

Onur ERDEM
Barbaros BATUR
Z. Düriye BİLGE
Galip TEMİR

Abstract:

In this study the economic analysis of a wind turbine powerplant of 14 MW capacity, consisting of seven wind turbines, planning to be established in Bozcaada was conducted. Payback period and the profit to be obtained is calculated. These wind speed directly affects the production inputs such as electrical connections and continuity and are the first investment in road construction.

Key Words:

Wind Turbine, Wind Power Plant, Electricity Generation, Bozcaada Island.

Bozcaada'da Kurulacak Olan Bir Rüzgâr Enerjisi Santralinin Ekonomik Analizi

ÖZET

Bu çalışmada Bozcaada'da kurulması düşünülen, 7 rüzgâr türbininden oluşan, 14 MW kapasitesindeki bir rüzgâr santralinin ekonomik analizi yapılmıştır. Geri ödeme süresi ve elde edilecek kar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplarda iki önemli ekonomik değer dikkati çekmiştir. Bunlar; üretimini doğrudan etkileyen rüzgâr hızı, sürekliliği gibi girdiler ve elektrik bağlantıları ve yol yapımı gibi ilk yatırımlardır.

***Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr Türbini, Rüzgâr Enerji Santrali, Elektrik Üretimi, Bozcaada.*

1. GİRİŞ

En ucuz elektrik enerjisi kaynaklarından biri rüzgâr enerjisidir [1]. Yurdumuzda üzerine çok düşülmeyen ve genellikle de yanlış hesaplanan toplam enerji maliyetine dayanılarak yapılan elektrik enerjisi maliyet hesapları, rüzgâr enerjisini olduğundan daha pahalı göstermektedir. Örneğin, bu hesaplarda, kömürle çalışan termik santrallerin insan sağlığı üzerinde maliyetleri, iş ve okul gün kayıpları, tedavi ücretleri göz önüne alınmamaktadır. Benzer olarak genellikle nükleer santrallerin sökülme ya da nükleer atıkların depolama maliyetleri göz ardı edilebilmektedir. Bu ek maliyetler de hesaba katıldığında, rüzgâr enerjisi maliyetleri göreceli olarak daha da aşağı çekilir.

Örnek olarak, Bozcaada'da, her biri 2 MW kapasitesi olan 7 adet rüzgâr türbini bulunan bir rüzgâr santrali kurulması projesinin ekonomik analizi yapılmıştır. Rüzgârın hızı, yönü, mevsim, yükselti, insan yapısı engeller gibi değişkenler, rüzgâr santralinde üretilen enerjinin maliyeti buna bağlı olarak geri ödeme süresini değiştirir.

2. MODELLEME

Rüzgâr kaynakları değerlendirilmesi çalışmaları, rüzgâr tarlalarının muhtemel yerlerinin belirlenmesinde geçtiğimiz yirmi yıldır kayda değer bir araştırma aracı olmuştur. Rüzgâr Tarlası Modellemesi,

muhtemel rüzgâr tarlası plan tasarımlarını önceden simüle ederek rüzgâr türbinlerinin seçilen alanda tam yerlerinin belirlenmesinde gereklidir. Bu çalışmalar, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla maliyet verimliliğinde ve yıllık enerji üretiminde gelişimler sağlamaktadır.

Bu modellemede, rüzgâr kaynakları değerlendirilmesi ve rüzgâr tarlası örnek bir çalışma ile incelenmektedir. Kompleks bir arazi olarak tanımlanan Bozcaada'da bu yöntemler uygulanmıştır. Bu topografyayı; şehir içi, şehrin çevresindeki yerleşimler, dağlar, farklı boyutlardaki adalar ve kıyı kesimleri oluşturmaktadır. Bunların yanında, çok yüksek enerji potansiyeline sahiptir. Bu konu için geliştirilmiş araştırma araçlarından bir olan WindSim programı, gerekli tüm aşamaları yürütmesi için kullanılmaktadır. WindSim içine gömülmüş HAD programı RANS denklemlerini sonlu hacimler yöntemi kullanarak hesaplamaktadır. Arazi üzerindeki akışı tahmin ede-

bilmek için sektör bazında simülasyonlar yürütülmüştür. Kara rüzgâr tarlaları için yıllık enerji üretimi araştırılmıştır. Rüzgâr tarlası düzenlerinde, rüzgâr türbinlerinin arasındaki hem rüzgâra karşı hem de rüzgâr yönündeki uzaklıkların değişimleri için parametrik çalışma yürütülmüştür. Çalışmada sanal rüzgâr verilerinden faydalanılmıştır. Bu teorik araştırma programı rüzgâr tarlası düzenin tasarım zamanını azaltmaktadır.

