

# RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ ÖLÇÜMÜ VE RÜZGÂR TÜRİNİ SEÇİMİ

Faruk KÖSE, Muammer ÖZGÖREN \*

*Bu çalışmada, Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü bölgesinde kurulan ölçüm istasyonunda yapılan ölçümlerden elde edilen veriler değerlendirilerek, bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. Uluslararası standartlara uygun olarak yapılan ölçümler 2003-2005 yılları arasında 21 aylık periyodu kapsamakta olup, yerden 10 m ve 20 m yüksekliklerdeki ortalama rüzgâr hızını ve 20 m yükseklikteki rüzgâr yönü değerlerini içermektedir. Ölçülen değerler ve yerli imalat faktörleri göz önüne alınarak kapasite, yatırım maliyeti ve basit geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Bölgeye kurulabilecek rüzgâr enerjisi santrali için minimum maliyet ve geri ödeme süresi verecek şekilde uygun türbin tipi seçilmiştir. Yapılacak yatırımın, ilk yatırım maliyetini 6 yıldan daha az sürede karşılayacağı bulunmuş olup, bu değer rüzgâr türbinlerinin literatürde verilen kullanım sürelerine göre oldukça kısadır.*

**Anahtar sözcükler:** Rüzgâr enerjisi potansiyeli, rüzgâr türbini, ekonomik analiz

*In this study, a wind observation station was established in a region of Alaaddin Keykubat Campus at Selçuk University. Measurement results were evaluated to determine wind energy potential of the region. The wind data were collected at 10 m and 20 m mast heights for mean wind velocities and at 20m for wind direction in a period of 21 months from 2003 to 2005 according to International standards. Capacity, investment cost and basic payback period calculations of the turbine corresponding to the measured values and national manufacturing factors were carried out. A suitable turbine type for wind energy plant to be erected to the region, which had minimum cost and basic payback period, was selected. The basic payback period of the investment cost of the wind energy plant to be erected was found less than 6 years. This result was fairly short with regard to the life cycle of the wind turbine plant given in literature.*

**Keywords:** Wind energy potential, wind turbine, economic analysis.

\* S.Ü.Müh.Mim.Fak.Makina Müh.Bölümü

## GİRİŞ

Gelişmiş ülkeler ile gelişmekte olan ülkeler arasında kişi başına tüketilen enerji miktarında büyük farklar vardır. Bu durum, günümüzde iletişim teknolojisindeki hızlı gelişmeler ve insanlar arasındaki etkileşimden dolayı oluşan yaşam standartlarının etkisiyle her geçen gün biraz daha değişmektedir. Geçmiş yıllardaki enerji kullanım miktarları daima artan bir eğilim göstermiştir ve bu gelecekte de benzer şekilde devam edecektir. Bu nedenle, her geçen gün yeterli yatırım yapılmadığı için israf edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının aktif kullanımına başlanılmalıdır. En önemli yenilebilir enerji çeşidinden birisi olan Rüzgâr enerjisi, dünya var oldukça atmosferik şartlardan dolayı oluşan Rüzgâr hareketleri ile kinetik enerji üretimi de sürecektir.

Günümüz şartlarında dünyadaki mevcut toplam teknik rüzgâr potansiyeli yılda 53000 TWh'tir ve bu, dünyanın 1998 yılındaki toplam elektrik tüketiminin yaklaşık 4 katıdır. 2020 yılına kadar dünya elektriğinin % 10'unu rüzgâr gücüyle sağlansa bile rüzgâr potansiyelinin çoğu hala kullanılmamış olacaktır. Dünya rüzgâr enerjisi piyasasında 2004 yılında Almanya 16000 MW kurulu güç ve 1/3 payla birinci, %25 ile ABD ikinci, % 15 ile İspanya üçüncüdür [1-4].

Rüzgâr enerjisi maliyeti için 1980 yılında 3000 \$/kW olan yatırım maliyeti, 2000 yılında 980 \$/kW'a düşmüş ve bu sürede üretim maliyeti de 20 sent/kWh'den 7 sent/kWh'e inmiştir [2, 3]. Birçok rüzgâr türbini üreticisi firma yeni geliştirdikleri santrallerle 5 m/s'nin altındaki ve 20 m/s'nin üstündeki rüzgâr hızlarında da çalışan türbin rotorları kullanarak maliyeti 4-5 sent/kWh'e indirdiklerini ifade etmekte olup, 5 sent/kWh'ı garanti edebilmektedirler [3, 4]. Halen petrol ve doğal gazla elektrik enerjisi üretim maliyeti 4-6 sent/kWh olduğu düşünülürse, artık günümüzde rüzgâr santrallerinin konvansiyonel sistemlerle rahatlıkla rekabet edebileceği düşünülmektedir.

Bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için ortalama rüzgâr hız ve yön değerlerinin belirli bir yükseklikten ölçülmesi gerekmektedir. Ölçme yüksekliği rüzgâr enerji potansiyeli ölçümleri için en az 30 m veya kurulmak istenen türbinin göbek eksen yüksekliğine eşit olmalıdır [5].

Türkiye için farklı kapasite ön görümleri olmasına karşın, uygun bölgelerde yararlanılabilir rüzgâr enerjisi güç potansiyelinin yaklaşık olarak 10000 MW civarındadır [6].

Rüzgâr türbinlerinin çalışma esnasında rahatsız edici bir gürültü kirliliğine neden olduğu şeklinde bir kanı vardır. Ancak bunun gerçekte böyle olmadığı şu şekilde açıklanabilir. Rüzgâr türbinlerinin sesi, karayolu trafiği (80 dBA), trenler, uçaklar (25 m'de uçak gürültüsü 140 dBA) ya da inşaat faaliyetleriyle karşılaştırıldığında çok düşük seviyededir. Örneğin, türbine çok yakın bölgede tam güçte 101-103 dBA gürültü üretirler. Diğer yandan 1 MW'lık bir türbinden 300 m uzaklıkta gürültü seviyesi ise yaklaşık 45 dBA'ya kadar düşmektedir [7].

Aşağıda Tablo 1.1'de elektrik enerjisi üretim sistemlerinin kuruluş ve birim enerji üretim maliyetleri (finansman maliyeti hariç) çeşitli enerji türleri için verilmiştir.

