

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİ SANTRALLARI YARDIMIYLA
HİDROJEN ELDESİNİN EKONOMİK ANALİZİ**

Makina Mühendisi, Kutlay TOPRAK

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programına
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Zehra YUMURTACI

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| SİMGE LİSTESİ..... | iii |
| KISALTIMA LİSTESİ..... | iv |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | v |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | vi |
| ÖNSÖZ..... | vii |
| ÖZET..... | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| 1 GİRİŞ..... | 1 |
| 2 HİDROJEN ENERJİSİ..... | 3 |
| 2.1 Hidrojenin Özellikleri..... | 4 |
| 2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri..... | 4 |
| 2.1.2 Hidrojenin Kimyasal Özellikleri..... | 4 |
| 2.2 Hidrojenin Kullanılması..... | 5 |
| 2.3 Hidrojen Üretim Teknolojileri..... | 5 |
| 2.3.1 Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Eldesi..... | 6 |
| 2.3.2 Steam Methane Reforming (SMR) Yöntemiyle Hidrojen Eldesi..... | 8 |
| 2.3.3 Auto Thermal Reforming (ATR) Yöntemiyle Hidrojen Eldesi..... | 9 |
| 3 RÜZGAR ENERJİSİ..... | 10 |
| 3.1 Rüzgar Gücü Kronolojisi..... | 10 |
| 3.2 Rüzgar Enerjisi İlk Kıpırdanışları..... | 11 |
| 3.3 1940 Sonrası Yıllarda Rüzgar Enerjisinin Dünya'da Durumu..... | 12 |
| 3.4 Rüzgar Enerjisinin Kullanım Nedenleri..... | 12 |
| 3.5 Temiz Enerji Kaynaklarının Kullanım Nedenleri..... | 13 |
| 3.6 Rüzgar Enerjisinin Avantajları..... | 14 |
| 3.7 Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları..... | 15 |
| 3.8 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli..... | 16 |
| 3.8.1 Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü..... | 16 |
| 3.8.2 Avrupa'da Rüzgar Enerjisi Potansiyeli..... | 17 |
| 3.8.3 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Durumu..... | 18 |
| 3.8.4 Türkiye'de Rüzgar Enerjisine Neden İhtiyaç Var?..... | 20 |
| 3.8.5 Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Kaynakları..... | 20 |
| 3.9 Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması..... | 21 |
| 4 RÜZGAR SANTRALLERİ EKONOMİSİ..... | 22 |
| 4.1 Rüzgar Sistemlerinin Ekonomisi..... | 22 |
| 4.2 Sermaye Maliyeti..... | 22 |
| 4.3 Ekonomik Konseptler..... | 30 |
| 4.4 Gelir Gereksinimleri..... | 34 |
| 4.5 Rüzgardan Elde Edilmiş Elektriğin Değeri..... | 37 |
| 4.6 Gizli Maliyetler ve Gelişmiş Ülkelerdeki Ekonomik Olmayan Faktörler..... | 37 |
| 4.7 Gelişmekte Olan Ülkelerdeki Ekonomik ve Ekonomik Olmayan Faktörler..... | 39 |

| | Sayfa |
|---------|---|
| 5 | SİSTEMİN TANITILMASI..... 41 |
| 5.1 | Sistemin Ekonomik Modeli..... 42 |
| 5.2 | Sistemin Lokasyonu 42 |
| 5.3 | Rüzgar Türbinleri 43 |
| 5.4 | Maliyet ve Ekonomi 46 |
| 5.5 | Sistemin Verileri 46 |
| 6 | ENERJİ ÜRETİM MALİYETİ HESABI 49 |
| 6.1 | Rüzgar Enerji Maliyeti Hesabı..... 49 |
| 6.1.1 | Yıllık Sermaye Masrafları..... 49 |
| 6.1.1.1 | Yatırım (Kuruluş) Maliyeti 49 |
| 6.1.1.2 | İnşaat Süresince Eskalasyon Yükü..... 50 |
| 6.1.1.3 | İnşaat Süresince Faiz Yükü..... 50 |
| 6.1.1.4 | Sabit Yıllık Sermaye Masrafı Metodu 51 |
| 6.1.2 | İşletme ve Bakım (O&M) Maliyeti..... 52 |
| 6.1.3 | Hesaplamalar 53 |
| 6.2 | Elektroliz Sisteminin Maliyetlerinin Hesaplanması..... 57 |
| 6.2.1 | Amortisman..... 58 |
| 6.2.2 | Tesis Maliyeti..... 59 |
| 6.2.3 | İşletme ve Bakım Maliyeti 60 |
| 6.2.4 | Enerji Maliyeti..... 60 |
| 6.3 | Hidrojen Üretim Maliyeti..... 62 |
| 7 | SONUÇLAR 67 |
| | KAYNAKLAR 69 |
| | ÖZGEÇMİŞ 72 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|------------|--|
| a | Alan (m^2) |
| A | Yıllık amortisman katsayısı |
| ac | Alternatif akım (V) |
| A_n | Yıllık elektrik maliyeti (\$) |
| C_a | Alan başına toplam maliyet ($\$/m^2$) |
| C_k | Sabit yıllık sermaye maliyeti (\$) |
| C_{kW} | kW başına düşen toplam maliyet ($\$/kW$) |
| C_{ms} | Sabit masraflar toplamı ($\$/kW_{yıl}$) |
| C_m | Toplam yıllık O&M masrafı ($\$/yıl$) |
| C_s | Birim tesis bedeli ($\$/kW$) |
| C_T | Toplam maliyet (\$) |
| C_u | Toptan (Perakende) maliyet ($\$/kWh$) |
| dc | Doğru akım (V) |
| e | Yıllık eskalasyon oranı (%) |
| E | Net üretilen yıllık elektrik miktarı (kWh) |
| e_a | Görünür eskalasyon hızı oranı (%) |
| e_i | Genel enflasyon hızı oranı (%) |
| e_x | Eskalasyon hızı oranı (%) |
| F | Gelecek değer (\$) |
| g | Birim enerji maliyeti ($\$/kWh$) |
| g_k | Birim yatırım maliyeti ($\$/kWh$) |
| g_m | Birim işletme ve bakım maliyeti ($\$/kWh$) |
| i | Yıllık faiz oranı (%) |
| i_a | Görünür faiz oranı (%) |
| I_d | Direkt inşaa bedeli (\$) |
| I_k | Toplam yıllık ödeme (\$) |
| L | Dengelenmiş yıl sonu maliyeti (\$) |
| L' | Dengelenmiş yıllık gelir gereksinimleri (\$) |
| LF | Dengeleme faktörü |
| L_f | Şebeke yük faktörü (%) |
| L_{fuel} | Dengelenmiş yıllık yakıt maliyeti (\$) |
| L_s | Dengelenmiş yıllık sabit maliyet (\$) |
| L_{som} | Sabit bakım onarım maliyeti (\$) |
| L_v | Dengelenmiş yıllık değişken maliyet (\$) |
| L_{vom} | Değişken bakım onarım maliyeti (\$) |
| n | Kredi geri ödeme süresi (yıl) |
| N_e | Efektif güç (kW) |
| P | Elektroliz yatırım maliyeti (\$) |
| P_{eR} | Rüzgar türbininin maksimum elektrik gücü (kW) |
| P_v | Şimdiki değer (\$) |
| S | İnşaat süresi (yıl) |
| t | Zaman (yıl) |
| T(t) | Faiz eklenmiş harcama miktarı (\$) |
| y(t) | İnşaat süresi boyunca yıllık harcama yüzdesi (%) |
| Y(t) | Herhangi bir t yılına ait eskalasyonsuz harcama miktarı (\$) |
| $Y_e(t)$ | Eskale edilmiş harcama miktarı (\$) |
| Yh | Yıllık üretilen hidrojen miktarı (kg/yıl) |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---------|--|
| AB | Avrupa Birliği |
| ABD | Amerika Birleşik Devletleri |
| AREP-TŞ | Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi |
| ATR | Otomatik Termal Dönüştürücü (Auto Thermal Reforming) |
| AWEA | Amerika Rüzgar Enerjisi Birliği |
| BM | Birleşmiş Milletler |
| CPO | Katalitik Kısmi Dönüşüm |
| ED | Enerji Dünyası |
| EİE | Elektrik İşleri Etüd Dairesi |
| ETKB | Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı |
| EWEA | Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği |
| FT | Financial Times |
| LPG | Sıvılaştırılmış Petrol Gazı |
| OM | Bakım ve Onarım |
| RES | Rüzgar Elektrik Santrali |
| RT | Rüzgar Türbini |
| SMR | Buhar Metan Dönüştürücü (Steam Methane Reforming) |
| TÜREB | Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği |
| TWEA | Turkish Wind Power Association |
| YİD | Yap-İşlet-Devret |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|-----------|--|----|
| Şekil 2.1 | SMR Proses Akım Şeması | 8 |
| Şekil 3.1 | Kıtaların rüzgar payları | 17 |
| Şekil 3.2 | Türkiye rüzgar potansiyeli | 19 |
| Şekil 4.1 | Elektrik makinalarının bağıl maliyeti..... | 23 |
| Şekil 4.2 | Kümülatif Hacimin Normal Maliyete Oranı | 28 |
| Şekil 4.3 | Sabit Ödeme Serilerinin Şimdiki Değer Dağılımları | 32 |
| Şekil 4.4 | Sabit Ödeme Serilerinin Eskalasyona Bağlı Şimdiki Değer Serileri | 33 |
| Şekil 5.1 | Sistemin Modeli | 42 |
| Şekil 5.2 | Sistemin Lokasyonu | 43 |
| Şekil 5.3 | Rüzgar türbini iç mekanizması..... | 44 |
| Şekil 5.4 | Rüzgar türbinleri | 45 |
| Şekil 5.5 | Türbinlerin Aylara Göre Toplam Üretimi..... | 47 |
| Şekil 5.6 | 1. Türbinin Gücü | 47 |
| Şekil 5.7 | 2. Türbinin Gücü | 48 |
| Şekil 5.8 | 3. Türbinin Gücü | 48 |
| Şekil 6.1 | Değişik Güçlerde Birim Tesis Maliyet Grafiği | 54 |
| Şekil 6.2 | Şebeke Yük Faktörünün Birim Enerji Maliyetine Etkisi | 57 |
| Şekil 6.3 | Türbinlerin Yıllık Enerji Üretimleri | 61 |
| Şekil 6.4 | Türbinlerin üretebileceği yıllık hidrojen miktarı | 62 |
| Şekil 6.5 | Şebeke Yük Faktörüne Bağlı Olarak H ₂ Üretim Maliyetinin Değişim Grafiği..... | 63 |
| Şekil 6.6 | Şebeke Yük Faktörüne Bağlı Olarak H ₂ Üretim Maliyetinin Değişim Grafiği..... | 64 |
| Şekil 6.7 | Elektrik Enerjisine Bağlı Hidrojen Maliyeti Grafiği..... | 64 |
| Şekil 6.8 | Hidrojen üretimi maliyet oranları..... | 65 |
| Şekil 6.9 | Değişik Güçlerdeki Rüzgar Santrallerindeki Hidrojen Maliyeti..... | 66 |

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|-------------|--|----|
| Çizelge 3.1 | Birincil enerji talebi karşılama oranları..... | 13 |
| Çizelge 3.2 | Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü..... | 17 |
| Çizelge 3.3 | Avrupa’da rüzgar enerjisi..... | 18 |
| Çizelge 3.4 | Türkiye’de devrede olan rüzgar santralleri | 18 |
| Çizelge 3.5 | 1 kWh enerjinin üretim maliyeti | 21 |
| Çizelge 4.1 | Büyük Rüzgar Türbinleri için İnşaat Maliyet Analizi..... | 24 |
| Çizelge 4.2 | Küçük Rüzgar Türbinleri için İnşaat Maliyet Analizi..... | 26 |
| Çizelge 5.1 | Çeşme’deki yıllık ve aylık rüzgar hızı (m/s) değerleri..... | 43 |
| Çizelge 5.2 | Rüzgar Türbininin Özellikleri | 45 |
| Çizelge 5.3 | Türbinlerin Yıllık Çalışma Aralığı..... | 46 |
| Çizelge 6.1 | RES’in maliyet hesapları için kabul edilen değerler..... | 53 |
| Çizelge 6.2 | Değişik Güçlerdeki Rüzgar Santral Maliyetleri | 53 |
| Çizelge 6.3 | Eskalasyon Hesabı..... | 55 |
| Çizelge 6.4 | Faiz Hesabı..... | 55 |
| Çizelge 6.5 | Değişik Şebeke Yük Faktörlerinde Birim Enerji | 56 |
| Çizelge 6.6 | Elektroliz sisteminin maliyet hesabı için kabul edilen değerler..... | 58 |
| Çizelge 6.7 | Elektroliz Sistemleri..... | 60 |
| Çizelge 6.8 | Değişen RES yük faktörünün elektroliz sisteminin toplam enerji maliyetine etkisi | 61 |
| Çizelge 6.9 | Hidrojen Üretimi Birim Maliyet Tablosu..... | 63 |

ÖNSÖZ

Günümüzde dünya ekonomisinin enerji ihtiyacının yaklaşık %80'i fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Hindistan ve Çin gibi gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmiş ülkeleri yakalamaya çalışırken enerji tüketimlerini arttırmaları sonucunda, fosil yakıt kaynakları daha da hızla tükenmektedir. Arz sınırlı iken talep giderek arttığı için fosil yakıt fiyatları da yükselmektedir. İki yıl önce petrolün bir varili 18\$ iken bugün 70\$'dır, ve bu rakamın artmaya devam etmesi beklenmektedir.

Bugün dünyada kişi başına düşen ortalama gelir 7000\$ civarındadır. Bu rakam 1860 yılında endüstri devrimi başladığı zaman iki haneliydi. Bu hızlı gelir artışını fosil yakıtlara borçluyuz. Her ilacın yan etkisi olduğu gibi, fosil yakıtların da yan etkisi bulunmaktadır. Fosil yakıt kullanımı hava kirliliği, asit yağmurları, küresel ısınma, iklim değişikliği, ozon tabakasının delinmesi, ve benzeri çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Buzullar erimeye başladı, okyanuslardaki sular ve Hint ve Pasifik Okyanusları'ndaki ada ülkelerinin etrafındaki deniz suları yükseliyor; bu yüzyılın ortasında bu ülkelerin tamamen sular altında kalmaları bekleniyor. Fosil yakıtların yol açtığı yıllık küresel hasar 5 trilyon dolar civarındadır ve bu rakam fosil yakıt tüketimiyle doğru orantılı olarak artmaktadır.

Hidrojen ekonomisi - bu çalışmanın konusu - yukarıda belirtilen, birbiriyle bağlantılı enerji ve çevre sorunlarını çözecektir. Hidrojen enerji sistemi bizi sürekli, yenilenebilir, sürdürülebilir ve tamamen çevreyle uyumlu bir enerji sistemiyle tanıştıracaktır. Hidrojen temiz ve verimli bir enerji taşıyıcısıdır; hava kirliliğine yol açan zehirli maddeler, asit yağmuru meydana getiren kimyasal maddeler, sera gazları, ve ozon tabakasına zarar veren kimyasal maddeler üretmez. Hidrojen, evrende hayata elverişli olarak bilinen tek gezegen olan Dünya'yı hakettiği enerji sistemine kavuşturacaktır.

Gelecekte çok yönlü kullanılmaya başlayacak hidrojen enerjisi için ülkemizde kurulacak sistemlerde faydalı olabileceğine inandığım bu çalışmanın hazırlanması esnasında yardımlarını esirgemeyen ve çalışmayı yöneten sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Zehra Yumurtaçı'ya ve bu çalışmaya temel oluşturan rüzgar enerji santrali verileri için Demirel A.Ş.'ye en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

ÖZET

Günümüzde enerji tüketiminin hızla artmasına paralel olarak alışlagelen enerji kaynaklarının yakın bir gelecekte tükeneceği bilimsel bulgularla ispatlanmış bir gerçektir. Ayrıca artan nüfus ve enerji talebine bağlı olarak dünyanın emisyon değerlerinin günümüzdeki sınırlar içinde tutulması pek mümkün görünmemektedir. Bu kirliliğin devam etmesi durumunda dünya sıcaklığının artacağı ve deniz seviyesinin yükseleceği bilinmektedir. Bunun için şu an tüm dünyada enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları önerilmekte ve kullanılmaktadır. Bu enerji kaynakları temel olarak hidroelektrik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, biokütle enerji ve hidrojen enerjisi olarak sınıflandırılabilir.

Hidrojen enerjisi ikincil bir enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Hidrojen üretimi için ayrıca bir elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için enerji santrallerinin özellikle pik yük saatlerinde ürettikleri enerji hidrojen elde etmek amacıyla kullanılabilir.

Bu çalışmada rüzgar enerji santralinden üretilen elektrik enerjisi elektroliz sisteminde kullanılarak gaz hidrojen üretilmiştir ve maliyet hesapları yapılmıştır. Bu çalışma için İzmir-Çeşme-Germiyan köyünde yer alan 3 adet rüzgar türbinli santralin yıllık ürettikleri enerji değerleri baz alınarak çalışılmıştır. Üretilen elektrik enerjisine göre üretilebilecek hidrojen miktarları ve birim elektrik enerji maliyeti ile birim hidrojen enerji maliyet değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca rüzgar santralinde yük faktörlerinin değişimine göre üretilen enerji ve hidrojen miktarları da belirlenmiş ve maliyet analizleri yapılmıştır. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar grafikler ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Hidrojen enerjisi, Rüzgar enerjisi, Rüzgar-Hidrojen sistemleri, Ekonomik Analiz.

ABSTRACT

Conventional energy sources will be exhausted in the future according to increasing the consumption of the energy. It is a truth that proved with scientific datas. In addition, with the increasing population and energy request, the emission values of the world have not been possible to be in today's limits. It is known that global warming and sea level will increase if this pollution continues. For this reason, renewable energy sources are used and suggested for producing energy all around the world today. These energy sources can be classified as hydroelectric energy, wind energy, solar energy, geothermal energy, biomass ve hydrogen energy.

Hydrogen energy is known as a secondary energy source. Electric energy is needed to produce hydrogen energy. For this, the energy which is produced by power plants especially on the peak load time, can be used to produce hydrogen energy.

In this research, with the electric energy which is produced by wind power plant has been used in electrolysis system, gas hydrogen has been produced and calculated its costs. For this work is based on the annual energy values of 3 plants with wind turbines which are located in İzmir-Çeşme-Germiyanlı village. According to produced electric energy, hydrogen amount which can be produced and unit electric energy cost with unit hydrogen energy cost values has been performed. Moreover, in wind power plant, the energy will be produced due to the changes of load factors and also hydrogen amount is determined and cost analysis has been performed. Results of these calculations are shown in the diagrams.

Keywords : Hydrogen energy, Wind energy, Wind-Hydrogen systems, Economic analysis

1 GİRİŞ

Yapılan tüm bilimsel araştırmalar; doğal çevreye zarar vermeyecek, teknolojik gelişmeye paralel olarak, mutfak fırınından uzay araçlarına kadar, tüm uygulama alanlarında maksimum enerji ihtiyacına cevap verecek, önceki enerji kaynaklarının ve çeşitli kirletici etkilerin doğaya verdiği kalıcı zararları yok etmeye yardımcı olabilecek ideal bir enerji kaynağının en kısa zamanda tüm uygulama alanlarında kullanılması gerektiği sonucunda birleşmektedirler.

Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüşürülmesi ile elde olunan ikincil enerjilere, enerji taşıyıcısı denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vuran bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen ise 21. yüzyıla damgasını vuracak bir diğer enerji taşıyıcısıdır.

İdeal enerji kaynağı arayışında bir takım kıstaslar belirlenmiştir. Bunlar ;

a-) Teknoloji ve bilimin bugünkü noktaya getirdiği insanlık, yüksek standartta yaşayabilecek uygun enerjiyi bulabilmek için, yaşadığı ortamın doğallığını düşünmemekte, tahrip edilmesine göz yumabilmektedir. Bu aşamada ideal enerji arayışındaki en önemli kıstas çevreye zarar vermemesi olmalıdır.

b-) Bu düşünceye paralel olarak, temiz enerji başlığı altında yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşılması, enerji arayışına yeni bir boyut getirmiştir. Bu nedenle ideal yakıt mutfakta kahve pişirmekten, uzaya mekik fırlatmaya kadar gelişen teknolojinin uygulama alanlarında etkin bir şekilde kullanılabilmelidir.

c-) Doğada, uygulamanın ve ihtiyacın niteliğine göre, bol miktarda, her koşulda bulunabilmeli ve sürekli bir geri dönüşüme ve tükenmez bir kaynağa sahip olmalıdır.

d-) şu anda kullanılan fosil enerji kaynaklarının yerine çok uygun ve ucuz bir sistem ile uygulanabilmelidir.

e-) Taşıma, depolama, kullanma gibi aşamalarında problem çıkarmamalı ve bulunduğu ortama zarar vermemelidir.

f-) Uygulanacak sistem ile üretildiği ünite arasında, uygulamanın niteliğine göre, özelliğini kaybetmeden kolayca nakledilip, gerekli sürede, uygulama aşamasına kadar saklanabilmeli veya değişik sistemler ile uygulama ortamında üretilebilmelidir.

Çevrenin doğallığıının bozulmaması ve insanlığın kısıtlanmadan gelişimini sürdürebilmesi için buna benzer birçok parametrenin bir arada bulunması gerekir. Bu özelliklerin çoğunu taşıyan en güçlü enerji taşıyıcılarından biri olarak hidrojen enerjisi görölmektedir (Yörüköğulları ve Altan, 1997).

2 HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen enerjisi önümüzdeki yılların en önemli enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bu enerji sudan elde edilebilmekte ve yüksek verimlilikle, çevre üzerinde hiçbir olumsuz etki yaratmadan yararlı bir enerjiye dönüştürülebilmektedir. Dünyanın enerji sorununu çözmek için kullanılacak hidrojen enerjisi ile uzun yıllar yetecek enerji devamlı olarak üretilebilecektir (Günerhan, 1998).

Yeni enerji kaynaklarının ideal enerji olma yolundaki eksikliklerini tamamlayacaktır. Ayrıca bu kaynaklar ile tüketici arasında köprü görevi görecektir sistemler oluşturmak ve bu sistemlerde hidrojen gazını kullanmak mümkündür.

Hidrojenin bir enerji vektörü olarak avantajlarından en önemlisi toksik olmayan ve korozyona neden olmayan bir element oluşudur. Bu yüzden normal önlemler alındığında hidrojenin kullanılması tehlikesiz ve çok basittir. Kirliliğe neden olmayan hidrojen geri dönüşümünde su üreterek doğal çevreye girer (Pottier ve Bailleux, 1986).

Doğada bileşikler halinde bol miktarda bulunan hidrojen serbest olarak bulunmadığından doğal bir enerji kaynağı değildir. Bununla birlikte hidrojen birincil enerji kaynakları ile değişik ham maddelerden üretilebilmekte ve üretiminde dönüştürme işlemleri kullanılmaktadır.

Değişik yöntemlerle suyun hidrojene ve oksijene ayrıştırılması ile oluşturulan gazlar toplanır, depolanır ve çeşitli yöntemlerle kullanım alanlarına nakledilir. Açığa çıkan oksijen ise genelde kullanım alanına hidrojen ile birlikte nakledildiği gibi atmosfere de bırakılıp, hava kirliliğinin giderilmesi, kirlenmiş göllerin, nehirlerin temizlenmesi ve şehir atıklarının temizlenmesi gibi doğa temizliğine yardımcı olur. Hidrojen doğada en çok bulunan element olmasına rağmen hafifliği sebebi ile atmosfere yükselip kaldığından yeryüzünde diğer elementlerle bileşik yapmış halde rastlanır. Doğadaki miktarı sonsuz olup tükenmez, yanması ile çok yüksek verim elde edilir ve sonuçta su buharı meydana gelir. Atık madde olarak hidrojenin yanmasından su buharı oluşması doğal çevreye zarar vermemesinin yanında diğer enerji atıklarının verdiği zararların giderilmesine yardımcı olabilmekte ve teknolojinin birçok alanında hidrojen atıklarından etkin bir şekilde doğal geri dönüşümlü olarak yararlanılabilmektedir (Yörükoğulları ve Altan, 1997).

2.1 Hidrojenin Özellikleri

En basit kimyasal element olan hidrojen, renksiz, kokusuz, tatsız ve yanıcı bir gazdır. Saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif kimyasal elementtir

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| Atom Numarası | : 1 |
| Atom Kütleli | : 1,008 |
| Erime Sıcaklığı | : -259,14 °C |
| Kaynama Sıcaklığı | : -252,87 °C |
| Elektron Biçimlenmesi | : 1 s ¹ |
| Yükseltgenme Derecesi | : +1 |
| Özgül Kütleli | : 0,0899 kg/m ³ |
| İzotopları | : 1,2 ve 3 |

(Akkuş, 2001).

2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Hidrojen molekülü, birbirinden 0,75 Angstrom uzaklıktaki iki atomun birleşmesinden oluşur. Aradaki bağ, iki elektronun ortaklaşa kullanılmasından meydana gelir ve çok yüksek olan ayrışma enerjisi, molekülün çok kararlı olduğunu gösterir. Hidrojen, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Havaya göre yoğunluğu 0,07'dir ve bu bakımdan cisimlerin en hafifidir. Dolayısıyla gözenekli çeperlerden diğer gazların tümünden daha hızlı geçer. Aynı şekilde kızıl derecedeki demir, platin ve iridyum gibi metallere de sızar. Hidrojen helyumdan sonra sıvılaştırılması en zor olan gazdır. Dönüşüm sıcaklığı -240°C olan hidrojen atmosfer basıncında -253°C'de kaynar, -259°C'da katılaşır. Özellikle kendi hacminin bin kat fazlasını çözüdürebilen paladyum gibi kimi metaller tarafından kolayca soğurulur (Akkuş, 2001).

2.1.2 Hidrojenin Kimyasal Özellikleri

Hidrojen etkinleştirilmiş biçimleri dışında soğukta pek etkili değildir. Sıcakta ya da katalizörler eşliğinde pek çok tepkimeye girer. Değerli bir element olması nedeniyle çok belirgin elektropozitif bir özellik taşır. Orta kuvvette bir indirgendir. Alkali metal oksitler (AL₂O₃) gibi çok kararlı bileşiklerini indirgeyemez. Bununla birlikte NiO, CuO, vb gibi pek çok metal oksidi indirger. Bu yolla katalizör olarak kullanılan çok ufaltılmış metaller elde edilir.

Hidrojen alkali ve toprak alkali metallerde olduğu gibi ametallerin çoğuyla da doğrudan birleşir. Halojenlerin dördüyle de tepkimeye girerek hidrasitleri verir, fluordan iyoda doğru gittikçe hem tepkime hızında hem de açığa çıkan ısı miktarında azalma görülür. Oksijenle kızıl derecede ya da düşük sıcaklıkta bir katalizör eşliğinde birleşerek su verir. Mavi bir alevle yanar, oksijenle karışımı oksihidrojen hamlacında kullanılır. Kükürtle 250°C'de birleşir. Azotla yüksek basınçta, bir katalizör eşliğinde birleşerek amonyak elde edilmesini sağlar (Akkuş, 2001).

2.2 Hidrojenin Kullanılması

Sanayisel olarak da kullanılan hidrojen temel olarak aşağıdaki katalitik hidrojenleme tepkimelerinde kullanılır:

1. Haber yöntemiyle amonyak (NH_3) birleşiminde
2. Metanol (CH_3OH) birleşiminde
3. Bitkisel yağları doyurmada
4. Alkenleri okso yöntemiyle aldehit ve alkollere hidroformillemede
5. Petrokimyada hidrojenle işlemede
6. Rafineride desülfirizasyon ve hidrokraking işlemlerinde
7. Düz cam üretiminde
8. Işıl işlemlerde koruyucu ve reaktif atmosfer bileşeni olarak
9. Enerji santral ekipmanlarının soğutulmasında
10. Bitkisel yağların katılaştırılmasında
11. Roket yakıt karışımlarında (Avcı, 1999).

