

RÜZGAR VERİSİ ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ

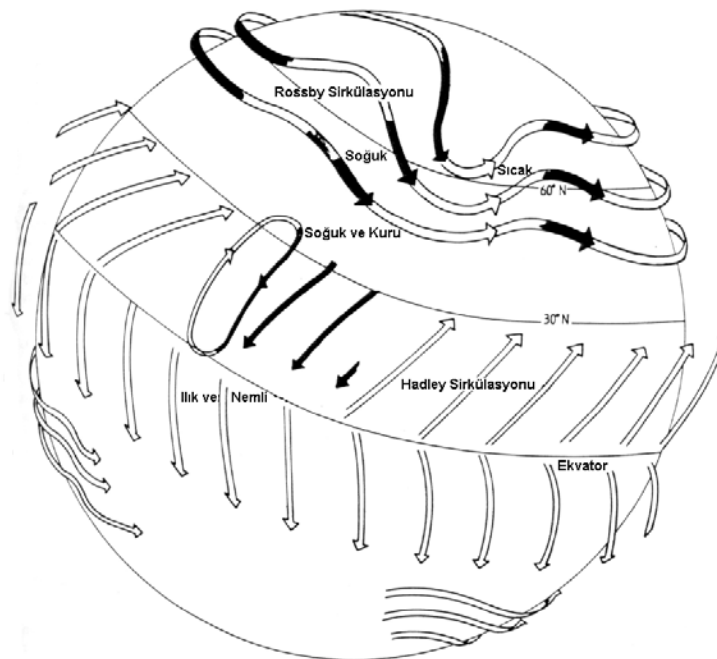
Dr. Ferdi Türksoy

GİRİŞ

Yenilenebilir ve temiz oluşu dolayısıyla geleceğin temel enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisi, rüzgarın doğası gereği kapsamlı incelemeler gerektirmektedir. Bu çalışmada, rüzgar enerjisi inceleme ve değerlendirmelerinde esas parametre olan rüzgar verisinin ölçümü ve analizi konusunda konuyla ilgilenen kişi ve kuruluşlara yardımcı olunabilmesi amacıyla bir takım özet bilgiler sunulmuştur. Çalışmada hesaplamaların nasıl yapılacağından çok elde edilen bulguların yorumlanması ve yorumlamalar yapılırken gözönünde bulundurulması gereken hususlar üzerinde durulmuştur.

ATMOSFERİN GENEL SİRKÜLASYONU

En basit ifadeyle havanın hareketine rüzgar adı verilmektedir. Bilindiği üzere atmosferin toplam enerjisi kinetik ve potansiyel enerji olarak ikiye bölünmüştür. Rüzgarlar, temel olarak basınç kuvvetlerinin etkisiyle potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün bir sonucudur.



Şekil 1. Atmosferin Genel Sirkülasyonu

Şekil 1'de atmosferin genel sirkülasyonu şematik olarak gösterilmektedir. Kuzey yarımküre için atmosferin genel sirkülasyonu ile ilgili özetle şunları söyleyebiliriz:

Ekvator civarlarında yerle temas halinde bulunan sıcak ve nemli hava konveksiyonla yükselir, yükseldikçe soğur, belli bir seviyeye yükseldikten sonra daha soğuk olan kuzey enlemlere doğru yönelir ve 30° Kuzey enlemlerine yaklaşınca tekrar yeryüzeyine doğru alçalır. Burada nispeten daha soğuk ve kuru olan hava ekvatora doğru yönelir. Buna Hadley Sirkülasyonu adı verilir. Dünyanın dönüşü sebebiyle meydana gelen Coriolis Kuvveti nedeniyle havanın hareketi hareket yönünün sağına doğru saptırıldığından 0°-30° enlemleri arasında yeryüzeyinde oluşan rüzgarlar temel olarak Kuzey-Doğu karakterli olurlar.

Benzer yapıda ancak bu kez dalgalar şeklinde bir karakteristik arzeden ve Rossby Sirkülasyonu diye adlandırdığımız bir sirkülasyon da 30°-90° enlemleri arasında gerçekleşir. Bu sirkülasyon sonucunda 30°-60° enlemleri arasında Güney-Batılı ve 60°-90° enlemleri arasında ise Kuzey-Doğulu rüzgarlar oluşur. Tablo1'de Kuzey ve güney yarımküre için atmosferik genel sirkülasyona göre rüzgar yönleri sunulmaktadır.

Tablo 1. Enlemlere göre genel hakim rüzgar yönleri

Enlem	90-60°K	60-30°K	30-0°K	0-30°G	30-60°G	60-90°G
Rüzgar Yönü	KD	GB	KD	GD	KB	GD

RÜZGAR ENERJİSİ AMAÇLI VERİ VE ÖLÇÜMÜ

Rüzgar şiddeti ölçümleri genellikle analog veya sayısal anemometreler vasıtasıyla yapılmaktadır. Bunlar arasında kap anemometre, pervane tipli anemometre veya ultrasonik anemometre gibi farklı çeşitler bulunmakla beraber en yaygın olarak kullanılanı kap anemometrelerdir.



Şekil 2. Kap anemometre, jirüet (rüzgar yönü ölçer) ve ultrasonik anemometre.

