

RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNDEN KAYNAKLANAN GÜRÜLTÜNÜN İNCELENMESİ

Ferit FİÇİCİ, Bahtiyar DURSUN, Cihan GÖKÇÖL

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze/KOCAELİ

ÖZET

Günümüz dünyasında fosil kökenli yakıtların artık azalmaya yüz tutması tüm gelişmiş ülkeleri alternatif enerji kaynakları arayışlarına sürüklemiştir. Birçok ülke enerji gereksinimini karşılayabilmek için alternatif enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisini değerlendirme yoluna gitmişlerdir. Rüzgâr enerjisi temiz olması, doğada bol bulunması gibi birçok avantajının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinden elektrik üretmeyi sağlayan rüzgâr türbinlerinin neden olduğu gürültü incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Türbini, Aerodinamik Gürültü, Mekanik Gürültü

INVESTIGATION OF THE NOISE CAUSED BY WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS

ABSTRACT

Because of the fast decrease in the existence of fossil energy sources (oil, natural gas etc.), all developed countries (including some developing countries) are forced to search for renewable energy sources which could be alternative to conventional ones. Many countries decided evaluating wind energy from renewable energy sources to meet energy requirement. Wind energy has many advantages such as it is friendly to environment and is existing in nature abundantly. However, it has some disadvantages, too. In this study, noise caused by wind turbine producing electricity from the kinetic energy inside wind energy, will be examined.

Keywords: Wind Turbine, Aerodynamic Noise, Mechanical Noise

I.GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışının doğal bir sonucu olarak ülkelerde büyümektedir. Şehirleşme ve sanayileşme beraberinde enerji ihtiyacını da arttırmaktadır.

Fosil kökenli yakıtların sona doğru yaklaşmasından dolayı ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması için gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler alternatif enerji kaynaklarına yönelim göstermektedirler. Alternatif enerji kaynaklarından rüzgâr; doğada bolca bulunması, bedava olması ve kolaylıkla istenilen enerji türlerine dönüştürülebilmesi sebeplerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde rüzgâr türbinlerinden

faydalanılmaktadır. Rüzgâr enerjisi çevre dostu bir enerji kaynağı gibi bir çok avantajı olmasına rağmen, enerji üretiminde kullanılan rüzgâr türbinlerinin gelişen teknoloji ile en aza indirgenebilen bazı olumsuz etkileri vardır.

Bu çalışmada, rüzgârın olumsuzluklarından biri olan gürültü etkisi üzerinde durulacaktır. Ayrıca, gürültünün neden olan faktörler ve gürültünün kontrolü değerlendirilecektir. İnsanlar üzerinde olumsuz etkilere yol açan gürültüyü tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Ancak gürültü kaynağı tespit edilip en aza indirmek mümkündür.

II. TÜRKİYE'DEKİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNİN DURUMU

Türkiye'nin toplam karasal alandaki yıllık rüzgar enerjisi doğal potansiyeli 400 milyar kWh ve teknik potansiyeli de 110 milyar kWh olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında, Türkiye toplam yıllık deniz üstü rüzgar enerjisi teknik potansiyeli de, 180 milyar kWh olarak tahmin edilmektedir[2]. Buradan hareketle Türkiye'nin dalga enerjisini de içeren toplam yıllık teknik rüzgar enerjisi potansiyeli yaklaşık olarak 308 milyar kWh olmaktadır. Türkiye'nin gerek duyduğu enerjinin tümü güneşten elde edilebilir. Güneş yeryüzüne her saat 10^{14} kWh'lık enerji

yayar. Diğer bir deyişle, yeryüzü güneşten 10^{17} Wh gücünde enerji alır[3]. Yurdumuzda ise yıllık güneş enerjisi yoğunluğu, bir saat için $0,149 \text{ kWh/m}^2$ olarak verilmektedir. Güneş enerjisinin yaklaşık %2'lik kısmının rüzgar enerjisine dönüştüğü bilinmektedir[4]. Bazı literatürde bu değer %1'dir[5,6]. Bu enerjinin de Betz Kriteri uyarınca teorik olarak en çok %59'luk, kanatlarda, jeneratörde ve dişli kutusundaki gibi kayıplar dikkate alındığında ise uygulama da ancak %40'lık kısmı elektrik enerjisine çevrilmektedir. Diğer yandan ülkemizin ancak %2'lik bölümünde genel anlamda rüzgar enerjisinden elektrik üretmek mümkündür[7].

Tablo 1. Ülkemizdeki Elektrik Enerjisi Tüketim Dağılımı

Ülkemizde Elektrik Enerjisi Tüketim Dağılımı								
Yıllar	Toplam (GWH)	Ev (%)	Ticari (%)	Kamu (%)	Sokak (%)	Endüstri (%)	Diğer (%)	Kayıp (%)
1990	56,812	15,9	4,5	2,6	2,2	51,4	5,8	17,6
1991	60,499	17,9	5,0	3,1	2,3	47,1	6,0	18,5
1992	67,217	17,1	4,9	3,0	2,8	46,9	5,7	18,5
1993	73,351	17,1	4,9	3,1	3,1	46,7	5,8	18,5
1994	77,783	17,3	4,8	4,3	3,2	43,9	5,5	21,1
1995	85,645	16,9	4,9	3,5	3,6	44,4	5,3	21,3
1996	94,789	17,3	6,1	3,2	3,1	42,9	5,7	21,8
1997	105,517	17,2	5,7	3,4	2,8	41,8	5,7	23,3
1998	114,100	18,2	5,8	3,6	2,6	41,9	6,2	21,3
1999	121,400	18,3	5,8	3,6	2,5	42,0	6,3	20,6

*Enerji tüketimi her yıl % 10 artış göstermektedir.