Sıvı hidrojen genellikle uzay araçlarının fırlatıcılarını itmede yakıt olarak kullanılır. Bu durumda çoğu kez sıvı oksijen gibi bir yakıtla tepkimeye sokularak aracın olağanüstü bir hıza (4500 m/s'nin üzerinde) erişmesini sağlar. Nükleer ya da güneş kökenli elektrikle suyun elektrolizi sonunda üretilen hidrojen verimin artırılması ve fiyatların düşürülmesi durumunda geleceğin önemli bir enerji kaynağı olabilir

2.3 Hidrojen Üretim Teknolojileri

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik ham maddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen üretiminde kullanılan birincil enerji kaynakları alışıla gelmiş fosil yakıtlar olabileceği gibi, hidrolik enerji ve nükleer enerji

olabilmektedir. Yenilenebilir temiz enerji kaynaklarından güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, deniz enerjileri bu amaçla kullanılabilir. Hidrojen üretiminde kullanılabilen ham maddeler ise su, fosil yakıtlar ve biyokütledir. Bugün dünyada yakıt dışı teknolojik gereksinimlerle yılda 500–600 milyar m³ hidrojen fosil yakıtlardan üretilmektedir. Ancak hidrojen çağına ait hidrojen yakıtının temelde yenilenebilir enerjilerle sudan üretilmesi ana ilkedir. Kolay bulunan bir element olan hidrojen birçok proseste girdi olarak kullanıldığı gibi kimyasal ve petrokimyasal birçok işlemde de yakıt görevi görür. Hidrojenin geleneksel uygulamaları dışında yakıt pili gibi uygulamalarının da ileriye yönelik olarak hidrojen tüketimini, buna bağlı olarak da üretimini tüm dünyada arttıracığı ön görülmektedir. Bu noktada hidrojenin ekonomik ve çevre dostu yöntemlerden üretilmesi, hidrojenin temiz enerji alanında önemli bir element olması için çok önemlidir.

Birçok endüstride hidrojen üretimi için aşağıdaki yöntemler uzun yıllardır kullanılmaktadır:

1. Elektroliz
2. Steam Methane Reforming (Buhar Metan Dönüştürücü) (SMR)
3. Auto Thermal Reforming (Otomatik Termal Dönüştürücü) (ATR)
4. Metanol parçalama
5. Kısmi Oksidasyon
6. Kok Gazlaştırma
7. Biokütle Gazlaştırma

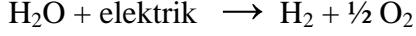
Endüstriyel hidrojen üretim metotları birincil enerji kaynağının ekonomik olması, prosesin verimliliği ve sorunsuz çalışması gibi kriterler gözetilerek seçilirler. Bu kriterlere göre ise en yoğun tercihler elektroliz, SMR ve ATR olarak görülür (Yavaş, 2006).

2.3.1 Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Eldesi

Elektroliz üniteleri talepteki dalgalanmaları %25 seviyelerine kadar tolere edebilir. Bu durum elektroliz hücresinin ömrünü kısaltır, ancak çıkan hidrojenin kalitesinde değişiklik olmaz. Elektroliz ile hidrojen üretiminde 1 m³ hidrojen üretimi için 5 kWh elektrik harcanır. Bu miktar değişik elektroliz sistemi üreticilerinin ürün speklerinde 4,8 ile 5,5 kWh arasında değişkenlik gösterir. Prosesin düşük basınçta gerçekleşmesi nedeniyle kompresör, pompa vb ekipmanın elektrik sarfiyatlarını da dikkate almak gerekir.

Bir elektroliz ünitesi temel olarak elektroliz hücresi, kontrol ünitesi ve güç kaynağından oluşur. Gereken saflık ve gazdaki nem miktarına göre deokso ve saflaştırıcı sistemleri de kullanılabilir.

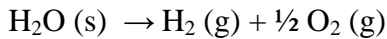
Elektroliz prosesinde doğru akım uygulanarak suyun temel bileşenlerine ayrıştırılması hedeflenir. Reaksiyon şu şekildedir:



Direnci azaltmak amacıyla KOH elektrolit çözeltisi kullanılır.

Hidrojen içermesi bakımından en zengin maddeler sırasıyla su (H_2O), fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb.) ve biokütledir. Bu ideal enerjiyi elde edip ondan yararlanabilmek için kullanılan yöntemler içerisinde en umut verici olan, yeryüzünde tükenmeyecek bir kaynak olan ve çevresel kirlenmeye neden olmayacak olan sudan hidrojenin elde edilmesidir. Diğer kaynakların rezervleri sınırlıdır ve üretim esnasında çevre kirliliğine yol açmaktadırlar. Suyun elektroliziyle hidrojen elde edilmesi klasik bir yöntemdir. Su oda sıcaklığında durağan olduğundan suyun elektrolizi kayda değer bir enerji gerektirir. Bu yüzden elektroliz maliyeti büyük oranda enerji maliyetine dayanmaktadır. Suyun elektrolizi esnasında üretilen hidrojenin hacimce 1,5 katı oranında ya da ağırlığının 0,8'i oranında oksijen üretilmektedir. Özellikle çelik endüstrisinde, hastanelerde ve medikal amaçlarla oksijene çok ihtiyaç duyulmaktadır. Yan ürün olarak çok saf bir şekilde oksijen elde edilebilmesi elektroliz yönteminin önemli bir özelliğidir. Bugün hidrojen üretiminde en önemli endüstriyel proseslerden biri olan suyun elektrolizi gelecekte çok daha önemli olacaktır. Günümüzde hidrojen üretiminde kullanılan en pratik yöntemlerden biri olan sudan hidrojen elde edilmesinde, elektroliz yöntemiyle suyun iki ana bileşeni olan oksijen ve hidrojene ayrışması sağlanır.

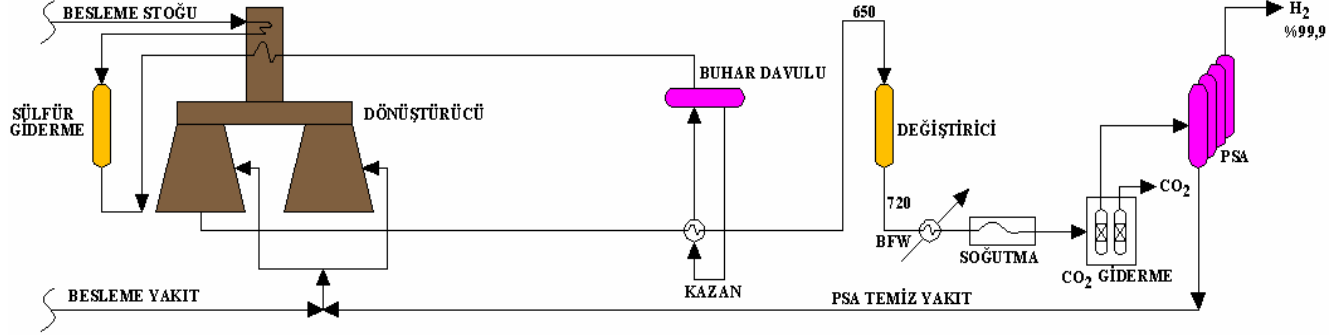
Sıvı fazdaki su, gaz fazındaki oksijen ve hidrojene aşağıdaki basit kimyasal denklemlerle ayrılır:



Suyun elektrolizi hidrojen ve oksijen gazlarının üretiminde çok basit bir yol izlenir. Elektrolizerlerin çalıştırılması kolaydır ve çok az bakım gerektirirler. Bütün bunlara karşılık elektrolizle çok saf ürünler elde edilir.

2.3.2 Steam Methane Reforming (SMR) Yöntemiyle Hidrojen Eldesi

Tipik SMR ünitesinin proses şeması aşağıda verilmiştir:



Şekil 2.1 - SMR Proses Akım Şeması (Yavaş, 2006)

SMR ile hidrojen üretiminde doğal gaz, LPG, hafif hidrokarbonlar ve nafta gibi hidrojen kaynakları kullanılabilir. Basınçlandırılan yakıt gazı öncelikle ısıtılır, gerekirse buharlaştırılır, bir miktar hidrojen ile zenginleştirilir ve kükürt gidermeye gönderilir.

Kükürt gidermenin ilk adımı yakıt içindeki kükürlü bileşiklerin H_2S 'e dönüşecek şekilde hidrojenasyon işleminden geçmesi, olefinlerin ise doymuş hidrokarbonlara dönüştürülmesidir.

Kükürt gidermenin ikinci aşaması ZnO yatağı ile gerçekleştirilir. Yakıt gazı daha sonra tekrar ısıtılır, buhar ile karıştırılır ve reaktöre gönderilir. Burada hidrokarbon – buhar karışımı katalizörlerle temas geçerek H_2 , CO , CO_2 ve kalıntı CH_4 denge karışımına dönüşür.

Katalizör tüplerinin içinde gerçekleşen iki temel reaksiyon şunlardır:

1. Buhar/metan dönüşümü
2. Karbonmonoksit dönüşümü

Katalizör tüpler özel alaşımlardan imal edilir ve endotermik reaksiyon için gereken ısıyı temin etmek için dışarıdan ısıtılır. Dönüştürücünün çıkışındaki tipik basınç ve sıcaklık yaklaşık 20 – 25 bar ve $850^\circ C$ 'dir.

Gaz, sonrasında soğutulur ve CO dönüşüm reaktörüne girer. Bu aşamada CO kalan buharla reaksiyona girip karışımdaki H_2/CO oranını iyileştirir.

Sonraki aşamada daha da soğutulan gaz gereken saflık değerini yakalamak için çoklu PSA (Pressure Swing Adsorption) ünitelerine beslenir. PSA'dan çıkan off-gas proste ihtiyacı duyulacak ısının büyük kısmını karşılamak için kullanılır, kalan ısı ihtiyacı ise ilave yakıt tüketimiyle sağlanır.

Atık ısı verimli bir şekilde prosten alınarak buhar üretiminde kullanılabilir. Proses tasarımı yüksek ya da düşük miktarlarda buhar elde edecek şekilde yapılabilir.

1 m³ hidrojen üretimi için yaklaşık olarak 0,8 kg CO₂ açığa çıkmaktadır.

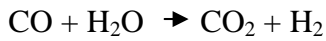
2.3.3 Auto Thermal Reforming (ATR) Yöntemiyle Hidrojen Eldesi

Ototermal dönüşüm (ATR), katalitik kısmi dönüşüm (Catalytic Partial Oxidation – CPO) ve SMR proseslerinin çift fonksiyonlu tek bir katalizör üzerinde gerçekleşmesiyle hidrojen üretimidir. Giren gaz yine doğal gaz, LPG, hafif hidrokarbonlardır. Oluşan reaksiyonlar şunlardır:



Kısmi oksidasyon reaksiyonu soğukta başlar ve endotermik prosesin ihtiyacı duyacağı ısı üretilene kadar devam eder, sonrasında SMR prosesi gerçekleşir. Ekzotermik olan CPO prosesi endotermik olan SMR prosesi için gereken ısıyı sağlar.

Bunlara ilave olarak kalan CO aşağıdaki reaksiyon sonucu suyla tepkimeye girerek ilave hidrojen üretir:



3 RÜZGAR ENERJİSİ

3.1 Rüzgar Gücü Kronolojisi

M.Ö. 2800: Mısırlılar tarafından ticari amaçlı yelkenlilerde kullanıldı.

IX. yy: Persler tarafından yel değirmeni olarak kullanıldı.

XI. yy. Avrupa'da özellikle Hollanda'da yeldeğirmeni olarak kullanıldı.

16. yy: Danimarka, Hollanda, Almanya'da yel değirmenlerinde kullanıldı.

1846-1908: Paul La Cour, ilk modern rüzgar türbinlerini tasarladı.

1918: Danimarka'da toplam kurulu güç 3 MW oldu.

1920-1930: Danimarka'da toplam 3000 türbin vardı.

1932: ABD'de 15 m/s rüzgar hızında 20 MW'lık bir türbin tasarlandı, sadece kağıt üzerinde kaldı.

1942: Modern rüzgar teknolojisinin başlangıç tarihi.

1941-1945: Smith/Putnam tarafından 1250 kW'lık türbin kuruldu. ABD'de 1945'de kapandı.

1950: Amerika'da orta batıda 50.000 küçük türbin.

1956-1957: J. Juul, Danimarka'da 200 kW'lık Gedser rüzgar türbini.

1958: Ulzich Hütter, Hannof tezine göre 10 kW'lık deniz üstü türbin kurdu. Meksika Körfezi'ne bir petrol platformuna kuruldu.

1974: İsveç'te toplam kurulu güç 1 MW oldu.

1980 – 1981: Endüstriyel ve teknolojik sıçrama ile modern türbinlerin gelişimi başladı.

1985: 1000'den fazla türbinden oluşan Kaliforniya rüzgar çiftliği kuruldu.

1983 – 1987: Kuzey Denizi kıyısında 300 kW'lık Vorth-Hütter türbini kuruldu.

1990: Almanya'da 4 tane MAN'ın yaptığı Grouten II tipi rüzgar türbini kuruldu.

1991: Baltık Denizi'nde Danimarka'da deniz üstüne (11 x 450 kW) rüzgar çiftliği kuruldu.

1995: 1500 kW'lık Neg Miçon türbinleri tasarlandı.

1996: 1500 kW ve 1650 kW'lık Vestas türbinleri tasarlandı.

1997: Buzlu ve soğuk yerler için rotor kanadı siyah yapıldı.

1998: 1,5 MW'lık Enercon E66'lardan oluşan Almanya'da Avrupa'nın en büyük rüzgar çiftliği (52,5 MW) kuruldu.

1999 – 2003: 2 MW ve 3 MW çalışmaları (Tuncer, 1999).

2006: 4 MW çalışmaları.

3.2 Rüzgar Enerjisi İlk Kıpırdanısları

Rüzgar enerjisi kullanımı günümüzden çok öncelere dayanmaktadır. Sanılanın aksine ilk defa, Asya medeniyetlerinden olan Çin, Tibet, Hindistan, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgar Türbinleri (RT) kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö. 200 - 300 yıllarında basit yapıdaki yatay - eksenli RT'leri hakkındadır. Ayrıca M.Ö. 700 yıllarında Farslıların da düşey eksenli RT'lerin kullanıldığı somut kanıtlardan bilinmektedir (Golding, 1955).

Rüzgar gücü kullanımı, Asya'dan Avrupa'ya 10.yüzyıl civarında geçmiştir. Bu geçişin ilk belirtileri olarak 11.ve 12. yüzyılda İngiltere'de rüzgar millerinin kullandığı bilinmektedir. Mesela 1190'lı yıllarda Alman Haçlıları rüzgar millerini Suriye'ye getirmiştir. Dolayısı ile ortaçağ döneminde rüzgar enerjisinin Avrupa'da kullanıldığını görmekteyiz. O dönemlerde ve hala günümüzde birçok ülkede çiftçiler tarafından kullanılan rüzgar milleri daha çok kuyulardan su çekmek amacıyla yönelik olarak kullanılmıştır. Hollanda ve Akdeniz'deki bir çok adada bunların örneklerini görmekteyiz.

Endüstri devrimi ile beraber, 18. yüzyılda buhar makinalarının ortaya çıkması sonucu dünya, enerji gücünün temini için termodinamik işlemlere dayanan makinalardan yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber, bu makinalar daha avantajlı duruma gelmiştir. İstenildiği zaman enerji kaynağı sağladıkları için, rüzgar enerjisinden daha popüler hale gelmiştir. Bu yüzden 19. yüzyılda ve 20. yüzyılın ortalarına kadar rüzgar enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece Amerika,

Rusya ve Avusturya gibi nüfusu dağınık olarak bulunan ülkelerde rüzgar enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek için kullanılmıştır.

3.3 1940 Sonrası Yıllarda Rüzgar Enerjisinin Dünya'da Durumu

İkinci Dünya Savaşı yıllarında Danimarkalı bir şirket olan F.L. Smith, 2 ve 3 kanatlı RT'leri inşa etmiştir. Bu türbinlerde, öncekilerde olduğu gibi doğru akım üretilirdi.

Daha sonra 1956-1957 yıllarında 200 kW gücünde ilk Gedser RT, Jull tarafından Gedser'de SEAS elektrik şirketi için yapılmıştır. Gedser türbini günümüzde kullanılan RT'lere öncü nitelikte özelliklere sahiptir. Bunlar 3 kanatlı, elektromekanik yönerge sistemli ve asenkron motor kullanmakta idi. Stall kontrol prensibine göre çalışan Gedser türbininde, ayrıca aerodinamik uç freni bulunmaktaydı. Bu sistem günümüzde kullanılan Stall kontrollü türbinlerde hala bulunmaktadır.

1960'lı yıllardan sonra rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ekonomik nedenlerle azalma göstermiştir. Daha ucuz olan fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğal gaz vb) kullanılarak yapılan termik santraller revaçta olmaya başlamıştır. Fakat 1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizi insanoğlunu tekrar alternatif enerji kaynakları aramaya itmiştir. Rüzgar, güneş, jeotermal vb. gibi alternatif enerji kaynaklarının yenilenebilir olması, çevre kirliliğine yol açmaması, ham maddeye gereksinim duymaması gibi sebeplerden dolayı tekrar kullanılmaya başlanmıştır (Gündüz, 1997).

3.4 Rüzgar Enerjisinin Kullanım Nedenleri

Türkiye'nin hedefi gelecekte enerji ihtiyacını karşılamada kendi kendine yetebilmektir. Bu, şu an için ulaşılması güç bir hedeftir. Mevcut enerji üretimimizin yaklaşık olarak % 61'inin dışa bağımlı kaynaklardan karşılandığı göz önüne alınırsa bu ibreyi aşağılara çekmek ülkemiz için hiç de kolay değildir. Su ve kömür kaynaklarımız sınırlı olduğuna göre elimizde doğal olarak alternatif enerji kaynakları kalmaktadır. Bunlar da daha çok güneş, rüzgar, jeotermalden sağlanabilir. Şu andaki sanayileşme ve büyüme hızıyla bu oranı aşağılara çekmek için muazzam yatırımlar yapmak zorunda olduğumuz bir gerçektir. Bunu yaparken bir yandan da mevcut hatlarımızı da iyileştirmek zorundayız.

Çizelge 3.1- Birincil enerji talebi karşılama oranları (TWEA)

| Yıl | Yerli Kaynaklar | İthalat |
|------|-----------------|---------|
| 1998 | %39 | %61 |
| 2000 | %34 | %66 |
| 2010 | %29 | %71 |
| 2020 | %25 | %75 |

Günümüzde hidroelektrik santral kurulabilecek her yer değerlendirilmiş veya değerlendirilmektedir. Mevsim şartlarından etkilendiği için kesin garanti olarak kabul edilemez. Yine doğal gaz santrallerinin gaz sıkıntısı dışa bağımlılığın en güzel örneğidir. Nükleerde ise yeterli uranyum rezervimizin olmamasından dolayı gene bağımlılığımız devam edecek.

Geriye kalan güneş, rüzgar, jeotermal ve diğer kaynaklarla ise birdenbire bütün ülke ihtiyacına cevap vermek oldukça zor ve pahalı olacaktır. Ancak şu da bir gerçektir ki; tüm bu saydığımız enerji kaynaklarını kullandığımız enerji çeşitliliği olan bir Türkiye yaratmalıyız. Sadece bir kaynağa yönelmek doğru olmaz. Ama ağırlığımızı temiz enerjiye ve özellikle de rüzgara yöneltmeliyiz. Daha hızlı hareket etmek ve en son teknolojiyi, mümkün olan en büyük güçteki türbinleri getirmeliyiz. Hatta bunları yerli üretme yollarını aramalıyız. Böylece hem yeni iş kolları yaratılmış olur hem de ülke parası dışarı gitmez (Sarıkayalar, 1998).

3.5 Temiz Enerji Kaynaklarının Kullanım Nedenleri

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık % 4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu ihtiyacı karşılayan fosil-yakıt rezervi ise, çok daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. En iyimser tahminler bile, en geç 2030-2050 yılları arasında petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceğini ve ihtiyacı karşılayamayacağını göstermektedir. Kömür ve doğalgaz için de benzer bir durum söz konusudur. Bu nedenle insanoğlu fosil yakıt rezervlerinin bitmesini beklemeden temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorundadır. Kendini sınırsız tekrarlayan yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, su ve biokütle gibi) çok kısa bir süre içinde önem kazanacaktır. Bu gerçeğin farkında olan dev petrol şirketlerinin (Agip, Shell, BP gibi) araştırma ve geliştirme çalışmaları da tamamen söz konusu teknolojileri

geliştirmek üzerine yoğunlaşmaktadır. İlk yatırım maliyetinden sonra, bakım ihtiyacı sifıra yakın olan sistemlerin birim fiyatları dünya genelinde düşmeye başlamıştır. Bunun sonucunda, çok yakın bir gelecekte hem verim hem de maliyet olarak alternatif enerji kaynakları sistemleri, diğer konvansiyonel sistemler ile aynı seviyeye gelecektir (Şen, 1999).

3.6 Rüzgar Enerjisinin Avantajları

- 1-) Temiz, çevreyi kirletmeyen, yakıt parası olmayan bir enerjidir.
- 2-) Rüzgar enerjisinde ulaştırma masrafları yoktur. Doğadaki rüzgar direkt olarak kullanılabilir.
- 3-) Sürekli bir enerji kaynağıdır. Dışa bağımlılığı yoktur. Sadece yerel imkanlarla enerji elde edilir.
- 4-) Özellikle dikkat edilecek başka bir hususta uzun dönem işletme masrafları diğer tüm enerji kaynaklarının içinde en az olanıdır.
- 5-) Rüzgar türbinleri karmaşık makinalar değildir. Gayet basit bir şekilde operatöre ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilir. Tamamen otomatik olarak çalışabilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ayrıca bu şekilde sadece periyodik bakımların yapılması ile 20-30 yıla kadar çalışabilir.
- 6-) Rüzgar türbinleri sanıldığı kadar gürültü rahatsızlığı da vermezler. Çıkarılmış olduğu ses bir çoğundan daha azdır.
- 7-) Hava kirliliği yaratacak emisyon ve atık ısı oluşturmazlar. Rüzgar enerjisinin en büyük avantajı gerek sera etkisi gerekse de hava kirleticisinin (CO₂, SO₂, NO_x gibi) diğer yöntemlere göre az olmasıdır.
- 8-) Rüzgar enerjisi işgücü ve istihdam demektir. Örneğin Danimarka'yı ele alırsak istihdam hacmini gayet iyi anlarız. Yeni iş kollarının yaratılması ile ekonomide canlanma meydana gelecektir. Yine New York'da yapılan bir çalışmaya göre, rüzgar enerjisinden üretilen 10 milyon kWh elektrik enerjisinin yine aynı elektrik miktarını üreten kömür santraline göre % 27 daha fazla ve gene doğal gaz kombine çevrim santralinden de % 66 daha fazla iş imkanı sağlamaktadır (Şen ve Şahin, 1997).

9-) Artan petrol fiyatları, yeni çevre düzenlemeleri ve aniden ortaya çıkan başka maliyetleri olmadığı için vergi artırımını olarak vatandaşa yük olmaz.

10-) Çok yer kaplamazlar. Aksi gibi deniz üstü olarak denize kurulabilen cinsleri karadan yer kazanma maksadıyla kullanılabilirler.

11-) Patlama yapmazlar ve radyasyon yaymazlar. Dolayısıyla tehlikeli değildirler.

12-) Rüzgar türbinlerinin bulunduğu yerler başka amaçlara hizmet edebilirler (tarla vb. gibi) Yani, diğer santraller gibi fazla yer işgal etmezler.

13-) Enerji ücretsiz olup taşınma maliyetleri yoktur. Buna ilaveten de bir atık üretimi söz konusu değildir.

14-) Herhangi bir radyoaktif ışınım tahribatı yaratmamaktadır.

15-) Atmosfere veya yakındaki nehir ve denizlere ısı emisyonları bulunmamaktadır.

16-) Rüzgar türbinleri güvenlik açısından oldukça başarılı bir geçmişe sahiptir. Kullanım sonrasında tasfiye edilmeleri diğer enerji tesislerine göre çok kolaydır.

17-) Rüzgar bir yerli enerji kaynağıdır. Ayrıca dünya enerji pazarlarından büyük ölçüde bağımsız olma özelliğine sahiptir.

18-) Rüzgar türbinlerinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişine kadar, üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleştirilmektedir.

19-) Rüzgar türbinleri modüler olup herhangi büyüklükte imal edilebilmekte ve tek olarak ya da gruplar halinde kullanılabilirler.

3.7 Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları

1-) İlk dezavantajı türbinlerin maliyetleridir. Birçok türbin teknik olarak başarılı çalışma göstermekte olup, maliyet biraz yüksektir. Ancak; işe çevre ve sosyal şartlar bakımından bakacak olursak, rüzgar enerjisinin çevreyi kirletmediği gibi buna ilaveten temizlediği saptanmıştır. Yani gayet temiz bir enerjidir. Zaten türbin fiyatları da gün geçtikçe iyileşme göstermektedir. Zamanla fiyatlar diğer enerji kaynakları ile rekabet eder hale gelmiştir. Daha da iyi olacağı açıkça bellidir.

2-) Bir başka dezavantaj ise, özellikle yurdumuzda da karşılaşıldığı gibi iyi derecede rüzgar alan bölgelerde arazilerin elde edilmesindeki zorluklar veya sit alanı olarak görülmesinden dolayı yaşanan zorluklardır.

3-) Rüzgar santrali kurulması için gereken ekipmanların çoğunun ithal edilmesi ve bu yüzden de pahalı olması. Bu sorun bir an önce yerli sanayinin kurulması ile ortadan kalkacaktır.

4-) Rüzgar enerjisi kullanımının en büyük dezavantajı rüzgarın değişken olmasıdır. Yeryüzünde rüzgarın sabit olduğu az yer vardır. Bu yüzden ki insanoğlu istediği her yere rüzgar santrali kuramaz. Aslında rüzgarın bu değişkenliği enerjinin depolanması yolu ile aşılabılır. Ancak hidroelektrik santralinde olduğu gibi barajlar yardımıyla bu iş yapılamamaktadır. Fakat depolama mümkün olmadığından dolayı en sağlıklı yol rüzgardan elde edilen enerjinin direkt olarak ana güç şebekelerine verilmesidir.

Günümüzde rüzgar enerjisi sektörü yıllık toplam cirosu 2 milyar dolar olan dev bir sektör haline gelmiştir. Günümüzde kullanılan rüzgar gücü, dünyada toplam elektrik enerjisi üretiminde % 1'lik bir paya sahip iken, önümüzdeki dönemde bu oranın artacağı tahmin edilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın yaptığı açıklamaya göre, ABD, 2020 yılında elektrik enerjisinin % 5'ini rüzgar gücünden temin etmeyi amaçlamaktadır (FT, 1999).