Klimatolojik amaçlı rüzgar hızı, yani rüzgar şiddeti ve yönü ölçümlerinde bazı noktalar gözardı edilebilmekle birlikte rüzgar enerjisi amaçlı ölçümlerde şu noktalara önem verilmesi gereklidir:

- Kullanılan sensörler kalibrasyonlu olmalıdır. Tercihen kalibrasyon, ölçümler tamamlandıktan sonra yinelenmelidir.
- Rüzgar hızı ölçümleri birisi tercihen poyra yüksekliğinde olmak üzere en az 2 seviyede yapılmalıdır.
- Rüzgar şiddeti ölçümlerinde kullanılacak anemometrenin rezolüsyonu en azından 10Hz ve ölçümlerin kesinliği de ölçülen değerlerin en az %0.3'ü olmalıdır. Bu yüzden optoelektronik sensörler tercih edilmelidir.
- Rüzgar yönü ölçümlerinde ise 0°-360° arasında ölçüm yapabilen ve rezolüsyonu asgari 1° olan sensörler tercih edilmelidir.

Ultrasonik anemometreler ve belli bir alan içerisindeki rüzgar hızı dağılımını ölçmekte kullanılan droppler radar tipi sistemler çok hassas ve detaylı bilgiler sağlayabildikleri halde pahalı ve kullanması nispeten zor sistemler olduklarından zorunlu koşullar dışında pek fazla tercih edilmemektedirler.

Rüzgar hızı yanısıra diğer bazı meteorolojik parametrelerin de ölçülmesi son derece yararlı olacaktır. Özellikle rüzgar enerjisi hesaplamalarında kullanılan bir parametre olan hava yoğunluğunu hesaplayabilmek için basınç, sıcaklık ve nemlilik değerlerinin ölçülmesi, bunun yanısıra atmosferik kararlılığın belirlenebilmesi amacıyla yine 2 seviyede sıcaklık ölçümü yapılması rüzgar enerjisi hesaplamalarındaki hassasiyetin ve doğruluğun artırılması bakımından önemlidir. Güç eğrisi testlerinde yağışlı periyodların belirlenebilmesi amacıyla yukarıdakilere bir de yağış ölçer eklemek gerekecektir.

Rüzgar Parkı Sahalarının Değerlendirilmesinde Kullanılabilecek Veri

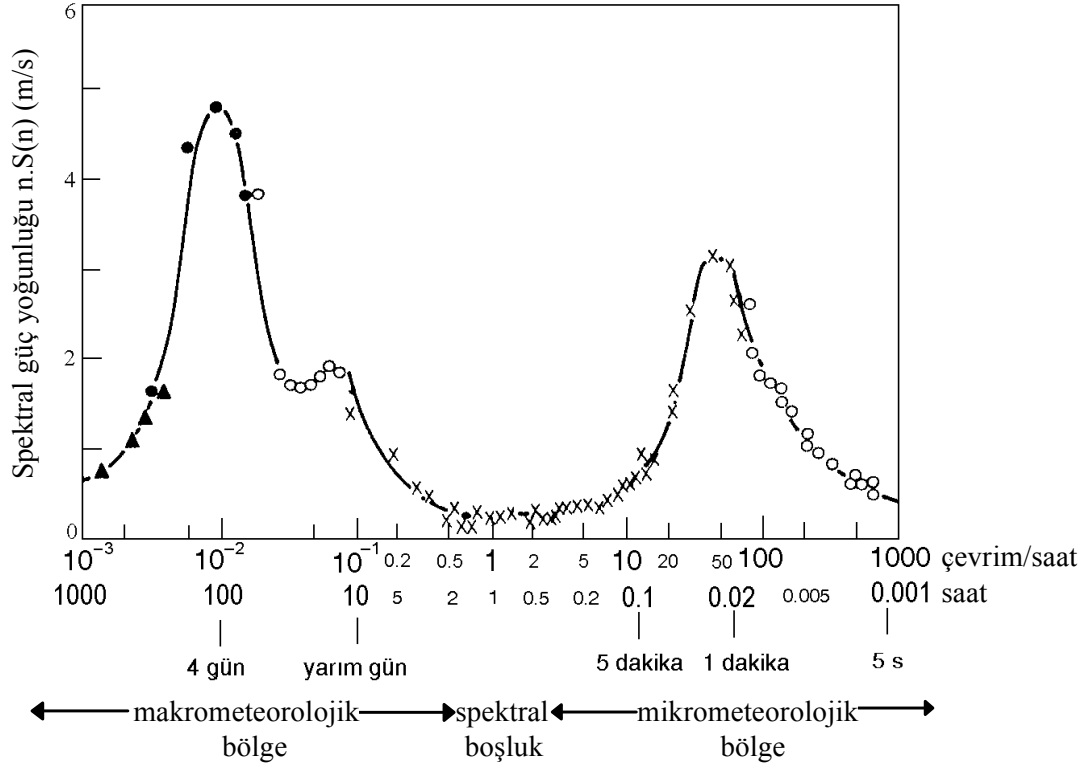
	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Arşivlenmiş meteorolojik veri	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uzun zaman serileri 2. Geniş bir alan üzerinde yayılmış veri 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nadiren ilgilenilen sahaya ait 2. Genelde 10m'de ölçüm; poyra yüksekliğinde değil 3. Kompleks arazi yapıları üzerinde enterpolasyon zor
Saha içi ölçümler	<ol style="list-style-type: none"> 1. İlgilenilen sahaya özgün veri 2. Poyra yüksekliğinde kaydedilmiş veri 3. Veri kaydı türbülans gibi bazı özel bilgileri içerecek şekilde düzenlenebilir 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Maliyetli 2. Kısa süreli veri temsili olmayabilir 3. Data kaybı itimali yüksek 4. Ölçüm cihazının yanlış konuşlandırılması alanı temsil etmeyen sonuçlara yol açabilir
Modelleme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Saha içi ölçümlerden daha ekonomik 2. Daha kısa sürede birden fazla alan için değerlendirme yapma imkanı 3. Çabuk neticeye ulaşabilme imkanı 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Yanlış kullanılabilir 2. Modellemedeki kabuller hatalı veya elverişsiz olabilir 3. Hassasiyet düşük olabilir 4. Ölçekleme hatalı olabilir

Rüzgar Şiddetinin Güç Spektrumu ve Ortalama Alma Peryodu

Rüzgar enerjisi hesaplamalarında kullanılacak rüzgar verilerinin kaydedildiği peryot (ortalama alma peryodu; 10 dakika veya 1 saat gibi) da büyük önem arz etmektedir. Şekil 2'de rüzgar şiddetinin güç spektrumu sunulmaktadır.