Türkiye yüzölçümünün $780,576 \text{ km}^2$ olduğu kara alanlarda rüzgar enerjisi yıllık teknik potansiyeli güneş enerjisinin yaklaşık %2'lik kısmının rüzgar enerjisine dönüştüğü varsayımıyla;

$E_{\text{Türkiye}} = 0,149 \cdot 7,8 \cdot 10^{11} \cdot 8760 \cdot 0,4 \cdot (0,02)^2 = 163 \cdot 10^9 \text{ kWh/yıl}$
olarak bulunur[8].

Elde edilen bu değerde, tablo-1'de 1999 yılına ait elektrik enerjisi tüketim değerinin sadece rüzgar enerjisi ile rahatlıkla karşılanabileceğini göstermektedir. Tablo -1 de Türkiye'nin 1990-1999 yılları arasındaki elektrik enerjisi tüketim değerleri verilmiştir [9].

III. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Türkiye'de rüzgar enerji sistemleriyle ilgili ilk çalışmalar 1998'de İzmir-Çeşme ve İzmir-Çeşme-Alaçatı bölgelerinde gerçekleştirilmiştir.

III.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Tarih boyunca çeşitli gelişmeler kaydeden rüzgar türbinleri temelde iki tipe sahiptir:

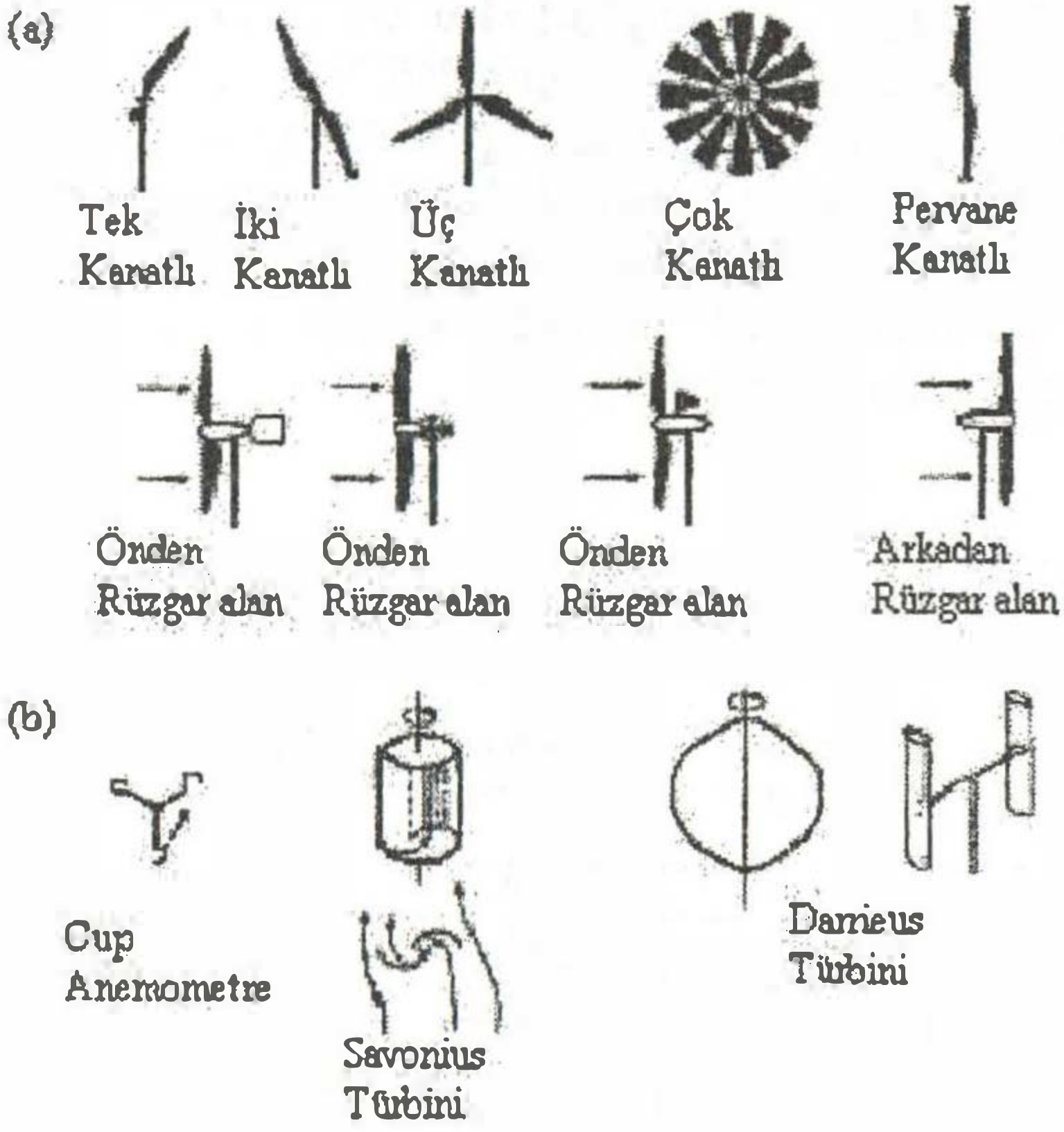
a) Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri(YERT):

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde dönme eksenini rüzgar yönüne paralel ve kanatlar yönüne diktir. Ticari amaçlı kullanımlarda tercih edilmektedir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri, rüzgarı önden(up-wind) ve arkadan(down-wind) almasına göre iki çeşittir. Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinleri kullanım alanı yoktur. Şekil -1(a)'da yatay eksenli rüzgar türbinleri görülmektedir[10]

b) Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri(DERT):

Dikey eksenli rüzgar türbinleri küçük güçlü rüzgar türbinleridir(Şekil-1.b). Herhangi bir yönden esen rüzgarı alabilmelerinden dolayı avantajlı konumdadırlar. Başlangıç momentleri yüksek, fakat verimleri düşüktür. Daha çok düşük güç gereksinimi olan yerlerde tercih edilir.