3.8 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

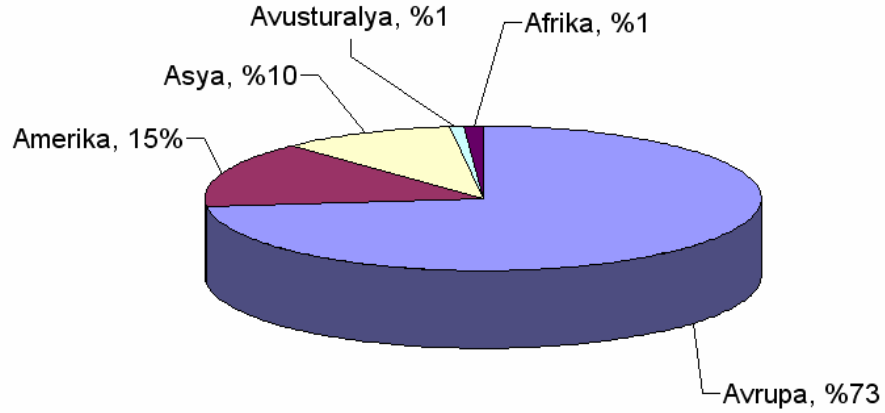
3.8.1 Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücü

Dünya geneline bakacak olur isek, Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi Almanya, İspanya ve Amerika kurulu rüzgar gücü bakımından ilk 3 sırayı paylaşmaktadırlar (Yumurtacı, Bekiroğlu ve Kekezoğlu, 2006). İspanya ise bu listede hızla yukarılara doğru tırmanmaktadır. Türkiye ise son sıralarda yer almaktadır. Ancak proje aşamasındaki santrallerin kurulması ile beraber hızla listede yukarılara doğru tırmanacağı açıktır.

Çizelge 3.2 - Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü
(Yumurtacı, Bekiroğlu ve Kekezoğlu, 2006)

| Toplam Kapasite | MW | % |
|-----------------|-------|------|
| Almanya | 18428 | 31.0 |
| İspanya | 10027 | 16.9 |
| ABD | 9149 | 15.4 |
| Hindistan | 4430 | 7.5 |
| Danimarka | 3122 | 5.3 |
| İtalya | 1717 | 2.9 |
| İngiltere | 1353 | 2.3 |
| Çin | 1260 | 2.1 |
| Japonya | 1231 | 2.1 |
| Hollanda | 1219 | 2.1 |
| Toplam | 51936 | 87.5 |
| Diğer Ülkeler | 7368 | 12.5 |
| Toplam (Dünya) | 59322 | 100 |

Kıtaların rüzgar paylarına bakacak olur isek Şekil 3.1'de Avrupa ve Amerika'nın başı çektiği görülmektedir.



Şekil 3.1 - Kıtaların rüzgar payları (Yumurtacı, Bekiroğlu ve Kekezoğlu, 2006)

3.8.2 Avrupa'da Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar enerjisi endüstrisi Avrupa için 2010 yılına kadar 40.000 MW rüzgar enerji kapasitesi kurmak üzere bir hedef koymuştur. Bu hedefe ulaşılmasıyla yaklaşık 50 milyon insana elektrik sağlanacaktır.

Çizelge 3.3 – Avrupa’da rüzgar enerjisi (EWEA, 2005)

| Ülke | Eylül 1999 kapasite (MW) | Ocak 2005 kapasite (MW) |
|------------|--------------------------|-------------------------|
| Danimarka | 1606 | 3122 |
| Finlandiya | 32 | 80 |
| Fransa | 22 | 386 |
| Almanya | 3817 | 18428 |
| Yunanistan | 79 | 489 |
| İrlanda | 73 | 339 |
| İtalya | 227 | 1717 |
| Hollanda | 405 | 1219 |
| Portekiz | 60 | 522 |
| İspanya | 1180 | 10027 |
| İsveç | 197 | 442 |
| İngiltere | 350 | 1353 |
| Toplam | 8048 | 38124 |

3.8.3 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Durumu

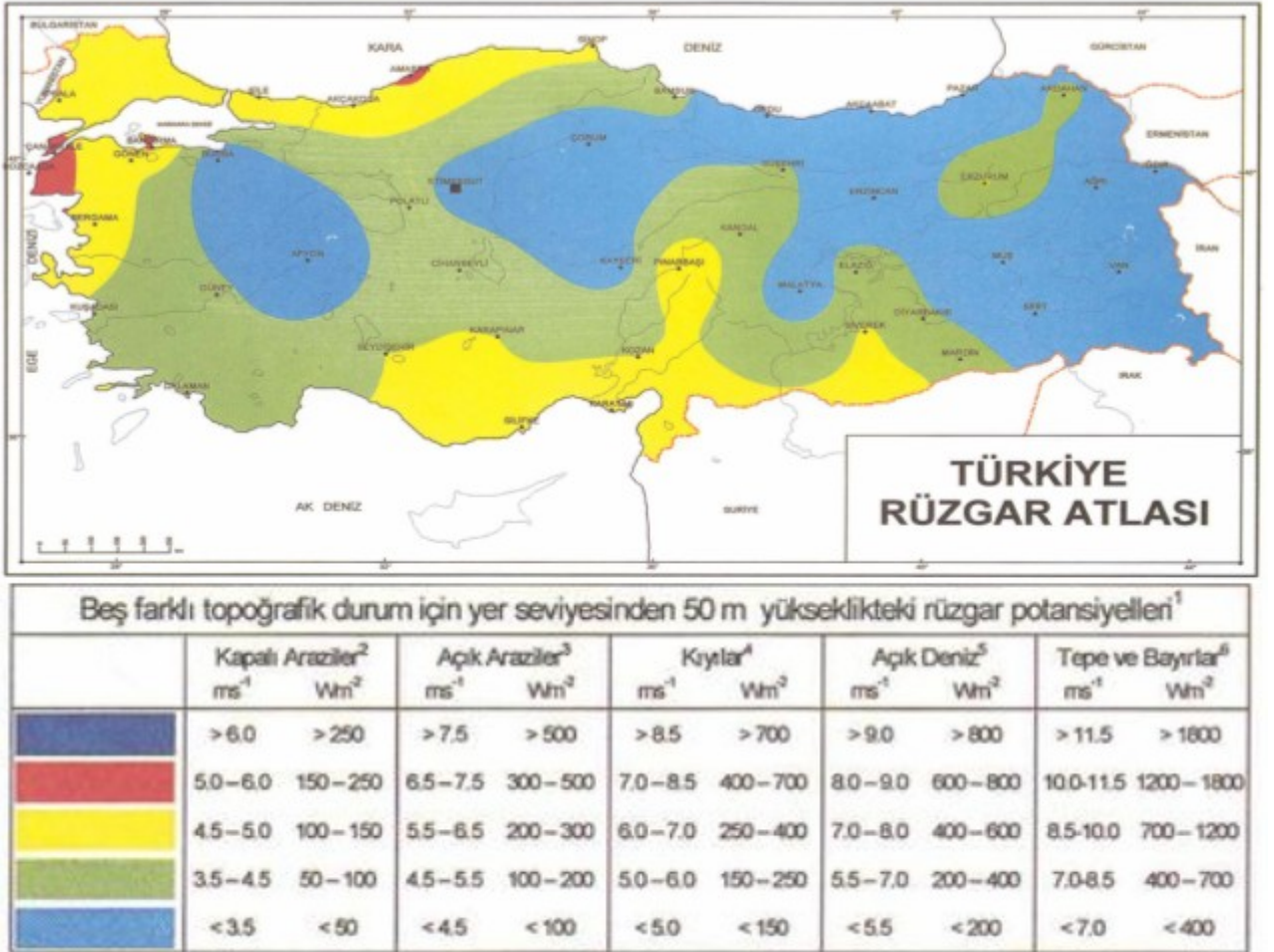
Çizelge 3.4 – Türkiye’de devrede olan rüzgar santralleri (E.İ.E., 2006)

| Yeri | Türbin Kapasitesi (kW) | Türbin Sayısı | Kurulu Kapasite (MW) |
|--------------------|------------------------|---------------|----------------------|
| Çeşme-Germiyan | 500 | 3 | 1,5 |
| Çeşme-Alaçatı | 600 | 12 | 7,2 |
| Çanakkale-Bozcaada | 600 | 17 | 10,2 |
| İstanbul-Hadımköy | 600 | 2 | 1,2 |
| Balıkesir-Bandırma | 1500 | 20 | 30 |
| TOPLAM | | 54 | 50,1 |

Türkiye mevcut kurulu gücüne bakıldığında çağın oldukça gerisinde kalmıştır. Teknik kapasite olarak Avrupa’da en yüksek değere ulaşabilecek konumda olmasına rağmen 88 GW’lık teknik kapasitesinin çok az bir kısmını kullanmaktadır. 2002 yılı sonu itibariyle kurulu güç 18.9 MW olmuştur. Daha sonra 2003 yılı itibariyle Hadımköy Çiftliğiyle 1.2 MW ekleme yapılarak kurulu güç 20,1 MW’a çıkarılmıştır. 2004 yılında ise bir artış gözlenmemiştir. 2006 yılında ise kurulu güç 50,1 MW’a çıkarılmıştır (Çizelge 3.4).

Hedeflere daha yakından bakmak gerekirse Tübitak enerji raporuna göre 2020 yılında kurulu güç beklentisi 10 GW'tır.

Diğer enerji kaynaklarına alternatif teşkil etmeden önce o kaynağın potansiyeli belirlenmelidir. Türkiye'de bu çalışmalar başlatılmış olup son zamanlarda hız verilmiştir. Rüzgar haritası çalışmaları halen devam etmektedir. Yapılan ölçümlere göre bir çok yer tespit edilmiş olup bu yerlerde özel firmalar tarafından projelendirilmiş rüzgar tarlaları mevcuttur. Bunlar genellikle Ege kıyılarında yoğunlaşmıştır. EİE tarafından çeşitli gözlem istasyonlarında rüzgar hızı verileri saptanmaktadır. Bu veriler doğrultusunda Şekil 3.2'deki bölgelere ayrılmış rüzgar haritası ortaya çıkmıştır. Bunun gibi daha detaylı haritaların çizilmesi ile beraber çok daha uygun projeler ortaya çıkacaktır. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere en uygun bölge Batı Ege-Çanakkale-Muğla civarları ve Hatay'dır. Türkiye'de EİE'nin yürüttüğü rüzgar hızı belirleme çalışmalarına göre en yüksek rüzgar hızları Hatay, Çeşme, Gökçeada, Bozcaada'dır.



Şekil 3.2 - Türkiye rüzgar potansiyeli (E.İ.E., 2002)

Ege ve Karadeniz kıyılarındaki rüzgar hızları oldukça yeterli hızlardır. Zaten bu yüzden ki kurulması planlanan rüzgar tarlalarının bir çoğu öncelikle Ege olmak üzere bu bölgeler için düşünülmüştür (E.İ.E., 2002).

Enerji arzının sağlanmasında konvansiyonel kaynaklar yanında yeni ve yenilenebilir kaynaklardan da yararlanılması ve yakıt çeşitliliğinin sağlanması olarak belirlenen Bakanlık politikası doğrultusunda başta rüzgar enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının YİD modeli kapsamında değerlendirilmesine önem verilmektedir.

3.8.4 Türkiye'de Rüzgar Enerjisine Neden İhtiyaç Var?

Türkiye'de son yıllarda gittikçe artan enerji darboğazı, tüketimin büyük bir hızla artması, üretimin çok az artış göstermesi, gelecekte büyüyen bir sorun oluşturmaktadır. Bu sorun karşısında ülkemizde alternatif enerji sistemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu soruna umut verici bir çözüm olan rüzgar enerjisi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bir enerji kaynağı olan rüzgar, ülkemizde sınırsız, temiz ve çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağı olmasından dolayı daha ön plana çıkmaktadır.

Gelişmekte olan ülkeler enerji gereksinimleri için rüzgar güç sistemlerini acilen yeni kapasite olarak kurmaktadır. Temel elektrik yapısı ve gücün taşınması için şebeke yatırımları gerektiren büyük güç santralleri ile karşılaştırsak eğer, rüzgar enerjisi daha ucuz ve hızlı bir şekilde devreye sokulabilir. Rüzgar enerjisi fosil yakıtlar tarafından üretilmek durumunda olan gücün miktarını azaltmak üzere mevcut elektrik sistemlerine entegre edilebilir. Bu olay ise gazların emisyonunu durduracaktır.

3.8.5 Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Kaynakları

Türkiye'deki rüzgar enerjisi kaynakları teorik olarak Türkiye'nin elektriğinin tamamını karşılayabilecek yeterliliktedir. Fakat rüzgar enerjisinin sisteme girişinin tutarlı bir biçimde gerçekleşmesini kolaylaştırmak üzere gerekli altyapı tasarımlanmalıdır. Türkiye Avrupa'da rüzgar enerjisi potansiyeli en ümit verici olan ülkelere biridir.

Türkiye'nin teknik potansiyeli 83000 MW'dir. Bu, Türkiye'nin bir an önce kullanması gereken önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği TÜREB kurulmasından sonra yatırımcılar Türkiye'de rüzgar enerjisini desteklemek üzere toplandılar. 1996 yılında ETKB'nin Türkiye'de rüzgar enerjisi

kullanımına ilişkin politikası iyimser bir şekilde değildi. Son üç yıldır, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği'nin çabaları ve ETKB ile Elektrik İşleri Etüd İdaresi'nin (EİE) TÜREB çalışmalarına katılımı sonrası Türkiye'de rüzgar enerjisi kabul görmeye başlamıştır.

3.9 Rüzgar Enerjisinin Diğer Enerji Kaynaklarıyla Karşılaştırılması

Türbinlerin ortalama ömürleri 40 yıldır. Bu değer, atmosferik nem, kararlı rüzgar yapısı v.b. gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca diğer önemli bir nokta da, rüzgar santrali kurulduktan sonra yapılan harcamalar sadece işletme ve bakım masraflarından ibarettir. Bu miktar da son derece düşüktür. Enerji üretiminde kullanılan diğer farklı yöntemlerden elde edilen elektriğin maliyet karşılaştırılması Çizelge 3.5'de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, rüzgar enerjisi diğer yaygın enerji kaynakları kadar ekonomiktir. 1980 yılında rüzgardan elde edilen 1 kWh enerjinin maliyeti 30 sent iken, son zamanlarda bu değer teknolojinin gelişmesiyle beraber 5 cent'e kadar düşmüştür. Bunun aksine diğer kaynaklarda sürekli bir artış görülmektedir.

Çizelge 3.5 – 1 kWh enerjinin üretim maliyeti (AWEA)

| Güç Kaynağı | Minimum (cent/kWh) | Maksimum (cent/kWh) | Ortalama (cent/kWh) |
|-------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Kömür | 4,8 | 5,5 | 5,15 |
| Gaz | 3,9 | 4,4 | 4,15 |
| Hidrolik | 5,1 | 11,3 | 8,2 |
| Biokütle | 5,8 | 11,6 | 8,7 |
| Nükleer | 11,1 | 14,5 | 12,8 |
| Rüzgar | 4,0 | 6,0 | 5,0 |

4 RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİ EKONOMİSİ

4.1 Rüzgar Sistemlerinin Ekonomisi

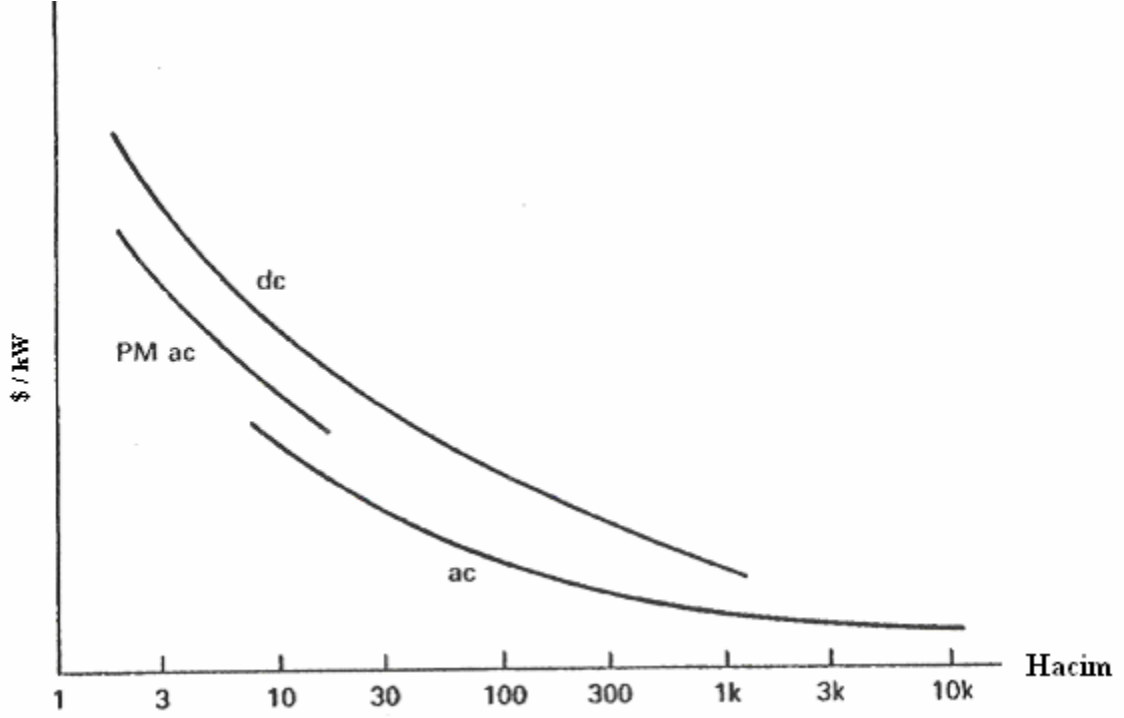
Yatırımın her bir doları için enerji verimini büyütmenin ekonomik amaç olduğu bilinmektedir. Şimdi rüzgar elektrik jeneratörleri için işletme ve toplam sermaye yatırım konusuna dönüyoruz. Böylece elektrik birim maliyetini inceleyebiliriz. Yakıt (rüzgar) bedava olabilir fakat yakıtların kullanacağı ekipmanlar pahalı olma durumundadır. Bu yüzden ekonomik çalışmalar oldukça önemlidir.

Birim elektrik maliyeti ağızsözlü bir tavır içinde sermaye yatırımı ve işletme maliyetlerinin bilgisinden incelenebilir. Elektrik değerini belirlemek biraz daha zordur fakat akıllı yatırım kararları verilmeden önce hesaplanmalıdır. Rüzgar makinasının alımını doğrulamadan önce makinanın değeri maliyetini geçmelidir. Değerin maliyete oranı diğer alternatif elektrik kaynakları kadar iyi olmalı ki rüzgar bu alternatiflerin önüne geçsin. Rüzgar tarafından üretilen elektriğin faydasının değeri onun yakıt kazançlarına ve kapasite kredisine bağlıdır. Rüzgar estiği zaman daha az petrol ve kömür yakılır ki bu bir faydaya kazançtır. Aynı zamanda eğer fayda rüzgar makinalarının eklenmesi sonucu bazı yeni konvensiyonel jenerasyonları silebiliyor veya erteleyebiliyorsa bu faydanın artı kazançları demektir. Rüzgardan üretilen elektriğin değeri ve maliyeti ‘olağan iş’ farzedilerek standart ekonomik modellerden incelenecektir. Bu şu demektir ki yeni santraller kurmak için doğal gaz, petrol, kömür ve nükleer yakıt kaynaklarının bol ve bunlar için hazır kredi olduğunu ve belirli bir politika değişikliğinin olmadığını kabul ederiz. Sonra gözlemledik ki ‘olağan iş’ operasyonundaki birçok doğru değişiklikler rüzgar jeneratörlerini konveksiyonel jenerasyondan daha uygun yapmıştır.

4.2 Sermaye Maliyeti

Elektrik üretimi için kullanılan rüzgar türbini birçok parçadan oluşmuştur. Yatay eksenli türbinin kulesinin en üstünde rotor, vites kutusu, jeneratör, duvar ve çeşitli sensörler, kontroller, bir fren ve yıldırım koruma bulunur. Kulenin altında transformatörler dişli kutusu koruyucusu, gerekli enstrümanlar ve kontroller bulunur. Rüzgar türbinini bir dağıtım hattı faydalı sahaya bağlar. Alan, geçiş yolu ve inşaat ayrıca çalışan sistem için gereklidir. Bütün bunların sermaye maliyetleri tüm mühendislik çalışmalarında dikkatlice incelenmelidir. Dağıtım hatları alan ve erişim yolu gibi bazı sermaye maliyetleri bölgeye göre genellikle değişmektedir. Bu maliyetler rüzgar türbinlerini varolan yol boyunca yerleştirmek suretiyle

azaltılabilir. Topografisinde büyük varyasyonlar olmayan Great Plains de bu normal bir uygulama olacaktır. ABD ve dünyanın diğer bölgelerinde rüzgar türbinleri rüzgarın en iyi olduğu yere konacaktır. Bu yerler yollardan ve güç hatlarından kilometrelerce uzak bir dağın tepesi olabilir. Bu gibi durumlarda bu maliyetler toplamın önemli bir parçası olabilir.



Şekil 4.1 – Elektrik Makinalarının Bağlı Maliyeti (Johnson, 2001)

Maksimum güç çıkışının kW başına maliyeti rüzgar türbininin boyutuyla alakalıdır. Birim boyut başına parçaların maliyeti boyut yükseldikçe azalır. Örneğin Şekil 4.1, elektrik jeneratörlerinin maliyetini, boyutla çeşitli varyasyonlarını gösterir. Transformerler, dağıtım hatları ve diğer elektrik ekipmanları için basit eğriler geçerli olacaktır. Bu şekilde dc ve ac konvansiyonel dc ve ac makinelerine referanstır. Bu makineler çalışmak için başka kaynaklardan saha elektriğine ihtiyaç duyarlar. Bu, makinenin kendi maliyetini arttırdığı gibi kayıpları da beraberinde getirir. PM ac ile gösterilen eğri bir ac jeneratörünün, mıknatıslarla sağlanan alanını göstermektedir. Bu daha basit bir makinedir ve daha küçük rüzgar türbinleri için potansiyel olarak daha verimlidir. Eşit oranlarda dc makinalarının boyutları ve kompleks yapılarından dolayı ac makinalarının iki katıdır. Komütatör (çevirgeç) yüzünden, daha az gerçekçi olan dc makinalarının zayıf kombinasyonu ve yüksek maliyeti rüzgar türbinleri üzerinde kullanılmalarını kısıtlar. Birim kapasite başına inşaat maliyeti kapasite arttıkça azalma eğilimi gösterir. Şöyle ki genellikle iki kat kule inşa etmek iki kat iş gerektirmez. En azından bazı kritik boyutlardaki ekipmanların lokal bulunduğu ve personelin uzun süre

yeterli olmadığı zamana kadar. Diğer yandan kullanılan malzeme kütlesi rotor yarıçapının kübüyle orantılı artarken oran sadece yarıçapın karesiyle orantılı artar. Kütle hacim ile doğru orantılı iken oran sadece alan ile doğru orantılıdır. Maliyet kütleyle bağlı olduğundan ölçeğin ekonomisinin bu basit yasayla üstün geleceği bir nokta olacaktır ve bazı kritik boyuttaki daha büyük bir türbinin maksimum gücünün kW başına maliyeti bu kritik boyuta yakın bir türbinden daha fazla olacaktır. Maliyet varyasyonları ile ilgili yapılan tahminlerle kritik boyut değişecektir fakat birçok detaylı çalışma göstermiştir ki 1500 kW'tan 2500 kW'a kadar kritik boyuta yakın olabilir. Bir boyut seçildikten sonra bile daha detaylı maliyet çalışmaları yapılabilir. Bağımsız çalışmaların sonuçları genellikle değişebilir. Bu yüzden tedbirli olunmalıdır. Çizelge 4.1'in üç sütununda sunulan 2. Dünya savaşı sonrası yapılan üç çalışmanın raporlarıdır. Bu çalışmalar tamamen konveksiyonel yatay eksenli pervane türbinleri içindir ve büyük rüzgar makinalarının inşasında ve işletmesinde yer almış tecrübeli insanlar tarafından yapılmıştır. Çalışmalar arasındaki farklar önemlidir ve belki de prosesin zorluğunu gösterir.

Çizelge 4.1 – Büyük Rüzgar Türbinleri için İnşaat Maliyet Analizi (Johnson, 2001)

| | İngiliz Dizaynı | Smith- Putnam | P.T. Thomas | MOD- X (200 kW) |
|--|--------------------|------------------|----------------|--------------------------|
| Palalar (%) | 7,4 | 11,2 | 3,9 | 19,6 |
| Göbek, pala parçaları, ana shaft, rulmanlar (%) | 19,5 | 41,5 | 5,9 | 15,2 |
| Kule (%) | 8,1 | 7,7 | 11,2 | 20,6 |
| Vites Kutusu (%) | 16,7 | 9,5 | 2,3 | 16,5 |
| Elektrik Jeneratörü ve kurulumu (%) | 12,5 | 3,4 | 33,6 | 7,6 |
| Yük ve Hız Saptırıcı için kontrol mekanizması (%) | 4,4 | 6,5 | 8,3 | 4,4 |
| Alan Çalışması ve Temeller (%) | 31,4 | 16,6 | 20,3 | 16,1 |
| Mühendislik | - | 3,6 | 14,5 | - |
| TOPLAM | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Rotor çapı (m) | 68,6 | 53,3 | 61 | 38,1 |
| Ölçülen Güç (kW) | 3670 | 1500 | 7500 | 200 |
| Ölçülen Rüzgar Hızı (m/s) | 15,6 | 13,4 | 15,2 | 9,4 |
| Üretim Miktarı | 40 | 20 | 10 | 100 |

Çizelge 4.1'deki 4. sütun, bu çalışmada MOD-X denilen konsept 200 kW'lık yatay akslı rüzgar türbini üzerinde yapılan çalışmanın sonucudur. Bu çalışma Lewis Araştırma merkezi tarafından MOD-0 ve MOD-0A ile elde edilen tecrübelerden sonra yapılmıştır. MOD-X için

konsept dizayn üç kademeli düşük hız şaftı üzerine monte edilmiş açısız hareket edebilen iki adet rotor kanadı ve paralel şaft vites kutusu içerir. 200 kW ve 1800 d/d değerlerinde eş zamanlı jeneratör seçilmiştir. Türbin dişli rotora ve pasif saptırıcı sürüş sistemine sahiptir. 30m rotor yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı 9,4 m/s idi.

Diğer önceki dizaynlarla karşılaştırıldığında göreceli olarak kanatları kuleyi ve vites kutusunu pahalı yapan bu dizayn temel saptırıcı kontrol ve kurulum için belli başlı maliyet düşüşleri ile sonuçlandı. Üretilen 100. ünite için tahmin edilen maliyet 153.360\$'dı. (1978 yılı \$ değeri). Bu maliyet içinde yönetim ve mühendislik maliyetleri ve genel masraflar dahil değildi. Toplam maliyet 202.810\$'dı. Böylelikle 10 metre yükseklikte ortalama rüzgar hızının 6,3 m/s olduğu ve ekonomik durumların sağlanmasıyla beraber kWh başına elektrik maliyeti 4,34 cent olmuştur.

Diğer 3 çalışma ile 1979'da yapılan çalışma arasındaki bir diğer fark da gelişmiş teknolojidir. 1950'den beri rüzgar türbin parçalarının teknolojisinde meydana gelen gelişmelerde en az iki alanda büyük yenilikler olmuştur. Türbinlerin mikro bilgisayar kontrolü ve büyük bilgisayar analizi alanlarında diğerlerine oranla kayda değer ilerlemeler olmuştur. Smith – Putman mekanizması göstergelerin kontrolü, düşük rüzgar hızlarında türbini devreden çıkarma, yeterli rüzgar hızlarında tekrar devreye alma işlemleri için 24 saat yapacak operatörlere ihtiyaç vardır. Bütün bu işlemlerin mikro bilgisayarlar aracılığıyla yapılması maliyetleri kayda değer bir şekilde azalttığı makina performansını arttırdığı ve operatör hatasından kaynaklanan hataları azalttığı gözlemlenmiştir.

