



# FARKLI ANMA GÜÇLÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ÇEŞİTLİ KRİTERLERE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

**Aydoğan ÖZDAMAR**

Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü ve Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova/İzmir

Geliş Tarihi : 21.04.2000

## ÖZET

Bu çalışmada, rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek ve düşük olan alanlarda rüzgar elektriği elde edilmesinde hangi özelliklere sahip olan rüzgar türbinlerinin kullanılmasının daha uygun olacağı sorusuna cevap aranmıştır. Bu amaçla, yaygın olarak kullanılan değişik özelliklere sahip ve anma gücü 500 kW ve üzerinde olan 10 adet rüzgar türbini seçilerek, çeşitli kriterlere göre birbirleriyle karşılaştırılmışlardır. Bu karşılaştırmada objektif olabilmek için, 1999 yılı Ağustos ayında İzmir ili sınırları içinde rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan ve Aydın ili sınırları içinde rüzgar enerjisi potansiyeli orta düzeyde olan iki referans yerleşim biriminde 10 m yükseklikte rüzgar hız ölçümleri yapılmış ve bu ölçüm değerleri kullanılarak, herbir rüzgar türbininin ölçüm değerleri bilinen bu ayda üretebileceği elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra da, Elektrik İşleri Etüd İdaresi'nin ölçüm alınan alanlardaki mevsimsel rüzgar enerjisi değişimlerine benzer değişim gösteren en yakın ölçüm istasyonlarındaki yıllık rüzgar hız ölçümlerinden yararlanılarak, incelenen rüzgar türbinlerinin bir yılda üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarları 10 m ve 70 m kule yükseklikleri için bulunmuştur. Ardından da, rüzgar türbinlerinin birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için, incelenen rüzgar türbinlerinin bir yılda üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarları, rüzgar türbinlerinin fiyatları, türbin pervanesinin süpürme alanı gibi özellikleri kullanılarak; rüzgar türbininin 20 yıl kullanımı için birim elektrik enerjisi maliyeti, birim nominal güç maliyeti, türbin pervanesi birim süpürme alanı enerjisi, yatırım giderleri geri ödenme süresi, rüzgar türbini kapasite faktörü ve birim enerjiye düşen rüzgar türbini fiyatı kriterleri tanımlanarak hesaplanmıştır. Son olarak da, bu kriterlerden yola çıkılarak, incelenen rüzgar türbinleri, ölçüm alınan her iki alan için birbirleriyle karşılaştırılmış ve bulunan sonuçlar yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Enerji, Yenilenebilir enerji kaynakları, Rüzgar türbinleri

## VERGLEICH VON WINDTURBINEN UNTERSCHIEDLICHER NENNLEISTUNG NACH VERSCHIEDENEN KRITERIEN

### ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde die Antwort auf die Frage gesucht, welche Eigenschaften eine Windturbine in den mittelmaßigen und besseren Windstandorten zur Windstromerzeugung haben soll? Zu dem Zweck wurden 10 unterschiedliche in weltweit eingesetzten Windturbinen mit Nennleistung 500 kW und mehr gewählt und nach verschiedenen Beurteilungskriterien verglichen. Für einen allgemeingültigen, einsatzortunabhängigen Vergleich wurden Windmessungen im August 1999 in 10 m Höhe in İzmir, wo das Windenergiepotential hoch ist, und in Aydın, wo das Windenergiepotential mittelmäßig ist, durchgeführt. Mit Hilfe dieser Messergebnisse wurde die von den betrachteten Windturbinen zu produzierende Energiemenge berechnet. Danach wurde die zu produzierende Energiemenge der Windturbinen in 10 m und in 70 m Höhe für 1 Jahr ausgerechnet, wobei die jährlichen Messergebnisse von 2 Stationen der staatlichen Behörde für Stromangelegenheiten nahe der Messorten zur Hilfe genommen. Es wurde dabei vorausgesetzt, daß die monatlichen Schwankungen des Windenergiepotentials in Messorten und in Stationen der staatlichen Behörde für Stromangelegenheiten gleich bleibt. Anschließend wurden die Kennwerte wie Energieeinheitskosten, spezifischer Nennleistungspreis, flächen spezifischer Preis, Rückzahlungszeit der Investitionskosten, Kapazitätsfaktor und Turbinkosten pro

Jahreskilowattstunde definiert und berechnet. Letzlich wurden die Windturbinen ausgehend von den berechneten Kennwerten untereinander für beide Messorte verglichen und die Ergebnisse interpretiert.

**Schlüsselwörter :** Energie, Erneuerbare energien, Windturbinen

## 1. GİRİŞ

Bir çok ülke gibi Türkiye de, rüzgardan elektrik enerjisi eldesi konusunda son bir iki yıldır atılım içindedir. 1998 yılı sonu itibarıyla 679.25 kW'lık rüzgar elektriği kurulu gücü talebinin Enerji Bakanlığı'na ulaşmış olması (Ültanır ve Koçak, 1999) bunun en güzel göstergesidir. Bu konudaki talep, nasıl bir rüzgar türbini ile rüzgardan elektrik enerjisi üretilmesi daha doğru olur sorusunu yöneltenlerin sayısını arttırmıştır. Rüzgar türbini üreticilerinin bu konuda henüz teknik bir standarta ulaşamamış olması ve rüzgar elektriğinin ekonomikliğinin bir yerden başka bir yere değişkenlik gösteren rüzgar enerjisi potansiyeline sıkı sıkıya bağlı olması, bu sorunun cevabını zorlaştırmaktadır. Bu konudaki zorluklara, enerji üretimi için İzmir Çeşme Germiyan'daki dişli kutusuz senkron jeneratörlü 500 kW nominal güçlü Enercon-40 rüzgar türbinlerinin mi, yoksa İzmir Alaçatı'daki dişli kutulu asenkron jeneratörlü 600 kW nominal güçlü Vestas-44 rüzgar türbinlerinin mi veya 500 kW'lık iki rüzgar türbininin mi yoksa 1 000 kW'lık 1 adet rüzgar türbininin mi daha uygun olacağı soruları örnek olarak verilebilir. Bu konuda verilecek yanlış bir karar, ortalama ömrü 20 yıl kabul edilen rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi elde edilmesinin ekonomikliğini önemli ölçüde etkileyecektir.

Herhangi bir yerde rüzgar elektriği elde etme konusunda karar verirken dikkate alınan en önemli kriter, birim elektrik enerjisinin maliyeti, satış fiyatı ve bunlara sıkı sıkıya bağlı olan yatırım giderlerinin geri ödenme süresidir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin birbirleriyle karşılaştırılmasında, birim enerji maliyeti ve yatırım giderleri geri ödenme süresi öncelikle hesaplanmalıdır. TEDAŞ, İzmir Çeşme Germiyan Köyü'nde kurulu bulunan rüzgar türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin 1 kWh'ını ilk 10 yılda 0.17 DM'a ve daha sonraki 10 yılda da 0.075 DM'a alacağını taahhüt etmiştir. İzmir Alaçatı'daki rüzgar türbinlerinin 1 kWh'ının TEDAŞ tarafından satın alınma fiyatı da, ilk 6 yıl 0.16 DM, ikinci 6 yıl 0.15 DM ve son 6 yıl da 0.056 DM'dır (Ültanır, 1998). Rüzgardan elektrik üretmek isteyen yatırımcı, rüzgar elektriğinin 1 kWh'ını TEDAŞ tarafından ödenen ortalama 0.12 DM'ın yeterince altında üretebilirse yatırım yapacaktır. Elektrik üretimi amacıyla kullanılması düşünülen rüzgar türbinleri, birim enerji maliyeti ve yatırım giderleri geri ödenme süresinin yanında; birim nominal güç

maliyeti, türbin pervanesi birim süpürme alanı enerjisi, rüzgar türbini kapasite faktörü ve birim enerjiye düşen rüzgar türbini fiyatı açısından da birbirleriyle karşılaştırılabilirler. Bu karşılaştırma sonucunda; rüzgar elektriğinin mevcut sınır şartları içinde ekonomik olup olmadığı, rüzgar türbinlerinin teknolojik gelişmişliği ve üretim alanına uygunluğu gibi özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olmaktadır.