**Tablo 1.1.** Elektrik Santrallerinin Yatırım ve Birim Enerji Maliyet Tablosu [2, 4, 5]

Elektrik Santralinin Cinsi	Kuruluş Maliyeti (\$/kWh)	Birim Enerji Maliyet Aralığı (cent/kWh)
Termik Santral (kömür)	1200–1369	4.80–5.50
Doğalgaz Santrali	500–600	3.90–4.40
Biyomas - Atık	----	5.80–11.60
Rüzgâr Santrali	1000–1100	4.00–6.00
Güneş Pili	3000–6000	25.0–100.0
Nükleer Santral	3500–4000	11.10–14.50
Hidroelektrik Santral	800–1000	5.10–11.30

Tablo 1.1'de doğalgaz santralleri ve birim enerji maliyeti en düşük görülmesine rağmen dışa bağımlı ve bilinen sınırlı rezervleri (yaklaşık 50 yıl) olması doğalgazın dezavantajıdır. Bunun yanında yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgâr santrallerinin maliyeti giderek düşmektedir. Ayrıca, Tablo 1'de görüldüğü gibi doğal gaz ve hidroelektrikten sonra rüzgâr ile elektrik üretimi diğer elektrik santrallerine göre daha ekonomiktir.

Bu çalışmada, bölgenin rüzgâr hızı, yönü, sıcaklığı gibi

gerçek ölçüm değerleri dikkate alınarak, belirlenen farklı kapasite ve boyuttaki türbinlerin kurulum ve işletme maliyetlerini kapsayan ekonomik analizi ve bulunan sonuçların yorumları aşağıdaki bölümlerde açıklanacaktır.

## MATERYAL ve METOT

### Ölçüm Sistemi ve Sahasının Tanıtılması

Ölçme işleminde rüzgâr hızı ölçümü için DEWI (Almanya Rüzgâr Enstitüsü) belgeli fincan tipi anemometre ve rüzgâr yön belirleme cihazı kullanılmıştır. Bölgede rüzgâr enerjisi ölçüm çalışmalarına 2002 yılı Nisan ayında başlanılmış olup, bir yıl boyunca 18 m yükseklikteki direkt anemometre ile hız ve yön cihazı ile de yön ölçümü yapılmıştır. 2003 yılı Mayıs ayından itibaren 20 m yükseklikteki direk ile ölçümlere devam edilerek, 2005 yılı Ocak ayı sonuna kadar ölçüm yapılmıştır. 18 m ve 20 m yüksekliklerdeki direklerden ölçülen değerlerin bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi açısından uygun olduğunu göstermesinden itibaren, standart veya daha yüksek konumdan ölçüm yapmak için çalışmalar başlatılmıştır. 2004 yılı Aralık ayında bölgeye 40 m yüksekliğindeki direk ile yeni bir ölçme sistemi yerleştirilerek, yerden 40., 20. ve 10. m'lerde rüzgâr hızı, 40. m de rüzgâr yönü, 2. m de ise sıcaklık, basınç ve nem ölçümüne başlanılmıştır.

Ölçüm yapılan, Selçuk Üniversitesi; Alaaddin Keykubat Kampüsü, Meram kampüsü, Karaman kampüsü ve ilçelerde bulunan Meslek Yüksek Okullarıyla birlikte 75.000'in üzerinde öğrenci ve personele sahiptir.

## RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ

### Rüzgâr Hızı ve Yönü Ölçümleri

Ölçüm sonuçları, 2003 yılından Mayıs-Aralık arası 8 aylık, 2004 yılının tamamını ve 2005 yılının Ocak ayı olmak üzere toplam 21 aylık süreyi kapsamaktadır. Bu süre zarfında toplam 92016 veri olması gerekirken veri sayısı 82650 civarında gerçekleşmiş olup, veri kaybı

yaklaşık % 10 dur. Bu değer, ölçüm standartları için kabul edilen üst sınır değerdir [8]. Aynı sayıda rüzgâr yön değerleri de ölçülmüştür. Rüzgâr yön değerlerinin ölçme yerinin güç ve enerji değerlerine doğrudan etkisi olmayıp, sadece türbinlerin yerleştirilmesinde önem arz etmektedir. Ölçülen verilerin Witem programı ile değerlendirilmesiyle önce aylık ortalama rüzgâr hızı ve hız dağılım frekans grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler ve bölgenin rakım ve pürüzlülük gibi verileri yardımıyla Alwin ve Excel programları kullanılarak aylık ve yıllık ortalama rüzgâr hızları, Weibull dağılım grafikleri ve katsayıları elde edilmiştir. Bazı aylarda, 21 aylık ortalama rüzgâr hızı (5.52 m/s) değerinden daha yüksek hızlar elde edilmiştir.

Yapılan ölçme sonuçlarını aylık ve yıllık ortalama değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Kampüs Rüzgâr Ölçüm İstasyonu Aylık Ortalama Karakteristik Verileri (Yükseklik:20m)

Aylar ve Ortalama Değerler	2004'de Ortalama Rüzgâr hızı, (m/s)	2004 Standart Sapma, S	2004 Türbülans Yoğunluğu I
Ocak	4.68	0.573	0.122
Şubat	6.03	0.824	0.137
Mart	5.57	0.761	0.137
Nisan	5.46	0.810	0.148
Mayıs	5.22	0.852	0.163
Haziran	5.66	0.867	0.153
Temmuz	6.72	0.934	0.139
Ağustos	6.17	0.942	0.153
Eylül	5.75	0.812	0.141
Ekim	4.27	0.734	0.172
Kasım	5.17	0.810	0.157
Aralık	3.50	0.510	0.146
Ortalama	5.37	0.786	0.147

Not: 2003 yılında yapılan 8 aylık hız ölçümünün ortalama değeri 5.73 m/s dir. Ocak 2005 için ortalama rüzgâr hızı ise 5.33 m/s dir.

Bir yıl süreli ölçüm yeterli olduğu için, 2003 ve 2005 yılı hız değerlerinin sadece ortalaması tabloda not olarak belirtilmiştir.

Rüzgâr hızı frekans dağılımının ölçüm periyodu

süresince değişimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Ölçüm sonuçlarının tahmini yoğunluk fonksiyonu, Weibull fonksiyonuna (denklem 1) uyarlanabilir [10]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.1)$$

Burada,  $f(v)$  gerçekleşen rüzgâr hızı  $v$  (m/s)'nin frekansını,  $c$  ölçek parametresi (karakteristik rüzgâr hızı)  $k$  ise şekil parametresi olarak tanımlanmaktadır. Buradaki  $k$ ,  $v$  ve  $c$  değerleri en küçük kareler gibi eğri uyarlama metodu uygulanarak ölçüm değerlerinden yaklaşık olarak belirlenir. Birikimli (kümülatif) Weibull dağılım fonksiyonu ise denklem (2) den hesaplanmıştır [9]:

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'deki  $k$  değeri yapılan ölçüm sonuçlarından 1.62 olarak hesaplanmıştır. Şekil parametresi  $k$ 'nın ikiye (2) eşit olduğu frekans dağılımı Rayleigh dağılımı olarak tanımlanır.