3. YILLIK ENERJİ KAZANCI

WindSim'in son adımı yaptıklarımızın enerji üretim değerlerini çıkarması olacaktır. Her bir türbine gelen rüzgâr hız ve frekansına dayalı olarak WindSim ile ayrıntılı analiz sonuçlarına ulaşmaktayız. Tablo 1 ve Tablo 2'de daha ayrıntılı görülebileceği gibi, 14 MW kurulu güçten yıllık 26,0 GWh enerji üretimi gerçekleşmektedir. Yaklaşık %1 oranında wake etkisinden kayıp oluşmaktadır.

Tablo 1. Türbin Verileri

Türbin İsmi	Türbin Tipi	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Yıllık Enerji Üretimi (GWh/y)	Wake kayıpları (%)	Wake Kayıplarıyla Beraber Yıllık Enerji Üretimi (GWh/y)	Yıllık Çalışma Saati (Saat)
Türbin 1	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	5.220	3.597	2.299	3.514	1757.100
Türbin 2	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	5.190	3.558	3.471	3.435	1717.300
Türbin 3	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	5.220	3.596	1.304	3.549	1774.350
Türbin 4	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	5.230	3.593	0.860	3.562	1780.850
Türbin 5	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	5.180	3.541	0.294	3.531	1765.300
Türbin 6	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	5.290	3.648	0.203	3.640	1820.100
Türbin 7	V90 model hub Yüksekliği 80m	1.225	6.270	4.763	0.000	4.763	2381.700

Makale

Tablo 2’de görüldüğü gibi daha yüksekte ve etrafında türbin olmayan 7 numaralı türbin en yüksek enerji üretimini yapmaktadır ve en uzun çalışma süresine sahiptir.

4. RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİNİN EKONOMİK ANALİZİ

Bu ekonomik analizde, bir rüzgâr enerji santrali kurulumu için santralin kurulum aşamasında ortaya çıkacak yatırım maliyetini belirlemek ve yürür halini devam ettirmek için yapılan işletme maliyetini belirleyerek, santralin kapasite faktörünü, yıllık hasılat, birim enerji maliyeti, geri ödeme süresi ve bunların yanında yıllık sabit maliyetler, birim enerji başına yatırım maliyeti ve net şimdiki değerini hesaplayarak bize mevcut şartlarda bu santralin kurulmasının uygun olup olmadığını öngörmemizi sağlamaktadır.

Tüm bu işlemleri yapan programımız dört bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler sırasıyla; proje bilgileri, yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri ve sonuç kısımlarından oluşmaktadır. Proje maliyeti, %25 özkaynak, %75 borç, %7 borç faiz oranı, %5 öz sermaye geri dönüşüm oranı, %5 paranın zaman değeri ve %20 borç vadesi değerleri temel alınarak hesaplanmıştır. [2]

Yatırım maliyeti içinde bir rüzgâr enerji santralinin kurulumu için gerekli tüm harcama kalemleri bulunmaktadır. Burada kullanılan harcama kalemleri, sırasıyla; fizibilite etüdü, proje geliştirme, mühendislik, elektrik sistemi, mekanik sistem, inşaat ve çevre, sistem dengesi ve diğer, öngörülme giderler ve faiz giderleridir. Bu kalemlerin hesaplanmaları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

4.1 Fizibilite Maliyeti

Rüzgâr enerji santrali yatırım kararı öncesinde durum değerlendirmesinin yapıldığı aşamadır. Burada yapılan fon ve imkânların faydalı şekilde kullanımı, projenin gelecekteki kazancı, yatırımın bir değeri olup olmadığına dair öngörünün oluşması, bu yatırımın ne ölçüde ve ne kadar kârlı olabileceği tahmin edilerek proje ile ilgili tüm hususların değerlendirilmesidir.

Aynı zamanda saha incelemesi yapılması, çevresel değerlendirme ve ön projenin hazırlanması, ayrıntılı maliyet tahmini ve proje yönetimi aşamalarının gerçekleştirilmesidir. Bizim projemiz için toplam 7 türbin içinde fizibilite etüdü maliyeti sabit ve 200.000 dolar olarak belirlenmiştir.

4.2 Proje Geliştirme

Rüzgâr santrali yatırım projesi için sözleşme görüşmelerinin gerçekleştirilmesi, santralle ilgili lisans, izin ve onayların alınması, saha etüdü ve arazi haklarının alınması, finansman işlemleri, hukuk ve muhasebe işlemlerinin gerçekleştirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Bu proje için toplam 7 türbin içinde proje geliştirme maliyeti sabit ve 500.000 dolar olarak belirlenmiştir.