## 2. İNCELENEN RÜZGAR TÜRİNLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, karşılaştırma ve değerlendirme amacıyla, yaygın olarak kullanılan 10 adet rüzgar türbini seçilmiştir. Tablo 1'de, incelemesi yapılacak olan rüzgar türbinleri ile ilgili firmaların kataloglarından elde edilen bilgiler verilmiştir. Bu tabloda; P projelendirmeyi, T rüzgar türbininin kurum alanına taşınmasını, M rüzgar türbininin montajını ve Tr ise trafosu simgelemektedir. Güç kontrolünde kullanılan pitch (adım) sözcüğü, güç kontrolünün pervane kanatlarının kendi eksenleri etrafında amaca uygun olarak döndürülmesi ile sağlandığını anlatmaktadır. Stall sözcüğü de, güç kontrolünün, yüksek rüzgar hızlarında pervane göbeğine sabit olarak mesnetlenmiş olan kanatların profillerinde girdap oluşması ile kaldırma kuvvetinin azalması sonucu olduğu anlamına gelmektedir. Buradaki aktif stall yönteminde de güç kontrolü; kanatların, nominal güce kadar amaca uygun olarak kendi eksenleri etrafında döndürülmesi ile sağlanır. Bu yöntemde; kanatlar, nominal güce ulaşılması anında girdap oluşturularak kaldırma kuvvetinin azalmasını sağlayacak şekilde döndürülürler. İncelenecek olan rüzgar türbinlerinden sadece Enercon-40, senkron jeneratöre sahiptir.

Tablo 1'de, rüzgar türbinlerinin fabrika çıkış fiyatları, kule yüksekliklerinde olduğu gibi türbinlerin birbirinden farklı özelliklerine göre verilmiştir. Karşılaştırmanın daha sağlıklı yapılabilmesi için, değişik özelliklere sahip olan rüzgar türbinlerinin fiyatları, aynı ana özelliklere sahip olmaları durumu için bulunmalıdır. Bunu sağlayabilmek amacıyla, proje gideri 50.000 DM ve trafo fiyatı 15.000 DM olarak kabul edilerek kaynaklarda verilen proje giderli ve trafo fiyatlarından çıkarılmıştır. Kule fiyatı da; rüzgar türbininin katma değer vergisi hariç, taşıma ve montaj giderlerinin dahil edildiği fiyatının kule

yüksekliğine bölünmesi sonucu ortaya çıkan bir metre kule fiyatı kullanılarak, 70 m kule yüksekliği fiyatına taşınmıştır. Bu fiyat dönüşümünün sonunda ortaya çıkan rüzgar türbini fiyatları; rüzgar

türbininin taşıma ve montaj giderlerini içermekte, katma değer vergisini ise içermemektedirler (Tablo 2).

Tablo 1. Karşılaştırması Yapılacak Olan Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri (Anonim, 1999)

Rüzgar Türbini	Çap (m)	P <sub>nom.</sub> (kW)	Kule (m)	Jener.	Devir Sayısı	Güç Kontrol	Fiyat (1000 DM)	Fiyata Dahil
DeWind 41	41	500	55	Asenkr.	Değişk.	Pitch	885	P, T, M
Enercon 40	44	500	63	Senkr.	Değişk.	Pitch	915	T, M
Tacke TW 600a	46	600	46	Asenkr.	Sabit	A.Stall	1195	T, M, Tr
Nordex N-43	43	600	78	Asenkr.	Sabit	Stall	1120	P, T, M, Tr
DeWind 48	48	600	70	Asenkr.	Değişk.	Pitch	1140	T, M
DeWind 46	46	600	70	Asenkr.	Değişk.	Pitch	1120	T, M
DeWind 62	62	1000	92	Asenkr.	Değişk.	Pitch	2390	T, M
DeWind 60	60	1250	56	Asenkr.	Değişk.	Pitch	2200	T, M
Nordex N-60	60	1300	85	Asenkr.	Sabit	Stall	2250	P, T, M, Tr
Tacke TW 1,5s	70.5	1500	77	Asenkr.	Değişk.	Pitch	3620	T, M, Tr

İncelenen rüzgar türbinlerini üreten firmaların ülkeleri şu şekildedir: Enercon, Tacke ve DeWind Almanya, Nordex Almanya-Danimarka.

Tablo 2. Karşılaştırması Yapılacak Olan Rüzgar Türbinlerinin Birbirleriyle Karşılaştırılabilecek Duruma Getirilmiş Özellikleri ve 10 m Yükseklikli Kule ile Elde Edilebilecek Aylık Enerji Miktarları

Rüzgar Türbini	P <sub>nom.</sub> (kW)	Kule (m)	Fiyat (1000 DM)	Fiyata Dahil	Süpürme Alanı (m <sup>2</sup> )	Enerji (kWh/Ay) İzmir	Enerji (kWh/Ay) Aydın
DeWind 41	500	70	985	T, M	1320.25	83.028	16.992
Enercon 40	500	70	985	T, M	1520.53	81.697	17.615
Tacke TW 600a	600	70	1420	T, M	1661.90	106.794	24.131
Nordex N-43	600	70	975	T, M	1452.20	94.325	20.229
DeWind 48	600	70	1140	T, M	1809.56	118.572	25.972
DeWind 46	600	70	1120	T, M	1661.90	111.098	23.745
DeWind 62	1000	70	2270	T, M	3019.07	197.795	42.956
DeWind 60	1250	70	2340	T, M	2827.43	193.254	39.746
Nordex N-60	1300	70	2035	T, M	2827.43	186.577	38.607
Tacke TW 1,5s	1500	70	3535	T, M	3903.63	251.787	50.652

Rüzgar hızlarının bir ay boyunca ölçüldüğü İzmir ve Aydın'da rüzgar türbinlerinden üretilebilecek elektrik enerjisinin bulunabilmesi için, her bir rüzgar türbininin rüzgar hızına bağlı güç değerleri bilinmelidir. Bu değerler de ilgili firmaların kataloglarından alınmış ve Tablo 3'de verilmiştir (Anonim, 1999).