### Yıllık Ortalama Değerlerin Hesaplanması

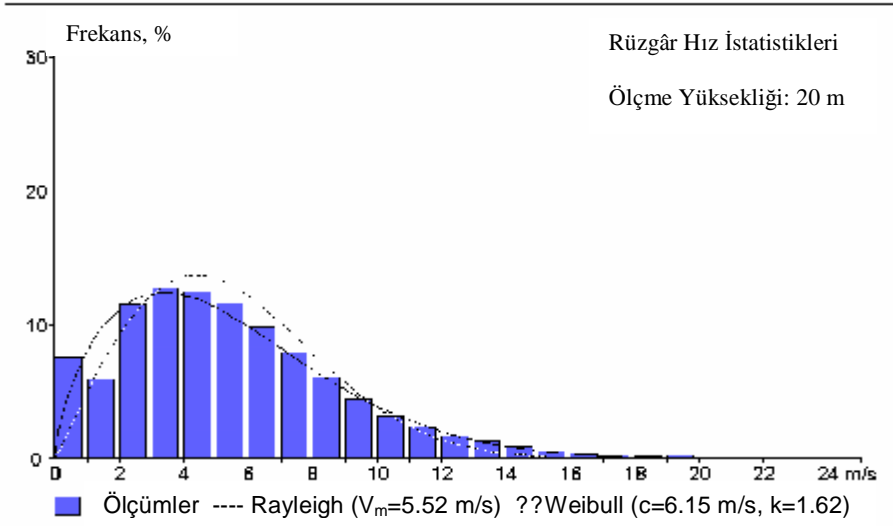
Bütün rüzgâr hızı ve yön ölçüm verileri birlikte ve aylık olarak ayrı ayrı değerlendirilerek ortalamaları Tablo 3.1 de özet olarak verilmiştir. Bu tablo değerlerinden 2003 den 8 aylık (Mayıs-Aralık), 2004 den 12 aylık ve 2005 den 1 aylık (Ocak) olmak üzere toplam 21 aylık verilerin ortalamalarından elde edilmiştir. Veri alınan ayların rüzgâr hızı frekans dağılımı Alwin programı kullanılarak Şekil 1'deki gibi bulunmuştur.

Ortalama rüzgâr hızı verilerinin standart sapma miktarının ( $S$ ) bu verilere ait ortalama hız değerine ( $V_m$ ) oranı, türbülans yoğunluğu ( $I$ ) olarak adlandırılmaktadır. Türbülans yoğunluğu sınıfları Tablo 3.2'de verilmiştir. Türbülans yoğunluğunun 0.25 den büyük olduğu alanlara rüzgâr enerji santrali kurmaktan kaçınılmalıdır [9]. Türbülans Yoğunluğu (3.3) ifadesiyle hesaplanmıştır [9]:

Yer: Selçuk Üniversitesi  
Ölçüme Başlama: 01.05.2003

Rakım: 1240 m  
Ortalama Ölçme Süresi: 573 gün

Sıcaklık: 12 °C  
(10 dakikalık 82650 veri)



Şekil 1. Mayıs 2003-Ocak 2005 Arası Rüzgâr Hız Dağılım Frekans (%) Değerleri

$$I = \frac{\sigma}{v_m} \quad (3.3)$$

Tablo 3.2. Hesaplanan Türbülans Yoğunluğu Değerlerinin Sınıflandırılması [9]

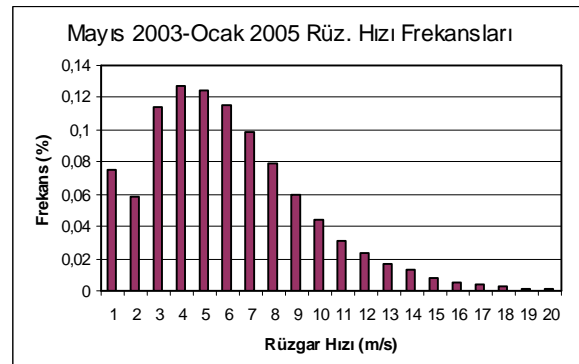
Türbülans yoğunluğu (I)	Yoğunluk sınıfı
0.00 < I ≤ 0.10	Düşük
0.10 < I ≤ 0.25	Orta
I > 0.25	Yüksek

Türbülans yoğunluğu seviyesinin yüksek olması enerji üretim miktarını düşürür, rüzgâr türbini üzerine etkiyen kuvvetlerin şiddetini ve malzeme yorulmasının hızını artırır. Bu durum rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Türbülans yoğunluğunun belirlenmesi için öncelikle rüzgâr hız ölçüm serilerinin ortalama hızı ve standart sapması belirlenmelidir. Standart sapma önemli bir kavram olup, rüzgâr hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak için kullanılır [9].

Rüzgâr hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s, rüzgâr yön verilerinin standart sapması ise 3° (derece) ile

75° arasında olmalıdır [9]. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması demek o alandaki rüzgâr rejiminin düzenli olması anlamına gelmektedir. Tablo 3.1'de verilen 2004 yılı verileri incelendiğinde, ortalama hız standart sapmasının 0.786, ortalama türbülans yoğunluğunun 0.147 ve veri listesinden yön standart sapmasının ise 11.7° olarak gerçekleştiği bulunmuştur. Bunlar, Uluslararası öngörülen standartlara uygun değerlerdir.

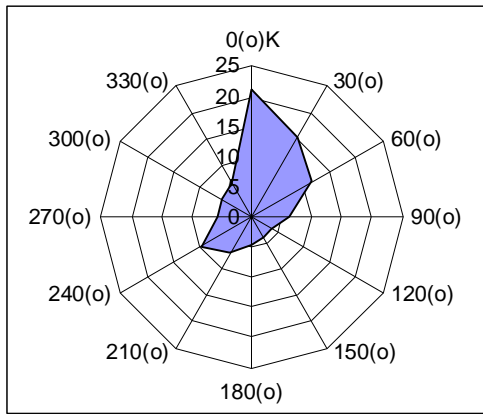
Mayıs 2003-Ocak 2005 süresince ölçülen rüzgâr hızı frekanslarının Excel programı ile çizilmiş grafiği, Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Mayıs 2003-Ocak 2005 Arası Rüzgâr Hız Dağılım Frekans (%) Değerleri

Grafikten de görüldüğü gibi, 3 ile 6 m/s hız aralığının frekansı daha yüksek olup, bu hız aralığında kurulacak bir türbin, verimli bir şekilde çalışabilecektir. Grafikteki bütün değerler dikkate alındığında, ortalama rüzgâr hızı 5.52 m/s olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3'de belirtilen ölçüm periyodunda görüleceği gibi, bölgenin hâkim rüzgâr yönü 0 (360) derecede olup, hâkim yön kuzeydir.