Smith – Putman makinası sürmeli hesap cetvelleri matematik tabloları kullanılarak tasarlanmıştır. Zaman kısıtlamaları yüzünden tasarım için gerekenden daha az iterasyon gerçekleştirilebilmiştir. Bütün tasarım süreci 6 iterasyonda tamamlanmıştır. Günümüzde ise kuleler ve palalar hafif ve maliyeti yüksek olmaya uygun tasarımlar yapabilme kabiliyetine sahip büyük bilgisayarlar tarafından tasarlanmaktadır. Maliyet her zaman kullanılan malzeme miktarı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle hafif tasarımlar rüzgar türbinlerinin ekonomik fizibilitesini arttırmaktadır. Örneğin hafif malzeme ile tasarlanmış Boeing MOD-2 kulesi daha katı bir kuleye sahip olan MOD-1'e göre Watt başına %27 daha az kitleye sahiptir.

Yukarıdaki sonuçlar büyük rüzgar türbinleri için elde edilmiştir. Rüzgar türbini boyutlarının etkisini görmek için bu sonuçları küçük rüzgar türbinleri için elde edilen benzer sonuçlar ile karşılaştırmak gerekmektedir. Küçük türbinler için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. İlk sütun 1980'deki rüzgar türbinlerine ait değerleri gösterirken ikinci sütun

1990'larda ortaya çıkan ikinci ve üçüncü nesil türbinlere ait tahmin edilen maliyet yüzdelerini belirtmektedir.

Çizelge 4.2 - Küçük Rüzgar Türbinleri için İnşaat Maliyet Analizi (Johnson, 2001)

| Yıl | 1980 | 1990 |
|----------------|------|------|
| Rotor ve Göbek | 12 | 20,5 |
| Kontroller | 6 | 6,6 |
| İletim | 11 | 14,5 |
| Jeneratör | 7 | 11,6 |
| İskelet | 8 | 2,4 |
| Kule | 18 | 7,5 |
| Kurulum | 20 | 25,6 |
| Dağıtım | 16 | 9,5 |
| Gemi | 2 | 1,8 |
| TOPLAM | 100 | 100 |

Bu tabloda toplam maliyetin %26 ve %10'unu oluşturan iskeletin ve kulenin maliyet azaltmada önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Dağıtım maliyeti işletmecilik servis grupları v.s. de maliyet azaltma konusunda bir miktar potansiyele sahiptir. Bütün bu kalemlerin maliyet yüzdeleri düşünülünce diğerlerinin maliyetleri göreceli olarak artmaktadır. Tabloda kurulum maliyetinin %20'den %25'e çıktığı ve bu alanda yeniliklere ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

Büyük ve küçük rüzgar türbinleri arasında belirtilen maliyet yüzdeleri açısından büyük farklar yoktur. Rüzgar türbinlerinin ana bileşenleri palalar, güç aktarma mekanizması, kule ile kurulum aşaması oluşturmaktadır. Bu nedenle olası maliyet azalmaları için bu alanların incelenmesi gerekmektedir.

Ekonomik çalışmaların esas zorluklarından biri kurulmuş rüzgar türbinlerinden yüksek miktarda üretildiği zaman oluşacak olan maliyetin tahminidir. İlk üretilen birkaç makinanın maliyeti özel üretilen parçalar ve yapımda kullanılan fazla el emeği yüzünden yüksektir fakat seri üretime geçtikten sonra üretilen makinalarda bu maliyet azalmaktadır. Üretim hacminin artmasıyla birim maliyetin azaldığı örnekler otomobillerde, uçaklarda, çelik üretiminde v.b. gibi birçok alanda görülmektedir. Son zamanlarda bu konu hakkında gösterilen klasik örneklerden biri de elektronik devreler ve hesap makinalarıdır.

Maliyet azalmaları öğrenme eğrileri ile formüle edilir. Bunlar diğer endüstri alanlarında da geniş miktarda kullanılmaktadır. Bunların temel aldığı matematik modeli ise şu şekildedir. Eğer y ürün maliyetini, x de toplam üretim hacmini belirtirse, normalize edilmiş maliyet artış miktarı dy/y normalize edilmiş hacim artışına dx/x ile aşağıdaki differansiyel denklem ile bağlıdır:

$$\frac{dy}{y} = -m \cdot \frac{dx}{x} \quad (4.1)$$

Burada m orantı sabitidir. Denklemdaki işaretin negatif olmasının nedeni hacim arttıkça maliyetin azalmasıdır. Bu denklem toplam (kümülatif) hacimden (x), $x(2^n)$ hacmine kadar integre edilir. Maliyet y_1 'den y_2 'ye azalırken kümülatif hacim n defa ikiye katlanır. Sonuç;

$$\ln \frac{y_2}{y_1} = -(mn) \ln 2 \quad (4.2)$$

şeklindedir.

y_2 için çözümlerse;

$$y_2 = y_1 e^{-(mn) \ln 2} \quad (4.3)$$

elde edilir. Eğrinin eğimi s şu şekilde tanımlanır;

$$s = e^{-m \ln 2} \quad (4.4)$$

n tane katlamadan sonra oluşan y_2 maliyeti ise;

$$y_2 = y_1 s^n \quad (4.5)$$

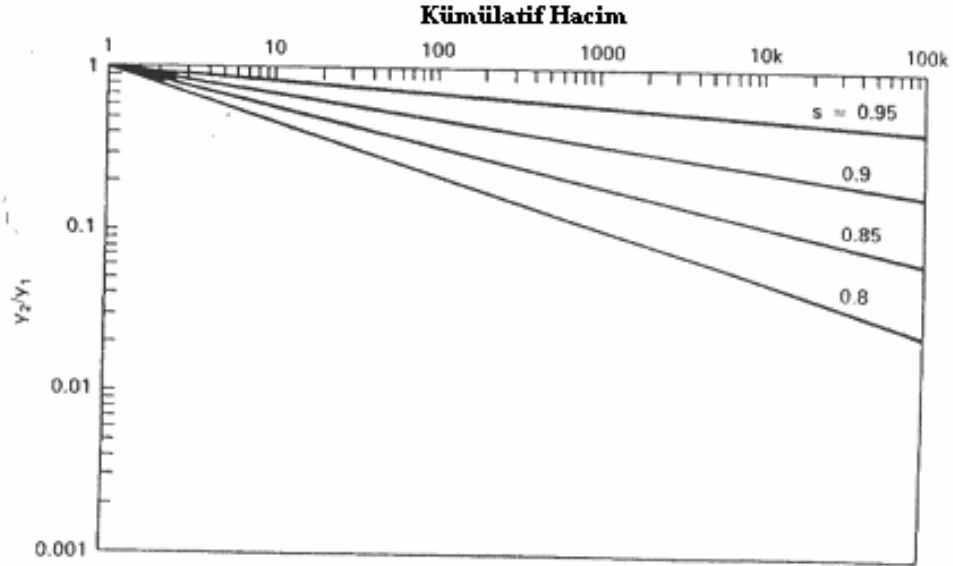
şeklindedir.

log-log eksenlerinde y_2 - n grafiği doğrudan oluşmaktadır. Şekil 4.2 $y_1=1$ için normalize edilmiş y_2 'nin 0,95 0,9 0,85 ve 0,8 için oluşturulan grafiklerini göstermektedir. İlk birimin maliyeti ve öğrenme eğrisinin eğimi verildiği zaman 10. veya 100. birimlerin maliyeti ya da ara değerlerin maliyetleri kolayca hesaplanabilir. Hacim katlanmalarından ziyade kümülatif üretim hacmi x ele alındığı için n ve x arasında bir ilişkiye ihtiyaç vardır. Hacmin x_1 'den x_2 'ye yükselmesi için gereken n miktarı;

$$n = \frac{\ln(x_2/x_1)}{\ln 2} \quad (4.6)$$

ilişkisi ile bulunabilir.

Ekonomik çalışmalar için s eğiminin seçimi önem arz etmektedir. Bu durumda geçmişteki öğrenme eğrilerinin eğimlerinin yanında üretim maliyetlerinin gelecekteki gidişatına dair bilgiye de ihtiyaç duyulmaktadır. Tarihteki çalışmalar eğimlerin Model-T Ford'lar için 0,86 uçaklar için 0,8 elektrik üretimi için 0,95 çelik üretimi için eğimlerin 0,99 ve hesap makinaları için 0,74 değerlerini aldığını göstermiştir. Rüzgar türbinlerinin değişik parçalarının değişik öğrenme eğrilerine sahip olması beklenmelidir. Palalar göbekler ve vites kutuları gibi rüzgar türbinlerine özgü parçalar düşük s değerlerine sahip olacaklardır. Öte yandan elektrik jeneratörleri oldukça gelişmiş bir teknolojinin yüksek hacminde üretilen olduklarından daha az bir maliyet düşüşü göstereceklerdir. Diğer bileşenler ise ortalama s değerlerine sahip olacaklardır.



Şekil 4.2 – Kümülatif Hacimin Normal Maliyete Oranı (Johnson, 2001)

Yeni üretim ekipmanları kullanan bir imalatçı seri üretime geçmeden önce üretim miktarı ve maliyet azaltılması için bu yöntemi kullanmak isteyecektir. Çünkü bu şekilde yapılan bir çalışma maliyetleri öngörülenden daha da azaltabilmektedir. Maliyet Şekil 4.2’de gösterildiği gibi doğrusal olarak üniform bir şekilde azalmayacaktır. Fakat yeni üretim ekipmanları servise sokuldukları oluşan biçim adımlarla eğrinin görünümü doğrusal bir hal almaktadır.

Makinanın maliyeti hesaplandıktan sonra bu diğerlerine anlaşılabilir terimler halinde aktarılmalıdır. Rüzgar türbininin maliyeti en az 4 farklı şekilde anlatılabilir: toplam maliyet, birim alana düşen maliyet, kW üretim başına düşen maliyet ve elektriğin birim maliyeti.

Toplam maliyet C_T ile verilir. C_T küçük makinalar için fabrikadan çıkan donanım maliyeti anlamına geldiği gibi büyük makinalar için yer, ulaşım yolları, dağıtım şebekesi ve inşaat maliyeti ya da masraflarını içermektedir. Sondaki terim daha hassas bir ekonomik hesaplama için maliyet hesaplarına eklenmelidir. C_T işletim ya da bakım masraflarını içermektedir. Bunlar başka şekilde hesaplanmaktadır.

Birim alan başına düşen maliyet;

$$C_a = \frac{C_T}{a} \quad (\$/m^2) \quad (4.7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada a türbinin izdüşüm alanıdır. C_a değişik tip boyut ve rüzgar hızına sahip türbinlerin karşılaştırılması için kullanılmaktadır. Herhangi bir alım kararı verilmeden önce tesis faktörü ya da kapasite faktörü de göz önünde bulundurulmalıdır. Geniş bir şekilde kullanılan bir başka maliyet ölçüsü de kW başına düşen maliyettir;

$$C_{kW} = \frac{C_T}{P_{eR}} \quad (\$/kW) \quad (4.8)$$

Burada P_{eR} rüzgar türbininin maksimum ya da rayiç elektrik güç çıktısıdır. Bu ölçüt kamu sektörü tarafından diğer üretim şekilleri ile karşılaştırmada kullanılan bir ölçüttür.

Fakat C_{kW} rüzgar türbinleri için iyi bir maliyet ölçüsü değildir. 8 m/s rüzgar hızı için 100 kW şeklinde derecelendirilmiş olan bir türbin sadece jeneratör ve elektrik aksamının değişimiyle kolayca 10 m/s rüzgar hızında 200 kW'lık bir güç üreten türbine dönüştürülebilir. Elektrik aksamının maliyeti toplam maliyetin çok küçük bir yüzdesini oluşturduğundan dolayı bu değişiklik C_T 'de çok küçük bir artışa neden olacaktır. Eğer 100 kW'lık makina için C_T 100000\$ ve 200 kW'lık makina için 102000\$ ise C_{kW} 1000 \$/kW'tan 510 \$/kW'a düşecektir. Fakat bu gibi durumlarda kapasite faktörü belirgin bir şekilde düşmekte ve yıllık enerji üretimi istenilen düzeyde artmayabilir hatta azalabilir. Bu nedenle C_{kW} yanıltıcı olabilmektedir. Tercihen kapasite faktörü belirtilerek kullanılmalıdır.

Esasında en önemli maliyet ölçütü birim elektriğin maliyetidir.

$$C_u = \frac{A_n}{E} \quad (\$/kWh) \quad (4.9)$$

A_n , E kadar kilowatt saat elektriğin yıllık maliyetidir. E, kW cinsinden net yıllık üretilen elektrik miktarıdır. C_u temel toptan ya da perakende maliyet olarak da ifade edilebilir. Temel maliyet tesisin aktarım ve dağıtım maliyeti olmadan oluşan maliyettir. Toptan maliyet, aktarım da dahil olmak üzere bir diğer elektrik tesisine olan maliyettir. Perakende maliyet ise kullanıcılara düzenleyici kurum tarafından aktarılan maliyettir. Bu değer tüm üretim maliyetlerini kapsamayabilir.

4.3 Ekonomik Konseptler

Rüzgar tesisleriyle geleneksel üretim tesisleri arasındaki maliyet farkını daha hassas biçimde incelemek için bazı ekonomik konseptlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Mühendislik ekonomisi kaynaklarında bu konseptler ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Mevcut konseptlerden biri mevcut değerdir. n dönem sonra biten, i faiz oranında A_n dönem sonu ödemesi ve üniform serisinin mevcut değeri P_v ;

$$P_v = A_n \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (4.10)$$

şeklinde verilir. Mevcut değer P_v ile A_n ödeme serileri ekonomik anlamda eşdeğer kabul edilir. Para ödünç alındığında ya da faiz karşılığı borçlanıldığında ve ödemeler yapıldığında eşdeğerdir. Mevcut değer 0 zamanında ya da 0 yılındadır ve her dönem sonunda eşit ödemeler yapılmaktadır. Eğer periyod 1 yıl ise, 1. dönem ödemesi yıl 1'in sonunda geri kalanlar da benzer şekilde yapılır.

Önceki mevcut değer analizi enflasyon zamanında bütün gerekli bilgileri içermemektedir. Enerji tüketimi artmasa bile faturalar yıldan yıla artış göstermektedir. Bu nedenle her yıl artan yıllık ödemeler serisinin mevcut değerini hesaplamak gereklidir. Yıllık artış ülke içindeki enflasyona bağlı olmasının yanında belirli malların enflasyona gebe olan maliyet artışlarına da bağlıdır. Örneğin 1973 ve 1979 yılları arasında petrol fiyatları enflasyondan daha hızlı artmıştır. Sabit dolar cinsinden yıllık maliyet artış hızı gerçek e_r eskalasyon hızı

olarak adlandırılır. Gerçek eskalasyon kaynak aktarımından sınırlı arz için artan talepten v.b. kaynaklanır.

Gerçek eskalasyon oranı genel enflasyon oranı e_i ile birleştiği zaman görünür eskalasyon oranı e_a elde edilir. Bunlar arasındaki ilişki şu şekilde gösterilir;

$$1+e_a = (1+e_r).(1+e_i) \quad (4.11)$$

Öğrenme eğrisi üzerindeki ürünlerde ya da uzun vadeli sabit fiyattaki sözleşmeler gibi durumlarda gerçek eskalasyon değeri negatif olabilir. Eğer hesap makinalarının gerçek eskalasyon enflasyonunun 0,14 olduğu durumda -0,1 görünürse görünür eskalasyon $(1-0,1) \times (1-0,14) - 1 = 0,026$ olacaktır. Yani diğer ürünlerin fiyatları yılda %14 artarken negatif eskalasyon etkisiyle hesap makinalarının fiyatları %2,6 artacaktır.

Faiz oranları enflasyon tarafından da etkilenmektedir yani genel enflasyon oranında daha yüksek olabilmektedirler. Güç sanayisindeki uzun dönem verileri incelendiğinde faiz oranının ortalama değerinin enflasyonun 4 puan üstünde olduğu görülmüştür. Örneğin enflasyon oranı %6 ise faiz oranlarının ortalama değeri %10 civarındadır. Görünür faiz oranı i_a gerçek faizin ve görünür eskalasyonun fonksiyonu olarak şu şekilde formüle edilir;

$$i_a = \frac{1+i}{1+e_a} - 1 \quad (4.12)$$

Bankaya yıllık i faiz ile konan 1 dolar 1 yıl sonra $1+i$ dolar olacaktır. Fakat enflasyon bu yıl 1 dolarlarının yıl 0 doları kadar değeri yoktur. Bu nedenle $1+i$ yıl 1 doları gerçekte $1+i_a$ yıl 0 doları eder. Yıl 0 bazen sabit dolarlar diğer yıl1 yıl 2 v.s. dolarları da mevcut dolarlar olarak adlandırılır. Ekonomik koşulların daha tutarlı veriler ışığında alınması için ekonomik çalışmaların “sabit dolar” olarak ifade edilmesi gerekmektedir.

i yıllık faiz ile bankaya yatırılmış bulunan P_v mevcut değerinin, güncel dolar ya da yıl n doları cinsinden, gelecek değeri F şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$F = P_v.(1+i)^n \quad (4.13)$$

Yıl n 'de i faizle ödenecek olan toplam F parasının bu güncel değeri:

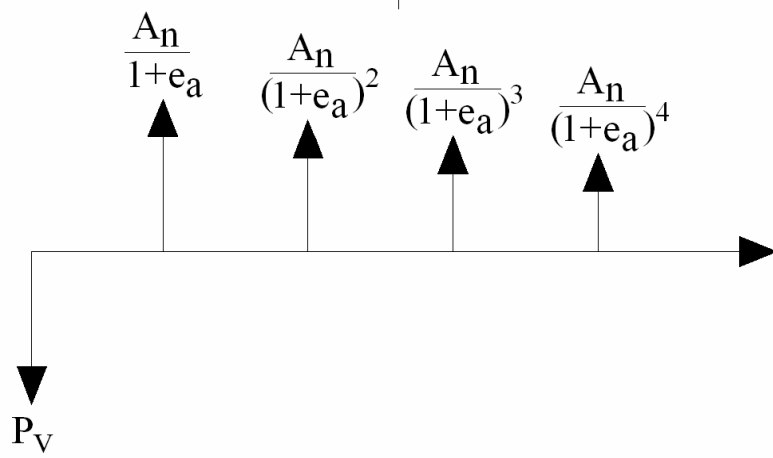
$$P_v = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (4.14)$$

şeklinde verilir.

Gerçek eskalasyonun sıfır, enflasyon oranının e_i olduğu durumda düzgün bir ödeme serisinin bugünkü değerini hesaplamaya çalıştığımızı varsayalım. “Sabit dolar” cinsinden ifade edildiğinde yıllık ödemeler şekil 4.3’teki gibi görülür. Denklem 4.14’ü ve seri toplamını kullanarak serinin bugünkü değeri:

$$\begin{aligned}
 P_v &= \sum_{j=1}^n \frac{A_n}{(1+e_a)^j (1+i)^j} \\
 &= A_n \frac{(1+e_a)^n (1+i)^n - 1}{(e_a + i + e_a i)(1+e_a)^n (1+i)^n}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

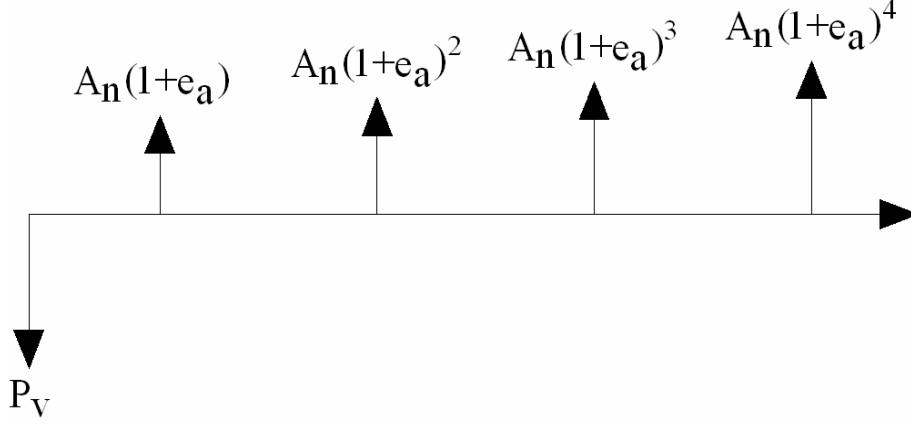
şeklini alır.



Şekil 4.3 – Sabit Ödeme Serilerinin Şimdiki Değer Dağılımları (Johnson, 2001)

Şimdi de düzgün eskalasyona tabi seri ödemelerin bugünkü değerini hesaplamak gerekmektedir. Bu yöntem her yıl sabit miktarda alınan yakıt ya da enerjinin e_a görünür eskalasyon oranı ile artan maliyetlerinin olduğu durumdaki değerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Her yıl ödenen miktar bir önceki yılın ödemesinin $1+e_a$ katıdır. Seriler Şekil 4.4’te gösterilmektedir. Bu serinin bugünkü değeri şu formülle verilir:

$$P_v = \sum_{j=1}^n \frac{A_n (1+e_a)^j}{(1+i)^j} = A_n (1+e_a) \frac{\left(\frac{1+e_a}{1+i}\right)^n - 1}{e_a - i} \tag{4.16}$$



Şekil 4.4 – Sabit Ödeme Serilerinin Eskalasyona Bağlı Şimdiki Değer Serileri (Johnson)

Denklem 4.15 ve 4.16 içerdikleri değişkenler yüzünden kolayca karıştırılabilmektedir. Aradaki fark denklem 4.15'in düzgün serilere, denklem 4.16'nın ise düzgün eskalasyona tabi serilere uygulanmasıdır. Bu durumda güncel dolarların sayısı sabit iken diğerinde güncel dolarlar yıldan yıla artmaktadır.

Ekonomik alternatifler her zaman bugünkü değerleri incelemek suretiyle incelenebilmektedir. Aynı zamanda alternatiflerin karşılaştırılmasında yıllık maliyetlerin kullanılması da tercih edilecektir. Sonuçta herkes aylık ve yıllık ödemelerin maliyetini bilmek istemektedir. Eğer başlangıç ve tesis ömrü farklı ise eskalasyon yüzünden oluşan değişken yıllık maliyetler bu karşılaştırmayı zorlaştırmaktadır. Bu zorluk dengelenmiş yıl sonu maliyeti L tanımlanarak aşılır.

$$L = P_v \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (4.17)$$

Köşeli parantez içindeki ifade ana para iyileşme faktörü olarak adlandırılır. Dengelenmiş maliyeti bulmak için ilk önce gerçek eskalasyona tabi seri ödemelerin güncel değeri P_v Denklem 4.16'daki gibi bulunur. Daha sonra yıllık ödemeler A_n için üniform seriler için kullanılan Denklem 4.10 çözülür. Bu yıllık ödeme dengelenmiş olduğunu belirtmek için L ile gösterilir.

Benzer ekonomik çalışmalarda kullanılan bir başka terim de dengeleme faktörü LF 'dir ve şu şekilde hesaplanır:

$$LF = \frac{L}{A_n} = (1 + e_a) \frac{\left(\frac{1 + e_a}{1 + i}\right)^n - 1}{e_a - 1} \cdot \frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (4.18)$$

Burada A_n gerçek Yıl 0 maliyetidir. Dengeleme faktörü verilen ekonomik kabuller altında sabit kalacaktır. Bu şekilde ilk yıl maliyetleri bilindikten sonra dengelenmiş maliyetlerin tahminini sağlayacaktır.

4.4 Gelir Gereksinimleri

Şirket hizmet ağında bulunan rüzgar türbinleri şirkete ait olmayabilirler. Yine de aynı ekonomik analiz sürecinden geçmektedirler. Farklı mülkiyet faiz oranlarını ve vergi durumlarını değiştirmesine rağmen aynı analiz yöntemleri hala geçerlidir. Bu nedenle elektrik hizmet sanayisindeki gelir gereksinimleri genel olarak incelendikten sonra rüzgar türbinlerine özel durum olarak değinilecektir.

Elektrik hizmet sanayini diğer sanayilerden ayıran kendine has 5 özelliği vardır :

1. Sektör ana para yoğundur. Verilen bir tesis için elektrik satışından elde edilen gelirin yarısı ana sermayenin karşılanması için kullanılabilir. Rüzgar gibi yakıt kullanılmayan durumlarda ise daha yüksek bir oran gerekebilir.
2. Sektör yatırımları 30-40 yıl gibi uzun vadeleri kapsamaktadır.
3. Diğer sektörlerle karşılaştırıldığında dolar bazında neredeyse sabit bir yıllık geliri olduğu görülebilir.
4. Sektörün ürün talepleri ve kullanımları müşteri tarafından belirlenir.
5. Sektör güvenilir, ucuz, çevresel olarak kabul edilebilir elektriği sağlamakla yükümlüdür. Bu kurallar genelde devlet kuruluşları tarafından düzenlenir.

Sektörün bu özellikleri ekonomik çalışmalarda kullanılan gelir gereksinim yaklaşımını olası yaklaşımlar arasından en mantıklısı olarak öne çıkarır. Bu yaklaşımda, verilen alternatifi karşılamak için gerekli olan gelir miktarı diğer alternatifler için benzer şekilde hesaplanan gelirler tarafından belirlenir ve bunlar ile karşılaştırılır. Bu yöntem müşterilerden elde edilecek olan gelirin yanında müşterilerin elektrik için ödemeleri gereken fiyatları da belirtir. Bu şekilde düzenleyicilere de yeterli elektrik miktarını en ucuz şekilde sağlamaları konusunda yardımcı olur.

Gelir gereksinimleri sabit maliyetler ve değişken maliyetler olmak üzere iki bileşenden oluşur. Sabit maliyetler, borç ödemelerini, amortisman giderlerini, gelir vergisi giderlerini, mülk vergisi giderlerini ve sigorta giderlerini içerir. Değişken maliyetler ise yakıt, işletme ve bakım giderlerini kapamaktadır. Şirketler genelde gelirlerinden tesis kurmak için para ödemezler. Çünkü, böyle bir durum şu andaki müşterilerin gelecek 40 yılda olası müşterilere fayda sağlayacak kalemler için ödeme yapması anlamına gelecektir. Aynı zamanda dolar bazında elde edilen göreceli sabit gelir, normalde zaman içinde değişiklik gösterecek olan bir inşaat programı için uygun olmamaktadır.

Bu nedenle yeni tesis kurmak için gereken para borç finansmanları olarak adlandırılan bono ve tahvil satışı ile hisse senedi satışı gibi yöntemler ile elde edilir. Şirketin hem borcun hem de ipotek parasının kullanımı için ödemesi gereken paranın, fiyat belirleme amaçları için gelir gereksinimi olarak kullanılmasına izin verilir. Bu para aynı zamanda yatırımın sabit maliyetinin bir parçasıdır. Sabit maliyetin diğer bileşenleri yatırımcılardan alınan paranın yıllık geri ödemeleri, federal ve yerel gelir vergileri, mülk vergileri ve sigorta giderleridir.

Gelir gereksinimleri enflasyon yüzünden artma eğilimindedirler. Fakat bakım gibi kalemler yüzünden düzensizdirler. Bunlar alternatiflerin daha kolay bir şekilde karşılaştırılmaları için genelde dengelenir. Dengelenmiş yıllık gelir gereksinimleri dengelenmiş yıllık sabit maliyetlerden ve dengelenmiş yıllık değişken maliyetlerden meydana gelir. Bu durum şu şekilde formüle edilir:

$$L = L_s + L_v \quad (\$/kW/yıl) \quad (4.19)$$

Dengelenmiş yıllık sabit maliyetler başlangıç yatırım sermayesinin yüzdesi olarak ifade edilebilir. %6 enflasyon ve %10 faiz ortamında 30 yıllık ömre sahip kömür tesisi için tipik oranlar şu şekildedir: faiz %10, amortisman ve emeklilik dağıtımları %1.17, gelir vergisi %4.7, mülk vergisi ve sigorta %2. Toplam %17.87 değerlendirmelerde %18 olarak yuvarlanır. Emeklilik dağıtımları, emeklilik süresinin tesis ömründen farklı olmasından dolayı oluşan durumlar için ayrılan ödenektir. Bu amortisman ödeneklerinin yeniden düzenlenmesini gerektirir.