Şekilden de görüleceği üzere makrometeorolojik bölge ile mikrometeorolojik bölge arasında 10dakika ile 2 saatlik bölgeye karşılık gelen ve trendlerin güçlü olmadığı spektral bir boşluk bulunmaktadır. Spektral güç yoğunluğunun düşük olduğu bu bölge kararlı ortalamaların elde edilebileceği ortalama alma peryodlarını işaret etmektedir.

Sonuç olarak ortalama alma peryodu belirlenirken, bunun spektral boşluk içerisinde yer almasına ve 5-10 dakika gibi kısa sürelerde gerçekleşen ani ve güçlü fırtınaları da tespit edebilecek kadar kısa olmasına dikkat edilmelidir.

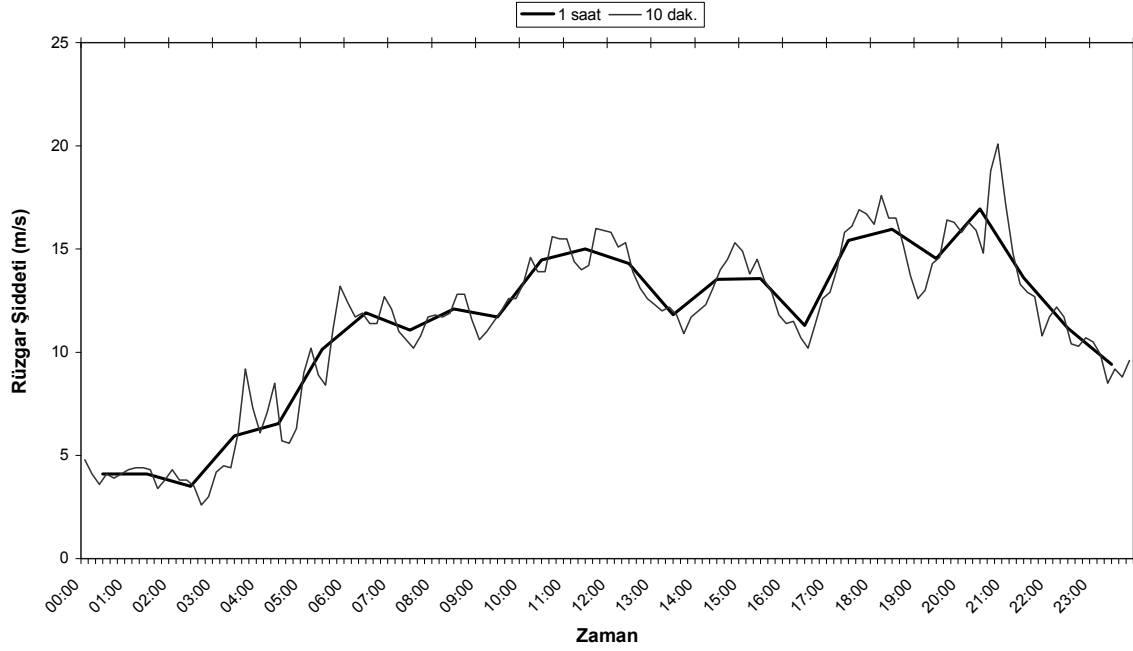


Şekil 3. Rüzgar şiddetinin güç spektrumu.

Bir örnek olması açısından 10 dakikalık ortalamalar şeklinde kaydedilmiş veri ve bu verinin saatlik ortalamalara dönüştürülmesiyle oluşturulan saatlik veri kullanılarak, yapılan bazı hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. 10 dakikalık ortalama ve saatlik ortalama olarak kaydedilmiş veriler kullanıldığı zaman yapılan hesaplamalarda ortalama rüzgar şiddeti neredeyse hiç değişmediği halde hakim rüzgar yönü ve enerjisi yüzdesi, rüzgar enerjisi yoğunluğu, rüzgar gradyanı eksponenti ve neticede yıllık enerji üretiminde gözardı edilemeyecek miktarda farklılıklar oluşmaktadır. Bunun nedeni, ortalama alma periyodunun genişlemesi sebebiyle detayların ihmal edilmesidir. Şekil 4'te 1 günlük rüzgar şiddeti verisinin saatlik veya 10 dakikalık ortalamalar şeklinde kaydedilmiş olması durumu karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi saatlik veri daha az çalkantılı bir değişim göstermekte ve detay içermemektedir.