### 3. RÜZGAR ÖLÇÜM DEĞERLERİ VE ELDE EDİLEBİLECEK ENERJİ MİKTARLARI

Rüzgar türbinlerinin kıyaslanmasında kullanmak için, 1999 yılı Ağustos ayında İzmir ili sınırları içinde deniz kıyısında bir alanda (Özdamar, 2000) ve Aydın ili sınırları içinde rüzgar enerjisi potansiyeli orta düzeyde olan bir alanda (Özdamar ve Ülgen, 2000) olmak üzere iki referans yerleşim biriminde 10 m yükseklikte rüzgar hız ölçümleri

yapılmıştır. Aylık ortalama rüzgar hızları; İzmir için 6,5 m/s, Aydın için 3.24 m/s olarak saptanmıştır. Bu ölçümler sonucunda bulunan rüzgar hızlarının 10 dakikalık esme sayıları Tablo 4'de verilmektedir. Bu tablonun incelenmesinden de anlaşılacağı gibi, en çok esme sayısı, İzmir'de 7-8 m/s rüzgar hız aralığında iken, Aydın'da 1-2 m/s rüzgar hız aralığında olmuştur.

Rüzgar hız ölçümü yapılan bir ay süresince her bir rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji miktarı

$$E = \sum_{i=1}^{4464} P_{ti} \Delta t_i \quad (1)$$

bağıntısından Tablo 3'deki rüzgar türbini güçleri  $P_{ti}$  ve Tablo 4'de sıralanan 10 dakikalık esme sayıları kullanılarak bulunmuş ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 3. İncelenen Rüzgar Türbinlerinin Rüzgar Hızına Bağlı Güçleri (Kw) (Anonim, 1999)

Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Türbinleri									
	De Wind 41	Ener. 40	Tacke TW 600a	Nord. N-43	De Wind 48	De Wind 46	De Wind 62	De Wind 60	Nord. N-60	Tacke TW 1.5s
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4.22	4.20	5	2	7	7	12.3	11.1	-	3
4	10.1	16.3	24.6	17	22	20	33.7	32.3	25	21
5	20.27	36.4	52.8	45	52	48	80.4	73.6	78	90
6	63	65.6	92.5	72	93	86	158.2	143.9	150	194
7	114.65	107.7	144.8	124	158	145	271.2	247.8	234	328
8	173.24	162.2	219.2	196	244	224	412.5	385.5	381	508
9	248.65	234.8	312.2	277	354	325	586.1	553	557	746
10	330.22	322.4	403.5	364	489	448	781.4	752.9	752	1021
11	405.25	403	486.2	444	590	580	971.2	976.1	926	1303
12	474.46	461.8	564.6	533	600	600	1027.1	1193.3	1050	1500
13	500.92	490.9	603.5	584	600	600	1039.4	1280.5	1159	1500
14	500.92	500.6	610.4	618	600	600	1039.1	1304	1249	1500
15	500.92	503.2	615.3	619	600	600	1037.4	1312.5	1301	1500
16	500.92	504.1	610.5	620	600	600	1034.7	1311	1306	1500
17	500.92	504.5	612.6	610	600	600	940	1308.6	1292	1500
18	500.92	503.9	610.9	594	600	600	840	1271.3	1283	1500
19	500.92	505.2	608.7	592	600	600	750	1161.8	1282	1500
20	500.92	503.9	610.9	594	600	600	840	1271.3	1283	1500
21	500.92	505.2	608.7	592	600	600	750	1161.8	1282	1500

Tablo 4. 1999 yılı Ağustos Ayında 10 m Yükseklikte Ölçülen Rüzgar Hızlarının 10 Dakikalık Esme Sayıları (Özdamar, 2000;Özdamar ve Ülgen, 2000)

V <sub>r</sub> (m/s)	İzmir	Aydın	V <sub>r</sub> (m/s)	İzmir	Aydın
0-1	62	782	8-9	530	108
1-2	248	1141	9-10	355	56
2-3	311	745	10-11	200	18
3-4	441	356	11-12	140	1
4-5	423	320	12-13	102	0
5-6	430	363	13-14	51	0
6-7	567	307	14-15	3	0
7-8	601	267	15-16	0	0

Enerji hesabında, Tablo 4’de belli bir hız aralığı için verilen esme sayısının, küçük rüzgar hızına ait olduğu kabul edilmiştir. Örneğin 3-4 m/s rüzgar hız aralığındaki İzmir için ölçülen 10 dakikalık esme sayısı olan 441 değeri, 3 m/s rüzgar hızına ait olarak kabul edilmiştir. Bu kabul altında hesaplanan aylık elektrik enerjisi üretim miktarı, gerçek elektrik enerjisi değerini yaklaşık olarak verecek ve gerçek enerji değerinden daha küçük olacaktır. İncelenen tüm rüzgar türbinleri için geçerli olan bu kabulün, çalışmanın amacını oluşturan rüzgar türbinlerinin kıyaslanmasına etkisi ihmal

edilebilecek düzeyde olacaktır.

Tablo 2’de, tüm rüzgar türbinlerinin İzmir’de üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarının, Aydın’da üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarından, beklenildiği gibi, daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. İzmir’de rüzgardan elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarını, Aydın’da aynı rüzgar türbini ile elde edilebilecek olan elektrik enerjisi miktarıyla karşılaştırabilmek için, hesaplanan enerji miktarları oranlanarak Tablo 5 hazırlanmıştır.

Tablo 5. İncelenen Rüzgar Türbinleri Yardımıyla İzmir ve Aydın’da Elde Edilen Aylık Enerji Miktarları Oranı (Kule Yüksekliği : 10 m)

Rüzgar Türbinleri	De Wind 41	Ener. 40	Tacke TW 600a	Nord. N- 43	De Wind 48	De Wind 46	De Wind 62	De Wind 60	Nord. N- 60	Tacke TW 1.5s
E <sub>İzmir</sub> /E <sub>Aydın</sub>	4.89	4.64	4.43	4.66	4.57	4.68	4.61	4.86	4.83	4.97

Daha önce de belirtildiği gibi, 1999 yılı Ağustos ayında ölçülen İzmir'deki ortalama rüzgar hızı (6.5 m/s), Aydın'daki aylık ortalama rüzgar hızının (3.24 m/s) iki katı olmasına rağmen, Tablo 5'de rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjilerin oranının, 4.43-4.97 arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Buradaki oranın, rüzgar enerjisinin rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak azalıp artması gerçeğine rağmen, 8 olmamasının nedeni, ortalama rüzgar hızına dayanan enerji hesabının gerçek değerlere dayanan enerji hesabına göre farklı olması ve rüzgar türbinlerinin güç faktörlerinin değişik rüzgar hızlarında değişim göstermesidir. Tablo 2'de izlenen bir başka gerçek, 500 kW nominal güçlü iki rüzgar türbininden elde edilen aylık enerji miktarlarının karşılaştırılması ile ortaya çıkmaktadır. Bu gerçek; senkron jeneratörlü Enercon-40 rüzgar türbininin rüzgar hızlarının göreceli olarak düşük olduğu Aydın'da, asenkron jeneratörlü DeWind-41 rüzgar türbininin ise rüzgar hız değerleri yüksek olan İzmir'de daha fazla enerji üretebileceğidir.