Baslangıç yatırım sermayesinin bu oranına dengelenmiş yıllık sabit borç oranı, r_f , ya da kısaca sabit borç oranı denir. Uzun ömürlü tesisler için amortisman yüzdesi sabit borç oranının düşük bir yüzdesidir bu nedenle 25 yıl veya daha fazla ömürlü tesisler için aynı oran kullanılır. Sabit borç oranı kısa ömürlü tesisler için yüksektir. 10 yıl ömürlü tesisler için tipik

olarak %23'ken, 5 yıl ömürlü olanlarında %34 olmaktadır. Vergi avantajları sabit borç oranını azaltıcı etki göstermektedir.

Eğer rüzgar türbinleri için vergi düzeltmeleri yoksa, kamu mülkiyetli rüzgar türbinlerinin sabit borç oranları konvansiyonel üretime çok yakın olacaktır. Rüzgar türbinlerinin özel sektör mülkiyetine ait olduğu durumlarda bile sabit borç oranı kamudakine çok yakın olacaktır. Önemli miktarda üretime sahip gruplar bile yatırımcılar tarafından kamu gibi görülecektir ve hatta yerel düzenleyici kuruluş tarafından da düzenlenebilir. Bu durum rüzgar makinaları için sabit borç oranının tespit edilmesine yardımcı olur. Bu şekilde de üretilen elektriğin maliyetinin sabit maliyet kısmı kolayca belirlenir.

Değişken maliyetler olması durumunda yakıt maliyeti ile onarım ve bakım (OM) maliyetini içermektedir. OM maliyeti hem sabit hem de değişken kısımlardan oluşmaktadır. Sabit kısım üretilen, transfer edilen veya kullanılan enerjiden bağımsız olarak tanımlanır. Değişken kısım ise üretilen enerjiye bağımlıdır. Bu kısım su, kireçtaşı, filtre torbaları ve termik santraller için kül atma maliyetlerini kapsamaktadır. Rüzgar türbinleri elektrik üretirken herhangi birşey tüketmezler fakat belirli işletme saatleri için bakım yapılması gerekeceğinden değişken maliyet kısmı bunlardan oluşur. Değişken maliyetler genelde mills/kWh olarak ifade edilir. Burada 1 mills = 0.001\$'dır. Sabit maliyetler ise \$/kW/yıl olarak belirtilir. Sonuçta dengelenmiş yıllık değişken maliyetler:

$$L_v = L_{fuel} + L_{som} + L_{vom} \quad (\$/kW/yıl) \quad (4.20)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada L_{fuel} dengelenmiş yıllık yakıt maliyeti, L_{som} sabit OM maliyeti ve L_{vom} da değişken OM maliyetidir.

Dengelenmiş yıllık yakıt maliyetinin, L_{fuel} , bir kWh üretmek için gereken yakıtın şimdiki değeri ile her kW kapasitesi için yıllık üretilen kWh ve dengeleme faktörünün çarpımına eşittir.

$$L_{fuel} = (C_{fuel})(E)(LF) \quad (\$/kW/yıl) \quad (4.21)$$

Aynı zamanda, L kapasitesinin \$/kW/yıl olarak tanımlanmasından ziyade dengelenmiş yıllık gelir gereksinimleri \$/kWh olarak da tanımlanabilir.

$$L' = \frac{L}{E} \quad (4.22)$$

Benzer ifadeler L 'nin L_s ve L_v gibi bileşenleri için de elde edilebilir.

4.5 Rüzgardan Elde Edilmiş Elektriğin Değeri

Rüzgar enerjisiyle üretilmiş elektrik enerjisinin, konvansiyonel üretimin hem kapasite yer değişiminden hem de yakıt masraflarından dolayı daha üstün olduğunu gösterdik. Kapasite kredisi sadece rüzgar türbininin inşaatının konvansiyonel başka bir üretim tesisinin inşaatını engellemesinden dolayı verilebilir. Konvansiyonel üretim etkilenmese bile yakıt tasarrufu modu hala uygulanabilir.

Kamu şirketleri yeni öğretimi planlarken birçok seçenek ile karşı karşıya kalırlar. Bunlardan en yaygın iki tanesi yeni kömür tesislerinin rüzgar tesisleriyle değiştirilmesi, bir diğeri de var olan petrol kullanan tesislerinde yakıt tasarrufuna gidilmesidir. Yeni petrol tabanlı tesisler petrol fiyatları nedeniyle yapılmamaktadır dolayısıyla rüzgar tesisleri ile değiştirilmesi söz konusu olmamaktadır. Eğer rüzgar üretimi kömür üretimini değiştiriyorsa aynı anda yakıt tasarrufu da olamaz. Her iki seçeneğinde kamu tarafından incelenmesi gerekmektedir.

4.6 Gizli Maliyetler ve Gelişmiş Ülkelerdeki Ekonomik Olmayan Faktörler

Elektriğin rüzgar rejimi ve konvansiyonel yöntemler ile üretimi konusunda basit ekonomik değerlendirme metodolojisi geliştirdik. Kamu tarafında daha ayrıntılı modeller kullanılmakla beraber buradaki metodoloji başlangıç yatırımının, yakıt fiyatlarının, işletme ve bakım masraflarının ve enflasyonun hem maliyetler hem de üretilen elektrik enerjisi üzerindeki ana etkilerini göstermektedir. Normalde ekonomik çalışmalarda bahsedilen faktörlerin yanında rüzgar türbinlerinin kurulumunu etkileyecek olan ve burada bahsedilmeye değer başka faktörler de vardır.

Rüzgardan elde edilen enerjinin topluma gizli maliyetinin olmadığına dikkat edilmelidir. Kömür tesislerinin, madencilik ve büyük miktardaki kömür nakliyatının yanında madenlerin ıslahı ve kirlenmiş su kaynakları gibi problemleri vardır. Yanmış kömür atmosfere kayda değer miktarda karbondioksit ve sülfürdioksit salmaktadır. Bu da yerkürenin iklimini ve tarım üretimini etkileyen bir faktördür. Nükleer enerji ise devlet tarafından desteklenen büyük miktardaki araştırma ve geliştirme çalışmalarından yararlanmıştır. Bu çalışmaların maliyeti normal ekonomik çalışmalara yansıtılmamıştır. Nükleer atıkların yok edilmesi ve nükleer kazanın izlerinin temizlenmesinin maliyeti tarihsel olarak ekonomik çalışmalara tam

olarak yansıtılmamıştır. Gizli maliyetlerin tespit edilmesi imkansız olmasa bile çok zor olduğundan bu durum politik sahada rüzgar enerjisinin lehine bir durum yaratmaktadır. Maliyetlerin eşit olduğu durumlarda gizli maliyetlerin önüne geçebilmek için karar alıcı kurumlar bu nedenle rüzgar enerjisini tercih edeceklerdir.

Politik durumlar bu ekonomik çalışmaların durumunu her zaman etkilemektedir. Düşük faiz ve uzun vadeli kredi imkanları ekonomik olarak marjinal olan rüzgardan enerji üretimini yapay olarak kağıt üstünde ekonomik olarak mükemmel şekilde gösterebilmektedir. Bu durum ekonomik tahmin işini oldukça tehlikeli bir iş haline getirmektedir. Örneğin 1939 yılında yazılan fakat 1946 yılından önce basılmayan “Rüzgardan Elektrik Enerjisi” adlı kitapçıkta şöyle bir ifade bulunmaktadır: “ülkenin ortabatı kırlarında bulunan çiftlikler birbirinden o kadar uzaktadırlar ki ekonomik olarak bunlara iletim hatlarıyla elektrik bağlamak mantıklı görünmemektedir.”

Kırsal Alan Elektrik Yönetmeliği 1936’dan 1955’e kadar olan zaman da çiftlikleri enerji hatlarına bağlanmalarını zorunlu kılmıştır. Bu durum politik durumun yayın basılmadan önce bile yanlış yolda olduğunu göstermektedir.

Rüzgar gücünü etkileyen diğer iki faktör ise enerji depolama konusunda ortaya konan çabalar ve yük yönetimidir. Kamu yönetimi petrol santrallerinin yerine kömür ya da nükleer yakıt kullanan santraller yapmaya çalışmaktadır. Piller gibi enerji depolama yöntemleri yüksek talep olan zamanlarda enerjinin temin edilmesini sağlarlar. Diğer zamanlarda ise tekrar şarj edilmeleri gerekmektedir. Yük yönetimi talebin fazla olduğu zamanlarda, evlerde elektrikli ısıtıcıların kullanılması gibi, yükleri ayarlamaktadır. Eğer depolama ve yük yönetimi ekipmanları kurulu kapasitenin üzerinde bir talep ile karşı karşıya kaldıkları bu gibi durumlar için petrol kullanan tesisler devreye sokulmaktadır. Petrol sadece konvansiyonel üretimin yeterli olmadığı durumlarda kullanılır. Bu tür bir sistemde konvansiyonel üretim ekstra yükten ziyade ortalama yük talebini karşılamaktadır. Bu gibi durumlar fazla talep az kullanımın olduğu zamanlara kaydırılarak depolanan enerjiden bu talebin bir kısmı karşılanır.

Rüzgar enerjisi bu tür sisteme güzel bir şekilde uyum sağlamaktadır. Konvansiyonel üretim ile beraber enerji sağlayıcı olarak görev yapabilir. Talebin fazla olduğu ve rüzgarın esmediği durumlarda depolardan daha fazla enerji çekilecek ve daha fazla yük ileriki zamanlara kaydırılacaktır. Eğer konvansiyonel üretim, depolama ve yük yönetimi talebi karşılayamaz ise bir miktar petrol kaynaklı üretim kullanılacaktır.

Bahsedilmesi gereken başka bir husus daha vardır. Bu da konvansiyonel üretimde kullanılan yakıtın talebi karşılayacak düzeyde olmamasıdır. Petrol kıtlığı veya ambargosu, madencilik grevleri ve kullanılabilir durumda olmayan nükleer yakıt gibi durumlarda tesisler faal durumda olmalarına rağmen elektrik talebini karşılayamayacaklardır. Rüzgar türbinleri en azından oluşacak olan elektrik kesintilerini azaltıcı etki gösterebilirler. Okullar ve sanayi kuruluşları rüzgarın estiği zamanlarda faaliyetlerini sürdürebilirler. Bu şartlar altında üretilen elektrik enerjisinin toplum gözündeki değeri yakıt tasarrufu sağlanarak üretilen elektrikten daha fazla olacaktır. Rüzgar türbinleri olası yakıt kıtlıklarına karşın bir sigorta poliçesi işlevi görürler.

Bütün bu faktörler konvansiyonel üretim karşısında rüzgar üretiminin yanındadır. Eğer rüzgar türbinleri ile konvansiyonel yöntemler ekonomik olarak birbirine denk ise, ekonomik olmayan faktörler yüzünden rüzgar türbinlerinin daha avantajlı bir durumda olduğu açıktır.

4.7 Gelişmekte Olan Ülkelerdeki Ekonomik ve Ekonomik Olmayan Faktörler

Asya, Afrika ve Güney Amerika'da oldukça düşük yaşam koşullarında kırsal alanda yaşayan yaklaşık 1 milyar insan vardır. Bu koşullar kentlerin varoşlarına olan göçün artmasına ve koşulların daha da kötüleşmesine neden olmaktadır. Gelişmekte olan bir çok ülke geleneksel fosil yakıtlarına sahip değildir ve bunları kısıtlı kaynaklarını kullanarak ithal etmek durumundadır. Enerji sorunlarının çözümü için iki tane teknik olarak makul çözüm görünmektedir. Bunlardan biri merkezi büyük nükleer santraller ile iletim hatları ve dağıtım ağının kurulmasıdır. Diğeri de merkezi olmayan ve köy gibi küçük yerleşim alanlarında kurulacak olan güneş ve rüzgar sistemleridir. Bu son seçeneğin en iyi çözüm ve politik olarak da daha makul olduğunu düşünen bir çok insan vardır.

Küçük kırsal toplulukların enerji ihtiyacı üçe ayrılır: yaşam koşullarının iyileştirilmesi için gerekli enerji, tarımsal üretimi arttırmak için gerekli enerji ve küçük çaptaki sanayi için gerekli olan enerji. Bu seçenekler arasında öncelik sırasının kurulması zor gözükmesine rağmen, insanların gelecek için umutlu olmalarının yaşam koşullarının iyileştirilmesi bağlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Yemek pişirirken, içme suyu çıkarmak ve aydınlatma için gereken küçük miktardaki enerji sağlandıktan sonra tarım ve sanayi üretimini arttırmak için gerekli çaişmalara başlanabilir. 200 aileden oluşan tipik bir köyün kabaca elektrik ihtiyacı şu şekildedir: 88000 kWh/yıl yemek yapmak için, 1000 kWh/yıl su çıkarmak için ve 26000 kWh/yıl aydınlatma için. Bu da günlük ortalama 315 kWh yapar ve bunu enerjinin çoğunun da akşam 3 saatlik dönemde sağlanması gereklidir. Yemek pişirmek için gereken

enerji toplam gereksiniminin 4te 3'ünü oluşturur ve sistem de bu enerjinin tamamını bütün köylüler aynı anda yemek yapsalar bile karşılamak zorundadır. En uygun çözüm bir dizel motor ve buna bağlı 100-150 kW'lık bir jeneratördür. Fakat bu durumda da yakıt maliyeti oldukça yüksektir. Bu tarz bir enerji kullanım biçimi güneş ve rüzgar sistemleri için de aşılması zor kısıtlamalar oluşturmaktadır. Tepe yüklemenin olduğu zamanlarda güneş sisteminin çıktısı 0 olacaktır. Bunun yakında aynı saatlerde rüzgarın da sakın olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle en az bir günlük ihtiyacı karşılayacak bir depolama yapmak zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu depolama biçimi rüzgar ve güneş sistemlerindeki pillerden oluşmaktadır.

Enerji sorunu için bir başka çözüm yöntemi de biogazdır. Bitki, hayvan ve insan artıklarından yemek ihtiyaçları için doğrudan depolanıp kullanılmak üzere metan gazı elde etmek mümkündür. Metanın aydınlatma için dorudan kullanımı verimli olmadığından aydınlatma enerjisinin elde etmek için kullanılacak olan içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir. Bu yöntemin en az yatırım gerektirmesine rağmen biogaz tesisinin faal olarak kalması ve içten yanmalı motorun çalıştırılması için kayda değer miktarda insan gücüne ihtiyaç duyulacaktır.

Bu tür uzak yerlerdeki insanlara elektrik taşımının maliyetinin gelişmiş ülkelerdeki nükleer ve termik santrallerden elde edilen elektrik maliyetinin 4 katı olduğunu yapılan çalışmalar göstermiştir. Rüzgar ve güneş sistemleri konvansiyonel sistemler ile yarışabilmektedirler fakat yine de bütün sistemler pahalıdır. Kişi başına tüketilen elektrik miktarı çok olmadığından kWh başına maliyet yükselmekte fakat kabul edilebilir seviye olmaktadır. Ortaya çıkan bir başka sorun da, insanların ekipman maliyetine, ulaşım ve yetişmiş insan azlığına bakarak bu köylere elektrik götürmenin ekonomik olarak verimli olmadığını düşünmeleridir. Bu köyler yoksulluk ve umutsuzluk içinde bırakılır. Kent varoşları daha yaşanabilir olduğundan toplu göçler olmaktadır. Bu süreç devam ettiği takdirde ülke daha kararsız ve devrime açık hale gelmektedir. Bu enerji ihtiyaçlarının karşılanmadığı durumdaki maliyetinin topluma ve dünyaya maliyetinin karşılandığını durumdakinden çok daha fazla olduğu ilgili kişiler tarafından tartışılmaktadır. Kırsal alanda yaşayan insanların yaşam koşullarını geliştirilmesi insanların üzüntüleri azaltacağı gibi dünyanın da politik olarak daha kararlı bir hale gelmesine neden olacaktır. BM Çevre Programı kıdemli enerji danışmanı Dr. I.H. Usmani'nin de dediği gibi: "bu köylülere belirli bir maliyette değil, herhangi bir maliyette enerji sağlanmalıdır" (Johnson, 2001).

5 SİSTEMİN TANITILMASI

Elektroliz sisteminin çalışabilmesi için elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada rüzgar-elektroliz sistemi ile çalışıldı. Bunlar rüzgar güç sistemi + elektoliz sistemi. Rüzgar türbinleri en çok yerel elektrik enerji ihtiyacında ve ayrıca şebekeye bağlı sistemler için enerji sağlamak için kullanılırlar. Sistem; rüzgar türbini, binalar, ve elektrik makineleri içerir. Elektroliz sistemi ‘anahtar teslim’ tesisidir. Elektroliz hücreleri, su arıtımı ünitesi, eğer gerekliyse üretilen hidrojeni basmak için kompresör (veya hidrojen kompresörsüz proses basıncıyla transfer edilir) içerir.

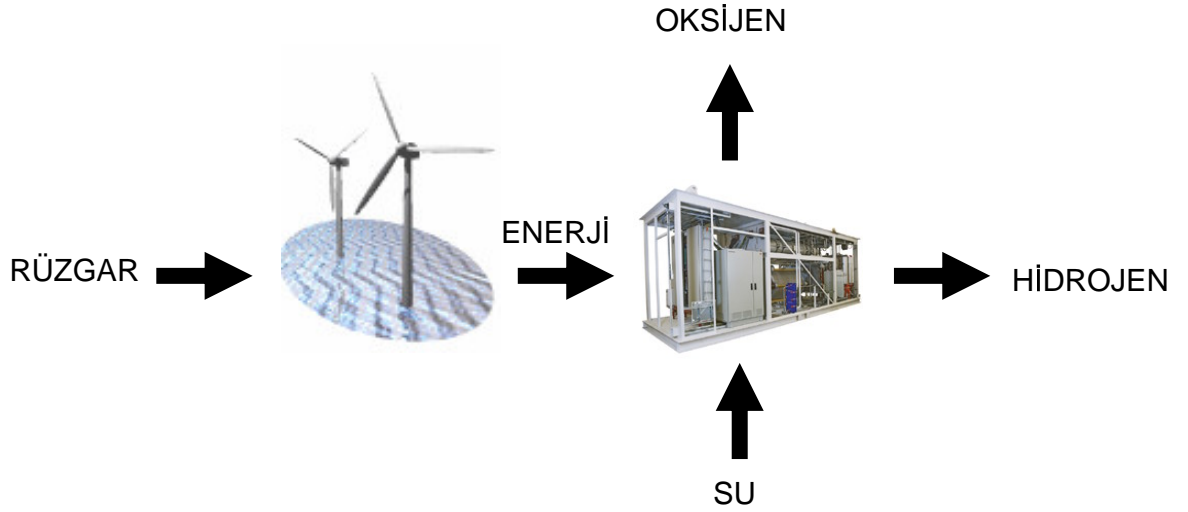
Enerji kavramı, yaşamakta olduğumuz dünyada ülkelerin önemini ve gücünü ortaya koyan en önemli unsurların başında yer almaktadır. Bir ülke hem nüfus hem de ekonomik olarak büyüme gösteriyorsa, bunlara paralel olarak enerji gereksinimi de artma eğiliminde olacaktır. Birçok ülke enerji ihtiyacını karşılamak için daha çok geleneksel enerji türlerine yönelim göstermektedir. Fakat şu bir gerçek ki, geleneksel enerji türlerinin büyük bir kısmını oluşturan petrol ve onun türevlerinin tükenmeye yüz tutması, gelecekte ihtiyaç duyacağı enerjiyi nasıl karşılayabileceğini şimdiden düşünen ve bunun için yeni enerji kaynakları arayan ülkeleri, doğada bolca bulunan ve daha birçok avantaja sahip Yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmeye almaya ve kullanmaya itmiştir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen enerjisi sahip olduğu birtakım iyi özellikler ve avantajları sayesinde popülerliğini arttırmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada hidrojen enerjisinin üretimi sırasında sisteme dâhil edilmesi gereken enerjinin, Türkiye’de bol miktarda potansiyele sahip rüzgâr enerjisinden sağlanabileceği irdelenmiş ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri ile rüzgâr-hidrojen kombine sistemleri kurmanın ve ülke genelinde bunları yaygınlaştırmanın sağladığı avantajlarının önemine değinilmiştir (Dursun, Ertürk ve Gökçöl, 2006).

2000 yılında yapılan bir başka çalışmada İtalya’nın Casaccia Araştırma Merkezinde bir deneme santrali kurulmuş ve proje bilhassa dalgalanan güç kaynaklarının elektroliz operasyonuna olan etkisini ve rüzgar türbininin daha yumuşak bir güç çıkışı verebilmesi üzerine yoğunlaşmış, bir rüzgar-hidrojen üretim santralinin boyutlarını ve ekonomikliğini değerlendirmiştir. Buna göre yıllık ortalama hızın 8 m/s ve üzerinde olduğu sahalar için hidrojen üretim maliyetleri hesaplanmış ve rüzgar ile hidrojen eldesinin ekonomikliği fosil yakıt maliyetleriyle karşılaştırılmıştır (Dutton, 2000).

Yenilenebilir enerji teknolojileri ve elektrolizörlerin maliyetlerini düşürme çabalarının yanı sıra, yenilenebilir hidrojen güç santrallerinin fiyat yönünden rekabet edebilir enerji üretimi için uygun kontrol sistemlerine gereksinimi vardır. 2005 yılında yapılan bu çalışmada, rüzgar-elektroliz sistemi için rüzgar güç çıkışını elektrolizör güç gereksinimleri ile eşleştiren, dolayısıyla sistem performansını arttıran yeni bir kontrol sistemi önerilmektedir (Battista, 2005).

5.1 Sistemin Ekonomik Modeli

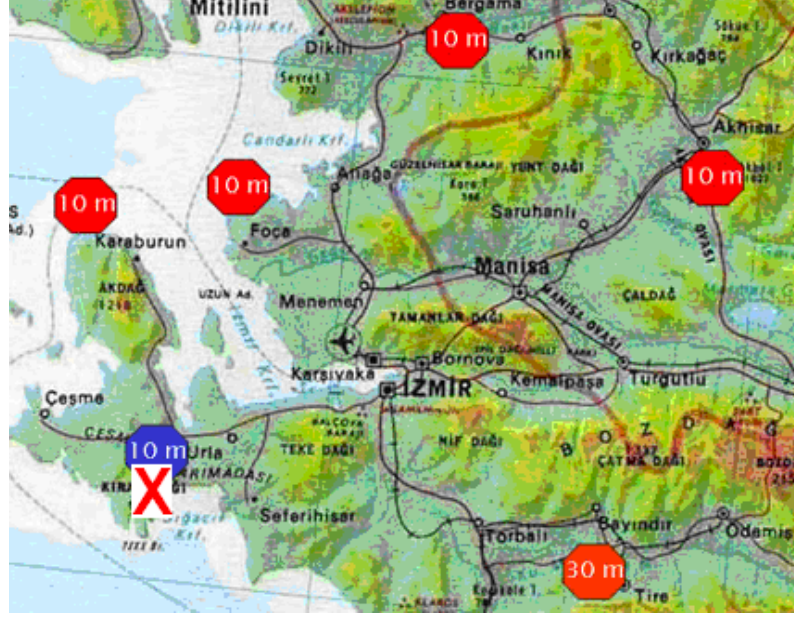
- Rüzgar güç sistemlerindeki elektrik enerjisi maliyetini hesaplamak
- Elektroliz sistemlerindeki hidrojen üretim ve maliyetini hesaplamak
- Maliyet ve ekonomisini belirlemek



Şekil 5.1 – Sistemin Modeli

5.2 Sistemin Lokasyonu

Rüzgar türbinlerinin tüm verileri aşağıdaki haritada çarpı ile gösterilen İzmir-Çeşme-Germiyan köyünde bulunan rüzgar santralinden alınmıştır (Şekil 5.2). Çeşme, Türkiye’de rüzgar bakımından en yoğun bölgedir. Çizelge 5.1’deki rüzgar hızlarına ait veriler incelendiği zaman ortalama rüzgar hızının 8,4 m/s olduğu bulunur ki, bu değer Türkiye rüzgar ortalamasının üstündedir. Bu bölge Türkiye’de rüzgar santralleri için en uygun yerlerin başında gelmektedir.



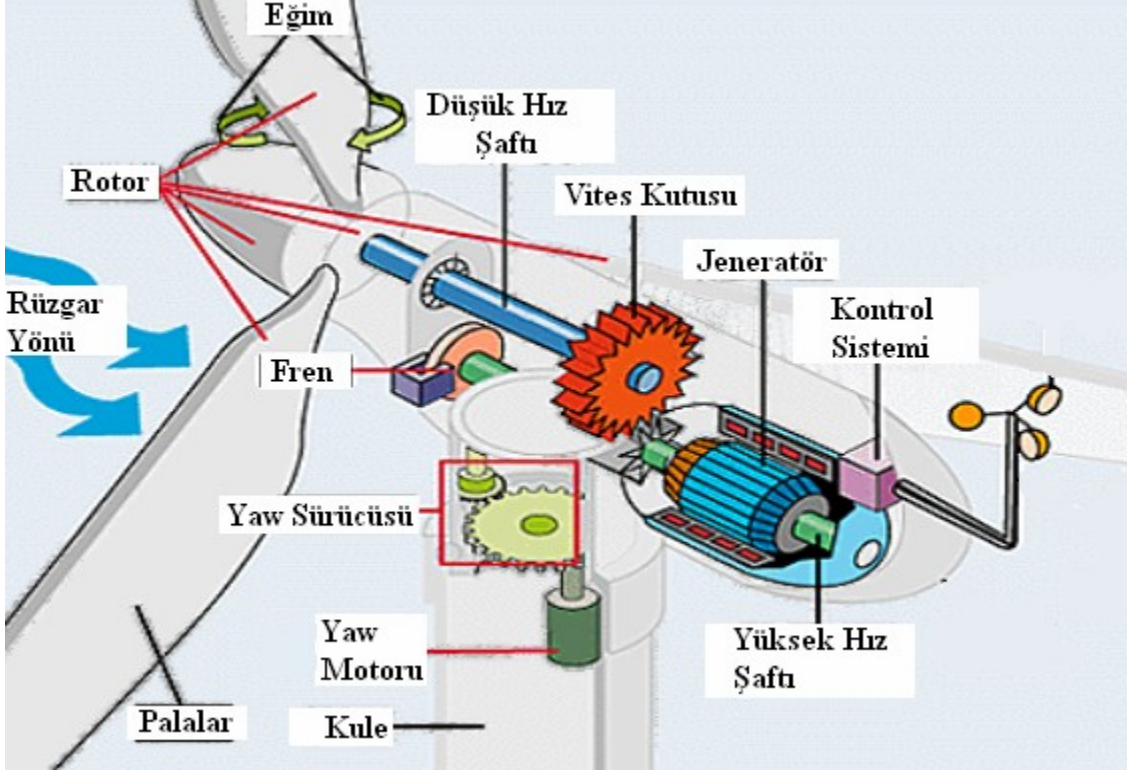
Şekil 5.2 – Sistemin Lokasyonu (EİE)

Çizelge 5.1 – Çeşme'deki yıllık ve aylık rüzgar hızı (m/s) değerleri (EİE, 2005)

| Yer | Yıl | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haz. | Tem. | Ağus. | Eylül | Ekim | Kasım | Ara. |
|----------------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| Çeşme | 1994 | | | | | | | | 9,5 | 7,3 | 6,7 | 11,1 | 8,5 |
| | 1995 | 10,1 | 9,4 | 9,8 | 6,4 | 8,5 | 4,9 | 10,7 | 8,0 | 6,4 | 9,2 | 8,3 | 11,1 |
| | 1996 | 9,1 | 10,0 | 9,8 | 7,2 | 6,2 | 9,4 | 9,9 | 8,5 | 6,4 | 7,3 | 8,3 | 10,1 |
| | 1997 | 9,2 | 8,8 | 10,3 | 7,8 | 6,8 | 6,5 | 7,5 | 8,6 | 9,6 | 9,6 | 6,4 | 10,0 |
| | 1998 | 6,8 | 9,8 | 9,5 | 7,4 | 6,7 | 7,9 | 9,3 | 9,5 | 7,6 | 7,6 | 8,1 | 10,1 |
| | 1999 | 9,5 | 8,9 | 7,5 | 6,5 | 7,5 | 7,6 | 8,3 | 9,1 | 6,2 | 7,2 | 10,5 | 9,4 |
| | 2000 | 8,8 | 9,7 | 8,1 | 6,3 | 6,9 | 9,7 | 8,1 | 9,8 | 7,3 | 7,9 | 6,4 | 9,3 |
| | 2001 | 8,5 | 8,9 | 8,5 | 8,5 | - | - | - | - | 6,7 | 9,0 | 9,3 | 10,7 |
| | 2002 | 8,0 | 7,7 | 8,0 | 7,0 | 7,0 | 8,6 | 8,6 | 6,5 | 7,2 | 5,3 | 7,1 | - |
| | 2003 | - | - | 10,0 | 7,3 | 6,5 | 8,0 | 8,6 | 9,7 | 7,8 | 9,2 | 6,9 | 9,3 |
| | 2004 | 9,2 | - | - | - | - | - | 9,5 | 7,7 | 9,1 | 6,7 | - | - |
| 2005 | - | 11,5 | 7,4 | 19,9 | 6,1 | 7,8 | - | 7,4 | 6,9 | 8,2 | 9,5 | 9,7 | |
| Ort. Hız Aylık | | 8,8 | 9,4 | 8,9 | 8,4 | 6,9 | 7,8 | 8,9 | 8,6 | 7,4 | 7,8 | 8,4 | 9,8 |

5.3 Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbin teknolojisi, araştırma ve gelişmedeki büyük üretimler ve sürekli teknik başarılar ve uluslararası ticari rekabet sonucu son 15 yılda gelişmiş bir seviyeye ulaşmıştır. Türbinlerin pahalı ve güvenilir olmadığına dair önceki düşünceler artık bastırılmıştır. Rüzgar enerjisi proje maliyetleri düşmüştür ve rüzgar türbinin teknik kullanılabilirliği %97'nin üzerine çıkmıştır. Bugün rüzgar enerjisi projesi saha kapasite faktörleri iyi rüzgar rejimli alanlar için %15'ten %30'un üzerine kadar çıkmıştır.



