797	17.377	100.000	0	1.457.174
Çevirici	3.000.000	267.959	0	30.000	0	297.959
Toplam	30.500.000	2.724.254	-1.047	315.000	0	3.038.207

Çizelge 6. Maliyet Dağılımı

Bileşen	Başlangıç Sermayesi (\$)	Yıllık Sermaye (\$/yıl)	Yıllık Yenileme Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Yakıt Maliyeti (\$/yıl)	Yıllık Toplam Maliyet (\$/yıl)
Generatör	660.000	58.951	160.743	578.160	12.141.072	12.938.926
Toplam	660.000	58.951	160.743	578.160	12.141.072	12.938.926

5.4. Diesel Generatör Sistemi

Bu senaryoda, Gökçeada'nın bütün elektrik yükü Diesel generatör ile karşılanmaktadır. HOMER ile en uygun generatör gücü 3.300 kW olarak bulunmuştur. Çizelge 6'deki değerler kullanılarak, 20 yıllık proje ömrü için NŞM 144.860.688 \$ ve düzeltilmiş enerji maliyeti ise 0,776 \$/kWh olarak bulunmuştur. Yıllık yakıt tüketimi 5.403.237 L/yıl ve yakıt maliyeti 12.141.072 \$/yıl olup, özel yakıt tüketimi 0,324 L/kWh ve ortalama elektriksel verim % 31,4 olarak elde edilmiştir. Yıllık gaz yayımları Çizelge 7'de ve HOMER benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir:

Sistem yapısı

Generatör	: 3.300 kW
-----------	------------

Maliyet özeti

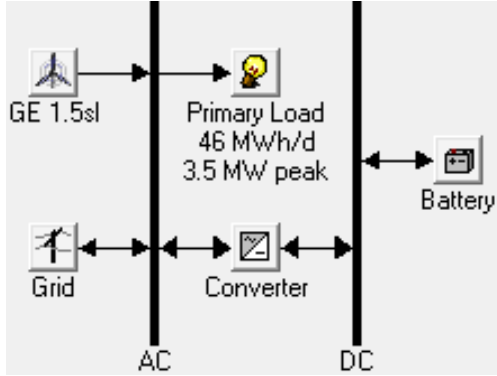
Toplam net şimdiki maliyet	: 144.860.688 \$
Düzeltilmiş enerji maliyeti	: 0,776 \$/kWh

Çizelge 7. Gaz Yayımları

Kirletici	Yayılım (kg/yıl)
Karbondioksit	14.228.501
Karbonmonoksit	35.121
Yanmamış hidrokarbonlar	3.890
Parçacıklı maddeler	2.648
Sülfürdioksit	28.573
Azot oksitleri	313.388

5.5. Şebekeye Bağlı Çalışan RT Sistemi

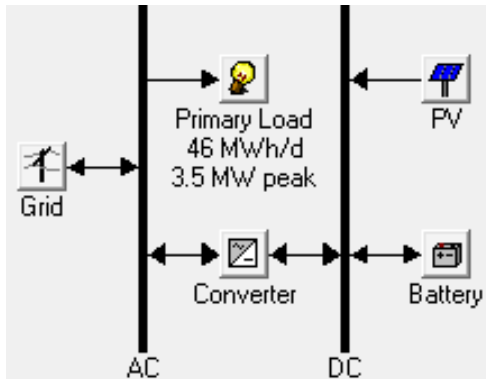
Bu senaryoda, Gökçeada'nın elektrik yükü şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgâr enerjisi sistemi ile karşılanmakta olup, sistemin HOMER modeli Şekil 9'da verilmiştir. Bu durumda, eğer rüzgâr hızı Gökçeada'nın yükünü karşılamak için yetersiz ise, gereken enerji şebekeden enerji satın alınır. Tersine, eğer üretilen elektrik enerjisi enerji talebinden fazla ise, üretilen fazla elektrik enerjisi şebekeye satılır.