#### 4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN KRİTER DEĞERLERİ VE BİRBİRLERİYLE KARŞILAŞTIRILMALARI

Bu çalışma için İzmir ve Aydın'da, sadece 1999 yılı Ağustos ayında rüzgar hız ölçümleri yapılmıştır. Rüzgar türbinlerinin birbirleriyle karşılaştırılmasında, rüzgar hızlarındaki değişimler açısından periyot olarak kabul edilen bir yıllık zaman diliminde elde edilen enerjinin hesaplanmasında yarar vardır. Bir ay için hesaplanan bu enerji değerlerini bir yıla genişletmek için, Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından söz konusu illerde yapılan rüzgar hız ölçüm sonuçları kullanılacaktır (Kavas ve Tiryaki, 1999). Tablo 6'da, EİEİ tarafından İzmir Kocadağ ve Aydın Didim'de 1996 yılında yapılan ve sonuçları aylık ortalamalar halinde verilen rüzgar hız ölçüm sonuçları görülmektedir.

Rüzgar enerjisinden rüzgar türbinleri yardımıyla  $\Delta t$  zaman aralığında elde edilebilecek enerji miktarı,

$$E = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 V_r^3 \Delta t \quad (\text{Wh}) \quad (2)$$

bağıntısı yardımıyla bulunur (Özdamar ve Kavas, 1999). Burada,  $C_p$  teorik olarak en çok 0,59 olabilen güç faktörü,  $\rho$  havanın yoğunluğu ve  $R$  pervane yarıçapıdır. Bu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi, rüzgar enerjisi rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak artmaktadır. Ayrıca, 1996 yılı aylık rüzgar hız ortalamaları bilinen ve ölçüm alanlarına yakın olan Kocadağ ve Didim'deki rüzgar enerjisinin aylık

değişimleri; ölçüm alınan İzmir ve Aydın'daki rüzgar enerjisindeki aylık değişimlere benzer olarak kabul edilebilir. Buradan hareketle, Kocadağ ve Didim için bilinen aylık ortalama rüzgar hızları kullanılarak, İzmir ve Aydın'da, incelenen rüzgar türbinlerinden bilinmeyen aylarda elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarları kabul edilebilir bir yaklaşımla bulunabilir. Bunun için İzmir ve Aydın'da elde edilebilecek enerji miktarları ile ilgili düzeltme faktörlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaba örnek olarak, İzmir'deki Eylül ayına ait enerji miktarının tespiti istensin. İzmir için 1998 yılı Eylül ayında herhangi bir rüzgar türbininden elde edilebilecek enerji miktarını saptamak için

$$k_1 = \left( \frac{6,4}{8,5} \right)^3$$

ile tanımlanan düzeltme faktörü hesaplanmalıdır. Burada parantez içinde paydaki değer, Kocadağ'da 1996 yılı Eylül ayında ölçülen ortalama rüzgar hızı, paydadaki değer ise Kocadağ'da 1996 yılı Ağustos ayında ölçülen ortalama rüzgar hızıdır. 1999 yılı Eylül ayında İzmir'de herhangi bir rüzgar türbini ile üretilen elektrik enerjisi miktarını bulmak için, Tablo 2'de İzmir için verilen 1999 yılı Ağustos ayına ait enerji miktarı, düzeltme faktörü  $k_1$  ile çarpılmalıdır. Burada örnek olarak anlatılan işlemler, İzmir ve Aydın için tüm ayları kapsayacak şekilde yapılmış ve Tablo 6'da verilmiştir. İncelenen rüzgar türbinlerinden bir yılda elde edilebilecek enerji miktarları da, 1999 yılı Ağustos ayı için bulunan enerji miktarlarının İzmir için 12.99 ile ve Aydın için 14.49 ile çarpımı sonucu bulunmuş ve Tablo 7'de verilmiştir. Buradaki çarpım katsayıları 12.99 ve 14.49, İzmir ve Aydın'a ait aylık düzeltme faktörlerinin toplanması sonucu bulunmuştur. Bu konuda son olarak eklenmesi gereken, rüzgar enerjisinin rüzgar hızının küpü ile orantılı olarak artması gerçeğinin rüzgar türbinlerinden alınan enerji için de geçerli olabilmesi için güç faktörü  $C_p$ 'nin tüm rüzgar hızlarında aynı olmasının gerekliliğidir. Halbuki rüzgar türbinlerindeki güç faktörü, rüzgar hızına bağlıdır ve her bir rüzgar türbini için de farklıdır. Güç faktörü ile ilgili olarak vurgulanan bu nokta, 1999 yılı Ağustos ayı enerji hesabında, rüzgar türbinlerinin Tablo 4'de verilen ve  $C_p$  değişimlerini de içeren gerçek rüzgar hızı-güç verileri kullanıldığı için, dikkate alınmıştır.

Rüzgar türbinlerinin birbirleriyle karşılaştırılmasında ve rüzgar enerjisi potansiyeli kullanılmak istenilen bir alanın değerlendirilmesinde, birim enerji maliyeti önemli bir kriterdir.

Tablo 6. EİEİ Tarafından 1996 Yılında Yapılan Ölçümlere Göre Kocadağ ve Didim'deki Aylık Rüzgar Hız Ortalamaları (m/s) ve Düzeltme Faktörleri ( $k_1$ ,  $k_2$ )

	Oc.	Şub.	Mart	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağus.	Eylül	Ekim	Kas.	Ara.
İzmir-Kocadağ	9.1	10.0	9.8	7.2	6.2	9.4	9.9	8.5	6.4	7.3	8.3	10.1
Aydın-Didim	4.9	5.0	6.0	5.1	3.6	5.1	4.8	4.5	3.9	3.8	4.4	5.3
$k_1$ (İzmir)	1.23	1.63	1.53	0.61	0.39	1.35	1.58	1	0.43	0.63	0.93	1.68
$k_2$ (Aydın)	1.29	1.37	2.37	1.46	0.51	1.46	1.21	1	0.65	0.60	0.94	1.63

Rüzgar türbinlerinden elde edilen 1 kWh elektrik enerjisinin maliyeti, İzmir ve Aydın'da 10 m yükseklikteki rüzgar hızları kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. İncelenen Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilen Yıllık Enerji Miktarları ve Birim Enerji Maliyetleri (Kule Yüksekliği: 10 m)

Rüzgar Türbini	$P_{nom}$ (kW)	Enerji (kWh/Yıl) İzmir	Enerji (kWh/Yıl) Aydın	Birim Enerji Maliyeti (DM/kWh) İzmir	Birim Enerji Maliyeti (DM/kWh) Aydın
DeWind 41	500	1.078.534	246.214	0.13 (0.07)	0.57 (0.31)
Enercon 40	500	1.061.244	255.241	0.13 (0.07)	0.55 (0.29)
Tacke TW 600a	600	1.387.254	349.658	0.15 (0.08)	0.57 (0.31)
Nordex N-43	600	1.225.282	293.118	0.11 (0.06)	0.47 (0.25)
DeWind 48	600	1.540.250	376.334	0.11 (0.06)	0.43 (0.23)
DeWind 46	600	1.443.163	344.065	0.11 (0.06)	0.46 (0.25)
DeWind 62	1000	2.569.357	622.432	0.13 (0.07)	0.51 (0.28)
DeWind 60	1250	2.510.370	575.920	0.13 (0.07)	0.57 (0.31)
Nordex N-60	1300	2.423.635	559.415	0.12 (0.06)	0.51 (0.28)
Tacke TW 1,5s	1500	3.270.713	733.948	0.15 (0.08)	0.68 (0.36)