4.3 Mühendislik

Rüzgâr santrali kurulumu ile ilgili saha ve bina tasarımı, mekanik aksam tasarımı, elektrik ve inşaat tasarımı yapılarak projelerin çizilmesi, gerekli ihalelerin yapılarak sözleşmelerin yapılması ve inşaat koordinatörlüğünün gerçekleştirilmesi aşamalarının yerine getirilmesidir. Toplam 7 türbin içinde mühendislik maliyeti sabit ve 485.000 dolardır.

Tablo 2. Rüzgâr Enerji Santrali Verileri

Türbin Tipi	Hub Yüksekliği (m)	Türbin Sayısı	Kapasite (MW)	Yıllık Enerji Üretimi (GWh/y)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Wake Kaybı (%)	Wake Kayıplarıyla Beraber Yıllık Enerji Üretimi (GWh/y)	Yıllık Çalışma Süresi (saat)	Kapasite Faktörü(%)
VESTAS V90 2 MW	80.0	7	14.0	26.3	5.4	1.1	26.0	1856.7	21.2

4.4. Elektrik Sistemi

Kurulacak olan rüzgâr santralının elektrik kısmı bağlantı ve montaj, kurulum ve gerçekleştirilmesi kalemlerini kapsamaktadır. 10 adet iletim hattı için toplam 750 bin dolar, trafo merkezi için 1 milyon dolar, 7 adet elektrik bağlantısı için de toplam 7 milyon dolar maliyet hesaplanmıştır.

4.4.1. İletim Hattı

Kurulacak rüzgâr santrali ile genel şebeke arasındaki nakil hattıdır. Kısaca santralin genel şebekeye bağlantısıdır. Burada her bir türbin için 2 km sabit uzunluk öngörülmüştür. Program proje bilgileri bölümünde ilgili hücreden aldığı türbin sayısını 2 ile çarpıp, gerekli olan iletim hattı uzunluğunu belirlemektedir. Bu çalışma için 14 km iletim hattı öngörülmüştür. İletim hattı maliyeti sabittir. Km başına birim maliyet 75.000 dolar olarak belirlenmiştir. Burada program miktar ve birim maliyeti çarparak maliyeti 1.050.000 dolar olarak hesaplanmıştır.

4.4.2 Trafo Merkezi

Rüzgâr santralinde üretilen enerjiyi yükselterek enerji nakil hattına ileten merkezdir. Toplam 7 türbin içinde bu maliyet sabit ve 1 milyon dolar olarak belirlenmiştir.

4.4.3. Elektrik Bağlantısı

Santral için gerekli olan tüm türbin bağlantıları, iç bağlantılar ve elektrik bağlantı ve montajları kapsamaktadır. Toplam 7 türbin içinde değişmeyen elektrik bağlantı maliyeti sabit ve türbin başına 1 milyon dolardır. Program proje bilgileri bölümünde ilgili hücreden aldığı türbin sayısını miktar kısmına aynen aktarmaktadır. Daha sonra birim maliyet ile çarparak maliyeti 7 milyon dolar olarak hesaplanmaktadır.

4.5. Mekanik Sistemler

Rüzgâr türbinleri, inşaat ve çevre, türbin temelleri, bina ve çevre, yol yapımı, sistem dengesi, yedek parçalar, nakliye, işletmeye alma ve öngörülemeyen giderleri içerir.

4.5.1. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr enerji santralının en önemli parçasıdır.

Enerjinin üretildiği, sistemlerin bulunduğu türbinleri ve bütünleyici parçalarını da içine alan sistemdir. Tanesi 2 milyon dolardan, 7 adet sistem 14 milyon dolar maliyet öngörülmüştür [3].

4.6. İnşaat ve Çevre

Rüzgâr santralının her türlü bina, temel, bahçe ve çevre düzenleme işlemlerini kapsamaktadır. Bu bedel 7 türbin içinde sabittir ve maliyeti 26 milyon dolardır. Rüzgâr türbininin kurulacağı yere türbini oturtmak için yapılan temel inşaatıdır. 1000 m³ C30 beton, 100 ton demir, yedek parça, nakliye, eğitim ve işletmeye alma, öngörülmeleyen değerler ve faiz giderleri gibi giderler inşaat ve çevre giderlerine dahildir.