Başlıca kullanım alanları sulama, tarım ve pompalama sistemleridir. Özellikle, Avrupa'da bazı ülkelerde orman gözetleme kulelerinde elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanımı oldukça yaygındır[10].



Şekil 1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması: (a) Yatay Eksenli (b) Dikey Eksenli

III.2. Rüzgar Türbini Bileşenleri

1. Motor Oturma Yeri: Rüzgar türbini dişli kutusu ve generatör dahil bütün ana parçaları içermektedir. Servis elemanı motor oturma yerine türbin kulesi içerisinden rahatlıkla ulaşabilir. Motor oturma yerinin solunda rüzgar türbin rotoru, rotor kanatları ve göbek bulunur.

2. Kanatlar: Rüzgarı yakalar ve onun gücünü rotor göbeğine aktarır. 600 kW'lık modern bir rüzgar türbininde her bir rotor kanadı 20m (66ft) uzunluğundadır ve bir uçak kanadını andırmaktadır.

3. Rotor Göbeği: Rüzgar türbininin düşük hız mili ile bağlantılıdır.

4. Düşük Hız Mili: Rotor göbeğini dişli kutusuna bağlar. 600 kW'lık modern bir rüzgar türbin rotoru 19-30devir/dakika kadar nispeten yavaş döner. Mil, aerodinamik frenleri harekete geçiren hidrolik sistemleri birbirine bağlar.

5. Dişli Kutusu: Sol tarafında düşük hız mili vardır. Düşük hız milinden yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönen yüksek hız mili sağ tarafında yer alır.

6. Yüksek Hız Mili: Yaklaşık 1.500 devir/dak. ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırır. Acil bir mekanik disk freni beraberinde bulunur. Aerodinamik frenler arızalandığında veya türbin çalışırken mekanik fren devreye girer.

7. Alternatör: Alternatör olarak genellikle bir rüzgar türbininde indüksiyon jeneratörü veya asenkron jeneratör kullanılmaktadır.

8. Elektronik Kontrol Ünitesi: Elektronik kontrol ünitesi, rüzgar türbininin mevcut durumunu sürekli takip eden ve sapma mekanizmasını kontrol etmekte olan bilgisayar destekli bir kontrol ünitesi bulundurmaktadır. Herhangi bir sorun (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü kontrol ünitesine çevrimiçi bağlantı ile çağrı mesajı gönderir.

9. Hidrolik Sistem: Türbin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır.

10. Soğutma Sistemi: Elektrik jeneratörünü soğutur. Ayrıca dişli kutusunun yağını soğutan bir yağ soğutma birimini de bulundurmaktadır. Bazı türbinler su-soğutmalı jeneratörlere sahiptir.

11. Kule: Rüzgar türbininin kulesi, motor oturma yeri ve rotoru üzerinde taşır. Genellikle kulenin yüksek olması bir avantajdır. Çünkü rüzgar hızları yerden yükseldikçe artar. Tipik olarak 600 kW'lık modern bir rüzgar türbininin kulesi 50-60m yüksekliktedir. Kuleler ya tüp ya da kafes biçimindedir. Tüp biçimli kuleler çalışanlar için daha avantajlıdır. Çünkü gerektiğinde bir merdivenle içeriden türbinin motor oturma kısmına çıkmak daha kolaydır. Kafes kulelerin avantajı esas olarak ucuz oluşlarıdır.

12. Sapma Mekanizması: Sapma mekanizması, rüzgar yön belirtecini kullanarak rüzgar yönünü belirleyen elektronik kontrol ünitesi tarafından devreye sokulur. Rüzgar yönü değiştiği zaman, o anda sapma mekanizması birkaç derece açılmalı yer değiştirecektir. Motor oturma yeri ile rotoru rüzgar yönüne doğru döndürmek için elektrik motorları kullanılır.