Birim enerji maliyeti hesabında; rüzgar türbini ömrünün 20 yıl olduğu, bu süre sonunda karşılıksız olarak atılacağı, rüzgar türbini kurulum alanı için harcama yapılmayacağı ve Tablo 7'de bir yıl için verilen elektrik enerjisinin 20 yıl boyunca her yıl aynı miktarda üretileceği varsayılmıştır. Rüzgar türbini işletmecisinin, Tablo 2'de verilen rüzgar türbinlerinin alımı için, bir bankadan DM üzerinden yıllık % 6.5 sabit faizle 20 yıl süreli kredi kullandığı ve yıllık bakım-onarım-sigorta giderlerinin yatırım giderlerinin % 2.5'u olacağı da bir başka varsayımdır. Tablo 2'de verilen rüzgar türbini fiyatlarına, 15.000 DM trafo gideri ve % 15 katma değer vergisi de eklenmiştir. Tablo 7'de birim enerji maliyeti sütununda parantez içinde verilen değerler, faizsiz kredi kullanılması durumundaki birim enerji maliyetini göstermektedir. Çevre dostu rüzgar enerjisinin kullanımını teşvik amacıyla, rüzgar türbini işletmecilerine faizsiz kredi kullanılabilir

umuduyla, bu seçenek de tabloda gösterilmiştir. Birim enerji maliyetlerinin incelenmesi, 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri ile daha ucuz elektrik enerjisi üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Türkiye'de 1 kWh elektrik enerjisinin TEDAŞ tarafından ortalama 0.12 DM'a satın alındığı düşünüldüğünde, 10 m yükseklikteki rüzgar potansiyelini kullanarak elektrik enerjisi üretmenin İzmir ve Aydın için ekonomik olmayacağı anlaşılmaktadır. Bu nedenle, bu alanda ekonomik bir yatırım yapabilmek için, 70 m gibi daha yükseklerdeki rüzgar enerjisi potansiyeli kullanılmalıdır.

Tablo 8'de, rüzgar türbinlerinin karşılaştırılmasında kullanılacak olan diğer karşılaştırma kriterleri verilmektedir. Buradaki kriter değerlerinin hesabında, 10 m yükseklikteki rüzgar hızlarına göre üretilen yıllık enerji miktarı kullanılmıştır.

Tablo 8. Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırma Kriter Değerleri (Kule yüksekliği: 10 m)

Rüzgar Türbini	Birim Nominal Güç Maliyeti (DM/kW)	Birim Süpürme Alanı Enerjisi (kWh/(m <sup>2</sup> Yıl)) İzmir	Birim Süpürme Alanı Enerjisi (kWh/(m <sup>2</sup> Yıl)) Aydın	Birim Enerjiye Düşen Rüzgar Türbini Fiyatı (DM/(kWh/Yıl)) İzmir	Birim Enerjiye Düşen Rüzgar Türbini Fiyatı (DM/(kWh/Yıl)) Aydın
DeWind 41	1970	817	187	0.91	4.00
Enercon 40	1970	698	168	0.93	3.86
Tacke TW 600a	2367	835	210	1.02	4.06
Nordex N-43	1625	844	202	0.80	3.33
DeWind 48	1900	851	208	0.74	3.03
DeWind 46	1867	868	207	0.78	3.26
DeWind 62	2270	851	206	0.84	3.65
DeWind 60	1872	888	204	0.93	4.06
Nordex N-60	1565	857	198	0.84	3.64
Tacke TW 1.5s	2357	838	188	1.08	4.82

Ayrıca, birim nominal güç maliyeti ve birim enerjiye düşen rüzgar türbini fiyatı hesabında kullanılan rüzgar türbinlerinin fiyatları, rüzgar türbinlerinin taşıma ve montaj giderlerini içeren katma değer vergisiz fabrika çıkış fiyatlarıdır.

Tablo 8'de verilen birim nominal güç maliyetleri, rüzgar türbinlerinin taşıma ve montaj dahil katma değer vergisiz fiyatlarının, nominal güçlerine oranlanması ile bulunmuştur. Bir rüzgar türbini alımında kriter olarak sadece birim nominal güç maliyeti dikkate alınmış olsaydı, 1300 kW nominal güçlü Nordex N-60 rüzgar türbininin seçilmesi gerekirdi. Rüzgar türbini seçiminde sadece yıllık enerji miktarının pervane süpürme alanına oranı olarak tanımlanan birim süpürme alanı enerjisinin kriter olarak dikkate alınması durumunda da; İzmir'de DeWind 60 ve Aydın'da Tacke TW 600a rüzgar türbinlerinin seçilmesi söz konusu olacaktır. 10 m yükseklik için birim süpürme alanı enerjisi değerlerinin incelenmesi sonucunda, 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinin hemen hemen tümünde en iyi değerlere ulaşılmaktadır. 500 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri ile nominal güçleri 600 kW'dan daha fazla olan rüzgar türbinlerinin birim süpürme alanı enerjisi değerleri, 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerine oranla daha düşüktür.

Buradan çıkan sonuç; birim pervane süpürme alanından daha fazla enerji elde edilebilmesi nedeniyle, 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerindeki teknolojik gelişmenin olgunlaşmış olduğudur. Ayrıca, birim enerjiye düşen rüzgar türbini fiyatı açısından da, İzmir ve Aydın'da 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri daha avantajlıdır.

Tablo 7 ve Tablo 8'de verilen, üretilen elektrik enerjisini içeren kriter değerleri, 10 m yükseklikteki rüzgar hız değerlerine göre bulunmuştur. Tablo 1'de verilen rüzgar türbinlerinin ise 46-92 m kule yüksekliklerine sahip oldukları bilinmektedir. Bu nedenle, karşılaştırmada kullanılacak olan kriter değerlerindeki rüzgar hızlarının, uygulamadaki kule yüksekliklerine göre hesaplanması gerekmektedir.

Belli bir yükseklikte ölçülen rüzgar hız değerleri, Hellmann katsayısı  $\mu$ 'yu kullanarak aşağıdaki bağıntıyla başka yüksekliklere aktarılabilmektedir (Hapel, 1990):

$$V_r = V_{ref} \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^\mu \quad (3)$$

Bu bağıntıda kullanılan semboller, aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- $V_r$  : Hesaplanmak istenen yükseklikteki rüzgar hızı,
- $V_{ref}$  : Ölçüm sonuçları bilinen yükseklikteki rüzgar hızı,
- $H$  : Hesaplanmak istenen noktanın yerden yüksekliği,
- $H_{ref}$  : Ölçüm sonuçları bilinen noktanın yerden yüksekliği,
- $\mu$  : Hellmann katsayısı.