Şekil 3. Mayıs 2003- Haziran 2004 Arası Rüzgâr Yön Dağılım Frekans Değerleri

Ölçme sistemlerinde hata ve belirsizlikler cihaz seçimi, kalibrasyonu, değer okuma ve data değerlendirme birimin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ölçüm istasyonunda rüzgâr hızı ölçümü  $\pm 0.001$  m/s, yön değerleri ise  $\pm 1^\circ$  hassasiyetle ölçülmüştür. Ölçüm yapılan yerdeki havanın yoğunluğu ( $\rho$ ) ise  $\pm 0.01$  hassasiyetle ölçüm yerinin rakım ve ortalama sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanmıştır [8]. Birim alan için rüzgar gücü,

$$P_A = 0.5 \rho v^3 \quad (3.4)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır [8]. Burada,  $\rho = 1.085 \pm 0.01$  ( $\text{kg/m}^3$ ), ortalama rüzgâr hızı  $5.52 \pm 0.001$  (m/s) ve bölgede elde edilebilecek birim güç  $P_A$  ( $\text{W/m}^2$ ) 'dür. Kline ve McClintock [11] tarafından verilen belirsizlik analizine göre yapılan ölçümlerdeki tahmini belirsizlik değeri  $\pm 0.8$  dur.

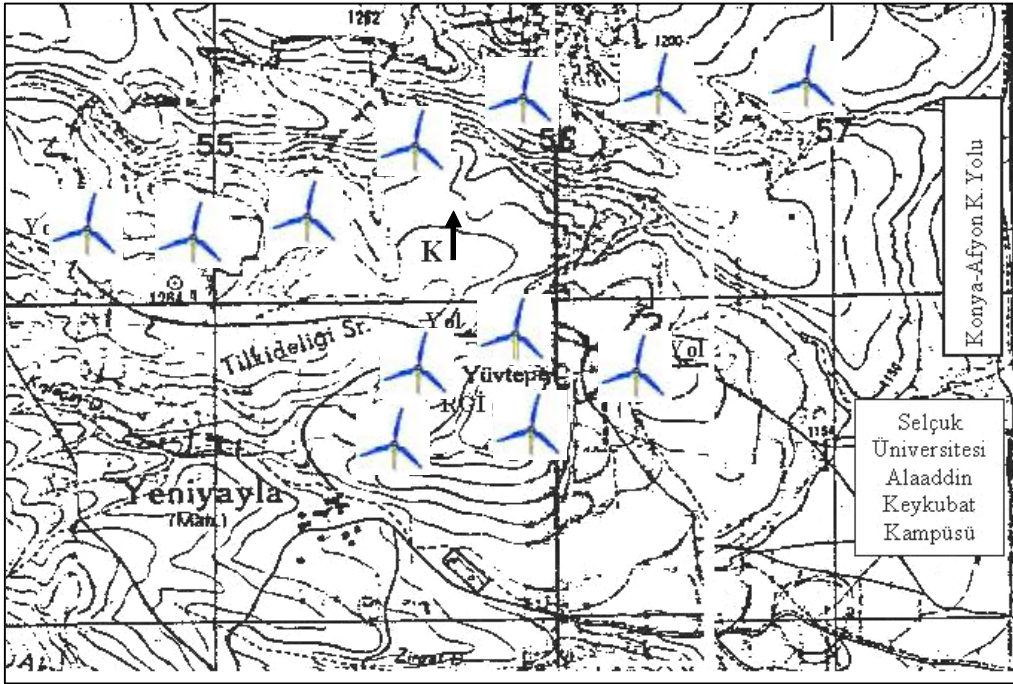
## TESİSİN KURULACAĞI YER HAKKINDA BİLGİLER

Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Konya Bölge Müdürlüğü'nün uzun yıllar ortalamalarına göre, bölgenin ortalama rüzgâr hızı 2.0 m/s, yön ortalaması  $0^\circ$  Kuzey ve sıcaklık ortalaması da  $12^\circ \text{C}$  olarak verilmektedir. Bu ölçümler, şehir merkezi içerisinde kalmış olan DMİ binasında yapıldığından, rüzgâr santrali hesapları için uygun değildir. Diğer yandan, Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından 50 m yükseklik ve 5 farklı yüzey durumu için yapılan Türkiye Rüzgâr Atlası çalışmasında [12], ölçüm istasyonu sayısının az olması sonuçların hassasiyetini azaltmış olmakla birlikte, Konya için verilen değerler bu çalışmada bulunan değerlerle uyumludur.

Rüzgâr santrali kurulması tasarlanan bölge, deprem yönünden 4. bölge içerisinde bulunmakta olup, herhangi bir risk taşımamaktadır [13]. Rüzgâr türbini kurulması planlanan yerlerin hemen 100 m yakınında asfalt yol olduğundan, ulaşım açısından hiçbir problem yoktur. Bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 10 katı kadar mesafe içinde ise, bu nesne yakın çevresel engel olarak tanımlanır. Daha uzak mesafedeki nesnelere, engel sınıfına girmez ve arazi pürüzlülüğü olarak değerlendirilir [14]. Proje yerinde, hakim rüzgar yönünde rüzgâr rejimini etkileyecek herhangi bir olumsuz faktör yoktur. Proje sahası, en yakın yerleşim yerine 600-700 m mesafede ve yaklaşık 100 m daha yüksek rakımdadır [15].

Rüzgâr türbinlerinden üretilebilecek enerji miktarını doğruya yakın bir şekilde hesap edebilmek için, özellikle hâkim rüzgâr yönünde en az 1000 m mesafeye kadar olan engeller net olarak belirlenmelidir [14]. Rüzgâr türbini kurulacak bölgenin en yakınındaki yerleşim yeri yüksekliği, rüzgâr türbini zemin yüksekliğinden daha aşağıdadır. Bu nedenle bölgeye rüzgâr türbini kurulması açısından engel teşkil etmemektedir. Şekil 4'de verilen harita üzerinde ölçüm yapılan rüzgâr gözlem istasyonu (RGİ) ile ve bu çalışmada önerilen rüzgâr türbini





Şekil 4. Rüzgâr Enerjisi Gözlem İstasyonu ve Önerilen Türbin Yerleri

santrallerinin yerleri rüzgâr türbini resimleri ile gösterilmiştir. Verilen haritanın karmaşıklığını önlemek için önerilen daha fazla sayıdaki türbin yerleri haritada gösterilmemiştir.