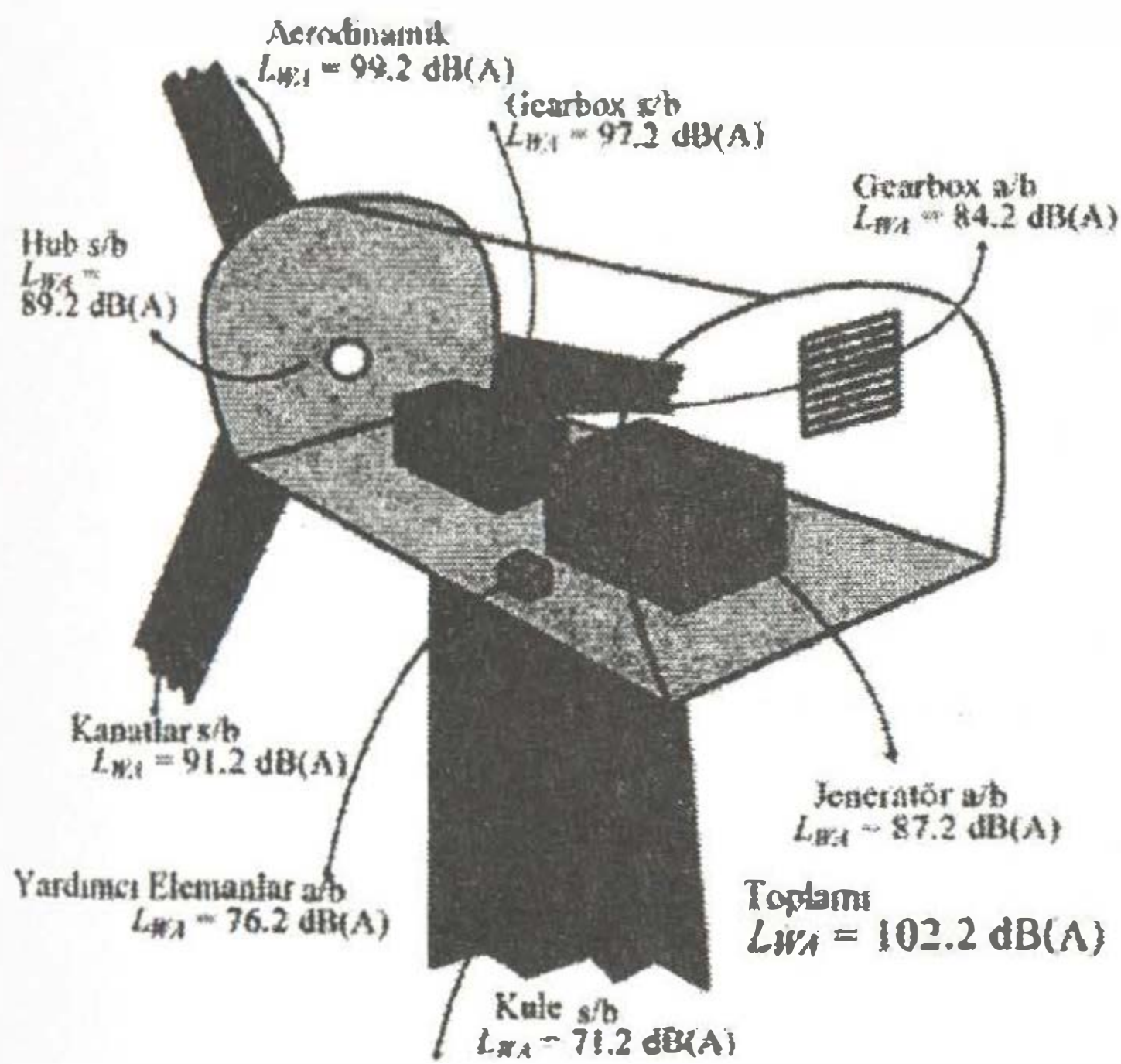
13. Anemometre ve Rüzgar Yön Belirteci: Rüzgar hızını ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Rüzgar hızı 5 m/s' ye eriştiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgar türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgar hızı 25m/s' yi aşarsa bilgisayar destekli kontrol ünitesi, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgar türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgar yön belirtecinden gelen sinyaller, rüzgar türbini elektronik kontrol ünitesi tarafından alınarak, sapma mekanizması yardımıyla rüzgara karşı türbini döndürmek için kullanılır[11].

IV.RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNDEN KAYNAKLANAN GÜRÜLTÜ

Gürültü: Fizik tanıma göre gürültü, aralarında herhangi bir uyum olmayan pek çok frekanstan oluşan sese verilen addır. Bir başka anlatımla, gürültü tek bir nota ile taklit edilemeyen sestir. Örneğin trafik, rüzgar, yağmur, pazar yeri, lokanta, gürültüleri gibi. Bu terim, yapı akustiğinde istenmeyen ses olarak ta tanımlanır.

Gelişigüzel bir yapısı olan bir ses spektrumudur[1]. Ses bir kaynaktaki (ses telleri, hoparlör membranı gibi) titreşimlerle oluşur ve yayılmak için bir ortama(hava, su gibi) ihtiyaç duyar. Bu ortamdaki titreşimler de kulağımızda ses olarak algılanır. Sesin birimi desibeldir ve bir sesin gürültü olarak algılanması için o sesin desibel miktarına bağlıdır. Gürültü seviyesindeki sesin insanın fizyolojik ve psikolojik özelliklerine etkisi vardır[12]. Rüzgar türbinlerinde gürültü temelde mekanik bileşenlerden kaynaklanan gürültüdür. Mekanik gürültü mekanik bileşenlerin çalışması sırasında parçaların birbirlerine temas etmesi ve diğer mekanik hareketler neticesi ile oluşmaktadır. Mekanik gürültünün ortaya çıktığı ana bileşenler şunlardır:

- Dişli kutusu
- Jeneratör
- Sapma sürücüleri
- Soğutucu fanlar
- Yardımcı ekipmanlar(ör.hidrolikler)
-



Şekil-2 Rüzgar türbin bileşenlerinin gürültü seviyeleri

çığa çıkan gürültü, mekanik ve elektrikselsel parçaların dönme hareketi ile ilgili olduğu için bu gürültü, geniş bir frekans aralığında yayılı bir bileşen olmasına rağmen karakter olarak tonal olma eğilimi içerisindedir. Örneğin, millerden, jeneratörün dönme frekansından ve dişli kutusunun

yüzey frekansından açığa rahatsız etmeyecek seviye tonlar ortaya çıkabilir. Gürültünün iletim yolu hava-kaynaklı(a/b, airborne) veya yapısal-kaynaklı(s/b, structural-borne) olabilir. Hava kaynaklı gürültüde gürültü doğrudan bileşen yüzeyinden yada içinden havaya doğru akar. Yapısal kaynaklı gürültüde ise gürültü hava içinde yayılmadan önce yapısal bileşenler boyunca iletilir. Şekil-2'de 2MW'lık bir rüzgar türbini için rüzgarı arkadan alma pozisyonunda(115m) belirlenen her bir bileşen için ses güç seviyeleri ve iletim yolu tipleri görülmektedir[13,14]. Mekaniksel gürültünün ana kaynağı dişli kutusudur. Gürültü nacelle yüzeyleri ve makine muhafazasından yayılım gösterir.

Aerodinamik gürültü çeşitleri aşağıda belirtilmektedir.

- Düşük frekans gürültüsü,
- İç akış türbülans gürültüsü,
- Kanat profil gürültüsü.