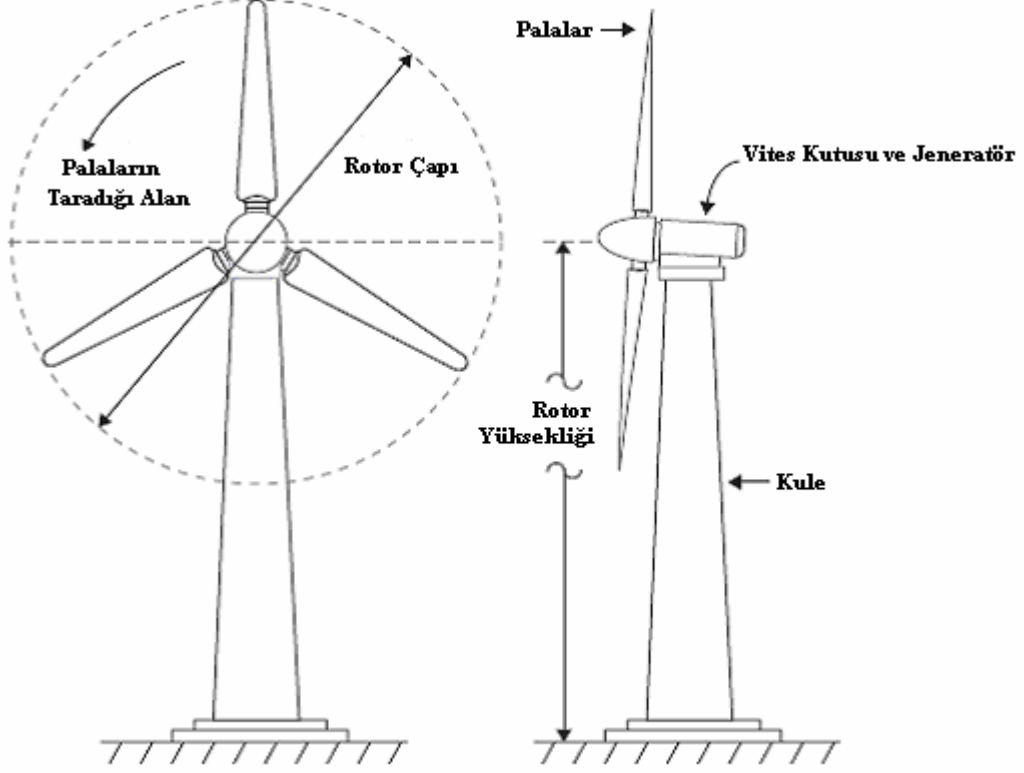
Şekil 5.3 – Rüzgar türbini iç mekanizması (Demirer A.Ş.)

Modern rüzgar enerjisi sistemleri otomatik olarak çalışmaktadır. Rüzgar türbinleri, uçakların kanatlarında dönüşü neden olan aynı aerodinamik kuvvetlere bağlı olarak çalışır. Rüzgar hızını sürekli ölçen anemometreler, rüzgar türbin kontrol sistemlerinin en önemli parçalarıdır. Rüzgar hızı, rüzgar türbinindeki sürtünmeyi yenecek kadar yüksek olduğunda kontrol mekanizması rotorun dönmesine izin verir. Böylece çok küçük bir miktar güç üretilir. Bu rüzgar hızı genellikle 4 m/s'dir. Rüzgar hızı arttıkça alınan güç de artar. Verim türbin dizaynının elde edebileceği maksimum güç miktarına ulaştığında türbin kontrol mekanizması verimi güce göre ayarlar. Ulaşılan bu güçteki rüzgar hızına türbinin ulaşılmış rüzgar hızı denir ve bu genellikle 15 m/s hızında güçlü bir rüzgardır. Sonunda eğer rüzgar hızı daha da artarsa kontrol sistemi rüzgar türbinini mekanizmayı hasardan korumak için kapatır. Bu sırada rüzgarın hızı genellikle 25 m/s'dir.

Modern rüzgar enerji sistemleri tipik olarak şu büyük parçalardan meydana gelir:

- Rotor, 2 veya 3 pervaneli. Bu rüzgardaki enerjiyi rotor şaftına mekanik olarak ileten aksamdır.
- Rotor şaftından elektrik jeneratörüne geçiş sağlayan vites kutusu.
- Rotoru yerden tutarak daha yüksek rüzgar hızlarını yakalamak için uzun kule.

- Yüksek rüzgardan veya buzlanma koşullarından rüzgar türbinini koruyacak bir temel.
- Mekanizmanın düzenli bir şekilde işleyişini sağlayacak rüzgar türbinini çalıştırıp durduracak bir kontrol sistemi.



Şekil 5.4 – Rüzgar Türbinleri (RETScreen International)

Bizim sistemimizde kullanacağımız rüzgar türbinlerinin özellikleri çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Bölgede 3 tane 500kW’lık rüzgar santrali bulunmaktadır ve özellikleri birbirinin aynısıdır. Türbinler Enercon yapımı olup bölgeye 1998 yılından beri elektrik sağlamaktadır.

Çizelge 5.2 – Rüzgar Türbininin Özellikleri (Demirer A.Ş.)

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Kurulu Güç | 500 kW |
| Rotor Çapı | 48 m |
| Rotor Yüksekliği | 76 m |
| Türbin Konsepti | Değişken hızlı, vitessiz |
| Dönüş Yönü | Saat yönünde |
| Pala Sayısı | 3 |
| Tarama Alanı | 1810 m ² |
| Pala Malzemesi | Fiberglas |
| Rotor Hızı | 40 - 80 m/s |
| Devreye Girme Hızı | 3 m/s |
| Ortalama Çalışma Hızı | 13 m/s |
| Devreden Çıkma Hızı | 34 m/s |

5.4 Maliyet ve Ekonomi

Maliyeti belirlemek için yapılan kabuller aşağıdadır.

- Yatırım için gerekli sermaye finans kurumlarından %100 finans edilir. Bu borç rüzgar güç santralleri için 25 yıl ve elektroliz sistemi için 20 yıldır.
- Faiz oranı her yıl için 5% tir.
- İşletim ve bakım rüzgar sistemlerinde başlangıç maliyetinin %2'sidir, elektroliz sisteminde 5% 'dir (Yumurtaçı ve Bilgen, 2004).

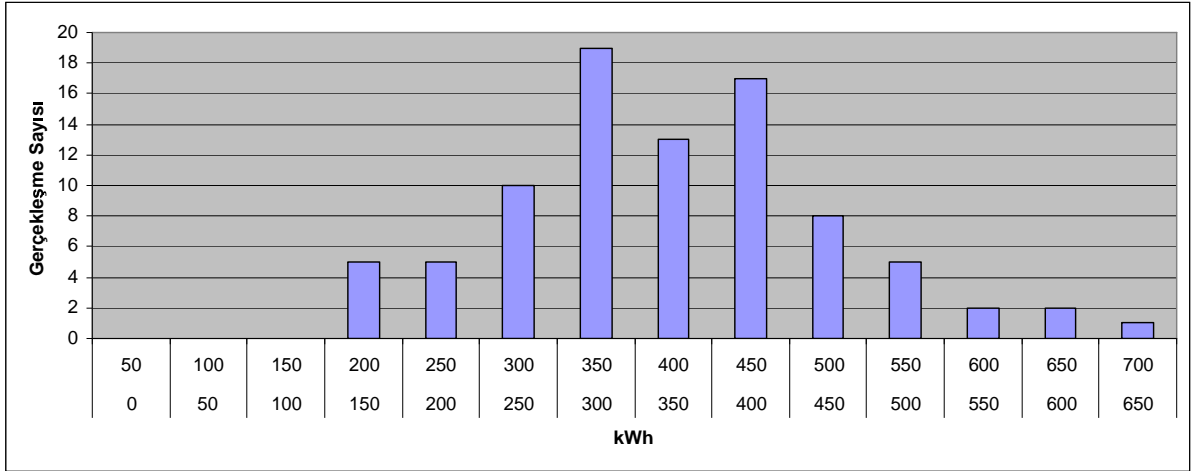
5.5 Sistemin Verileri

Maliyet hesapları yaparken rüzgar santralinden (Germiyan RES) ve elektroliz sistemlerinin verilerinden yararlanılacaktır. Rüzgar santrali verileri 1998-2005 yılları arasındaki enerji değerleri için yapılan istatistiksel çalışmalardan alınmıştır.

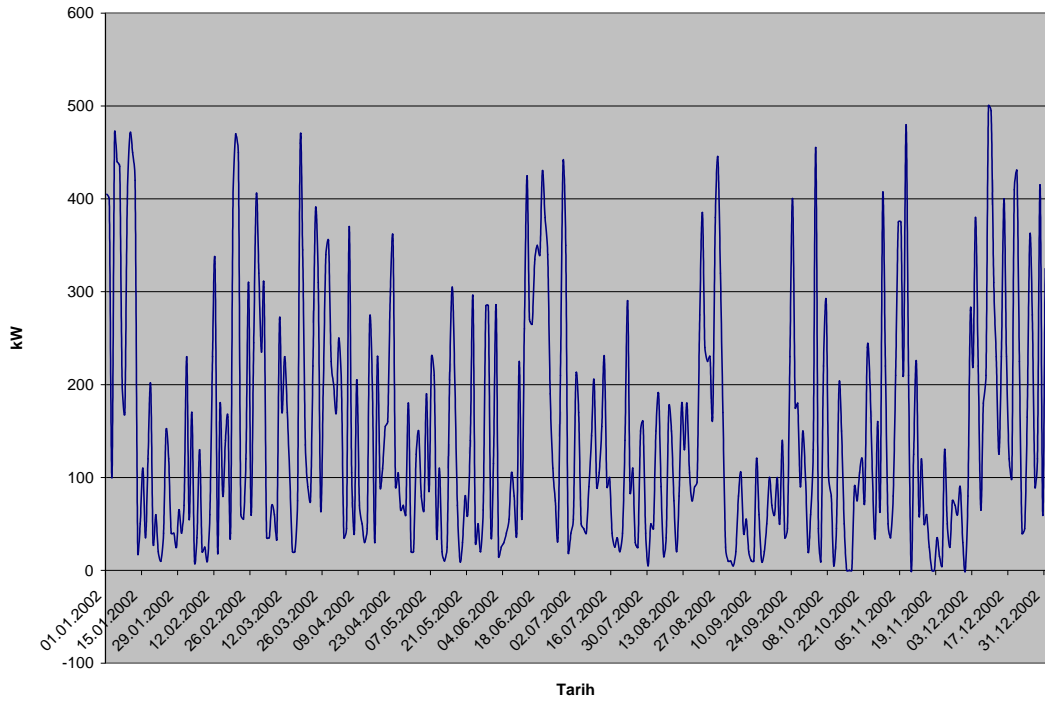
Çizelge 5.3 – Türbinlerin Yıllık Çalışma Aralığı (Demirer A.Ş.)

| kWh Aralığı (Yıllık) | | Tekrar |
|--------------------------|-----------|----------|
| 2.400.000 | 3.000.000 | 0 |
| 3.000.000 | 3.600.000 | 0 |
| 3.600.000 | 4.200.000 | 1 |
| 4.200.000 | 4.800.000 | 4 |
| 4.800.000 | 5.400.000 | 2 |
| 5.400.000 | 6.000.000 | 0 |
| Toplam Yıl Sayısı | | 7 |

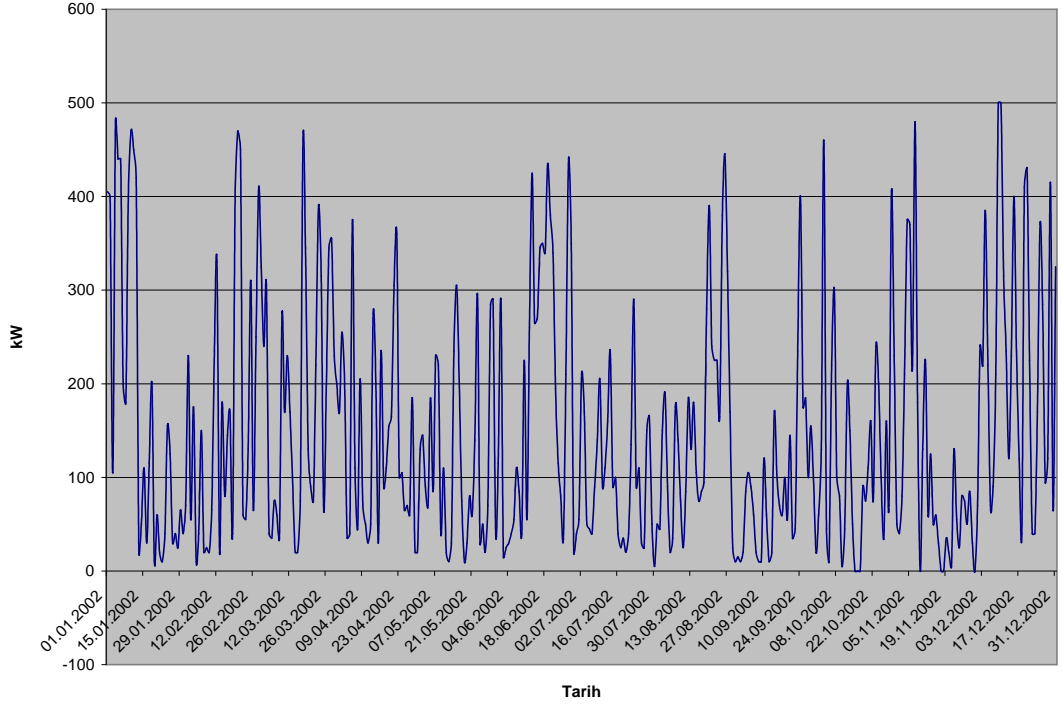
Bu değerler santrali kuran ve işleten Demirer A.Ş. tarafından verilmiştir. 7 yıllık bir çalışmanın ürünü olan bu veriler temel alınarak maliyet hesapları yapılmıştır. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8 türbinlerin 2002 yılı içinde hangi güç aralıklarında çalıştıklarını göstermektedir. Bu verilere ve grafiklere göre türbinler yaklaşık olarak %30 şebeke yük faktörü ile çalışmaktadırlar.



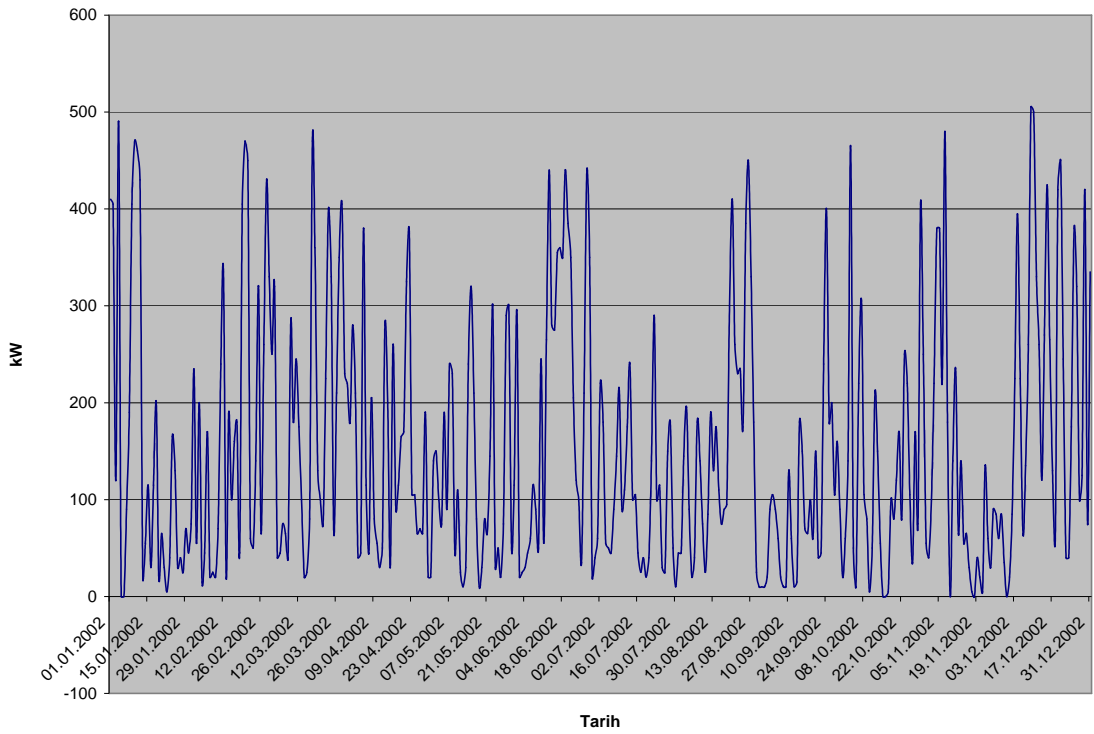
Şekil 5.5 – Türbinlerin Aylara Göre Toplam Üretimi



Şekil 5.6 – 1. Türbinin Gücü



Şekil 5.7 – 2. Türbinin Gücü



Şekil 5.8 – 3. Türbinin Gücü

6 ENERJİ ÜRETİM MALİYETİ HESABI

6.1 Rüzgar Enerji Maliyeti Hesabı

Elektrik enerjisi üretim maliyetini hesaplayabilmek için santrale yapılan masrafların bilinmesi gerekir. Genellikle bu masraflar sırasıyla santral yeri masrafları, santralin inşaatı masrafları, işletme başladıktan sonra bahis konusu olan yakıt masrafları, işletme ve bakım masraflarıdır. Belirli bir süre içinde bu masrafların tamamı, aynı sürede üretilen elektrik enerjisi miktarına bölünerek üretilen birim enerji başına maliyet hesaplanabilir.

En basit şekilde, amortisman için ayrılacak yıllık sabit miktar biliniyor ise, buna yıllık işletme ve bakım masrafları ile yıllık yakıt masrafları eklenerek yıllık toplam masraf bulunur. Santralin her yıl yaklaşık aynı elektrik enerjisini ürettiğini kabul edersek, birim elektrik enerjisi üretim maliyeti, yıllık toplam masrafların yıllık enerji üretimine oranı olarak,

$$g = \frac{C_k + C_m + C_f}{E} = \frac{C_T}{E} \quad (6.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada; C_k yıllık sabit sermaye veya yatırım masraflarını, C_m yıllık işletme ve bakım masraflarını, C_f yıllık yakıt masrafları, C_T yıllık toplam masrafları, E ise yıllık elektrik enerjisi üretimini göstermektedir. Rüzgar türbinlerinin yakıt masrafı olmadığından bu eşitlik;

$$g = \frac{C_k + C_m}{E} = \frac{C_T}{E} \quad (6.2)$$

şeklini alır.

Elektrik enerjisi üretim maliyetinin her zaman bu kadar kolay elde edilemeyeceği bilinmelidir. Zorlukların başında paranın zaman içindeki değerinin hesaba katılması gelir. Santralin inşaat süresince yapılan masraflar değişik tarihlerde yapılmaktadır. Ayrıca yıllık işletme ve bakım masrafları ile yıllık elektrik enerjisi üretimi yıldan yıla değişebilmektedir.

6.1.1 Yıllık Sermaye Masrafları

6.1.1.1 Yatırım (Kuruluş) Maliyeti

$$I_d = C_s \cdot N_e \quad (\$) \quad (6.3)$$

I_d : Direkt inşaat bedeli (\$)

C_s : Birim tesis bedeli (\$ / kW)

N_e : Efektif güç (kW)

Birim tesis bedelleri tablolar yardımıyla bulunabilir.

6.1.1.2 İnşaat Süresince Eskalasyon Yüğü

İnşaat periyodu süresince kullanılan malzeme, teçhizat ve işçilik fiyatlarındaki artışlar “Eskalasyon” olarak adlandırılmaktadır. İnşaat süresi boyunca yapılacak yatırım harcamaları belirlenecek bir harcama modeli ile zaman içine yayılacağından inşaat periyodunda yapılan gerçek toplam harcama eskalasyon etkisiyle inşaatın başlangıç tarihi için geçerli olan direkt inşaat bedelinden daha yüksek olacaktır. Yıllık eskalasyon oranı “e” ve harcama modeli yardımıyla inşaat süresi içinde herhangi bir yıla ait eskalasyon yükü ve eskale edilmiş yıllık gerçek harcama belirlenebilir.

$$Y(t) = I_d \cdot y(t) \quad (\$) \quad (6.4)$$

I_d : Direkt inşaat bedeli (\$)

$y(t)$: İnşaat süresi boyunca yıllık harcama yüzdesi (%)

$Y(t)$: Herhangi bir t yılına ait eskalasyonsuz harcama miktarı (\$)

$$Y_e(t) = Y(t) \cdot (1+e)^t \quad (\$) \quad (6.5)$$

$Y_e(t)$: Eskale edilmiş harcama miktarı (\$)

e : Yıllık eskalasyon oranı (%)

6.1.1.3 İnşaat Süresince Faiz Yüğü

İnşaat süresi boyunca yapılan yıllık $Y_e(t)$ harcama miktarlarının kredi olarak alındığı düşünülürse, inşaat periyodunun sonunda $Y_e(t)$ miktarlarına ilave olarak bir faiz yükünün de geri ödemesi gerekmektedir.

İnşaat süresi içinde herhangi bir t yılının başında kredi olarak kullanılan $Y_e(t)$ miktarı için inşaatın bitiminde geri ödenmesi gereken borç faiz yükü de dahil olmak üzere,

$$T(t) = Y_e(t) \cdot [(1+i)^{S-t}] \quad (\text{M\$}) \quad (6.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada “S” inşaat süresi olduğundan “(S-t)” faiz periyodudur.

Eskalasyon ve faiz yükleri de dahil olmak üzere inşaatın bitimindeki toplam yatırım bedeli,

$$I_k = \sum_{t=1}^S T(t) \quad (\text{M\$}) \quad \text{olmaktadır.}$$

6.1.1.4 Sabit Yıllık Sermaye Masrafı Metodu

Sermaye masrafı için kullanılan kredinin geri ödeme başlangıç tarihi inşaatın bitiş tarihi olarak alınırsa;

$$C_k = I_k \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (6.7)$$

denklemini kullanılarak santral ömrü boyunca sabit yıllık sermaye masrafı hesaplanabilir.

n : Kredi geri ödeme süresi (yıl)

i : Kredi faiz oranı (%)

$\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$: Amortisman katsayısı

C_k : Toplam yıllık ödeme (\$)

Bundan sonra santralin yıllık ürettiği enerji miktarı hesaplanarak birim yatırım maliyeti bulunabilir.

$$E = 24 \times 365 \times N_e \times L_f \quad (\text{kWh}) \quad (6.8)$$

L_f : Şebeke yük faktörü (%)

E : Yıllık üretilen enerji miktarı (kWh)

$$g_k = \frac{C_k}{E} \quad (\$/\text{kWh}) \quad (6.9)$$

g_k : Birim yatırım maliyeti

6.1.2 İşletme ve Bakım (O&M) Maliyeti

O&M masrafları işletme esnasındaki tüm işçilik, malzeme tedarik ve depolama, tamir ve bakım sigorta v.b. gibi masrafları kapsar. Bu masrafları iki kısım halinde ele almak mümkündür.

- \$ / kW yıl olarak ifade edilen ve kullanma süresi veya şebeke yük faktörüne bağlı olmayan yıllık sabit masraflar

- \$ / kW h olarak ifade edilen ve üretilen enerji ile orantılı yıllık değişken masraflar

Bu iki kısımdaki değerler tablolar yardımıyla bulunabilir ancak burada kabul edeceğimiz bir değerle hesaplamaları yapacağız. Toplam yıllık işletme ve bakım masrafı rüzgar sistemlerinde başlangıç maliyetinin %2'sidir (Yumurtacı ve Bilgen, 2004).

Tablolar yardımıyla da aşağıdaki formülleri kullanarak da yıllık işletme ve bakım masraflarını bulabiliriz.

$$C_m = C_{ms} \cdot N_e \quad (\$/\text{yıl}) \quad (6.10)$$

C_{ms} : Sabit masraflar toplamı (\$/kW yıl)

C_m : Toplam yıllık O&M masrafı (\$/yıl)

Orantılı O&M masrafı da toplam yıllık O&M masrafına eklenerek aşağıdaki formül yardımıyla birim başına toplam O&M maliyeti bulunur.

$$g_m = \frac{C_m}{E} \quad (\$/\text{yıl}) \quad (6.11)$$

g_m : Birim işletme ve bakım maliyeti

6.1.3 Hesaplamalar

Enerji maliyeti hesabında kullanılabilen çeşitli metodlar vardır. Burada hesaplar sabit yıllık sermaye masrafı metodu yardımıyla yapılmıştır. Sonuçlar kullanılan metoda göre farklı olmaktadır. Bu nedenle verilen rakamsal sonuçların hangi metodla elde edildiğinin bildirilmesi gerekir.

Rüzgar santralinde üretilen enerjinin birim maliyetinin hesaplanabilmesi için Çizelge 6.1'deki değerler kabul edilecektir.