## KURULACAK TESİS

### Kapasite Seçimi

Yıllık veya ön rapor için en az altı aylık ortalama rüzgâr ölçüm sonuçları elde edildikten sonra, ölçüm noktasına ve yakın çevresine hangi türbinlerin kurulacağı belirlenebilir [14, 15, 8]. Türbin büyüklüğü ve kule yüksekliğinin seçilmesinde kapasite faktörü (KF) en önemli etkidir. KF değeri, kurulacak türbinden mevcut rüzgâr değerleriyle bir yılda üretilebilecek elektrik enerjisinin, türbin tam gücünde üretilecek enerjiye oranı olarak hesaplanır ve rüzgâr türbininin enerji performansını ifade eder [9]:

$$KF = \frac{YEÜ}{(NG \cdot 8760)} \quad (5.1)$$

Burada; YEÜ yıllık gerçek enerji üretimini, NG nominal

türbin gücünü ve 8760 katsayısı ise türbinin yıllık çalışma saatini göstermektedir.

Tipik bir rüzgâr türbininin KF değeri, rüzgâr türbininin kurulduğu yerin rüzgâr kapasitesine bağlı olarak %20 ile %35 arasındadır [8]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, KF değeri %25 ve üzeri olan bölgelere rüzgâr santrali kurulmasına izin vermektedir [16]. KF'nün hesaplanması için kurulacak türbinin nominal gücü, bütün güçlerdeki verimi, ilk çalışmaya başlama ve devreden çıkma rüzgâr hızı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Yıllık enerji üretiminin hesaplanmasında, türbin kurulacak yerin rakımı ve hava yoğunluğu değerleri de gereklidir. Ölçüm yapılan yükseklikten daha yüksek kule yükseklikleri için rüzgâr hızının hesaplanmasında ise, pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük yüksekliği değerleri önemlidir. Bu çalışmada, 20 m yüksekliğindeki direkt Nisan-Mayıs 2003 süresince 2 anemometre, 40 m yüksekliğindeki direkte ise 2005 yılı Ocak ayı süresince 3 farklı anemometre ile yapılan ölçümler sonucunda bölgenin pürüzlülük sınıfının 1.5 ve pürüzlülük uzunluğunun da 0.055 m olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, RGI'nun bulunduğu bölgenin bitki örtüsü ve yeryüzü

şekillerinin ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.1'de, ölçme periyodundaki veriler için Windpower [17] programı kullanılarak hesaplanan KF değerlerinin, en büyükleri 600 ile 2750 kW gücündeki türbinlerde gerçekleştiği görülmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu, KF 27-29 arasında bulunmuştur ve bunlar standartlara uygun değerlerdir. Türbinlerin bazı özellikleri ve bir yılda üretilebilecek elektrik enerjisi değerleri de, Tablo 5.1'de verilmiştir.

bütün birimlerinin mevcut ve yakın gelecekteki elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaya yetecek kadar bir üretim olan 30 Milyon kWh/yıl düşünülmüştür. Bunun için, 0.6 MW'lık türbinden 20 adet, 1 MW'lıktan 13 adet, 1.5 MW'lıktan 8 adet, 2 MW'lıktan 7 adet, 2.3 MW'lıktan 5 adet ve 2.75 MW'lıktan 5 adet rüzgâr türbini gerekecektir.

Üçüncü durum (Durum III) Selçuk Üniversitesinin bütün birimlerinin elektrik enerjisi ihtiyacı ve Alaaddin Keykubat Kampüsü'nün kışın ısınmasını karşılamaya yetecek kadar bir üretim miktarıdır. Bunun için 60 Milyon

**Tablo 5.1:** 600-2750 kW Gücündeki Bazı Rüzgâr Türbinlerinin Özelliklerinin, Mayıs 2003-Ocak 2005 Arası 1.5 Pürüzlülük Sınıfı ve 0.055 m Uzunluğu İçin Enerji Üretimlerinin Karşılaştırılması.

Rüzgâr Türbini \ Gücü (kW)	Türbin A (600)	Türbin B (1000)	Türbin C (1500)	Türbin D (1500)	Türbin E (2000)	Türbin F (2300)	Türbin G (2750)
Toplam Üretilen Enerji, (kWh/yıl)	1491083	2354602	3796258	3747534	4670649	5743989	6410024
Orta. Kapasite faktörü (KF)	28	27	29	29	27	28	27
Türbin Rotor çapı ,(m)	48	60	77	72	80	90	92
Türb.Göbek yüksekliği, (m)	80	80	80	80	80	80	80
Devreye Gir. Rüz.hızı (m/s)	4	3.5	3	3	4	3	3
Devr.Çıkış Rüz. hızı, (m/s)	25	20	20	25	25	25	25
Mak. Güç Rüz. Hızı (m/s)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Göbek Eks. Rüz. Hızı (m/s)	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
Giriş bir. güç yoğunluğu. (W/m <sup>2</sup> )	441	421	421	421	421	421	421
Çıkış bir. güç yoğunluğu. (W/m <sup>2</sup> )	94	95	93	105	106	103	110
Birim enerji yoğunluğu (kWh/m <sup>2</sup> /yıl)	824	833	815	920	929	903	964

### Optimum Kurulacak Güç, Ünite Sayısı ve Kapasitesi

Optimum kurulacak güç, ünite sayısı ve kapasitesi aşağıdaki üç ayrı durum için değerlendirilmiştir.

Birinci durumda (Durum I); Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü'nün yıllık 11.5 Milyon kWh/yıl ihtiyacı olan mevcut elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaya yetecek kadar bir üretim için 0.6 MW'lık türbinden 8 adet, 1 MW'lıktan 5 adet, 1.5 MW'lıktan 3 adet, 2 MW'lıktan 3 adet, 2.3 MW'lıktan 2 adet ve 2.75 MW'lıktan 2 adet gerekeceği düşünülmüştür.

İkinci durumda (Durum II); Selçuk Üniversitesinin

kWh/yıl üretim ve 0.6 MW'lık türbinden 39 adet, 1 MW'lıktan 25 adet, 1.5 MW'lıktan 16 adet, 2 MW'lıktan 13 adet, 2.3 MW'lıktan 10 adet ve 2.75 MW'lıktan 10 adet rüzgâr türbini gerekecektir.

### Tesis Giderlerinin Hesaplanmasındaki Etkenler

Elektrik enerjisi üretim santrallerinin maliyetleri genelde şu kalemlerden oluşmaktadır:

- Yatırım maliyeti: Güç santrallerinin inşaatı ve şebekeye bağlanmasını içermektedir.

- İşletme maliyetleri: Tesisin işletilmesi, yakıtının sağlanması ve bakımını kapsamaktadır.
- Finansman: Yatırımcı ve bankalara geri ödemesi gereken miktarı göstermektedir.