■ Düşük frekans gürültüsü

Bu gürültüye kule yada rüzgar kaymasından dolayı kanatlar tarafından tecrübe edilen rüzgar hızlarındaki değişimler neden olmaktadır. Bu etki daha çok rüzgarı arkadan alan türbinlerde yer almasına rağmen rüzgarı önden alan türbinler içinde önem arz etmektedir. Bir sesin frekans yapısını gösteren grafiğe, gürültü (*ya da ses*) spektrumu denir. Bu grafikte genellikle x ekseninde (*yatay eksen*) Hz cinsinden frekanslar ve y ekseninde (*düşey eksen*) dB cinsinden ses basınç düzeyi gösterilir. Müzik seslerinin spektrumu, x eksenine dik doğrulardan, gürültü spektrumları ise sürekli eğrilerden oluşur. Bir gürültünün spektrumuna bakıldığında o gürültü içinde güçlü frekans bölgelerinin, ya da gürültüye karışmış müzik seslerinin, yani bazı baskın frekansların olup olmadığı anlaşılır. Zaman içinde değişen gürültülerin, spektrumu da değişeceğinden, bu tür gürültüler iki eksenli tek bir grafikte gösterilemeyeceği için, zaman boyutunu da içeren üç eksenli grafiklerle gösterilir[1]. Gürültü spektrumu Gürültü spektrumu, kanat geçiş frekansı ve onun harmonikleri tarafından şekillendirilir. Bu spektrum tablo-2'de görülmektedir.

Tablo 2. Kanat Geçiş Frekansı Harmonikleri ve Gürültü Spektrumu

Oktav Bant Merkez Frekansı	Bağıl dB
16	-56,7
31,5	-39,4
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	1,2
4000	1,0
8000	-1,1
16000	-6,6

■ İç Akış Türbülans gürültüsü

Atmosferik türbülansın neden olduğu girdaplarla kanatlar etkileşirken, iç akış türbülansı geniş bant aralığında gürültü oluşturur. İç akış türbülansı, gözlemci tarafından hisyrtı gürültüsü olarak algılanan 1000Hz'e kadar frekanslar üretir.

İç akış türbülansının; kanat hızı, kanat profili ve türbülans yoğunluğundan etkilendiği düşünülür[15].

■ Kanat profil gürültüsü

Bu gürültü, kararlı ve türbülanssız akışta kanadın kendisi tarafından üretilir. Kanat yüzeyindeki kusurlar tonal bileşenler üretebilir olmasına rağmen bu gürültü tipik olarak geniş bant aralığındadır. Bu gürültünün türleri;

i. Firar kenarında oluşan gürültü:

Rüzgârın kanadı terk ettiği kenara firar kenarı denir. Firar kenarında oluşan bu gürültü 750-2000Hz frekans aralığında geniş bant hisyrtı sesi şeklinde algılanır ve türbülanslı sınır tabakasının kanat firar kenarı ile etkileşiminden oluşur. Firar kenarı gürültüsü, rüzgâr türbini üzerinde etkin olan çok yüksek frekanslı gürültülerin ana kaynağıdır.

ii. Durma Etkisi: Kanat durması, geniş bant ses yayılımını arttıran kanat profili civarında, kararsız bir akışa neden olur.

iii. Keskin olmayan firar kenarı gürültüsü: Keskin olmayan firar kenarı, girdap dağılımı ve tonal gürültüyü artırıcı bir etkiye sahiptir. Bu durum firar kenarını keskinleştirmek suretiyle ortadan kaldırılabılır[15].

iv. Yüzey Kusurları: Dikim sırasında ya da yıldırım çarpmasından dolayı ortaya çıkan hasarların neden olduğu yüzey kusurları tonal gürültünün ana kaynağı olabilmektedir[15].

Aerodinamik gürültüyü azaltmak için en bilinen yaklaşım rotorun dönme hızını düşürmektir. Fakat bu durum enerji kayıplarına neden olmaktadır. Rüzgâr hızının düşük olduğu durumlarda gürültüyü azaltma yeteneği değişken hızlı veya çift hızlı rüzgâr türbinlerinin önemli bir özelliğidir[15].

IV.1 Rüzgâr Türbinlerinde Gürültü Tahmini

Rüzgâr türbinlerinin normal çalışma şartlarında ortaya çıkan gürültünün tahmini, çevresel gürültü değerlendirmesinin önemli bir kısmını oluşturur. Gürültü tahmini basit rüzgâr türbinlerinde gürültü tahmini ve

modern rüzgâr türbinlerinde gürültü tahmini olmak üzere iki kategoride incelenmektedir.

IV.1.1 Basit Rüzgâr Türbinlerinde Gürültü Tahmini

Araştırmacılar tek bir rüzgâr türbini gürültüsünün tahmini için analitik modeller ve bilgisayar kodları geliştirmişlerdir. Genel olarak bu modeller üç sınıfa ayrılabilir [13,14] :

- **Sınıf 1:** Bu model sınıfı temel rüzgâr türbini parametrelerinin(rotor çapı, güç ve rüzgâr hızı) bir fonksiyonu olarak genel ses güç seviyesine yönelik basit tahminler sunar.
- **Sınıf 2:** Bu sınıf daha önce tanımlanmış olan gürültü mekanizmalarının üç türünü ele alır ve son teknoloji türbinlerinde kullanılabilir.
- **Sınıf 3:** Bu modeller, gürültü üreten mekanizmaları tanımlayan iyileştirilmiş modelleri ele alır ve iyileştirilmiş modelleri rotor geometrisi ve aerodinamik ile ilişkilendirir.