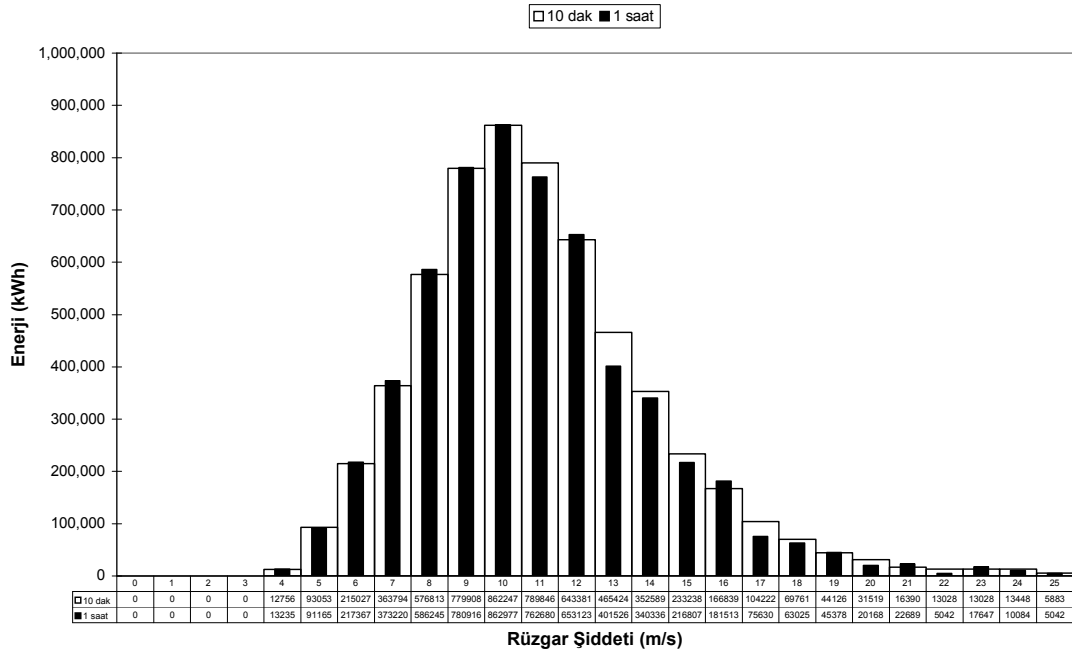
Tablo 2. 10 Dakikalık veriyle saatlik verinin karşılaştırılması.

Ortalama Alma Periyodu	10 dakika		1 Saat	
Veri sayısı	52112		8687	
Ölçüm Yüksekliği	30	10	30	10
Ortalama Rüzgar Şiddeti (m/s)	6.947	6.241	6.945	6.240
Weibull A Parametresi (m/s)	7.832	7.036	7.836	7.040
Weibull k Parametresi	1.933	1.927	1.991	1.988
Hakim Rüzgar Yönü (°)	0	0	0	0
Hakim Rüzgar Yönü Yüzdesi (%)	37.92	37.92	39.13	39.13
Enerji Yoğunluğu (kWh/m ² -yıl)	3574.67	2546.25	3503.60	2493.52
Hakim Enerji Yönü (°)	0	0	0	0
Hakim Enerji Yönü Yüzdesi (%)	34.80	36.53	36.81	38.63
Azami Rüzgar Şiddeti (m/s)	32.80	28.10	30.15	25.68
Türbülans Yoğunluğu (10 m/s'de)	0.0911	0.1029	0.0917	0.1033
Rüzgar Gradyanı Eksponenti	0.09624		0.09626	
Türbin Tipi	Nordex 80_2,500kW		Nordex 80_2,500kW	
Toplam Kurulu Güç (MW)	2.5		2.5	
Enerji Üretimi (kWh/yıl)	5,866,318.607		5,745,815.798	
Kapasite Faktörü (%)	26.79		26.24	



Şekil 4. Saatlik ve 10 dakikalık verinin 1 günlük değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 5'te ise 10 dakikalık ortalamalar şeklinde kaydedilmiş veri ve saatlik veri için her rüzgar şiddetine karşılık gelen esme sayıları belirlenmiş ve 2.5MW'lık bir rüzgar türbininin güç eğrisi kullanılarak, hesaplanmış enerji üretim değerlerinin karşılaştırmasının yapıldığı bir grafik sunulmuştur. Şekil'den de görüleceği üzere bazı rüzgar şiddeti değerlerine karşılık gelen bağıl hata değerleri %60'lara varmaktadır ve sonuç olarak toplam enerji üretiminde %2.05 düzeyinde bir bağıl hata olmaktadır. Bu değerlerin genel bir ifade olmayıp, sadece bir örnek olduğu ve farklı rüzgar koşullarında farklı oranlarda gerçekleşeceği bilinmelidir.



Şekil 5. 10 dakikalık ve saatlik veri kullanılması durumunda enerji üretim miktarları.

RÜZGAR ÜZERİNDEKİ LOKAL ETKİLER

Rüzgar diğer birçok meteorolojik parametrenin aksine lokal etkilerden çok fazla etkilenen bir parametredir. Bu yüzden ilgilenilen bölgede rüzgar üzerinde etkili olabilecek tüm etkenlerin dikkate alınması gerekmektedir.,