Çizelge 6.1 – RES'in maliyet hesapları için kabul edilen değerler

| | | |
|--------------------|-------------------|---------------|
| Faiz Oranı | (i) | 0,05 |
| Santral Ömrü | (n) | 25 yıl |
| Yük Faktörü | (L _f) | 0,3 |
| Baz Alınan Güç | (N _e) | 500 kW |
| Birim Tesis Bedeli | (C _s) | 1881,19 \$/kW |
| Eskalasyon Oranı | (e) | 0,06 |
| İnşaat Süresi | | 3 yıl |

$$g = \frac{C_k + C_m}{E} = \frac{C_T}{E}$$

g : Birim elektrik enerjisi üretim maliyeti (\$ / kW h)

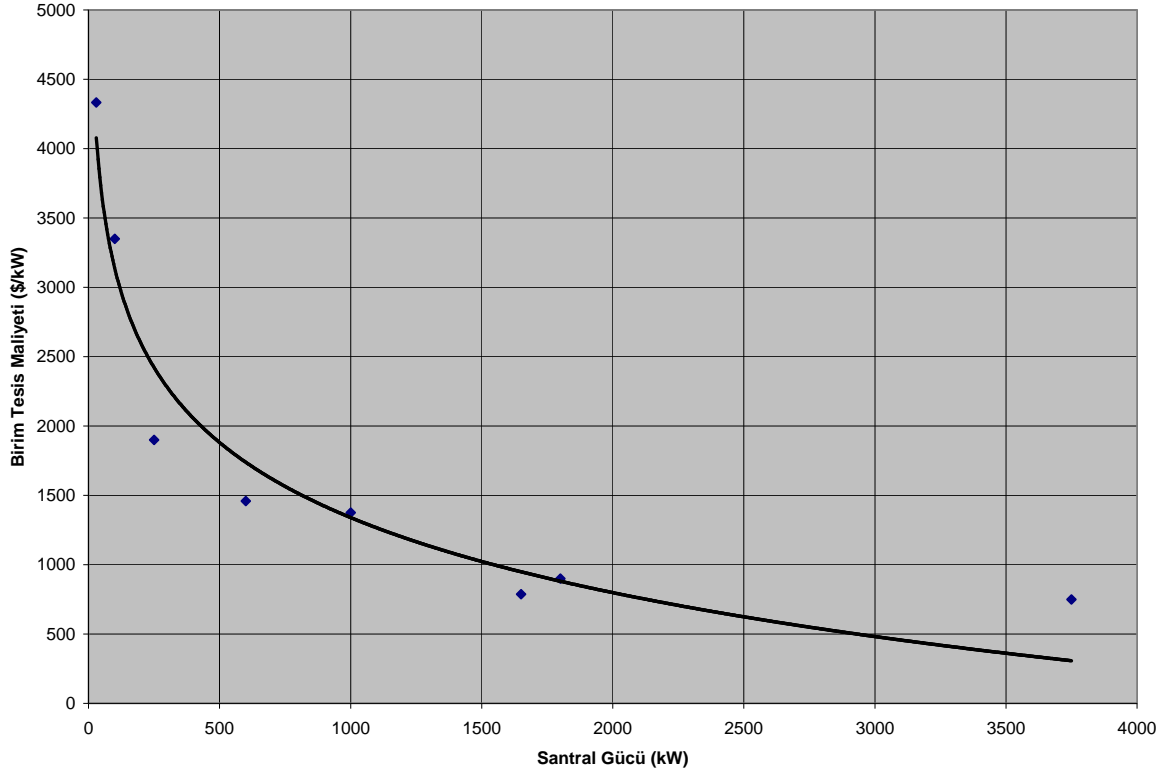
Çizelge 6.2 – Değişik Güçlerdeki Rüzgar Santral Maliyetleri

| Rüzgar Santral Gücü (kW) | Sermaye Maliyeti (\$) | Birim Tesis Maliyeti (\$/kW) |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 30 | 130000 | 4333,33 |
| 100 | 335000 | 3350,00 |
| 250 | 475000 | 1900,00 |
| 600 | 875000 | 1458,33 |
| 1000 | 1375000 | 1375,00 |
| 1650 | 1300000 | 787,88 |
| 1800 | 1620000 | 900,00 |
| 3750 | 2812500 | 750,00 |

KAYNAKLAR : (The Economics of Wind Energy, AWEA 2005)
 (GE Global Research, Ellen Lui 2003)
 (Market Opportunities for a Distributed Base Load Wind/Hydrogen Power Plant, Mike Michaud)
 (Wind Power is "Taking Off" in Distributed Generation Applications, Global Wind Power 2004)

Çizelge 6.2'deki verilerden yola çıkarak şekil 6.1 elde edilir. Sistemimizi oluşturan 500 kW'lık türbininin birim tesis maliyeti bu talodan bulunur. 500 kW'a (N_e) karşılık gelen birim tesis bedeli (C_s) 1881,19 \$/kW'tır. Direkt inşaa bedelini bulmak (I_d) için denklem (6.3)'ten yararlanır.

$$I_d = 1881,19 \times 500 = 940595 \text{ \$}$$



Şekil 6.1 – Değişik Güçlerde Birim Tesis Maliyet Grafiği

İnşaat boyunca eskalasyon miktarını ($Y_e(t)$) bulmak için denklem (6.4) ve (6.5) kullanılarak çizelge 6.3'teki değerlere ulaşılır. Harcama planı ilk yıl için %30 ikinci yıl için %50 ve üçüncü yıl için %20 olarak kabul edilmiştir.

$$2006 \text{ yılı için } Y(t) = 940595 \times 0,30 = 282178,5 \text{ \$}$$

$$2007 \text{ yılı için } Y(t) = 940595 \times 0,50 = 470297,5 \text{ \$}$$

$$2008 \text{ yılı için } Y(t) = 940595 \times 0,20 = 188119 \text{ \$}$$

Bulunan bu değerler 3 yıllık eskalasyonsuz harcama planını göstermektedir. Bize gerekli olan eskale edilmiş harcama planıdır.

$$2006 \text{ yılı için } Y_e(t) = 282178,5 \times (1+0,06)^1 = 299109,21 \text{ \$}$$

$$2007 \text{ yılı için } Y_e(t) = 470297,5 \times (1+0,06)^2 = 538426,27 \text{ \$}$$

$$2008 \text{ yılı için } Y_e(t) = 188119 \times (1+0,06)^3 = 224052,74 \text{ \$}$$

Çizelge 6.3 – Eskalasyon Hesabı

| İnşaat Süresince Eskalasyon Hesabı e=0,06 | | | |
|---|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Yıl | Harcama Dağılımı (%) | Eskalasyonsuz Harcama Planı (\$) | Eskale Edilmiş Harcama Planı (\$) |
| 2006 | 30 | 282178,50 | 299109,21 |
| 2007 | 50 | 470297,50 | 528426,27 |
| 2008 | 20 | 188119,00 | 224052,74 |
| TOPLAM | 100 | 940595,00 | 1051588,22 |

İnşaat süresince faiz yükünün hesabını (I_k) yapabilmek için denklem (6.6)'dan yararlanılır. Yapılan hesap sonucunda çizelge 6.4 elde edilir.

$$2006 \text{ yılı için } T(t) = 299109,21 \times (1+0,05)^3 = 346256,30 \text{ \$}$$

$$2007 \text{ yılı için } T(t) = 528426,27 \times (1+0,05)^2 = 582589,96 \text{ \$}$$

$$2008 \text{ yılı için } T(t) = 224052,74 \times (1+0,05)^1 = 235255,38 \text{ \$}$$

$$I_k = 346256,30 + 582589,96 + 235255,38 = 1164101,64 \text{ \$}$$

Çizelge 6.4'te yıllara göre faiz yükü de belirtilmiştir. 3 yıllık faiz yükünün 112513,42 \$ olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.4 – Faiz Hesabı

| İnşaat Süresince Faiz Hesabı e=0,05 | | | |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------|
| Yıl | Eskale Edilmiş Harcama | Eskale Edilmiş Harcama + Faiz | Faiz Yükü |
| 2006 | 299109,21 | 346256,30 | 47147,09 |
| 2007 | 528426,27 | 582589,96 | 54163,69 |
| 2008 | 224052,74 | 235255,38 | 11202,64 |
| TOPLAM | 1051588,22 | 1164101,64 | 112513,42 |

Sabit yıllık sermaye masrafı metoduna göre toplam yıllık ödemeyi (C_k) bulmak için denklem (6.7) kullanılır.

$$C_k = 1164101,64 \times \left[\frac{0,05(1 + 0,05)^{25}}{(1 + 0,05)^{25} - 1} \right] = 59333,68 \$$$

Bulunan bu değeri yıllık üretilen enerji (E) miktarına böldüğümüz zaman elde edilen değer birim yatırım maliyeti değerini verecektir. Yıllık üretilen enerji miktarını bulmak için denklem (6.8) kullanılır.

$$E = 24 \times 365 \times 500 \times 0,3 = 1314000 \text{ kWh}$$

$$g_k = \frac{59333,68}{1314000} = 0,04515 \$/\text{kWh} = 45,15 \text{ mills/kWh}$$

Bulunan bu sonuca O&M masrafları da eklenerek rüzgar türbininin birim enerji maliyeti (g) bulunur. Toplam yıllık işletme ve bakım masrafı rüzgar sistemlerinde başlangıç maliyetinin %2'sidir. Yıllık işletme ve bakım masrafı şu şekilde hesaplanır:

$$C_m = I_d \times 0,02 \quad (6.12)$$

$$C_m = 940595 \times 0,02 = 18811,9 \$$$

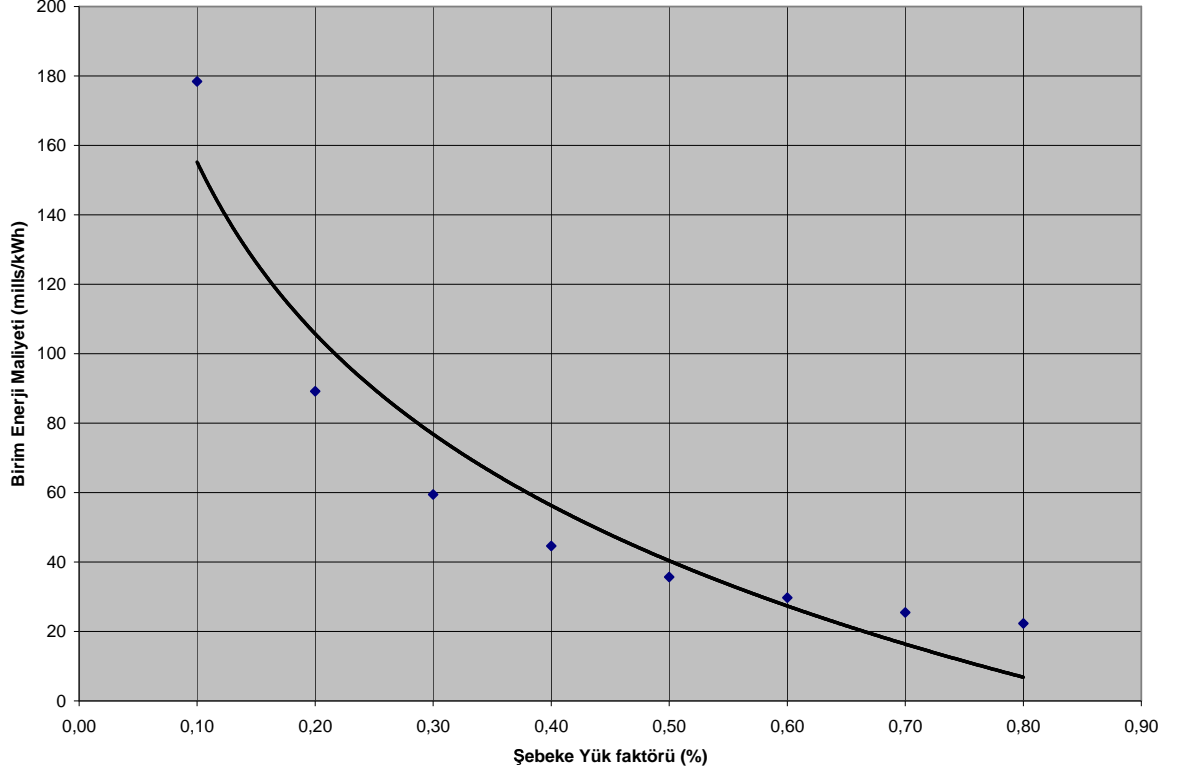
$$g_m = \frac{18811,9}{1314000} = 0,01431 \$/\text{kWh} = 14,31 \text{ mills/kWh}$$

$$g = 45,15 + 14,31 = 59,47$$

Çizelge 6.5 – Değişik Şebeke Yük Faktörlerinde Birim Enerji Maliyeti

| L_f | g |
|--------------------|--------------------------------------|
| Şebeke Yük Faktörü | Birim Enerji Maliyeti (mills/kWh) |
| 0,10 | 178,4145669 |
| 0,20 | 89,20728343 |
| 0,30 | 59,47152229 |
| 0,40 | 44,60364172 |
| 0,50 | 35,68291337 |
| 0,60 | 29,73576114 |
| 0,70 | 25,48779527 |
| 0,80 | 22,30182086 |

Burada Şu duruma dikkat etmek gerekir. Değişik yük faktörlerinde yıllık üretilen toplam enerji miktarı değişmektedir. Bu da birim enerji maliyetinin değerini değiştirmektedir. Bu durum izelge 6.5 ve Şekil 6.2’de daha iyi Şekilde görülebilir. Türbinlerin Şebeke faktörü yaklaşık 0,30’dur.



Şekil 6.2 - Şebeke Yük Faktörünün Birim Enerji Maliyetine Etkisi

6.2 Elektroliz Sisteminin Maliyetlerinin Hesaplanması

Bu sistem için maliyet hesaplaması amortisman metoduna göre yapılacaktır. Amortisman metodunu kısaca Şu Şekilde açıklayabiliriz:

Bir tesisin kuruluşunda yapılan toplam yatırım masraflarının, kredi alınmışsa kredinin faizi de dahil olmak üzere belirli bir sürede geri ödenmesi amacıyla toplam yatırım değerinin önceden belirlenmiş bir kısmının, sermaye maliyeti olarak her yıl işletme gelirlerinden ayrılması ve vergi dışı bırakılması işlemine ‘‘Amortisman’’ adı verilir. Yıllık gelirden ayrılacak amortisman payının belirlenmesinde bir çok yöntem vardır. Fakat esas konumuzu teşkil eden enerji maliyeti hesabında sabit yıllık amortisman metodunu kullanacağız (Aybers ve Şahin, 1995).

$$A = P \cdot \left[\frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (6.13)$$

A = Yıllık amortisman

P = Yatırım maliyeti

i = Faiz oranı

n = Yatırım ömrü

Elektroliz sistemi için maliyetler açıklanan amortisman metoduna göre hesaplanacaktır. Elektroliz sistemi için kabul edilen değerler çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6 – Elektroliz sisteminin maliyet hesabı için kabul edilen değerler

| | | |
|-------------------------|------|-------------|
| Faiz Oranı | (i) | 0,05 |
| Tesis Ömrü | (n) | 20 yıl |
| Yük Faktörü | (%) | 0,9863 |
| Günlük Hidrojen Üretimi | (Ne) | 2383 kg/gün |
| Kapital Maliyeti | (Cs) | 3518000 \$ |

5 MW kapasiteli elektroliz tesisinin toplam yatırım maliyetleri;

Arazi, bina ve inşaat maliyeti = $1,68 \times 10^6$ \$

Elektroliz tesisi içerisindeki tüm cihaz ve ekipmanların temini ve kurulması için gereken maliyet = $1,3778 \times 10^6$ \$

İlk yatırım maliyeti (%2 santral maliyeti) = $0,0336 \times 10^6$ \$

Faiz, paranın değer kaybı ve diğer maliyetler = $0,427 \times 10^6$ \$

Toplam yatırım maliyeti (P) = $3,518 \times 10^6$ \$ (Taylor, Alderson, Kalyanam, Lyle ve Phillips, 1986).

6.2.1 Amortisman

Yıllara göre amortisman bir önceki bölümde de kullanılan (6.13) numaralı formülle hesaplanabilir.

$$A = P \cdot \left[\frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \right]$$

$P = 3,518 \times 10^6$ \$ (Yatırım maliyeti)

$i = 0,05$ (Faiz oranı)

$n = 20$ yıl (Ömür)

$$A = 3,518 \times 10^6 \left[\frac{(1+0,05)^{20} \times 0,05}{(1+0,05)^{20} - 1} \right] = 280878,6 \text{ \$/yıl}$$

6.2.2 Tesis Maliyeti

Tesis Maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Kapital Yüklenimi} = \frac{A}{Yh} \quad (6.14)$$

A = Amortisman

Yh = Yıllık hidrojen üretimi

Yıllık hidrojen üretiminin hesaplanması için günlük üretilen hidrojen miktarı ile yük faktörü 365 gün ile çarpılır.

Günlük hidrojen üretimi = $2,383 \times 10^3$ kg/gün (elektroliz sisteminin kapasitesi)

Yük Faktörü = 0,9863

$$Yh = 2383 \text{ kg} \times 365 \times 0,9863 = 857878,8 \text{ kg/yıl} \quad (6.15)$$

Yıllık hidrojen üretimi 857878,8 kg/yıl olarak hesaplandıktan sonra kapital yüklenimi bu değer kullanılarak (6.14) numaralı denklemle bulunur.

$$\text{Kapital yüklenimi} = \frac{280878,6}{857878,8} = \mathbf{0,327 \text{ \$/kg H}_2}$$

6.2.3 İşletme ve Bakım Maliyeti

Birim işletme ve bakım maliyeti, toplam işletme ve bakım maliyetinin yıllık toplam hidrojen miktarına bölünmesiyle hesaplanır. İşletme ve bakım maliyeti ilk maliyetin %5'i kadardır (Yumurtacı ve Bilgen, 2004).

$$\text{İşletme ve Bakım Maliyetleri (toplam)} = 0,1759 \times 10^6 \$$$

$$0,1759 \times 10^6 / 857878,8 = 0,205 \$/\text{kg}$$

$$\text{Birim İşletme ve Bakım Maliyetleri} = \mathbf{0,205 \$/\text{kg}}$$

6.2.4 Enerji Maliyeti

Çizelge 6.7 – Elektroliz Sistemleri (Ivy, 2004)

| | Sistemin Enerji İhtiyacı (kWh/kg) | Hidrojenin Isıl Değeri (kWh/kg) | Sistemin Verimi (%) | Üretim Basıncı (psi) |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| Stuart: IMET 1000 | 53,4 | 39 | 73 | 360 |
| Teledyne: EC-750 | 70,1 | 39 | 56 | 60-115 |
| Proton: HOGEN 380 | 62,3 | 39 | 63 | 200 |
| Norsk Hydro: Atmospheric | 53,5 | 39 | 73 | 435 |
| Avalence: Hydrofiller 175 | 60,5 | 39 | 64 | 10000 |

Kaynak : Summary of Electrolytic Hydrogen Production Milestone Completion Report, Johanna Ivy 2004

H₂'nin yoğunluğu 0,0899 kg/m³'tür.

Rüzgar türbininin yıllık enerji kapasitesi kWh cinsinden Şekil 6.3'ten alınır. 1 kg H₂ üretebilmek için gereken enerji miktarı Çizelge 6.7'den çeşitli firmalara ait elektroliz sistemlerinin ortalaması alınarak 59,96 kWh/kg bulunur. Türbinlerin tüm kapasitesi ile hidrojen ürettiğini kabul ediyoruz. 500 kW'lık rüzgar türbininin çeşitli şebeke yük faktörleri için birim enerji maliyetini \$/kWh cinsinden Çizelge 6.5'ten alarak, elektroliz için kullanılan enerjiyi de Şekil 6.3'ten alarak, buradan toplam enerji maliyeti;

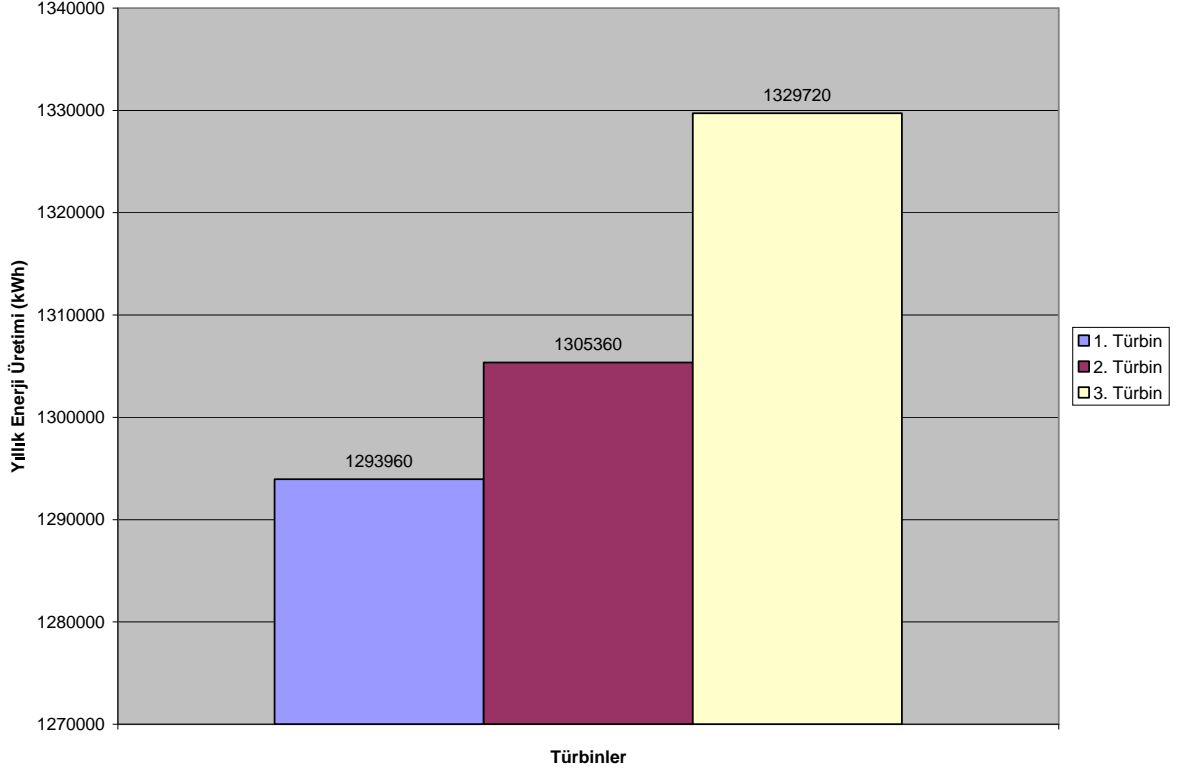
$$\text{Toplam enerji maliyeti} = \text{Yıllık güç kullanımı} \times \text{Birim enerji maliyeti} \quad (\$/\text{yıl}) \quad (6.16)$$

denklemleri ile bulunur.

$$\text{Toplam enerji maliyeti} = 1293960 \times 0,05947 = 76951,8 \$$$

76951,8 \$ değeri %30 şebeke yük faktörü ile çalışmış olan 1. rüzgar santralinin birim enerji maliyetine göre hesaplanmış olup diğer şebeke yük faktörlerine ait toplam enerji maliyetleri de

hesaplanarak Çizelge 6.8’de sunulmuştur. Bu çizelgede ayrıca 2. ve 3. rüzgar santrallerinin şebeke yük faktörlerinin elektroliz sisteminin toplam enerji maliyetine etkisi de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 – Türbinlerin Yıllık Enerji Üretimleri (Demirer A.Ş.)

Çizelge 6.8 – Değişen RES yük faktörünün elektroliz sisteminin toplam enerji maliyetine etkisi

| Şebeke Yük Faktörü (%) | 1. Türbin Toplam Enerji Maliyeti (\$) | 2. Türbin Toplam Enerji Maliyeti (\$) | 3. Türbin Toplam Enerji Maliyeti (\$) |
|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0,20 | 115421,232 | 116438,112 | 118611,024 |
| 0,30 | 76951,8012 | 77629,7592 | 79078,4484 |
| 0,40 | 57710,616 | 58219,056 | 59305,512 |
| 0,50 | 46168,4928 | 46575,2448 | 47444,4096 |
| 0,60 | 38469,4308 | 38808,3528 | 39532,5756 |
| 0,70 | 32970,1008 | 33260,5728 | 33881,2656 |
| 0,80 | 28855,308 | 29109,528 | 29652,756 |

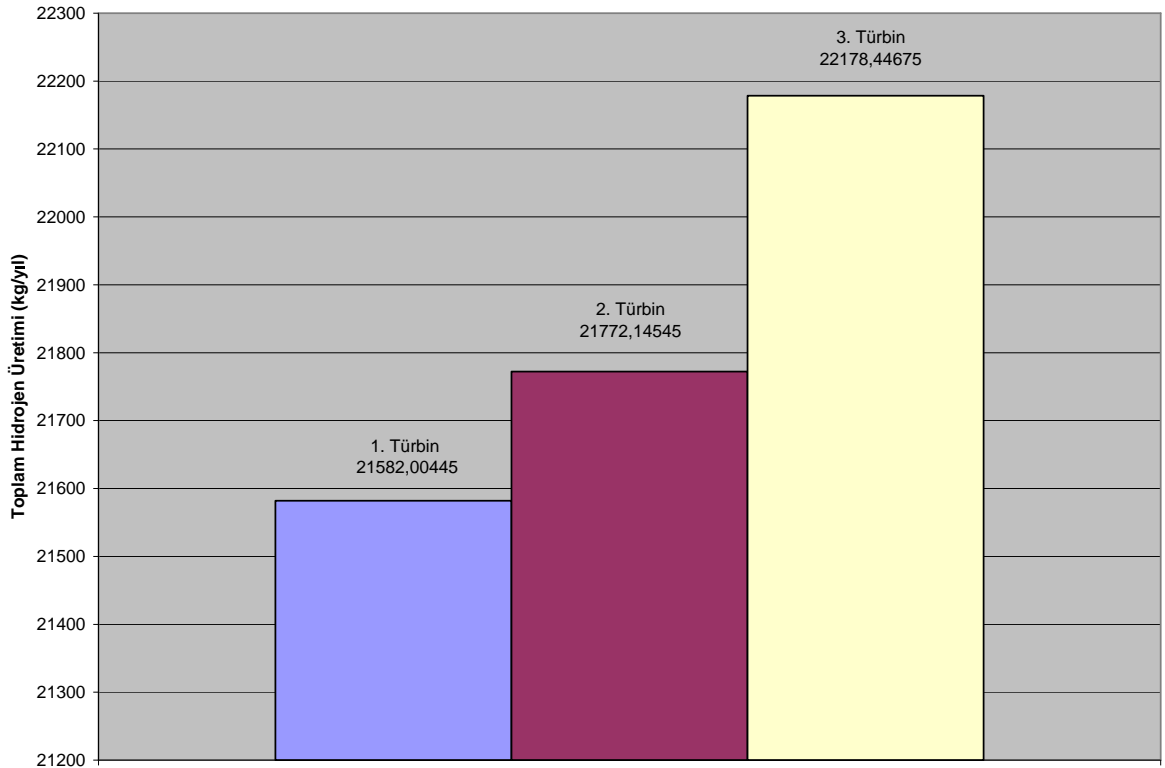
Çizelge 6.8’de de görüldüğü gibi şebeke yük faktörü arttıkça elektroliz toplam enerji maliyeti düşmektedir.