Sınıf 2 ve Sınıf 3 gürültü tahmin modelleri için tipik girdiler tablo-3'de belirtilmiştir. Sınıf-1 modeller için ses güç seviyesini tahmin etmekte kullanılan deneysel yolla elde edilmiş denklemler vardır. Ses güç seviyesinin tahmin edilmesinde kullanılan üç adet sınıf-1 modeli örneği denklem (4.1), (4.2) ve (4.3) denklemlerinde özetlenmiştir[20].

$$L_{wa} = 10(\log_{10} P_{wt}) + 50 \quad (4.1)$$

$$L_{wa} = 22(\log_{10} D) + 72 \quad (4.2)$$

$$L_{wa} = 10(\log_{10} V_{tip}^5) + 10(\log_{10} D) - 4 \quad (4.3)$$

Burada;

L_{wa} :Yaygın bağıl ses güç seviye değeri,

V_{tip} :Rotor kanat uç hızı(m/s),

D :Rotor çapı (m),

P_{WT} :Rüzgâr türbininin nominal gücü (W).

İlk iki denklem bir rüzgâr türbininin gürültü seviyesini tahmin etmek için kullanılan en basit yöntemleri temsil etmektedir. Son denklem, aerodinamik gürültünün uç hızının beşinci kuvvetine bağlı olduğunu gösteren pratik bir kuraldır.

Tablo 3. Sınıf 2 ve Sınıf 3 Gürültü Tahmin Modelleri İçin Tipik Girdiler

Grup	Parametreler	Sınıf 2	Sınıf 3
Türbin Konfigürasyonu	Göbek (Hub) Yüksekliği Kulenin Tipi (Rüzgar Arkadan alan(downwind) veya Önden alan(upwind))	X	X
Kanatlar ve Rotor	Kanat Sayısı Veter Dağılımı Fırar kenarı Kalınlığı Yarıçap Profil Şekli Kanat Uç Şekli	X (X) (X) X (X) (X)	X X X X X X
Atmosfer	Türbülans Yoğunluğu Zemin Yüzey Pürüzlülüğü Türbülans yoğunluk Aralığı Atmosferik Kararlılık Şartları	X X	X X X X
Türbin Çalışması	Dönme Hızı Rüzgar hızı, alternatif olarak oranlanmış güç, oranlanmış rüzgar hızı, Rüzgar kesme hızı Rüzgar Yönü	X X	X X X

IV.1.2 Modern Rüzgar Türbinlerinde Gürültü Tahmini

Sezgisel olarak bir kişi belli bir yerdeki rüzgar türbinlerinin sayısını iki kat artırmanın ses enerji çıkışını ikiye katlayacağını bekleyebilir. Desibel ölçeği logaritmik olduğu için iki ses basınç seviyesinin toplamı için kullanılan bağıntı

$$L_{\text{Toplam}} = 10 \log_{10} (10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}) \quad (4.4) \text{ ile}$$

ifade edilir.

Bu denklem iki önemli çıkarımda bulunmamızı sağlar:

- Eşdeğer ses basınç seviyelerinin toplamı gürültü seviyesini 3dB kadar artırır.
- $|L_1 - L_2|$ değerinin mutlak değeri 15dB'den büyük ise, daha düşük seviyelerin toplamının ihmal edilebilir etkisi vardır.

Bu bağıntı N sayıda gürültü kaynakları için genel bir hale sokulabilir[14].

$$L_{\text{Toplam}} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (4.5)$$

IV.2 Rüzgar Türbinlerinden Gürültü Yayılımı

Belli bir güç seviyesindeki kaynaktan belli bir mesafede ses basınç seviyesini tahmin etmek için kişi öncelikle ses dalgalarının nasıl yayıldığını düşünmelidir. Tek bir rüzgar türbini için kişi ses basınç seviyesini küresel

yayılım varsayımına göre hesaplayabilir. Küresel yayılımda ses basınç seviyesi mesafenin karesi başına 6dB kadar azalmaktadır. Şayet kaynak tamamen düz ve yansıtıcı bir yüzey üzerinde ise bu durumda yarı küresel yayılım düşünülme zorundadır. Yarı küresel yayılım mesafenin karesi başına 3dB'lik azalmaya neden olur[13]. Ayrıca atmosferik çekim ve zemin etkisi de düşünülmalıdır.

Rüzgar türbini gürültüsü bazı özel durumları ortaya koymaktadır. İlki kaynağın yüksekliği genellikle standart gürültü kaynağından yüksek seviyede olmaktadır. Bu durum gürültü perdelemesini daha az önemli hale getirir. Ayrıca üretilen gürültü üzerinde rüzgar hızının güçlü bir etkisi vardır. Hakim olan rüzgar yönleri, rüzgar türbinlerinde rüzgarı önden yada arkadan alma pozisyonları arasındaki ses basınç seviyelerinde önemli farklara neden olabilmektedir. Tam bir gürültü yayılım modeli aşağıdaki faktörleri kapsamalıdır:

- Kaynak karakteristikleri(Yön, yükseklik v.s.)
- Kaynağın gözlemciye olan uzaklığı
- Hava çekimi
- Zemin etkisi (yerde ses yansımaları zemin özellikleri v.b)
- Karmaşık bir alanda yayılım
- Hava etkileri (Yükseklikle rüzgar hızı veya sıcaklığının değişmesi)

Yansıtıcı bir yüzey üzerinde yarı küresel yayılıma dayanan ve hava çekimini de içeren basit bir model aşağıdaki denklemde görülmektedir.

$$L_p = L_w - 10 \log_{10} (2\pi R^2) - \alpha R \quad (4.6)$$

Burada;

L_p : Ses basınç Seviyesi (dB)

R :Gürültü kaynağına olan uzaklık (m)

L_w :Güç seviyesi (dB)

α :Frekansa bağlı ses emme katsayısı •

Bu denklem, hem geniş bant ses güç seviyeleri hem de tahmini geniş bant ses yutma katsayıları ($\alpha = 0,005 \text{ dB(A)m}^{-1}$) ile kullanılabilir.