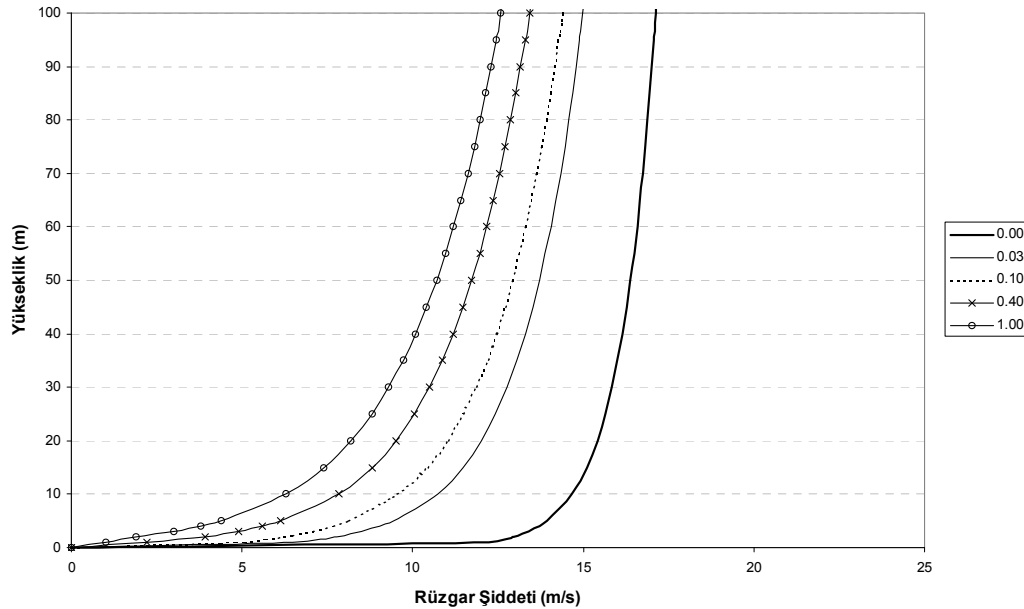
Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişimler

Tüm akışkanlarda olduğu gibi yüzey pürüzlülüğü, akışa karşı bir direnç oluşturmakta ve pürüzlülüğün fazla olduğu ortamlarda akışı yavaşlatıcı bir etki yaratmaktadır. Pürüz uzunluğu veya rüzgarın yükseklikle değişimi aşağıda verilen Prandtl'in logaritmik kanunu veya ampirik olarak düzeltilmiş logaritmik kanun yardımıyla hesaplanabilir.

$$V_2 = V_1 \left(\frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \right)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{\ln(z_2/z_0) + 5.75z_2/h}{\ln(z_1/z_0) + 5.75z_1/h} \right) \quad \begin{aligned} h &= u_* / 6f \\ f &= 2\Omega \sin \varphi \end{aligned}$$

- V_1, V_2 : z_1, z_2 yüksekliğindeki rüzgar şiddetleri
 z_1, z_2 : alt ve üst seviye gözlem yükseklikleri
 z_0 : pürüz uzunluğu
 u_* : sürtünme hızı
 f : Coriolis parametresi
 Ω : Dünyanın açısal hızı
 φ : enlem derecesi şeklinde tarif edilmektedir.



Şekil 6. Farklı Pürüzlülük sınıflarına karşılık gelen rüzgar şiddeti profilleri.

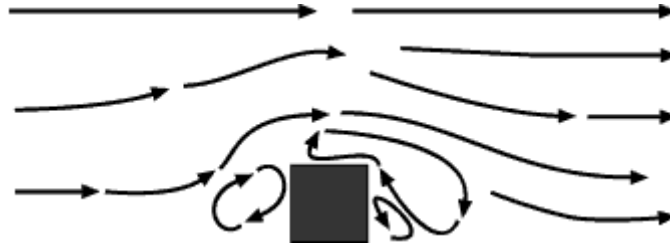
Şekil 6'da 1500m yükseklikte rüzgar şiddetinin 20 m/s olduğu kabul edilerek, standart pürüz uzunlukları için 100m yüksekliğe kadar rüzgar şiddetinin yükseklikle değişimi verilmiştir. Pürüzlülük değeri arttıkça rüzgar şiddetinin yükseklikle daha fazla arttığı açıkça görülmektedir.

Topoğrafyanın Etkisi

Dağlar, tepeler, vadiler rüzgar üzerinde gerek şiddet gerekse yön bakımından önemli değişikliklere neden olmaktadır. Sözelimi bir tepe üzerinden geçerken veya iki tepe arasındaki bir kanal içerisinde geçerken sıkışma nedeniyle rüzgarın şiddeti artmaktadır. Yeryüzü şekilleri yine benzer olarak rüzgarın esiş yönünü de kendi şekillerine paralel olacak şekilde değiştirici bir etkiye olmaktadır.

Çeşitli yapılar ve diğer perdeleyici engeller

Bir yapı normal akış paterni üzerinde yüksekliğinin 5 katı mesafede rüzgarüstü tarafından başlayarak, yüksekliğinin 2 katı yüksekliğe ve yine yüksekliğinin 10 katı mesafede rüzgaraltı tarafında etkili olmaktadır.



Şekil 7. Perdeleyici engellerin rüzgar paterni üzerindeki etkisi.

Atmosferik kararlılıktaki değişimler

Atmosferik kararlılık rüzgar profilinin yapısı üzerinde önemli etkilere yol açmaktadır. Kararsız atmosfer koşullarında düşey momentum taşınımı daha fazla olacağı için rüzgar şiddetinin yükseklikle değişimi daha az olacaktır.

Lokal sıcaklık değişimleri

Gerek konveksiyon gerekse hava yoğunluğu üzerindeki etkisi dolayısıyla rüzgar şiddeti değerleri üzerinde değişimlere neden olmaktadır.

Deniz Meltemleri

Temelde deniz ve kara sıcaklıklarının farklı oluşundan meydana gelen, çok güçlü olmayan rüzgarlardır.

Anabatik ve katabatik dağ rüzgarları

Vadilerde ısınan sıcak havanın daha soğuk dağ havası içerisinde yükselmesi veya soğuk dağ havasının vadilere doğru çökmesi sonucu oluşan rüzgarlardır.

RÜZGAR VERİSİ ÜZERİNDE İNCELEMELER

Burada, rüzgar akışı modellenmesinden ziyade eldeki ham verinin basit yazılımlar ve ofis programları kullanılarak, incelenmesi üzerinde durulmuştur.