Şekil 9. Sistemin HOMER modeli

5.6. Şebekeye Bağlı Çalışan PV Sistem

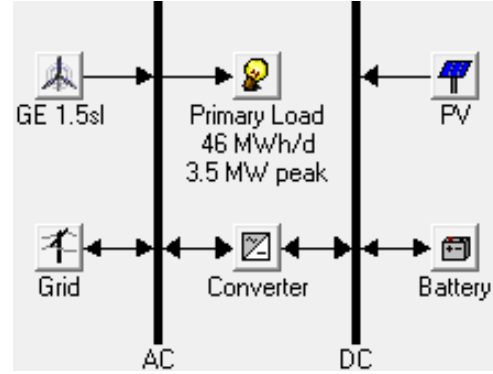
Bu senaryoda, Gökçeada'nın elektrik yükü şebekeye bağlı olarak çalışan güneş enerjisi sistemi ile karşılanmakta olup, sistemin HOMER modeli Şekil 10'da verilmiştir. Bu durumda, eğer güneş enerjisi Gökçeada'nın yükünü karşılamak için yetersiz ise, gereken enerji şebekeden satın alınarak karşılanır. Eğer PV ile üretilen elektrik enerjisi enerji talebinden fazla ise, üretilen fazla elektrik enerjisi şebekeye satılır ve bu nedenle çevirici kapasitesi artırılır. Enerji maliyeti açısından en uygun çevirici kapasitesi 28.000 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 10. Sistemin HOMER modeli

5.7. Şebekeye Bağlı Çalışan RT+PV Sistemi

Bu senaryoda, Gökçeada'nın elektrik yükü senkronizasyon mekanizması üzerinden şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri ile karşılanmakta olup, sistemin HOMER modeli Şekil 11'de verilmiştir. Bu durumda, eğer yenilenebilir enerji sistemleri ile üretilen enerji Gökçeada'nın yükünü karşılamak için yetersiz ise, gereken enerji şebekeden satın alınarak karşılanır.



Şekil 11. Sistemin HOMER modeli

5.8. Senaryoların Sonuçları

Bilgisayar benzetimi sonuçları Çizelge 8'de toplu olarak verilmiştir. Buna göre, en ekonomik sistem rüzgâr türbini sistemi olmaktadır. Sadece rüzgâr türbini sistemi için, enerjinin maliyeti 0,174 \$/kWh ve fazla elektrik üretimi toplam elektrik üretiminin % 64,2'si olup, 31.833.954 kWh/yıl olarak elde edilmiştir. Eğer sistem şebekeye ile bağlantılı olursa, üretilen fazla enerji şebekeye satılabilir ve rüzgâr türbini sisteminin enerji maliyeti 2 Cent değerine düşürülmektedir. Bu maliyet 7 adet rüzgâr türbini kullanılması durumu için elde edilmiş olup, türbin sayısı arttırılırsa, şebekeye satışların artmasıyla enerjinin maliyeti azalır. PV+RT karma sistemde, PV modüllerinin kuruluşunun ekonomik olmadığı görülmektedir. Diesel generatör sistemi de PV sisteminden daha ekonomik olmaktadır.

Yenilenebilir enerji yasasına göre, EPDK tarafından elektrik fiyatı 2007 yılı sonunda 9,67 Ykr/kWh (4,78 €Cent/kWh) olarak belirlenmiştir. EPDK'na göre, satış fiyatı 5 €Cent/kWh değerinin altında olmamalıdır. Bu nedenle, satış fiyatı olarak 5 €Cent/kWh (7,86 Cent/kWh) kullanılmıştır. Alış fiyatı ise 7,86 Cent/kWh+Vergi=9,28 Cent/kWh olmaktadır (17). Yüksek batarya fiyatlarından dolayı, batarya maliyeti NŞM ve DEM üzerinde çok etkilidir. Eğer yedek güç için bataryalar kullanılmazsa, yenilenebilir enerji sistemlerinin maliyeti azalır. Bu amaçla, Çizelge 8'de, incelenen senaryolar için batarya kullanılmaması durumlarına ilişkin bazı benzetim sonuçları da verilmiştir. Örneğin, eğer RT senaryosunda yedek enerji şebekeden sağlanırsa, sistemin NŞM ve DEM değerleri negatif olmaktadır, çünkü şebekeye satış ile ilgili girdiler maliyetten daha büyüktür.

Çizelge 8. Ayrıntılı Bilgisayar Benzetimi Sonuçları

	Sistem Tipi	RT (adet)	PV (kW)	Diesel Gen. (kW)	Batarya (adet)	Çevirici (kW)	Toplam Net Şimdiki Maliyet (\$)	Enerji Maliyeti (\$/kWh)	Yenilenebilir Oram (%)
1	RT	7	-	-	9500	3500	32.537.056	0,174	100
2	PV	-	25000	-	32750	3200	223.835.376	1,200	100
3	PV+RT	6	500	-	10000	3000	34.014.936	0,182	100
4	Diesel	-	-	3300	-	-	144.860.688	0,776	0
5	Diesel	-	-	2400	700	700	132.776.600	0,712	0
6	RT+Şebeke	7	-	-	-	-	-15.505.178	-0,083	93
7	RT+Şebeke	7	-	-	9500	3500	3.700.266	0,020	93
8	PV+ Şebeke	-	25000	-	-	28000	166.601.872	0,892	87
9	PV+ Şebeke	-	25000	-	32750	28000	219.393.472	1,175	87
10	PV+RT + Şebeke	6	500	-	-	3000	-5.239.017	-0,028	92
11	PV+RT + Şebeke	6	500	-	10000	3000	10.880.557	0,058	92

6. SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu çalışmada, Ege Denizi'nde bulunan ve Türkiye'nin en büyük adası olan Gökçeada'nın elektrik enerjisi gereksinimi incelenmiş ve bu gereksinimin yenilenebilir enerji sistemleri ile karşılanması analiz edilmiştir. Gökçeada'nın seçilmesinin nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Gökçeada rüzgâr potansiyeli açısından Türkiye'nin en önemli bölgelerinden biridir. Ancak, oldukça yüksek bir rüzgâr potansiyeline sahip diğer bir ada olan Bozcaada'da rüzgâr enerjisi santrali olmasına rağmen, Gökçeada'da henüz bir rüzgâr enerjisi santrali yoktur.

- Bir ada olduğu için, Gökçeada'nın enerji gereksinimi tek bir enerji iletim hattı üzerinden karşılanmaktadır. Bu durum enerjinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından risklidir. İletim hattında oluşacak bir arıza nedeniyle adanın tamamı elektriksiz kalabilir. Elektrik enerjisinin adada değişik yöntemlerle üretilmesi elektrik enerjisinin sürekliliğini artırabilir.

- Gökçeada ile ilgili olarak daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilen rüzgâr hızı verisi HOMER programında kullanmak için uygundur.

Bu çalışmada, Gökçeada'nın elektrik yükünü karşılayabilecek en uygun yenilenebilir enerjili karma veya karma olmayan sistem tasarımını belirlemek amacıyla, NREL tarafından geliştirilmiş olan HOMER (Version 2.52 Beta) bilgisayar yazılımı kullanılmış ve 20 yıllık tesis ömrü için güneş ve/veya rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin benzetimler yapılmıştır. Bunların yanı sıra, gerekirse Diesel generatör kullanılması da düşünülmüş ve bu durumdaki gaz yayılımları verilmiştir. Bilgisayar benzetimi sonuçlarından, Gökçeada için rüzgâr enerjisi sistemine ilişkin enerji maliyetlerinin daha düşük olduğu

görülmektedir. DEM yaklaşık 17 Cent olup, şebekeye satış yapıldığında 2 Cent değerine inmektedir. Aynı zamanda, yedek güç için bataryalar yerine şebeke bağlantısının kullanımıyla NŞM daha da azalmaktadır. Buna göre, rüzgâr enerjisi sistemi, özellikle şebekeye satış yapılabilmesi durumunda, Gökçeada için avantajlıdır. PV modüllerinin ve bataryaların maliyetleri çok yüksek olduğu için, PV sistemleri henüz ekonomik değildir. Sonuç olarak, elektrik enerjisi gereksiniminin rüzgâr enerjisi ile karşılanması Gökçeada için uygun bir yatırım olacaktır.

7. KAYNAKLAR

- 1) Farret, Felix A. 2006. Integration of alternative sources of energy. Wiley-Interscience
- 2) Google Earth
- 3) <http://www.gokceadarehberi.com>
- 4) HOMER Help files
- 5) Artar, H., 2005 Gökçeada rüzgâr enerji potansiyelinin incelenmesi ve enerji dönüşüm analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- 6) Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., 2006. Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
- 7) Camerlynck, J., 2004. Modelling of Renewable Energy Systems in the Maldives, Utrecht University
- 8) <http://www.gepower.com/>
- 9) <http://www.fxstreet.com/fundamental/interest-rates-table>
- 10) <http://www.tcmb.gov.tr/>
- 11) <http://www.bigpara.com>
- 12) <http://gm.poaas.com.tr/pompafiyat>
- 13) Givler T, Lilienthal P. Explore the role of gensets in small solar power systems. NREL, US, 2005. (<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36774.pdf>).

- 14) Dalton, G.J., Lockington, D.A., Baldock, T.E., 2007. Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel, *Renewable Energy*
- 15) <http://www.windpower.org>
- 16) <http://www.mutlu.com.tr/>
- 17) www.epdk.gov.tr