Ancak rüzgâr santralleri için projenin maliyeti ödendikten sonra, yani geri ödeme süresinin tamamlanmasını takiben, tesisin sadece işletme ve bakım maliyetleri söz konusu olacaktır. Rüzgâr türbini yatırım maliyeti toplam maliyetin % 75-90'ını oluşturmaktadır. Rüzgâr gücü ile üretilen elektrik enerjisi maliyetleri, 4.7 EuroCent/kWh değerindedir [4]. Türbin maliyeti ise, kW güç başına halen 600-900 Euro'dur. Projenin hazırlanması ve tesisin kurulma maliyetleri kW başına 200-250 Euro olup, bu değer de eklenmesini gerektirmektedir. Bu da, rüzgâr türbinlerinin toplam maliyeti kW kurulu güç başına 1000 Euro'ya kadar ulaşmaktadır.

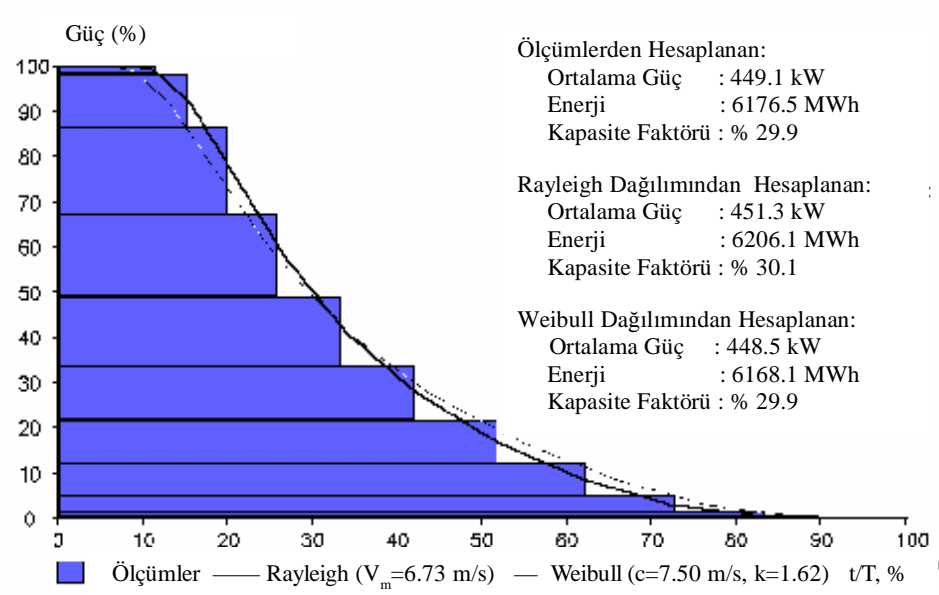
Rüzgâr elektrik santralının işletme maliyetleri çok düşük olup, yıllık giderleri olarak üretilen (kWh) elektrik fiyatının yaklaşık % 1-2'si mertebesinde. Bu maliyet, arazi kirası, bakım ve sigorta primlerini kapsamaktadır [6].

Şekil 5'de 1500 kW güçlü Türbin C için bölge değerleriyle üretililecek enerji ve kapasite faktörü

değerleri Alwin programı kullanılarak bulunmuştur. Şekilde, düşey eksen üretilen güç miktarının yüzdesini, yatay eksen ise belirli zaman periyodundaki ölçüm frekansına karşılık gelen zaman (t)'nin yıllık toplam ölçüm süresi (T)'ye oranını göstermektedir. Örneğin Rüzgâr türbini, t/T oranının %43 değeri için 330-510 kW arasında güçle çalışmaktadır. Ortalama kapasite faktörü ise yaklaşık %30 olarak gerçekleşmiştir. Rayleigh ve Weibull dağılımlarından bulunan KF değerleri arasında sadece 0.2 fark vardır. Bu değerler, birbiriyle uyumludur ve sınır değer %25'in oldukça üzerinde olan KF değeri türbin tesis etmek için yeterlidir.

### Türbin Tipi ve Parametreleri

Şekil 6'da, 1000 kW gücünde kaldırma kuvveti (stall) kontrollü bir türbin ile 2000 kW gücünde kanat yalpalama (pitch) kontrol sistemine sahip iki türbin karşılaştırılmıştır. Bu türbinlerin rüzgâr hızlarına karşılık gelen güç eğrilerinden, 1000 kW türbinin yüksek hız frenleme sistemi olmasından dolayı, üretilen güç bir miktar azalır. Bunun nedeni ise, kanada uygulanan direnç kuvvetinin kaldırma kuvvetinden daha etkin olmasından

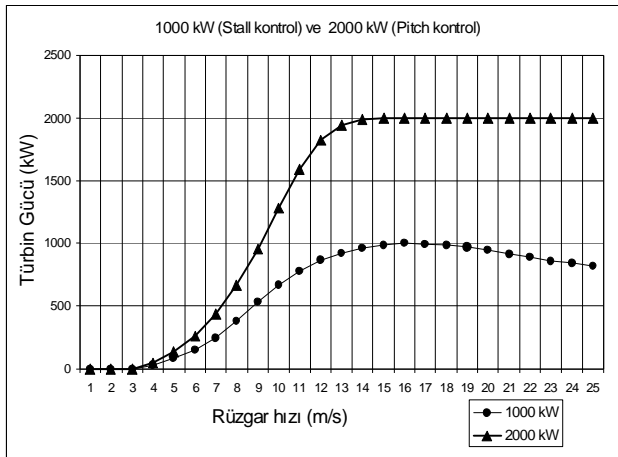


Şekil 5. 1500 kW Güçlü Önerilen Türbin C ile Bölgede Üretililecek Enerji ve Kapasite Faktörü Değerleri



kaynaklanmaktadır. Yani, rüzgâr hızının artmasıyla azalan kaldırma kuvvetinden dolayı türbin gücü düşmektedir. 2000 kW türbinde ise, yüksek rüzgâr hızlarında da türbin sabit maksimum güç üretmeye devam edecek şekilde, kanat hücum açısı otomatik olarak ayarlanmaktadır. Böylece, yeni kontrol sistemiyle donatılmış olan 2000 kW güçlü türbin beklenmedik yüksek rüzgâr hızlarında da daha yüksek verimle çalışmaya devam edebilmektedir.

Ekonomik analizi yapılan rüzgâr türbinlerinin tamamında göbek yüksekliği 80 m alınmıştır. Göbek eksenindeki rüzgâr hızı Alwin ve Windpower programı kullanılarak 6.9 m/s olarak hesaplanmıştır. Kule tipi olarak da, konik boru tipi kuleler kullanılacağı düşünülmüştür. Dişli kutusu özellikleri, paralel eksenli planet dişli sistemleridir.