Eldeki Verinin Tamlığı

İncelenecek veya çalışmada kullanılacak verinin yeterli ve eksiksiz olup olmadığının bilinmesi daha sonraki adımlarda elde edilecek sonuçların yorumlanması için gereklidir.

Tablo 3. Eldeki Veri miktarı.

Günlük Veri Sayısı	Yıl / Ay														TOPLAM
	1999												2000		
Gün	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2		
1	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
2	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1584
3	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1584
4	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1584
5	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
6	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
7	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
8	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
9	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
10	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
11	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
12	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
13	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
14	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
15	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1712
16	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
17	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
18	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
19	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
20	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
21	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
22	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
23	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
24	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
25	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
26	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
27	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
28	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1728
29	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1584
30	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1584
31	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	1008
TOPLAM	2160	4464	4320	4464	4320	4464	4464	4320	4448	4320	4464	4464	1440		52112
Veri Kaydı:	10	Dakikalık Ortalama													
Başlangıç:	14.02.1999 00:00						Bitiş :						13.02.2000 23:50		
Veri Sayısı:	52112						Veri Tamlığı (%) :						99.15		

Bunun net bir şekilde görülebileceği, günlük veri sayılarının listelendiği bir tablo oluşturulabilir (Tablo 3). Bir örnek olarak seçilen ve sunulan bu verinin saatlik, 10 dakikalık ortalamalar şeklinde veya başka şekilde kaydedildiği, başlangıç ve bitiş zamanları, veri sayısı ve verinin tamlığı bu şekilde tespit edilebilir. Eldeki veri içerisindeki kayıplar burada koyu renk gölge ile işaretlenmiştir. Veri kayıplarının ardışık bir biçimde %10'u aşması durumunda eldeki verinin temsiliğini yitirmiş olabileceği gözardı edilmemelidir. Saatlik veri durumunda günde 24 veri, 10 dakikalık veri olması durumunda ise günde 144 veri (6 kat fazla) kaydedildiği yine dikkat çekici bir noktadır.

Frekans (Esme Sayısı) Tablosu

Bir rüzgar hızı verisinin istatistiki anlamda en özet şekilde gösterimi rüzgar şiddeti sınıflarına ve rüzgar yönü sektörlerine göre esme sayılarının listelendiği bir tablo oluşturmaktır (Tablo 4). Burada 0° Kuzey yönünü göstermektedir.

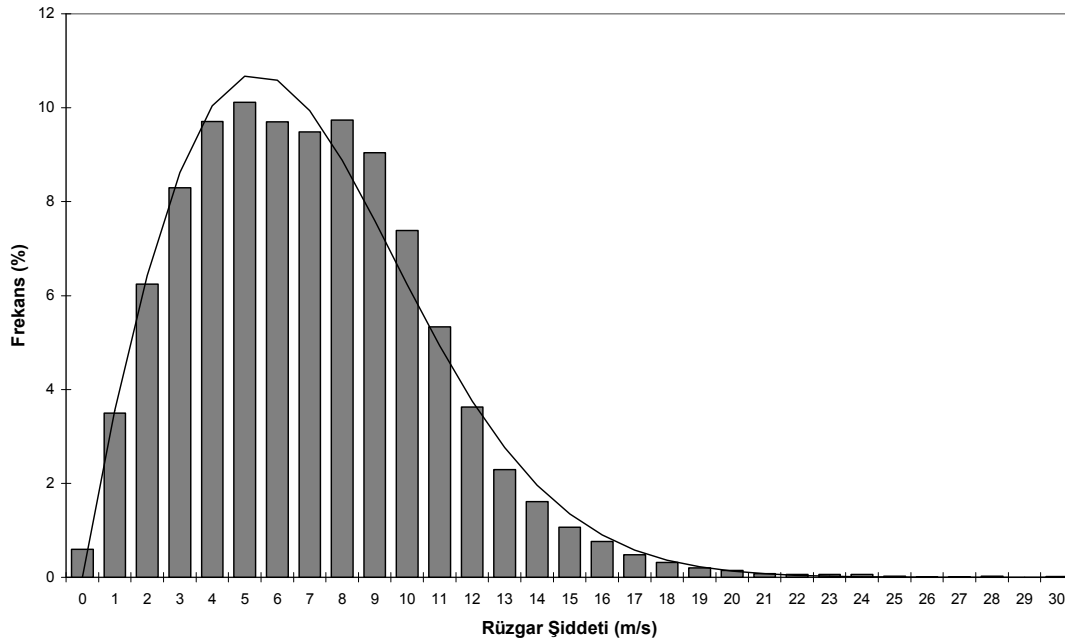
Tablo 4. Frekans (Esme Sayısı) Tablosu.

Rüzgar Şiddeti	Rüzgar Yönü (Sektör)												TOPLAM
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
0	31	26	33	11	20	29	15	31	26	22	38	28	310
1	364	145	78	60	94	173	227	113	59	70	123	317	1823
2	995	147	28	28	54	386	509	101	54	68	143	741	3254
3	1509	245	17	10	30	487	588	72	50	131	198	988	4325
4	1898	281	22	6	28	713	654	55	37	233	261	871	5059
5	1914	322	12	10	27	889	516	56	15	335	306	870	5272
6	1802	342	16	6	32	963	366	34	16	359	264	856	5056
7	1897	301	10	0	40	830	282	13	14	349	341	864	4941
8	1985	271	2	1	51	765	228	24	8	340	424	977	5076
9	2057	206	0	0	46	656	252	19	12	278	354	835	4715
10	1932	229	0	0	69	547	165	18	2	210	188	488	3848
.
30	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7
TOPLAM	19762	3169	218	132	721	8691	4849	615	296	2500	2693	8466	52112

Böyle bir tablo üzerinden rüzgarın hangi rüzgar şiddeti değerinde hangi sektörden kaç kez (veya saatlik kaydedilmiş veri için kaç saat) estiğini tek tek veya toplam olarak görmek mümkündür.