4.6.1. Rüzgâr Türbini Temel İnşaatı

Rüzgâr türbininin kurulacağı yere türbini oturtmak için yapılan temel inşaatıdır. Rüzgâr türbin temelinde de toplam 7 türbin içinde bu bedel sabittir ve 165.500 dolar olarak belirlenmiştir

4.6.2. Bina ve Bahçe

4 farklı türbin markası içinde bina ve bahçe maliyeti sabit ve m² başına birim maliyeti 3,418 dolar olarak belirtilmiştir. 100 m² olarak belirlenen çalışma alanı program tarafından toplam 34.180 dolar olarak hesaplanmaktadır.

4.6.3. Yol Yapımı

Kurulacak rüzgâr santrali için türbinlerin kurulacağı alan ve idari binalar ve santrale ulaşım sağlamak için gerekli olan yollardır. Burada yapılacak yol sıkıştırılmış toprak yol olarak düşünülmüştür. Proje bilgileri bölümünde ilgili hücreden aldığı türbin sayısını 2 ile çarparak yol uzunluğunu belirler. Bu çalışma için 14 km yol uzunluğu belirlenmiştir. Bizim projemiz için toplam 7 türbin içinde yol yapımı maliyeti sabittir ve 300 bin dolar olarak belirlenmiştir.

4.6.4 Sistem Dengesi ve Giderleri

Rüzgâr santralının fiziki kurulumu esnasında kurulum için gerekli taşıma ve nakliye işleri, gereken yedek parçalar ve santral kurulumunda sonra gerekli olan personel eğitimi ve santrali işletmeye alma

Makale

çalışmalarını kapsar. 125 bin dolar olarak öngörül-
müştür.

4.6.5. Yedek Parçalar

Rüzgâr santrali kurulumu sırasında gerekli olan yedek parçalardır. 7 türbin için de bu maliyet sabit ve 15 bin dolar olarak belirlenmiştir.

4.6.6. Nakliye

Rüzgâr santrali kurulumu sırasında türbin, kule, rotor ve diğer teçhizatları taşıma işlerini kapsamaktadır. 7 türbin için de sabit ve 15 bin dolar olarak belirlenmiştir.

4.6.7. Eğitim ve İşletmeye Alma

Rüzgâr santrali kurulumu sonrası santrali işletmeye alma faaliyetleri ve personel için gerekli eğitim faaliyetlerini kapsamaktadır. 7 türbin için de bu maliyet sabittir. Burada 10 kişilik personel grubu çalışacağı düşünülmüş ve toplam maliyeti 70 bin dolar ve toplam eğitim maliyeti 25 bin dolar olarak belirlenmiştir.

4.6.8. Öngörülemeyen Değerler

Rüzgâr santrali kurulumu için önceden öngörülme-
yen ancak ilerleyen safhalarda karşımıza maliyet olarak çıkan harcamalardır. Maliyetler toplam kurulum maliyetinin %1 oluşturmaktadır.

4.7. Faiz Giderleri

Rüzgâr santrali kurulumu inşaatı sürerken bu döneme ait faiz gider ve ödemelerini kapsamaktadır. Bu zamana kadar olan maliyetlerin toplamının %7'sidir

ve her bir türbin için yaklaşık 1,4 milyon dolar olarak belirlenmiştir.

4.8. İşletme Maliyetleri

Bu bölümde bir rüzgâr santralinin kurulumundan sonra santralin işletilebilmesi için yapılan tüm harcama kalemleri bulunmaktadır. Bu kalemler toplanarak santralin işletme maliyetleri, toplamı çıkarılmıştır. Burada kullanılan harcama kalemleri sırasıyla; bakım-onarım, arazi ve kaynak kiralama, sigorta, parçalar ve iş gücü, atmosfer faydası izleme ve takip, genel ve idari, yıllık yedek tutma, amortisman ve öngörülme-
yem giderlerdir ve Tablo 3'de ayrıntılı olarak görülebilir.

4.9. Toplam Maliyet

Projeye ait sonuç bilgileri olarak santral kapasite faktörü, yıllık hasılat, yıllık sabit maliyetler, birim enerji maliyeti, santral geri ödeme süresi, net şimdiki değer, birim enerji başına bakım ve onarım maliyeti ve birim enerji başına yatırım maliyeti bulunmaktadır. Bu kalemlere ait hesaplamaların formülleri aşağıda detaylı olarak belirtilmiştir [4].

$$\text{Kapasite Faktörü} = \frac{\text{Yıllık Üretilen Enerji}}{P_R \times 8760} \quad (4.1)$$

$$\text{Yıllık Hasılat} = \text{Enerji} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{yıl}} \right) \cdot 7,3 \cdot \left(\frac{\text{S}}{\text{kWh}} \right) \cdot (1 - \text{vergi oranı}) \quad (4.2)$$

$$\text{Yıllık Sabit Maliyet} = (\text{Yatırım Maliyeti} \times \text{Yıllık Uniform Maliyet Çarpanı}) + \text{İşletme Maliyeti} \left(\frac{\text{S}}{\text{yıl}} \right) \quad (4.3)$$