Şekil 6. Stall (1 MW) ve Pitch Kontrollü (2 MW) Rüzgâr Türbinleri Rüzgâr Hızı-Güç Grafiği [17]

Tasarlanan rüzgâr elektrik santrali direkt Ulusal şebeke ile birlikte çalışacağı için, herhangi bir depolama sistemine ihtiyaç yoktur. Üretilen fazla elektrik enerjisi, şebekeye verilerek satılabilecektir. Uygulamada, belirli dönemlerde üretilen ve tüketilen elektrik enerji miktarı ölçülerek tesisin ekonomikliği değerlendirilir.

Kesin proje hazırlanması için 1 yıllık standart ölçümlerin bitmesinden itibaren 3 ay, inşa ve işletmeye alınma süresi için de 3 ay gibi bir süre olmak üzere toplam 18 aylık süre öngörülmektedir.

## TESİS YATIRIM PLANI VE EKONOMİK DEĞERLENDİRME

Durum I için  $3 \times 1.5 = 4.5 \text{ MW} \times 1 \text{ Milyon } \text{₺} = 4.5 \times 10^6 \text{ ₺}$ , Durum II için  $8 \times 1.5 = 12 \times 1 \times 10^6 \text{ ₺} = 12 \times 10^6 \text{ ₺}$  ve Durum III için ise,  $16 \times 1.5 = 24 \times 1 \times 10^6 \text{ ₺} = 24 \times 10^6 \text{ ₺}$  döviz gerekmektedir. Eğer kurulu gücü 600 kW ve bir kısmı yerli imkanlarla yapılan Türbin A kullanılırsa; üretici firmanın verdiği teklif değerlendirildiğinde, Durum I için  $8 \times 0.6 = 4.8 \text{ MW}$  gücü karşılayacak yatırım;  $8 \times 432000 = 3.456 \times 10^6 \text{ ₺}$  ithalat ve  $8 \times 238000 = 1.904 \times 10^6 \text{ ₺}$  yerli katkı olmak üzere toplam  $5.36 \times 10^6 \text{ ₺}$  gerekmektedir. Burada, 600 kW'lık bir türbinin toplam maliyeti 670000 Euro olup, bunun 238000 ₺ kısmı (%35.52) kısmı yerli katkı ile sağlanabileceği düşünülmüştür. Durum II için  $20 \times 0.6 = 12 \text{ MW}$  güce karşılık  $20 \times 0.67 \times 10^6 \text{ ₺} = 13.4 \times 10^6 \text{ ₺}$  yatırım gerekir. Durum III için ise  $39 \times 0.6 = 23.4 \text{ MW}$ ,  $39 \times 0.67 \times 10^6 \text{ ₺} = 26.13 \times 10^6 \text{ ₺}$  döviz gerekmektedir.

Tablo 6.1'de üç farklı marka ve yedi değişik tipteki türbinlerin özellikleri ve ekonomik analiz için kullanılacak değerleri verilmiştir. Bu tablo hazırlanırken, şu kabuller yapılmıştır: Yatırım, kuruluşun ve ortaklarının elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için kurulmuş ise, tesis peşin para ile kurularak, aylık veya yıllık faiz ödemeleri yerine bu değerler gelir olarak kaydedilir. Yapılan hesaplamalarda yatırım ve gelir döviz olarak değerlendirildiği için, faiz oranı dikkate alınmamıştır.

Burada masraflar olarak, lisans alma (1-5 MW gücü arası bedel 5 milyar TL), yıllık lisans ücretleri (üretilen kWh başına 75 TL) ve sistem kullanım ücreti 21134 TL/kWh'dir. Ayrıca, üretilen elektriğin kWh bedelinin %1-2'si kadar işletme masrafı olmaktadır. Rüzgâr santrallerinde teşvik için lisans alma bedelinin %1 alınırken, yıllık lisans bedelleri de ilk 8 yıl alınmamaktadır [16].

Rüzgâr santrali kurulu gücünün birim maliyeti yaklaşık 1000 €/kW değerindedir [18]. Dolayısıyla, 1 MW'lık bir sistem için yaklaşık  $1 \times 10^6 \text{ ₺}$ 'ya ihtiyaç vardır. Türbin gücü büyüdükçe birim fiyatın azaldığı, güç küçüldükçe

de birim fiyatın arttığı görülmektedir. Ayrıca, kule yüksekliği, hız kontrol ve devir yükseltme sistemlerindeki farklılıklar da türbin fiyatlarını değiştirmektedir. Rüzgâr türbini santralleri, yapılacak tasarrufla lisans ücretlerinin alınmadığı ilk 8 yılda tesis yatırım bedelini geri ödenmesi beklenir.

Yatırım projelerinin değerlendirilmesinde temel teşkil eden faktörler arasında yatırım tutarı ile söz konusu yatırımın ömrü ve bu ömrün sonundaki hurda değeri ile elde edilen faydalar sayılabilir. Rüzgâr çiftliklerinin sökülme maliyetleri yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri sökülme maliyetlerini karşılamaktadır [19].

Tablo 6.1'deki YEEG hesaplanması şu şekildedir. Elektrik kurumundan satın alınan elektrik için kWh başına

verilen YEEG değerleri bulunur. İM değerleri ise, YEEG değerlerinin %1.5'i olarak alınmıştır. YİLB ve YÜLB değerleri elektrik kurumunun kWh başına aldığı 75/1775000 Euro'nun, ÜEE değeri ile çarpımıyla elde edilmiştir. YSKB değeri ise elektrik kurumuna kWh başına aldığı 21134/1775000 Euro'nun ÜEE değeri ile çarpımıyla hesaplanmıştır. YNG değeri, YEEG değerinden YTG çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Sonuçta, geri ödeme süresi (GÖS) aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunmuştur [20]:

$$GÖS = TF/YNG \quad (6.1)$$

En düşük GÖS, 600 kW güçteki Türbin A için 5.21 yıl olarak elde edilmiştir. Fakat bölgeye birim alandan