Hellmann katsayısı da rüzgar hız ölçüm yerinin özelliklerine bağlıdır ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Ölçüm Yerinin Özelliklerine Bağlı Olan Hellmann Katsayısının Değişimi (Hapel, 1990)

Ölçüm yerinin tanımı	$\mu$ (Hellmann Katsayısı)
Açık deniz, kıyı şeridi	0.14
Açık alan ve tarlalar	0.18
Ağaçlık alan ve şehir	0.28
Yüksek binalı kentsel alan	0.4

Bu çalışmada incelenen İzmir ili sınırları içindeki yüksek rüzgar enerjisi potansiyelli alan, deniz kıyısında ve engellerden uzak olduğu için Hellmann katsayısı 0.14, Aydın ili sınırları içindeki rüzgar enerjisi potansiyeli orta düzeyde olan alanın çevresinde de tarlalar ve ağaçlık alan olduğu için Hellmann Katsayısı 0.22 olarak alınmıştır. Ortalama bir değer olan Hellmann katsayısının, gerçekte engellerin durumuna göre rüzgarın esiş yönüne birinci derecede bağlı olduğunun ve yapılan ölçümlerde rüzgarın Hellmann bağıntısına her zaman uyum göstermediğinin vurgulanmasında yarar vardır. 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızlarının 70 m yüksekliğe taşınmasında; saatlik rüzgar verisi, bölge pürüzlülük bilgileri, yakın çevre engel bilgileri ve bölgenin topoğrafyasını kullanan ve Danimarka Meteoroloji Teşkilatı'nın Riso Meteoroloji İstasyonu'nda geliştirilmiş olan WA<sup>S</sup>P (Wind Atlas Analysis and Application Program) paket programının gerçeğe daha yakın değerler vereceği de burada belirtilmelidir (Dündar ve İnan, 2000).

İzmir ve Aydın'da 1999 yılı Ağustos ayında 10 m yükseklikte ölçülen ve Tablo 4'de verilen rüzgar hızı-10 dakikalık esme sayısı değerleri, Hellmann yükseltme bağıntısı yardımıyla 70 m yüksekliğe taşınmış ve sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir. Ağustos ayı ortalama rüzgar hızı Aydın'da 10 m yükseklikte 3.24 m/s iken, 70 m yükseklikte 4.97 m/s'ye çıkmış, İzmir'de ise 10 m yükseklikte 6.5 m/s olan aylık ortalama rüzgar hızı 70 m'de 8.53 m/s'ye ulaşmıştır.

Tablo 10'un incelenmesinden, en çok esme sayısının; İzmir'de 10 m yükseklikte 7-8 m/s rüzgar hız aralığında iken, 70 m yükseklikte 9-10 m/s hız aralığına kaydığı ve Aydın'da ise 70 m yükseklikte

de 10 m yükseklikte olduğu gibi 1-2 m/s rüzgar hız aralığında olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 10'da 70 m yükseklik için verilen rüzgar hız ve esme sayılarının kullanılması durumunda, Tablo 3'de belirtilen rüzgar türbinlerinden 1999 yılı Ağustos ayında elde edilebilecek enerji miktarları Tablo 11'deki gibi olacaktır.

1996 yılı aylık rüzgar hız ortalamaları bilinen ve ölçüm alanlarına yakın olan Kocadağ ve Didim'deki rüzgar enerjisinin aylık değişimleri; tekrar bir ay ölçüm alınan İzmir ve Aydın'ın rüzgar enerjisindeki aylık değişimlere benzer olarak kabul edilir ve 10 m yükseklikteki yıllık enerji hesabında yapılan işlemler tekrarlanırsa, incelenen rüzgar türbinlerinden İzmir ve Aydın'da bir yıl boyunca 70 m yükseklikte elde

edilebilecek enerji miktarları bulunur. Herbir rüzgar türbini için bulunan bu değerler, Tablo 12'de verilmiştir. Ayrıca bu tabloda, rüzgar türbinlerinin yatırım giderlerini geri ödeme süreleri de verilmektedir. Bu sürelerin hesabında, 1 kWh elektrik enerjisinin TEDAŞ tarafından ilk 10 yılda 0.17 DM'a satın alındığı dikkate alınmıştır (Ültanır, 1998). Yatırım giderleri hesap edilirken de, Tablo 11'de verilen taşıma ve montaj giderlerini içeren rüzgar türbini fiyatlarına, 15.000 DM trafo gideri ve % 15 katma değer vergisi eklenmiştir. Daha sonra da, yatırım giderleri, bir yılda üretilen enerjinin 0.17 DM ile çarpımına bölünerek, yatırım giderleri geri ödenme süresi bulunmuştur. Bu sürenin belirlenmesinde; kredi giderleri, bakım-onarım, sigorta ve işletme giderleri hesaba katılmamıştır.

Tablo 10. 70 m Yükseklikte 1999 Yılı Ağustos Ayı İçin Hesaplanan Rüzgar Hızlarının 10 Dakikalık Esme Sayıları

V <sub>r</sub> (m/s)	İzmir	Aydın	V <sub>r</sub> (m/s)	İzmir	Aydın
0-1	24	350	11-12	389	198
1-2	138	782	12-13	271	97
2-3	201	691	13-14	186	53
3-4	258	626	14-15	125	31
4-5	355	309	15-16	102	32
5-6	301	234	16-17	75	6
6-7	329	196	17-18	56	1
7-8	309	234	18-19	3	0
8-9	459	220	19-20	1	0
9-10	472	224	20-21	0	0
10-11	410	180	21-22	0	0

Tablo 11. İncelenen Rüzgar Türbinlerinin 1999 Yılı Ağustos Ayı İçin Karşılaştırılabilecek Duruma Getirilmiş Özellikleri ve Elde Edilebilecek Aylık Enerji Miktarları (Kule yüksekliği: 70 m)

Rüzgar Türbini	P <sub>nom.</sub> (kW)	Kule (m)	Fiyat (1000 DM)	Fiyata Dahil	Süpürme Alanı (m <sup>2</sup> )	Enerji (kWh/Ay) İzmir	Enerji (kWh/Ay) Aydın
DeWind 41	500	70	985	T, M	1320.25	160.029	65.277
Enercon 40	500	70	985	T, M	1520.53	157.558	64.385
Tacke TW 600a	600	70	1420	T, M	1661.90	198.414	81.966
Nordex N-43	600	70	975	T, M	1452.20	183.542	74.118
DeWind 48	600	70	1140	T, M	1809.56	217.529	92.141
DeWind 46	600	70	1120	T, M	1661.90	208.895	87.023
DeWind 62	1000	70	2270	T, M	3019.07	363.370	152.276
DeWind 60	1250	70	2340	T, M	2827.43	386.961	155.505
Nordex N-60	1300	70	2035	T, M	2827.43	370.785	148.364
Tacke TW 1.5s	1500	70	3535	T, M	3903.63	489.960	199.140

Tablo 12'nin incelenmesinden, yatırım giderlerinin, rüzgar türbinine bağlı olarak İzmir'de 2.77-3.77 yılda ve Aydın'da 5.85-8.32 yılda geri ödenebileceği anlaşılmaktadır. Yatırım giderlerinin geri ödenme süresi rüzgar türbinlerinin seçiminde kriter olarak dikkate alındığında, 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinin seçilmesinin uygun olacağı anlaşılmaktadır. Tablo 12 ve Tablo 7'nin birlikte irdelenmesi sonucunda, rüzgar hızlarının 70 m kule yüksekliği kabulü ile artması sonucunda, 10 m

yükseklikli kule ile Aydın'da 500 kW nominal güçlü DeWind 41'den daha fazla elektrik enerjisi üreten senkron jeneratörlü 500 kW nominal güçlü Enercon-40 rüzgar türbininin, bu avantajını kaybettiği anlaşılmaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyeli arttıkça; asenkron jeneratörlü rüzgar türbinleri ile elde edilen elektrik enerjisi miktarı, senkron jeneratörlü rüzgar türbinlerinden elde edilene göre daha fazla olmaktadır.