Tablo 3. Vestas V 90 İçin İşletme Maliyetleri

MALİYET ADI						
Birim	Miktar	Birim Maliyet(\$)	Maliyet(\$)	Maliyet(%)	AÇIKLAMA	
Bakım ve Onarım	Türbin	7	\$6.000	\$42.000	%1.68	Tek türbin fiyatınının %0.3'ü civarındadır.
Arazi ve Kaynak Kiralama	Dönüm	70	\$2.250	\$7.875	%0.31	Türbin için 10 dönüm alana ihtiyaç vardır. 20 yıllıktır
Sigorta	Türbin	1	\$520.000	\$520.000	%20.81	Tüm santral maliyetininin %2'si civarındadır.
Parçalar ve İşgücü	Santral	7	\$50.000	\$350.000	%14.01	Türbin başına \$50.000 parça ihtiyacı olmaktadır.
Atmosfer izleme ve Takip	Santral	1	\$400.000	\$400.000	%16.00	Santralin yıllık sera gazı izleme tabiki için.
Genel ve İdari	Ay	12	\$22.500	\$270.000	%10.81	Aylık olarak \$22.500 belirlenmiştir.
Yıllık Yedekte Tutma	Maliyet	26.292	\$7.00	\$184.050	%7.37	Santral enerji kapasitesine göre ayrılan yedektir.
Amortisman	Türbin	7	\$150.000	\$700.000	%28.02	1/teknik ömür oranında amortisman ayrılmıştır.
Öngörülme- yem Değerler	%	1%	\$2.473.875	\$24.733	%0.99	Bu ana kadar yapılan işletme harcamalarının %1
TOPLAM			\$2.498.608			
İŞLETME MALİYETİ			\$2.498.608 %100.00			

Kredi İçin → Yıllık Üniform Maliyeti =

$$\left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (4.4)$$

Öz Sermaye İçin → Yıllık Üniform Maliyeti =

$$\left[\frac{k \cdot (1+i)^n}{(1+k)^n - 1} \right] \quad (4.5)$$

Birim Enerji Maliyeti (\$/kWh) =

$$\frac{\text{Yıllık Sabit Maliyet (\$)}}{\text{Enerji (kWh)}} \quad (4.6)$$

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{M(\$)}{\text{Enerji (\$/yıl)}} \quad (4.7)$$

$$\text{Net Şimdiki Değer} = (\text{Yıllık Hasılat}(\$) - \text{Yıllık Üniform Maliyet}(\$)) - \text{Yatırım Maliyeti}(\$) \quad (4.8)$$

Birim Enerji Başına B&O Maliyeti =

$$\frac{\text{İşletme Maliyeti (\$)}}{\text{Enerji (kWh)}} \quad (4.9)$$

Birim Başına Yatırım Maliyeti =

$$\frac{\text{Yatırım Maliyeti (\$)}}{\text{Enerji (kWh)}} \quad (4.10)$$

5. SONUÇ

Bölüm 4.9'daki ekonomik formülasyonları kullanarak daha önce belirlediğimiz işletme giderleri ve maliyetlerle beraber; santral kapasite faktörünü, yıllık hasılatı, birim enerji maliyetini, geri ödeme süresini, net şimdiki değerini kolaylıkla hesaplayabilmekteyiz. Elde edilen değerler Tablo 4 ile verilmiştir.

Hesaplamalarını yaptığımız rüzgâr enerji santrali 11,6 yıl gibi bir sürede kendini amorti etmektedir. 20 yıllık ekonomik ömrü içerisinde geri kalan 8,4 yıl yatırımcıya ciddi kâr sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] "Comparative Central Generation Costs of Station Technologies California Electricity" California Energy Commission, June 2007, CEC-200-2007-001-SD
 [2] <http://www.epdk.gov.tr>
 [3] VESTAS Wind Technology Turkey Co. Ltd.
 [4] SANKO Holding, Çatalca Rüzgâr Enerji Santrali, İstanbul.

Tablo 4. Rüzgâr Enerjisi Santralinin Verileri

Santral Kapasitesi Faktörü	%21
Yıllık Hasılat	3 531 541 \$
Birim Enerji Maliyeti	0,152 \$/kWh
Geri Ödeme Süresi	11,6 Yıl
Net Şimdiki Değer	11 721 000 \$