**Tablo 6.1:** Tablo 5.1'deki Veriler Kullanılarak Euro (€) Biriminde Maliyetlerin ve GÖS'lerinin Karşılaştırması.

Türbin Tipi \ Gücü (kW)	Türbin A 600	Türbin B 1000	Türbin C 1500	Türbin D 1500	Türbin E 2000	Türbin F 2300	Türbin G 2750
ÜEE (kWh/yıl)	1554533	2453743	3918718	3854607	4802837	5911290	6528570
TF (€)	-518236	-1000000	-1450000	-1400000	-1950000	-2250000	-2675000
YEEG (€)	118446.59	187041.62	301561.90	297691.43	371020.57	456283.07	509190.64
İM (€)	-1184.47	-1870.42	-3015.62	-2976.91	-3710.21	-4562.83	-5091.91
YÜLB (€)	-63.00	-99.49	-160.41	-158.35	-197.35	-242.70	-270.85
YİLB (€)	-63.00	-99.49	-160.41	-158.35	-197.35	-242.70	-270.85
YSKB (€)	-17753.55	-28035.02	-45200.07	-44619.93	-55610.98	-68390.68	-76320.82
YTG (€)	-19064.02	-30104.42	-48536.50	-47913.54	-59715.89	-73438.92	-81954.41
YNG (€)	99382.57	156937.21	253025.41	249777.89	311304.68	382844.15	427236.22
GÖS (yıl)	5.21	6.37	5.73	5.60	6.26	5.88	6.26

ÜEE: Üretilen Elektrik Enerjisi, TF:Türbin Fiyatı, YEEG: Yıllık Elektrik Enerjisi Geliri, İM: İşletme Masrafı, YÜLB: Yıllık Üretim Lisans Bedeli, YİLB: Yıllık İletim Lisans Bedeli, YSKB: Yıllık Sistem Kullanım Bedeli, YTG: Yıllık Toplam Gider, YNG: Yıllık Net Gelir, GÖS: Geri Ödeme Süresi, Giderlerin önüne tabloda '-' işareti konmuştur. Not: Bazı türbin fiyatları, kWh başına yaklaşık üretim maliyeti dikkate alınarak belirlenmiştir.

Üniversite 119500+KDV TL=141000 TL/kWh ödemektedir. Bir Euro=1775000 TL olarak alınırsa (1 Mart 2005 kur değeri), elektrik kWh maliyeti yaklaşık 0.08 Eurocent'dir. ÜEE kullanıldığında bu paranın elektrik kurumuna ödenmesi yerine rüzgâr enerji santraline gelir olarak kalacaktır. ÜEE değeri birim kWh maliyeti ile çarpılırsa, her bir türbin için Tablo 6.1'de

daha fazla faydalanabilmek için bir MW'dan daha büyük güçlü türbinlerin yerleştirilmesi uygun olacaktır. Bu türbinlerden en düşük GÖS 1,5 MW güçteki Türbin D için 5.60 yıl olarak elde edilmiştir. Sistemin bu türbinlerden oluşması durumunda, birinci duruma 3\*1.5=4.5 MW, ikinci duruma 8\*1.5=12 MW ve üçüncü duruma da 16\*1.5=24 MW kurulu güç

gerekmektedir. Türbin sayısının artması, GÖS'ni değiştirmez. Çünkü türbin sayısı, yıllık üretilen enerji ve giderler ile çarpan durumundadır. Rüzgâr türbinlerinin literatürde yaklaşık ömrünün 25 yıl, mekanik aksamının ise 50 yıl süresince kullanılabileceği belirtildiği düşünüldüğünde, kurulacak rüzgâr enerjisi tesisinin Tablo 6.1'in en alt satırında bulunan geri ödeme sürelerinden karlı bir yatırım olacağı aşikardır.

## SONUÇ

Bu çalışmada, Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü bölgesindeki Yüv tepede kurulan rüzgâr ölçüm istasyonunda yapılan ölçümler değerlendirilerek, üç farklı marka ve yedi değişik tipteki türbin için ekonomik analiz yapılmış ve basit geri ödeme süreleri bulunmuştur. Ölçüm sonuçları ve istatistik hesapları tablo ve grafiklerle verilmiştir. Üç farklı durum için rüzgâr enerji santralının maliyet analizinde geri ödeme süresinin 5.21-6.37 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Literatürde, rüzgâr enerji santrallerinin ömrünün asgari 25 yıl olduğu düşünüldüğünde; yapılacak yatırım, ömrünün %25 kadar sürede kendini amorti etmektedir. Kalan %75 çalışma süresince ise, çok düşük bir işletme ve bakım maliyeti ile elektrik enerjisi üretimine devam etmektedir. Yurdumuzda, rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminin yaygın olarak gerçekleştirilmesi ile, milli ekonomiye azımsanmayacak oranda katkı sağlanabilecektir.

## TEŞEKKÜR

Bu araştırma, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No.1999/120) tarafından desteklemiştir.

## KAYNAKÇA

1. Haas, L. "Yeni Enerji Kaynağı: Rüzgâr Gücü", Deutschland, sayı 6, Say. 44-49 Aralık/Ocak 2002.
2. Moody, S. M.-Stuart, "A Blueprint to Achieve 12% of the World's Electricity From Power by 2020", Co-Chair G8 Renewable Energy Task Force 2001-2, European Wind Energy Association, 2002.
3. [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
4. Anonim, "Wind Power Economics", Renewable Energy House, Brussels, Belgium, 2004, ([www.ewea.org](http://www.ewea.org)).
5. Hvelplund, F., "Political Prices or Political Quantities, A comparison of Renewable Energy Support Systems", New Energy, 5/2001.
6. Oğuzer, C. (2001). "Rüzgâr Ölçüm Sistemlerinin Esasları", Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu, 5-7 Nisan 2001.
7. Anonim, "Wind is Power and The Environment", Renewable Energy House, Brussels, Belgium, September-2004.
8. Türksoy, F., "Rüzgâr Verisi Ölçümü ve Analizi", Rüzgâr Enerjisi Semp., 5-7 Nisan 2001.
9. Akkaş, A. A., "Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi", Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu, 5-7 Nisan 2001.
10. Patel, R. M., Ph.D., P.E., "Wind and Solar Power Systems", CRC Pres Boca Raton London New York Washington, D.C., 1999.
11. Kline, S.J., and McClintock, F.A., Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mech. Eng., p. 3, January 1953.
12. [www.eie.gov.tr](http://www.eie.gov.tr)
13. [www.deprem.gov.tr](http://www.deprem.gov.tr)
14. Çalışkan, M., "Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi", Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, s.179-190, 12-13 Ekim 2001 Kayseri.
15. Köse, F., "S.Ü. Kampüs Bölgesi Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Belirleme Ölçümleri ve Küçük Tip Bir Rüzgâr Türbini İmalatı", S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 99-120 nolu proje, 2003, Konya.
16. "Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği", T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 24836 sayılı Resmi Gazete, 04.08.2002.
17. [www.windpower.org](http://www.windpower.org)
18. [www.vestas.com](http://www.vestas.com)
19. Uyar, T.S., "Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme ve Rüzgâr Enerjisinin Entegrasyonu", 2000.
20. Anonim, "Sanayide Enerji Yönetimi Esasları", Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü Ulusal Enerji Tasarruf Merkezi, Cilt 4, 1997, Ankara.