Tablo 12. İncelenen Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilebilecek Yıllık Enerji Miktarları, Birim Enerji Maliyetleri ve Yatırım Giderleri Geri Ödenme Süreleri (Kule yüksekliği: 70 m)

Rüzgar Türbini	P <sub>nom.</sub> (kW)	Enerji (kWh/Yıl) İzmir	Enerji (kWh/Yıl) Aydın	Birim Enerji Maliyeti (DM/kWh) İzmir	Birim Enerji Maliyeti (DM/kWh) Aydın	Geri Ödeme Süresi (Yıl) İzmir	Geri Ödeme Süresi (Yıl) Aydın
DeWind 41	500	2.078.777	945.864	0.07 (0.04)	0.15 (0.08)	3.25	7.15
Enercon 40	500	2.046.678	932.939	0.07 (0.04)	0.15 (0.08)	3.31	7.25
Tacke TW 600a	600	2.577.398	1.187.687	0.08 (0.04)	0.17 (0.09)	3.77	8.17
Nordex N-43	600	2.384.211	1.073.970	0.06 (0.03)	0.13 (0.07)	2.81	6.24
DeWind 48	600	2.825.702	1.335.123	0.06 (0.03)	0.12 (0.07)	2.77	5.85
DeWind 46	600	2.713.546	1.260.963	0.06 (0.03)	0.13 (0.07)	2.83	6.09
DeWind 62	1000	4.720.176	2.206.479	0.07 (0.04)	0.15 (0.08)	3.28	7.01
DeWind 60	1250	5.026.623	2.253.268	0.07 (0.04)	0.15 (0.08)	3.17	7.07
Nordex N-60	1300	4.816.497	2.149.794	0.06 (0.03)	0.13 (0.07)	2.88	6.45
Tacke TW 1,5s	1500	6.364.580	2.885.539	0.08 (0.04)	0.17 (0.09)	3.77	8.32

Tablo 13'de, İzmir ve Aydın'da ölçüm alınan alanlarda 70 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyeline göre hesaplanan karşılaştırma kriter değerleri verilmiştir. Bir rüzgar türbini alımında kriter olarak sadece birim nominal güç maliyeti dikkate alınmış olsaydı, 10 m yükseklikteki rüzgar potansiyelinin değerlendirilmesinde olduğu gibi, 1300 kW nominal güçlü Nordex N-60 rüzgar türbininin seçilmesi gerekirdi. Rüzgar türbini seçiminde sadece birim süpürme alanı enerjisinin kriter olarak dikkate alınması durumunda; İzmir ve Aydın'da, 10 m yükseklikteki rüzgar hızlarına göre 600 kW nominal güçlü Nordex N-43 ve Tacke TW 600a en iyi rüzgar türbinleri iken, 70 m yükseklikteki rüzgar hızlarına göre 1250 kW nominal güçlü DeWind 60 rüzgar türbininin

seçilmesi söz konusu olacaktır. Birim süpürme alanı enerjisi değerlerinin incelenmesi sonucunda, 1250-1300 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinin bu kriterlere göre diğerlerinden daha iyi olduğu görülmektedir. Buradan çıkan sonuç; birim pervane süpürme alanından daha fazla enerji elde edilebilmesi nedeniyle, 70 m yükseklikteki rüzgar potansiyelini değerlendirme açısından 1250-1300 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerindeki teknolojik gelişmenin diğerlerine göre daha olgunlaşmış olduğudur. 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri, birim enerjiye düşen rüzgar türbini fiyatı açısından, 10 m'de olduğu gibi 70 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesinde de daha avantajlı olmaktadır.

Tablo 13. Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırma Kriter Değerleri (Kule yüksekliği: 70 m)

Rüzgar Türbini	Birim Nominal Güç Maliyeti (DM/kW)	Birim Süpürme Alanı Enerjisi (kWh/(m <sup>2</sup> Yıl)) İzmir	Birim Süpürme Alanı Enerjisi (kWh/(m <sup>2</sup> Yıl)) Aydın	Birim Enerjiye Düşen Rüzgar Türbini Fiyatı (DM/(kWh/Yıl)) İzmir	Birim Enerjiye Düşen Rüzgar Türbini Fiyatı (DM/(kWh/Yıl)) Aydın
DeWind 41	1970	1575	716	0.47	1.04
Enercon 40	1970	1346	614	0.48	1.06
TackeTW 600a	2367	1551	715	0.55	1.20
Nordex N-43	1625	1642	740	0.41	0.91
DeWind 48	1900	1562	738	0.40	0.85
DeWind 46	1867	1633	759	0.41	0.89
DeWind 62	2270	1564	731	0.48	1.03
DeWind 60	1872	1778	797	0.47	1.04
Nordex N-60	1565	1704	760	0.42	0.95
Tac. TW 1.5s	2357	1630	739	0.56	1.23

Tablo 14'de, incelenen rüzgar türbinlerinin İzmir ve Aydın'da 70 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyeline göre kapasite faktörleri verilmektedir. Buradaki kapasite faktörleri, bir yılda rüzgar türbinlerinin ürettikleri elektrik enerjisi miktarlarının, bu türbinlerin nominal güçte

üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarına oranlanmasıyla % olarak bulunmuştur. Rüzgar türbinlerinin bir yılda nominal güçte üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarları, rüzgar türbinlerinin nominal güçlerinin bir yılı oluşturan 8760 saat ile çarpımından hesaplanmaktadır. İncelenen rüzgar

türbinlerinin kapasite faktörü hesabında, Tablo 12'de verilen bir yılda üretebilecekleri elektrik enerjisi miktarları kullanılmıştır.

Bu tablodan, İzmir ve Aydın'da 70 m kule yüksekliğinde 600 kW ve 1000 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinin kapasitelerini daha iyi kullanacakları anlaşılmaktadır.

Tablo 14. İncelenen Rüzgar Türbinlerinin İzmir ve Aydın İçin Kapasite Faktörleri (Kule yüksekliği: 70 m)

	De Wind 41	Ener. 40	Tacke TW 600a	Nord. N-43	De Wind 48	De Wind 46	De Wind 62	De Wind 60	Nord. N-60	Tacke TW 1.5s	
Nominal Güç (kW)	500	500	600	600	600	600	1000	1250	1300	1500	
Bölge	İzmir	0.48	0.47	0.49	0.45	0.54	0.52	0.54	0.46	0.42	0.48
	Aydın	0.22	0.21	0.23	0.20	0.25	0.24	0.25	0.21	0.19	0.22

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinlerini birbirleriyle çeşitli kriterlere göre karşılaştırarak, bugünkü durumlarını değerlendirmeyi ve bu değerlendirmeden hareket ederek bu konuda geleceği görebilmeyi hedefleyen bu çalışmada, aşağıdaki sonuç ve değerlendirmelere ulaşılmıştır:

- Düşük rüzgar enerjisi potansiyelli alanlarda, senkron jeneratörlü rüzgar türbinleri; yüksek rüzgar enerjisi potansiyelli alanlarda ise, asenkron jeneratörlü rüzgar türbinleri daha avantajlı olmaktadır.
- Bugünkü şartlar altında, 1 adet 1200 kW nominal güçlü rüzgar türbini yerine, 2 adet 600 kW nominal güçlü rüzgar türbininin kullanılması daha ekonomik olmaktadır. Bunun ana nedeni, büyük nominal güçlü rüzgar türbinlerinin yeterince satılmamış olmaları nedeniyle araştırma-geliştirme giderlerinin rüzgar türbini fiyatlarına yansımakta olmasıdır. 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri ise oldukça çok sayıda üretilerek satılmış ve kendi araştırma-geliştirme giderlerini çıkarmışlardır. Buradan hareketle, yakın gelecekte araştırma-geliştirme giderlerini çıkaran büyük nominal güçlü rüzgar türbinlerinin de ucuzlayacakları ve daha ekonomik hale gelecekleri tahmin edilebilir.
- Rüzgar enerjisi tesislerinin yatırım giderleri geri ödenme süresi, rüzgar türbinine bağlı olarak İzmir'de 2.77-3.77 yıl ve Aydın'da 5.85-8.32 yıldır. Yatırım giderlerinin geri ödenme süresi kriter olarak dikkate alındığında, rüzgar elektriği eldesinde günümüz şartlarında 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinin seçilmesinin uygun olacağı anlaşılmaktadır.
- Birim süpürme alanı enerjisi açısından, 10 m'deki rüzgar potansiyeline göre 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri, 70 m'deki rüzgar potansiyeline göre ise 1250-1300 kW

nominal güçlü rüzgar türbinleri diğerlerine nazaran daha iyidir. Buradan çıkan sonuç; birim pervane süpürme alanından daha fazla enerji elde edilebilmesi nedeniyle, 10 m'deki rüzgar potansiyelini değerlendirme açısından 600 kW ve 70 m yükseklikteki rüzgar potansiyelini değerlendirme açısından da 1250-1300 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerindeki teknolojik gelişmenin, diğerlerine göre daha olgunlaşmış olduğudur. Bir başka ifadeyle, 10 m yüksekliği simgeleyen orta düzeydeki rüzgar enerjisi potansiyelinden en iyi şekilde 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri, 70 m yüksekliği simgeleyen yüksek rüzgar enerjisi potansiyelinden de en iyi şekilde 1250-1300 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri yararlanabilmektedir. Büyük nominal güçlü rüzgar türbinlerindeki bu teknolojik gelişmişliğe rağmen birim enerji maliyetlerinin yüksek çıkmasının nedeni, yukarıda da ifade edildiği gibi, bu rüzgar türbinlerinin yatırım giderlerine eklenen ve henüz çıkarılmayan araştırma-geliştirme giderleridir.

- Günümüz şartlarında, 600 kW nominal güçlü rüzgar türbinleri, birim enerjiye düşen rüzgar türbini fiyatı açısından, 10 m'de olduğu gibi 70 m yükseklikteki rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesinde de daha avantajlı olmaktadır.
- Ülkemizde üretilen rüzgar elektriğinin 1 kWh'nın TEDAŞ tarafından ortalama 0.12 DM'a satın alındığı dikkate alınırsa, 1999 yılı Ağustos ayında 10 m yükseklikte 6.5 m/s ve 70 m yükseklikte 8.53 m/s ortalama rüzgar hızına sahip olan İzmir'de rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin çok karlı olduğu anlaşılmaktadır. Türkiye'nin ilk rüzgar çiftliklerinin İzmir'de kurulmuş olmasının altında yatan gerçek de budur. 1999 yılı Ağustos ayı ortalama rüzgar hızı 10 m yükseklikte 3.24 m/s ve 70 m yükseklikte 4.97 m/s olan Aydın'da ise, rüzgar elektriği üretmek, günümüz şartlarında ekonomik olmayacaktır.

Halbuki, Aydın gibi orta düzeyde rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olan bölgelerde de rüzgar elektriği üretimi ekonomik hale getirilmelidir. Çünkü; TEDAŞ'ın rüzgar elektriği birim alış fiyatını, büyük ölçüde global ısınmayı sağlayan fosil yakıt kaynaklı elektrik enerjisi birim fiyatı belirlemektedir ve bu hesapta, fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar dikkate alınmamaktadır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimini, Aydın gibi rüzgar enerjisi potansiyeli orta düzeyde olan bölgelerde de işletmeci açısından çevreyi korumak adına ekonomik hale getirmek gerekmektedir. Bu konuda, 16 Aralık 1999 tarihinde Almanya Parlemantosu'nda görüşülmeye başlanan ve Hükümet tarafından desteklediği için 2000 yılı Şubat ayında yürürlüğe girmesi beklenen "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektriğin Desteklenmesi" adlı yasa tasarısı yol gösterici olabilir (Koenemann, 2000). Yasa tasarısına göre, 1 kWh rüzgar elektriğinin alış fiyatı; ilk 5 yıl 0.178 DM olacak ve üretilen elektrik enerjisi miktarına göre belirlenen belli bir zaman içinde de 0.138 DM'a inecektir. Bu yasa tasarısı ile, Aydın gibi rüzgar enerjisi potansiyeli orta düzeyde olan ve daha az elektrik enerjisi üreten bölgeler daha fazla desteklenerek, elektrik üretiminin ekonomik hale gelmesi sağlanacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Anonim, 1999. DeWind (Seelandstr. 1, 23569 Lübeck Almanya), Enercon (Dreekamp 5, 26605 Aurich Almanya), Tacke (Holsterfeld 5a, 48499 Salzbergen Almanya) ve Nordex (Svindbaek, 7323 Givø Danimarka) Firmalarının Tanıtım Katalogları.
- Dündar, C., İnan, D. 2000. "Türkiye Kıyılarında Rüzgar Enerjisi Potansiyellerinin Belirlenmesi", **Türkiye II. Enerji Sempozyumu**, 22-24 Kasım 1999. Ankara, 127-138.

Hapel, K. H. 1990. Festigkeitsanalyse Dynamisch Beanspruchter Offshore-Konstruktionen, 379 s., Vieweg Verlag, Braunschweig.

Kavas, G., Tiryaki, H. 1999. "Rüzgar Güllü İmalatı ve Elektrik Enerjisi Eldesi", Symposium Über Die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben (Editörler: Özdamar A., Groehn, H. G., Ülgen, K.), Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 89-103.

Koenemann, D. 2000. Neuer Schub für Solar-und Windstrom, Sonne Wind & Wärme News I/2000, 1.

Özdamar, A., 2000. İzmir'de Bir Noktanın Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Projesi, Yayınlanmamış Rapor, İzmir.

Özdamar, A., Kavas, M. G. 1999. "Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı Üzerine Bir Araştırma", Güneş Günü Sempozyumu'99, 25-27 Haziran 1999, Kayseri, 151-160.

Özdamar, A. ve Ülgen, K. 2000. Aydın'da Bir Noktanın Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Projesi, Yayınlanmamış Rapor, No:1, İzmir.

Ültanır, M. Ö. 1998. 21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, 313 s., TÜSİAD Yayınları No: T/98-12/239, İstanbul.

Ültanır, M. Ö., Koçak, S. 1999. "Denizüstü Rüzgar Santralleri", Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben (Editörler: Özdamar A., Groehn, H.-G., Ülgen, K.), Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 147-151.