6.3 Hidrojen Üretim Maliyeti

Toplam enerji maliyetini bulduktan sonra türbinlerin sağladığı enerji ile üretilebilecek H₂ miktarı Şekil 6.4'den alınabilir. Şekil 6.4'deki yıllık üretilen hidrojen miktarını bulmak için ise şu yol izlendi. 1 kg hidrojen üretebilmek için gerekli olan enerjinin 59,96 kWh olduğundan daha önce bahsedilmişti. Türbinlerin yıllık enerji üretimlerini de göz önünde bulundurarak, herhangi bir türbin için Şekil 6.3'ten alacağımız enerji miktarı değerini 1 kg hidrojen üretebilmek için gerekli olan enerjiye böldüğümüz zaman ortaya o rüzgar türbininin yıllık üretebileceği hidrojen miktarı ortaya çıkar.

$$\text{Yıllık üretilen H}_2 \text{ miktarı} = \frac{1293960}{59,96} = 21582 \text{ kg H}_2$$

Bu miktar 1. Türbin içindir. Diğer değerler hesaplanarak Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4 – Türbinlerin üretebileceği yıllık hidrojen miktarı

Yıllık üretilen H₂ miktarını da hesapladıktan sonra şimdi elektroliz birim enerji maliyetini hesaplayabiliriz. Bunun için (6.17) nolu formülden yararlanacağız.

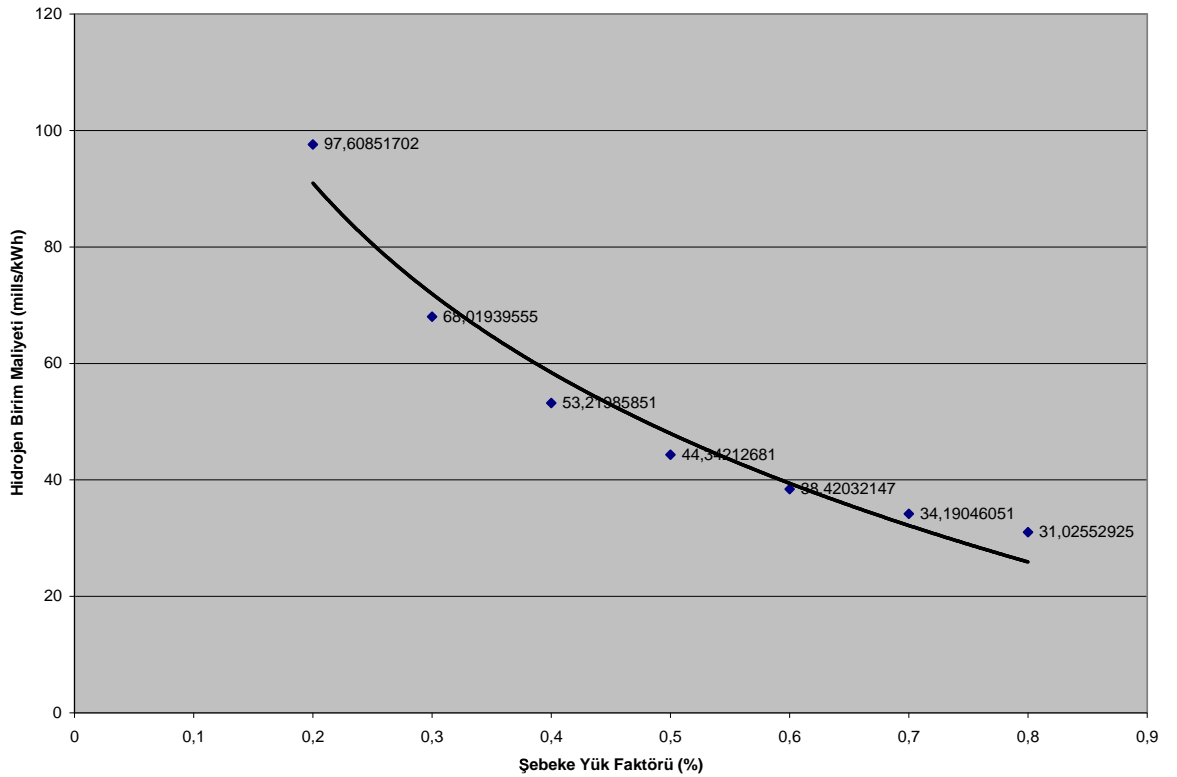
$$\text{Elektroliz birim enerji maliyeti} = \frac{\text{Yıllık Toplam Enerji Maliyeti}}{\text{Yıllık Üretilen H}_2 \text{ Miktarı}} \quad (\$/\text{kg}) \quad (6.17)$$

Çizelge 6.8 ve şekil 6.4'teki değerleri kullanarak elektroliz birim enerji maliyeti hesaplanır. Hesapladığımız bu maliyete tesis maliyetini ve işletme ve bakım maliyetlerini de eklememiz gerekmektedir. Çizelge 6.9 bir kg hidrojen üretmek için yapılması gereken harcamayı göstermektedir.

Çizelge 6.9 – Hidrojen Üretimi Birim Maliyet Tablosu

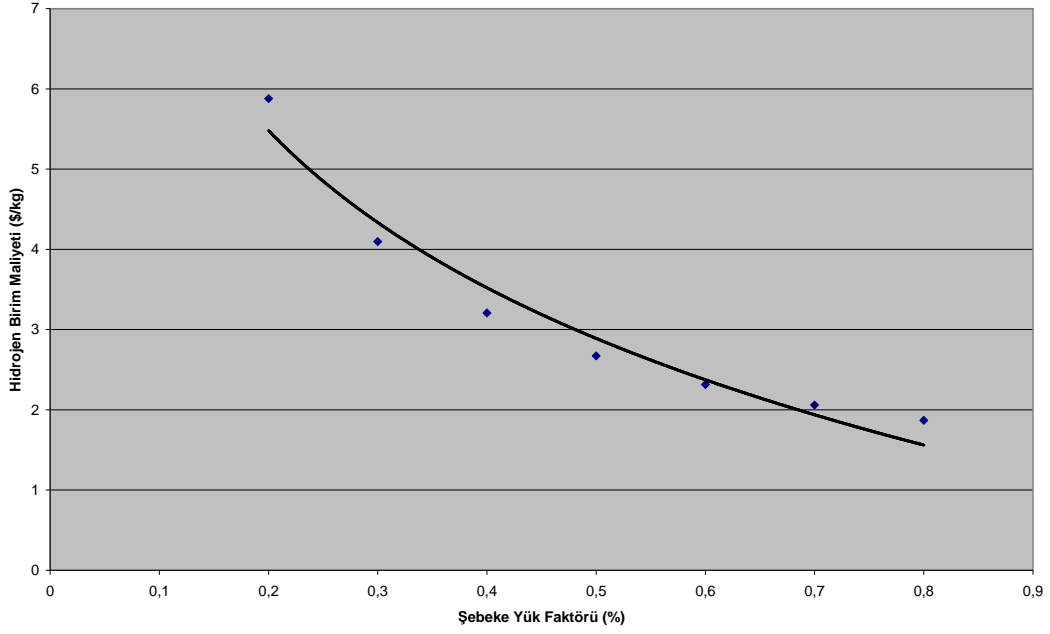
| Şebeke Yük Faktörü (%) | 1. 2. ve 3. Türbinler için Birim Hidrojen Maliyeti (\$/kg) | (mills/kWh) |
|------------------------|--|----------------|
| 0,2 | 5,880031 | 97,60852 |
| 0,3 | 4,097554 | 68,0194 |
| 0,4 | 3,206016 | 53,21986 |
| 0,5 | 2,671212 | 44,34213 |
| 0,6 | 2,314477 | 38,42032 |
| 0,7 | 2,059666 | 34,19046 |
| 0,8 | 1,869008 | 31,02553 |

\$/kg cinsinden bulduğumuz bu maliyeti 1 kg hidrojen üretmek için gereken enerji miktarı (0,0166 kg/kWh) ile çarparak \$/kWh'e dönüştürebiliriz. Çizelge 6.9'da da görüldüğü gibi değerlerini aldığımız Germiyan RES'in çalıştığı %30'luk şebeke yük faktöründe hidrojen üretim maliyeti 4,097 \$/kg veya 68,019 mills/kWh olmaktadır.

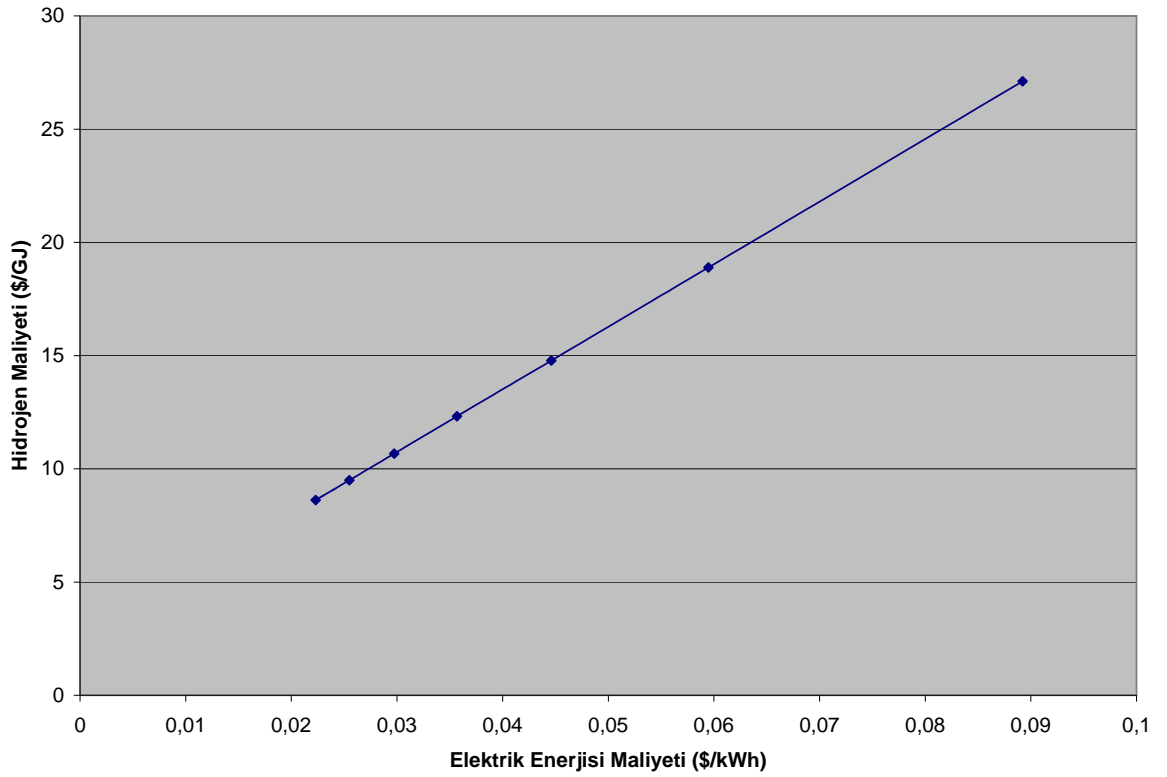


Şekil 6.5 – Şebeke Yük Faktörüne Bağlı Olarak H₂ Üretim Maliyetinin Değişim Grafiği

Şekil 6.5'te ve 6.6'da ise şebeke yük faktörüne bağlı olarak H₂ üretim maliyetinin değişim grafiği görülmektedir. Şebeke yük faktörü yükseldikçe maliyetlerin azaldığı gözlenmektedir.

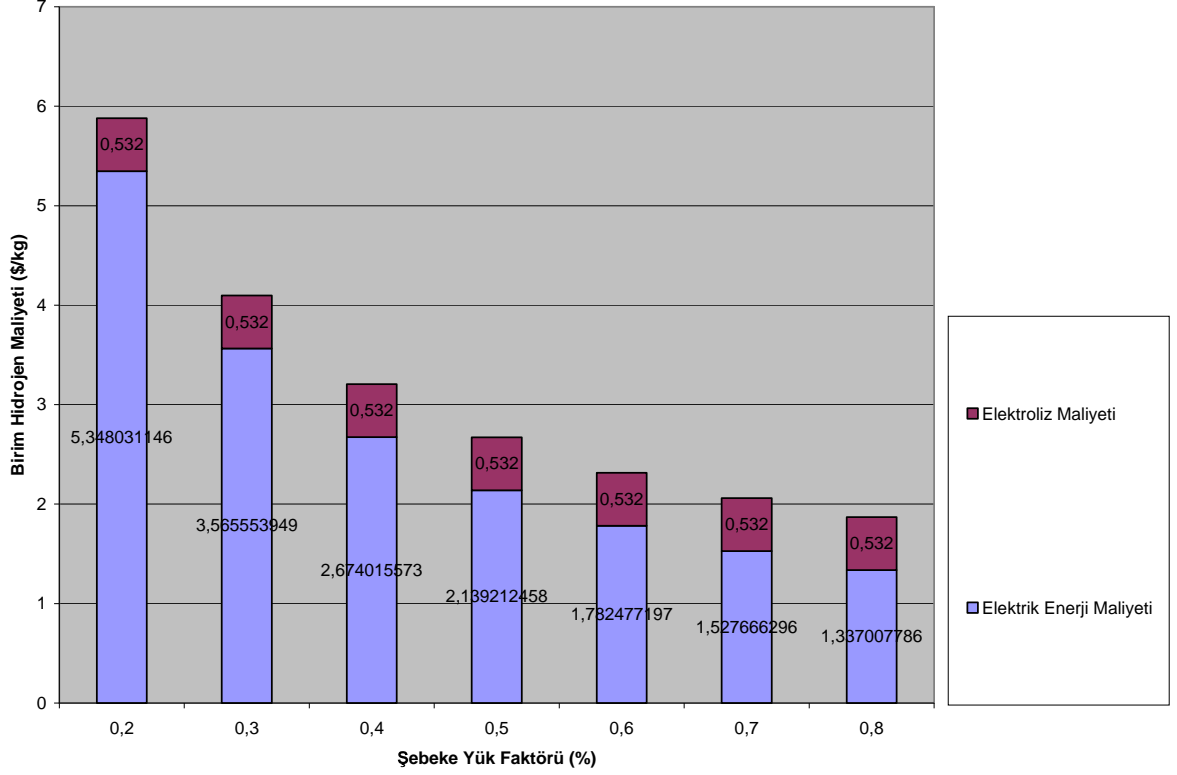


Şekil 6.6 – Şebeke Yük Faktörüne Bağlı Olarak H₂ Üretim Maliyetinin Değişim Grafiği



Şekil 6.7 - Elektrik Enerjisine Bağlı Hidrojen Maliyeti Grafiği

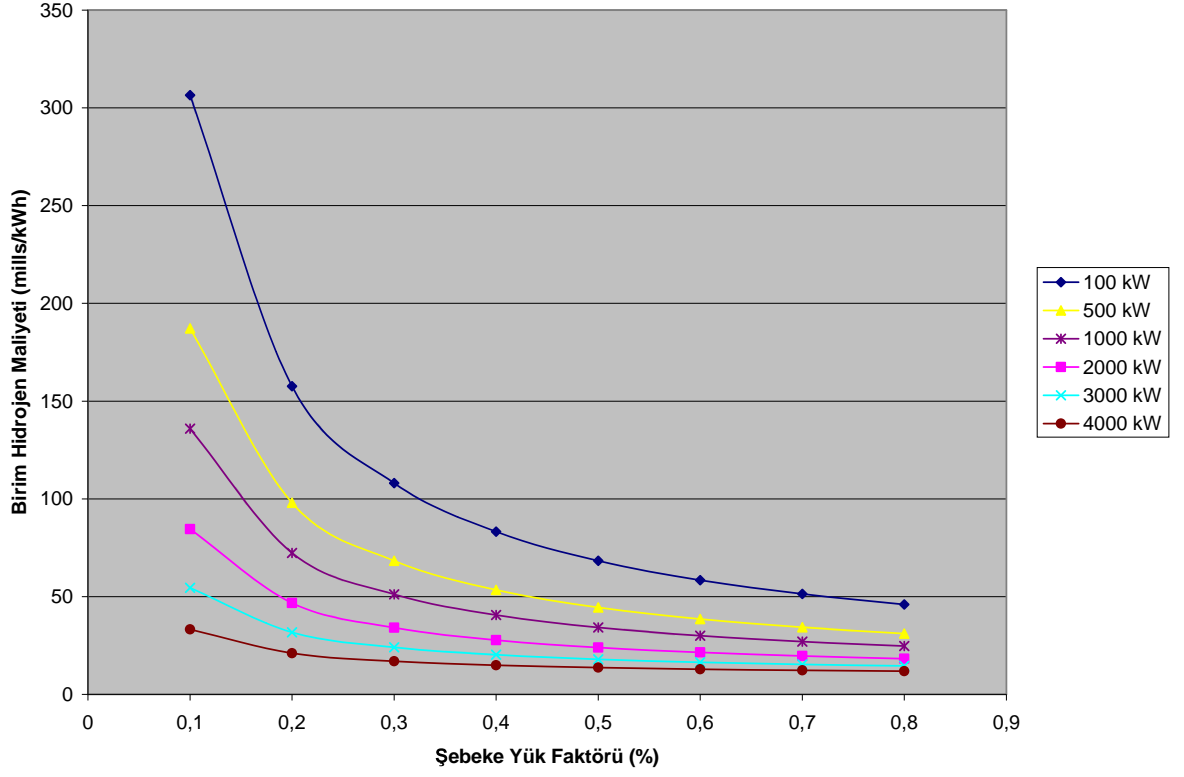
Şekil 6.7’de görüldüğü gibi elektrik enerji maliyeti arttıkça hidrojen maliyeti de lineer olarak artmaktadır. Aslında elektrik enerjisinin maliyetinin etkisini daha iyi görebilmek için Şekil 6.8’i incelemiz daha yerinde olabilir.



Şekil 6.8 – Hidrojen üretimi maliyet oranları

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi hidrojen üretim maliyetine en büyük oranda etki eden elektrik enerji maliyetidir. Elektrik üretim maliyeti ne kadar düşerse düşün maliyet içindeki oranı diğer maliyet oranlarına göre yine de yüksek kalmaktadır. Bunun en büyük nedeni elektrik enerjisini fosil yakıttan değil de yenilenebilir enerji kaynağından yani rüzgar enerjisinden sağlanmış olmasıdır. Türbinin %30 şebeke faktöründe çalıştığını düşünürsek enerji maliyetinin diğer maliyet oranına göre yüksek olması düşündürücüdür çünkü pratikte çok zor olan %80 gibi şebeke yük faktörlerinde dahi enerji maliyeti ancak yeterli bir seviyeye düşmüştür.

Şekil 6.9’da ise değişik güçlerdeki rüzgar santrallerindeki şebeke yük faktörüne göre hidrojen birim maliyetlerinin değişimi gözlenmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, düşük güçlü rüzgar santrallerinde (500 kW ve altı) ekonomik açıdan 0,30 ve daha yüksek yük faktörlerinde çalıştırmak uygundur.



Şekil 6.9 – Değişik Güçlerdeki Rüzgar Santrallerindeki Hidrojen Maliyeti

7 SONUÇLAR

Dünya ülkelerinin hedefi gelecekte enerji ihtiyacını karşılamada kendi kendine yetebilmektir. Fosil yakıtların sınırlı olduğu düşünülürse yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılması en uygun yöntemlerden biridir.

Bu çalışmada rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi, elektroliz sisteminde kullanılarak hidrojen elde edilmiş ve bu hidrojenin maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Bunun için de ülkemizde İzmir-Çeşme-Germiyan Köyü'nde yer alan Demirer A.Ş.'ye ait olan rüzgar enerji santrali verileri ile çalışılmıştır. Bu santral 500 kW gücünde 3 üniteden oluşmaktadır. Bu santralin yıllık enerji eğrilerine göre üretebileceği elektrik enerjisi, dolayısıyla üretilen hidrojen miktarları hesaplanmıştır. Bir yılda 1. türbin 21582 kg, 2. türbin 21772,1 kg 3.türbin 22178,4 kg hidrojen üretebilmektedir. Bu santralin yıllık ortalama yük faktörü yaklaşık olarak 0,30 mertebesinde dir. Bu değere göre hesaplanan hidrojen maliyeti 4,097 \$/kg ya da başka bir deyişle 68,01 mills/kWh'dir.

Yük faktörlerinin değişimine göre, rüzgar enerji santralinden üretilen elektrik maliyetleri hesaplanmış ve grafikler halinde sunulmuştur. Yük faktörü arttıkça üretilen elektrik enerjisi de artacağından birim elektrik enerjisi maliyetinin azalacağı aşıkardır. Buna göre de hidrojen maliyeti yük faktörü 0,20 iken 97,60 mills/kWh'dan 0.80 yük faktöründe 31,02 mills/kWh'a azalmış durumdadır. Dolayısıyla yüksek yük faktörlerinde çalıştırmak ekonomik açıdan her zaman daha uygun olmaktadır.

Birim elektrik fiyatlarına göre hidrojen maliyetlerine baktığımızda da elektrik enerji maliyeti arttıkça elde edilebilecek hidrojen maliyeti de artacaktır. Bu değerler de grafikler halinde çalışmada verilmiştir.

Tüm uygulama alanlarında maksimum enerji ihtiyacına cevap verecek önceki enerji kaynaklarının ve çeşitli kirletici etkilerin doğaya verdiği kalıcı zararları yok etmeye yardımcı olabilecek ideal bir enerji kaynağı olarak kabul edilen hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynağı adaylarından biridir. Bu enerji sudan elde edilebilmekte ve yüksek verimlilikle çevre üzerinde hiçbir olumsuz etki yaratmadan yararlı bir enerjiye dönüştürülebilmektedir. Dünyanın enerji sorununu çözmek için kullanılacak hidrojen enerjisi ile çok uzun yıllar yetecek enerji devamlı olarak üretilen olacaktır.

Türkiye'de son yıllarda gittikçe artan enerji darboğazı karşısında, ülkemiz alternatif enerji sistemlerinin uygulanması ve bu soruna gelecek için umut verici bir çözüm niteliği taşıyan hidrojen enerjisi gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak hidrojen enerjisi her ne kadar şu an yüksek maliyetler gerektiren bir enerji formu gibi gözükse de diğer enerji formlarına göre sahip olduğu avantajları göz önüne alındığında üzerinde yoğun çalışmalar yapılarak en kısa zamanda özellikle doğa ve canlılar düşünülerek tüm uygulama alanlarında ekonomik şartlarda kullanıma geçilmesi gereken enerjidir.

KAYNAKLAR

- Akkuş, E., (2001), “Hidrojen”, <http://www.webkimya.com.hid.htm> (05.02.2004).
- Altan, M., Yörükoğulları, E., (1997), “Hidrojen Zeolit Sisteminin Enerji Teknolojisindeki Önemi”, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Türkiye 7. Enerji Kongresi.
- AREB-TŞ, (1999), “Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi Haberler Bülteni”, Sayı 2, Temmuz 1999.
- Avcı, E., (1999), “Hidrojen Eldesi, Kullanımı ve Uygulama Alanları”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Proje 2.
- Battista, H.D., (2005), “Power conditioning for a wind–hydrogen energy system”, Journal of Power Sources, 2005.
- Aybers, N., Şahin, B., (1995), “Enerji Maliyeti”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını No:299
- Bellarmino, G.T., Urguhart, J., (1996), “Wind Energy For The 1990’s and Beyond”, Energy Conversion & Management 37.
- Brinkman, G., (2003) “Economics and Environmental Effects of Hydrogen Production Methods”
- Dursun, B., Ertürk, E., ve Gökçöl, C., (2006), “Rüzgar-Hidrojen Kombine Sistemlerinin Türkiye’de Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi”, III. Ulusal Hidrojen Kongresi 2006.
- Dutton, A.G., (2000), “Experience in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems”, International Journal of Hydrogen Energy 25, 705-722, 2000.
- ED, (1999), “Enerji Dünyası” sayı:25, Ağustos 1999.
- E.İ.E., (2002), “Rüzgar Enerjisi”, Elektrik İşleri Etüd İdaresi, Ankara.
- FT, Financial Times Gazetesi, (1999), Companies&Markets eki, 25 June 1999.
- Golding, E.W., (1955), “The Generation of Electricity by Wind Power”, E. & F.N. Spon Limited London.
- Gül, İ.Ç., (2002), “Küçük Hidroelektrik Santraller Yardımıyla Deniz Suyundan Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Eldesi, Elde Edilen Hidrojenin Depolanması ve İletimi ile İlgili Maliyet Analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2002.
- Gündüz, A., (1997), “Marmara Bölgesi Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi” Lisans Tezi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Günerhan, H., “Çevre ve Yeni Enerji Kaynakları”, Tesisat Mühendisleri Derneği, Teknik Bülten, Sayı:29, Ocak 1998, Ankara, 29:19-20.

- Hoffman, K.C., (1973), "Economics of Hydrogen Energy Systems", Brookhaven National Laboratory Upton, New York.
- Johnson, G.L., (2001), "Wind Energy Systems" Section 8: Economics of Wind Systems 1-25
- Liu, E., (2003), "Large Scale Wind Hydrogen Systems", GE Global Research.
- Michaud, M., (2005), "Market Oppurtunities For a Distributed Base Load Wind/Hydrogen Power Plan".
- Mays, I., (1999), "Status of Wind Energy World Wide and Prospects in Europe".
- Mendilcioğlu, M, (1999), "Enerji Sektöründe Rüzgar Enerjisi Uygulamalarının Gelişimi ve Geleceği", T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Pottier, J. ve Bailleux, C., (1986), "Hydrogen: A Gas of The Past, Present and Future 'A Drama In 3 Acts' ", Hydrogen Energy Progress VI: 197-216.
- Redman, M.J., (1992), "Wind Energy Costs", Master's Project, San Diego University.
- Sarıkayalar, O., (1998), "Rüzgar Enerjisi ve Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli", Yüksek Lisans Tezi, Haziran 1998, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Şahin A.D., (2004), "Progress and Recent Trends in Wind Energy", Progress in Energy and Combustion Science 30, 501-543
- Şen, Z., (1999), "Terrain Topography Classification For Wind Energy Generation", Renewable Energy 16, Pregamon.
- Şen, Z., Şahin, A.D., (1997), "Regional Assesment of Wind Power in Western Turkey By The Cumulative Semiveriogram Method", Renewable Energy 12, No:12.
- Tuncer, K.K., (1999), "Rüzgar Enerjisi Teknolojileri ve Kullanımının Dünyada ve Ülkemizdeki Gelişimi", M.A.M.
- Uyar, Dr., T.S. (1998), "Türkiye'de ve Dünya'da Rüzgar Enerjisi Kullanımındaki Gelişmeler", Elektrik Dergisi.
- Walker J.F., Jenkins, N., (1997), "Wind Energy Technology", John Wiley & Sons. Inc.
- Veziroğlu, T.N., (2006), "III. Ulusal Hidrojen Kongresi 2006 Konuşması".
- Vosburgh, N.P., (1983), "Commercial Applications of Wind Power", Van Nostrand Reinhold Company, USA.
- Yavaş, U., (2006), "Alternatif Hidrojen Üretim Yöntemleri ve Türkiye Şartlarına Uygun Çözümler", III. Ulusal Hidrojen Kongresi 2006.
- Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N., ve Kekezoğlu, B., "Maximum Power Generation Using Wind Power Plants", The Second International Green Energy Conference, Canada, 2006

Yumurtaci, Z., ve Bilgen, E., (2004), "Hydrogen Production From Excess Power in Small Hydroelectric Installations", International Journal of Hydrogen Energy 29, 687-693, 2004.

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] "Hidrojen Gazı"
<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/hidgazi.html> (15.01.2001)
- [2] www.elsevier.com/locate/ijhydene (19.12.2001)
- [3] www.eie.gov.tr
- [4] www.awea.org
- [5] www.retscreen.net

ÖZGEÇMİŞ

| | | |
|--------------------|------------|--|
| Doğum tarihi | 23.07.1981 | |
| Doğum yeri | İzmir | |
| Lise | 1992-1999 | Edirne Anadolu Lisesi |
| Lisans | 2000-2004 | Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü |
| Yüksek Lisans | 2004-2006 | Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı |
| Çalıştığı Kurumlar | | |
| | 2004-2005 | Çağ-Tes Mühendislik |
| | 2005- | Prosan Arıtma ve Klima Ekipmanları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. |