IV.3 Rüzgar Türbinleri İçin Gürültü Azaltma Yöntemleri

Rüzgar türbinlerinde mekanik gürültü azaltılmalıdır.

Mekanik gürültüyü azaltma;

- Dişli çark dişini özel bir şekilde yaparak,
- Düşük hız soğutma fanlarını kullanarak,
- Yer seviyesine değil de motor oturma yeri içine bileşenleri monte ederek,
- Motor oturma yerine ses yalıtımı ve susturucuları ilave ederek,

- v. Büyük bileşenler için titreşim yalıtıcıları ve özel yapıda vidalar kullanarak
- vi. Türbini tekrardan tasarlayarak gerçekleştirilebilir.

Örneğin, bir alanda düşük frekanslı gürültü bir problem oluşturuyorsa, izin verici merci sıkıntıya neden olan rüzgarı arkadan alan türbinlerin kurulumunu yasaklayabilir[16]. Eğer bir rüzgar türbini uygun tasarım prosedürlerine göre tasarlanmışsa, muhtemelen bu türbinde yeni, gürültü azaltıcı kanatlar kullanılmıştır ve mekanik gürültü emisyonları problem oluşturmayacaktır. Genellikle rüzgar türbini gürültüsünü azaltmaya çalışan tasarımcılar daha çok aerodinamik gürültüyü daha fazla azaltmak üzerine yoğunlaşmışlardır.

Aerodinamik gürültü üreten üç mekanizma rüzgar türbinleri için önemli olup, aşağıda belirtilmiştir.

- Fırar kenarı gürültüsü
- Hücüm kenarı gürültüsü
- İç akış türbülans gürültüsü

Modern rüzgar türbinlerinde gürültü, düşük uç hız oranları, daha düşük hücüm kanat açısı, rüzgarı önden alan tasarımlar ve son zamanlarda en çok başvurulan değiştirilmiş kanat fırar kenarı yapısı kullanılarak azaltılabilir.

IV.4 Gürültünün İnsanlar Üzerindeki Etkileri

Dünya sağlık örgütünün “İnsanın fiziksel, ruhsal ve sosyal yönden kendini iyi hissetme durumudur” biçiminde tanımladığı insan sağlığı için çeşitli yönlerden bir risk oluşturan çevre sorunlarından birisi de gürültü kirliliğidir. Uzun yıllar gürültünün yalnızca işitme sistemine ilişkin sorunlar yarattığı kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra, psikolojik etkilenme ve insan performansı üzerinde etkileri olduğu da anlaşılmıştır.

Ancak yapılan bilimsel çalışmalar, sağlık üzerindeki etkisi aşırı olan gürültünün, çeşitli fizyolojik etkileri ve bunların az veya çok kronik patolojik etkilere dönüşmesi üzerinde sürdürülmektedir. Gürültünün insan üzerindeki etkisinin; işitsel, fizyolojik, psikolojik ve performans yönünden ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir[17].

İletişim ve konsantrasyonu engelleme, dinleme ve algılama güçlüğü yaratma, uykuyu bozma ve genel sıkıntılar oluşturma gibi olumsuzluklara neden olmaktadır. Gürültü, duyma yeteneğinde geçici veya kalıcı fizyolojik bozulmalara neden olabilir. Geçici bozulmalar, zayıf sesleri algılayabilme yeteneğinin

birkaç saatten birkaç haftaya kadar değişebilen geçici bir süre için kaybolma şeklinde ortaya çıkar. Bu süre maruz kalınan süre ve gürültü düzeyine bağımlı olarak doğrusal bir biçimde artar. Duyma yeteneğindeki kalıcı bozulmalar ise sağırılık kadar varabilir[18].

Türkiye’deki oluşturduğu olumsuz etkilere bağlı olarak gürültü düzeyleri Tablo 4’de verilmiştir. Almanya Çevre İdaresi tarafından yapılan gürültü düzeylerine karşı olumsuz etkilerde Tablo 5’te görülmektedir.

Tablo 4. Oluşturduğu Olumsuz Etkilere Bağlı Olarak Gürültü Düzeyleri [18]

Sınıflandırma	Gürültü Düzeyi (dBA)	Gürültü Etkileri
1. Derece	30-65	Konforsuzluk, rahatsızlık, öfke, kırgınlık, uyku ve konsantrasyon bozukluğu
2. Derece	65-90	Fizyolojik tepkiler, kan basıncının artması, kalp atışı ve solunum hızlanması, beyin sıvısındaki basıncın azalması, ani refleksler
3. Derece	90-120	Fizyolojik tepkilerin artması, baş ağrıları
4. Derece	120-140	İç kulakta sürekli hasar ve dengenin bozulması
5. Derece	>140	Ciddi beyin tahribatı

Tablo 5. Almanya Çevre İdaresi Tarafından Yapılan Gürültü Düzeylerine Göre Etkileri [19]

Gürültü Kaynakları	Gürültü Düzeyi (dBA)	Gürültünün Etkileri
Jet Uçakları	120	Duyma Hasarları
Disko	110	
Araçlar	100	
Hızır ve Motosiklet	90	Duyma Hasarları
Aşırı Çalışan Otoban	80	
Ana Trafik Caddesi (gündüz)	70	Kan ve Kalp Dolaşımında Yükselme
Ana Trafik Caddesi (gece)	60	
10-kw küçük rüzgar türbini (yerleşime olan mesafe 100m)	55	
Sessiz Oturma Caddesi (gündüz)	50	Haberleşme Sorunu
300-kw rüzgar türbini (yerleşime olana mesafe 150m)	45	
Sessiz Oturma Caddesi (gece)	40	Oda İçerisinde Konsantrasyon Bozukluğu
Saat Tıkırtısı	30	Uyuma Zorluğu

IV.5 Rüzgar Gürültü Standartları

Uygun bir gürültü değerlendirme çalışması aşağıdaki üç önemli bilgiyi içermelidir:

- Mevcut ortama ilişkin geçmiş gürültü seviyeleri için bir araştırma
- Bölgede ve bölge civarında türbin(ler)in oluşturduğu gürültü seviyesinin ölçümü
- Türbin gürültü seviyeleri kabul edilebilirlik değerlendirmesi

Günümüzde, uluslararası gürültü standartları özellikle üstteki bilgilerin tümünü yapısında barındırma niteliğine sahip yönetmelikler mevcut değildir. Buna karşın birçok ülkede, gürültü yönetmelikleri, insanların maruz kaldığı gürültü için üst limitleri tanımlamaktadır. Bu limitler ülkeye göre belirlenerek gündüz ve gece farklılık göstermektedir. Tablo-6'da görüldüğü gibi Avrupa'da, sabit gürültü limitleri standarttır[20]. Amerika'da, resmi federal gürültü yönetmeliği olmamasına rağmen Amerikan Çevre Koruma Ajansı(EPA) gürültü yönergesi yayınlamıştır. Birçok eyalet kendi gürültü yönetmeliğine sahiptir ve birçok yerel hükümet gürültü yasası çıkarmaktadır.

Tablo 6. Avrupa Sabit Gürültü Limitleri

Ülke	Ticari	Karışık	Yerleşimsel	Kırsal
Danimarka			40	45
Almanya				
Gündüz	65	60	55	50
Gece	50	45	40	35
Hollanda				
Gündüz		50	45	40
Gece		40	35	30

V. Sonuçlar

Rüzgar enerji sistemlerinde gürültü oluşum seviyeleri aynı olmamaktadır. Artık modern rüzgar türbinlerinde titreşimden kaçınma konusunda kazanılan mühendislik bilgileri sayesinde mekanik gürültü düşük seviyelere çekilmiştir. Diğer teknik gelişmeler sayesinde, mekanik gürültünün oluştuğu nacelle içindeki bileşenler(dişli kutusu, sapma mekanizması vs.) en az gürültüye neden olacak şekilde geliştirilmektedir. Aerodinamik gürültü, motor kanatlarındaki "şışt" sesi, esas olarak kanatların en ucu ve gerisinden yükselir. Dönme hızı ne kadar yüksekse, o kadar fazla olan aerodinamik gürültü, motor kanatlarının daha iyi tasarlanmasına bağlı olarak son on yılda büyük ölçüde azaltılmıştır.

Avrupa Birliği'ne dahil olmaya çalışan Türkiye'de gürültü standartları hakkında gerekli yasal düzenlemeler yapılır ve bu yasal düzenlemeler yürürlüğe girerse,

Türkiye'deki üreticilerde gürültüyü standartların izin verdiği seviyeye çekmek zorunda kalacaklardır.

VI. Kaynaklar

- [1]Sirel S., "Yapı Akustiginde 30 Terim 30 Tanım" Yapı Fiziği Uygulamaları, (2002).
- [2]Ültanır, M.Ö., "21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi", TÜSİAD Yayınları, Yayın No: TÜSİAD-T/98-12/239, İstanbul, (1998).
- [3]Karadeli, Ş., "Rüzgar Enerjisi", Temiz Enerji Vakfı Kitapçık Serisi, s.6-12, No:11, Ankara, (1999).
- [4]Demirci, B., Yıldırım, E., "Elektrik Enerjisi Üretiminde Özel Sektörün Yeri", Türkiye 4. Enerji Kongresi, İzmir, s.255-265,(1986).
- [5]Erdallı, Y., Türe, İ.E, Türksoy, F. "Rüzgar Enerji Sistemleri", Termodinamik Dergisi, Sayı30, s.49-52,(1995).
- [6]Avşar, H., Çetinkaya K., Gökkaya H. "Afyon Yöresi Rüzgar Potansiyeli ve Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Savonius Tasarımı", I.Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi Kitabı, Kayseri , (2001).
- [7]Anonim, Elektrik İşleri Genel Müdürlüğü, "Türkiye Rüzgar Enerjisi Doğal Potansiyeli", Yayın No:85-1,Ankara, (1984).
- [8]Özdamar, A., "Dünya ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma" Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6.Cilt, 2.-3. Sayı, s.133-145, (2000).
- [9]"Dünya Ekonomi-Politika Gazetesi", (13.07.1999).
- [10] Dursun B. "Dikey Eksenli Bir Darrieus Rüzgar Türbin Dizayn Edilmesi ve Kanat Üretimi" Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [11]Akgün, N., "Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Yeni ve Yenilenebilir Enerji Araştırma Çalışmaları",Ankara, (2005).
- [12]Anonim, "Gürültü Kontrol Yönetmeliği" 11 Aralık 1986 Tarihli 19308 Sayılı Resmi Gazete s.8-26 (1986).
- [13]Wagner, S., Bareib, R., Guidati, G., "Wind Turbine Noise", Springer, Berlin,(1996).

[14]Manwell J.F., McGowan J.G. Rogers, A.L., "Wind Energy Explained Theory Design and Application" Wiley Publishing, England (2002)

[15] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E., "Wind Energy Handbook", Wiley Publishing, England, (2001).

[16]NWCC, National Wind Coordinating Committee, "Permitting of Wind Energy Facilities: A Handbook, Resolve, Washington, DC, (1998).

[17]Hiçyılmaz, C.Ö., "Aralıklı Gürültünün İşitme Organı ve Organizma Üzerine Etkileri", G.Ü. Tıp Fakültesi Doktora Tezi, (1994).

[18]Cura, O., " Gürültü ve Sağlık I. Ulusal Gürültü Kongresi",Bursa, (1994).

[19]Almanya Duesseldorf Şehri Çevre İdaresi, (2000).

[20]Gipe, P., "Wind Energy Comes of Age", Wiley, New York, (1995).