Frekans Histogramı ve Weibull Dağılımı

Frekans histogramı rüzgar şiddeti sınıflarına karşılık gelen esme yüzdelerini (frekans) gösteren grafiksel bir gösterimdir (Şekil 8). Frekans tablosundaki bilgiler yardımıyla hazırlanabilecek bu grafik yardımıyla incelenen alanda hangi rüzgar şiddeti değerlerinin daha sık gözlemlendiği tespit edilebilmektedir. Histograma veri saklamada bir tasarruf yapmak amacıyla bir istatistiksel dağılım fonksiyonu olan 2 parametrelili bir Weibull Dağılım fonksiyonu uydurmak mümkündür. Böylece verinin tamamını saklamak ve kullanmak yerine sadece Weibull parametrelerini kullanarak, hesap yapmak mümkün olacaktır.



Şekil 8. Frekans histogramı ve Weibull Dağılımı.

Weibull Dağılım fonksiyonu şu eşitlikle verilmektedir:

$$\Phi(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{A} \right)^k \right) \quad u > 0$$

Burada,

u : rüzgar şiddeti

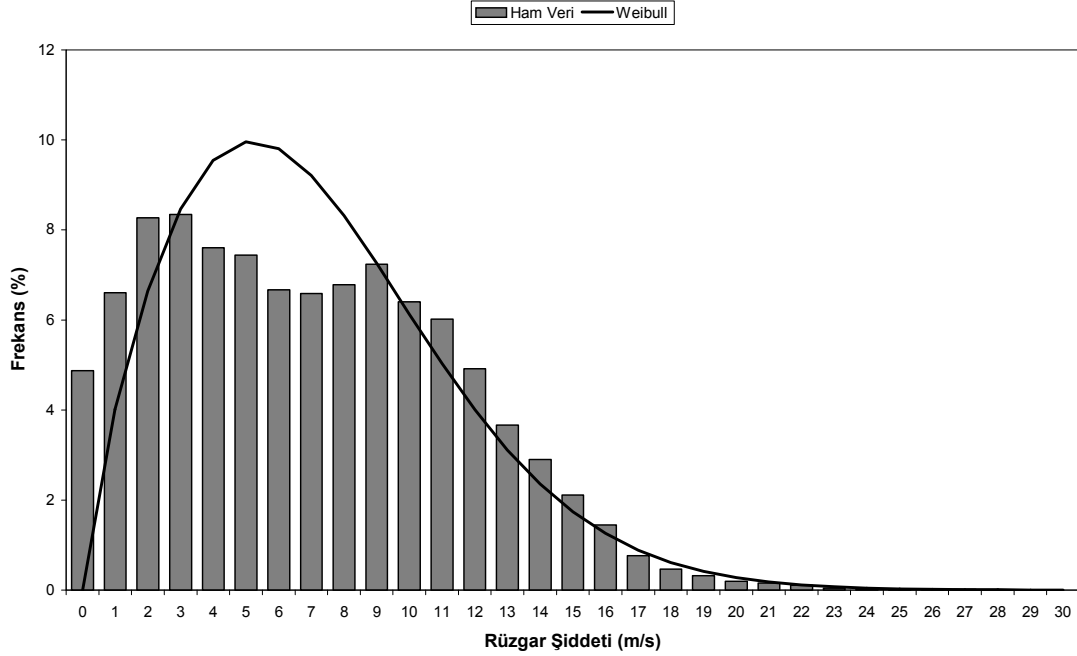
A : ölçek parametresi

k : şekil parametresi'dir.

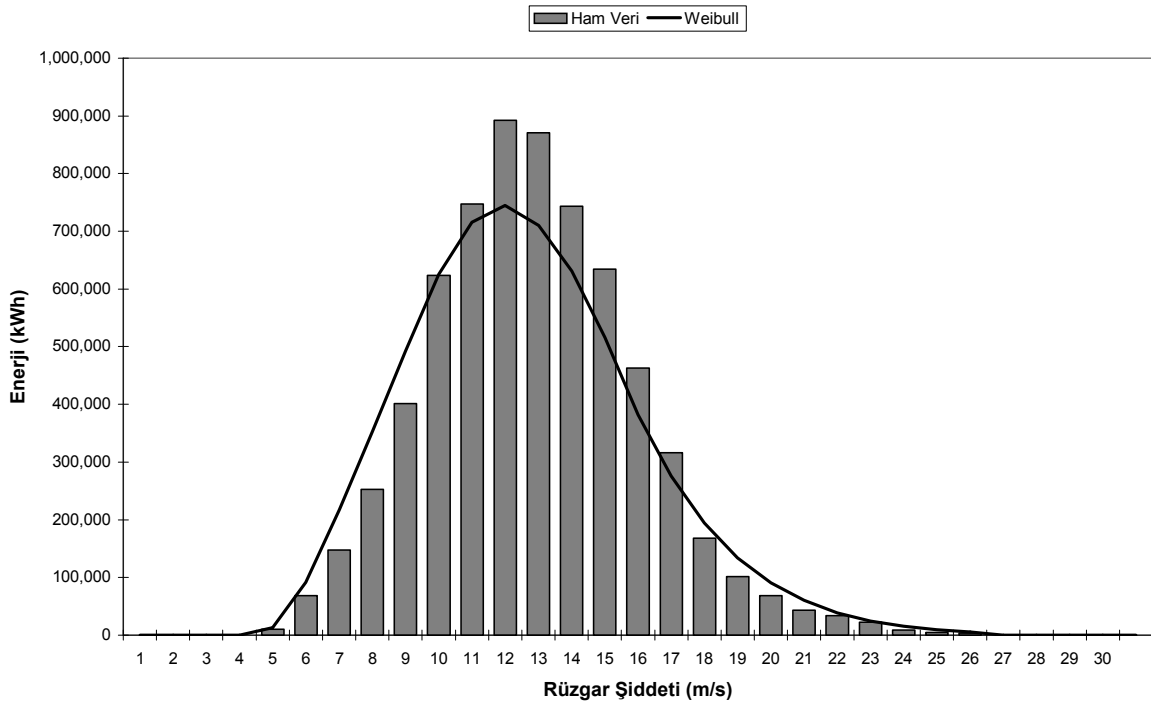
Burada şu hususların gözden kaçırılmaması son derece önemlidir:

- Uydurulan Weibull Dağılım fonksiyonu ne kadar iyi olursa olsun mutlaka bir hata payı içerecektir.
- Gözlem sayısı azaldıkça ve/veya mod değeri küçüldükçe uydurulan dağılım fonksiyonundaki hata miktarı genel olarak artacaktır.
- Özellikle iki tepe noktası bulunan frekans histogramlarında 2 parametrelili Weibull Dağılım Fonksiyonu çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.
- Bazı ticari programlarda tercih edilen yüksek rüzgar şiddeti değerlerine daha fazla ağırlık verilmesi zaman zaman ham veri ile Weibull Fonksiyonu kullanılarak hesaplanan enerji üretim miktarlarında ciddi farklılıklar yaratmaktadır.

Bir örnek olması açısından, Şekil 9'da iki tepe noktalı bir frekans histogramına uydurulan Weibull dağılımı görülmektedir. Şekil 10'da ise frekans histogramı (ham veri) ve Weibull dağılımı için 2.5MW'lık bir rüzgar türbininin güç eğrisi kullanılarak, hesaplanmış enerji üretim miktarları verilmektedir.



Şekil 9. Frekans Histogramı ve uydurulan Weibull Dağılım fonksiyonu.



Şekil 10. Ham veri ve Weibull dağılımı için üretim miktarları.

Özellikle 10 – 17 m/s değerlerine karşılık gelen enerji üretim miktarlarında Weibull dağılımı fonksiyonu kullanılarak hesaplanan enerji miktarlarının oldukça düşük kaldığı ve toplamda bu miktarın yıllık olarak yaklaşık %4.3'lük bir hataya neden olduğu görülmektedir.

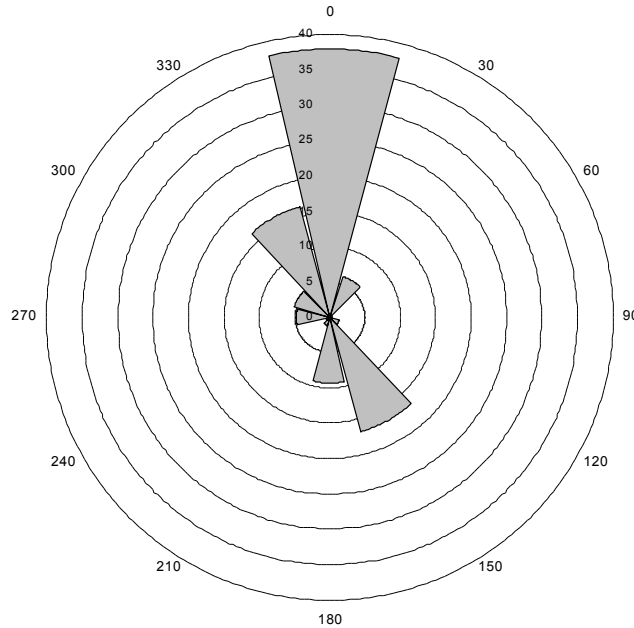
Buradan da anlaşılacağı üzere, özellikle enerji üretimi hesaplamalarında, eldeki verinin Weibull Dağılımına ne derece uygun olduğuna son derece dikkat edilmesi ve en azından Weibull dağılımı kullanımının ne kadar hataya neden olacağına belirlenmesi gerekmektedir.

Rüzgar Gülü

Rüzgarın hangi oranlarda hangi yönden estiğini bilmek rüzgar üzerinde yeryüzü yapısının etkilerinin belirlenmesinde büyük önem arz etmektedir.

Rüzgar enerjisi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan 30 derecelik dilimler halinde sektörler oluşturularak, hazırlanan frekans tablosu yardımıyla rüzgarın her bir sektörden esme oranları hesaplanır. Şekil 11'de her bir sektörden esme yüzdeleri grafiksel bir gösterimle sunulmuştur. Grafikten de anlaşılacağı üzere hakim rüzgar yönü 0° (Kuzey) olup, bunu takiben 330° ve 150° sektörleri etkili olmaktadır.

Ölçüm istasyonu kurulurken ölçüm istasyonunun konumunun tespitinde ve sensörlerin ölçüm direği üzerindeki pozisyonlarının belirlenmesi açısından hakim rüzgar yönüne ilişkin ön bilgilerin bulunması faydalı olacaktır. Bu şekilde ölçümlerin ilgilenilen alanı temsil etmesi sağlanırken sensörlerin ölçüm direğinin perdeleyici etkilerinden etkilenmesi önlenir.

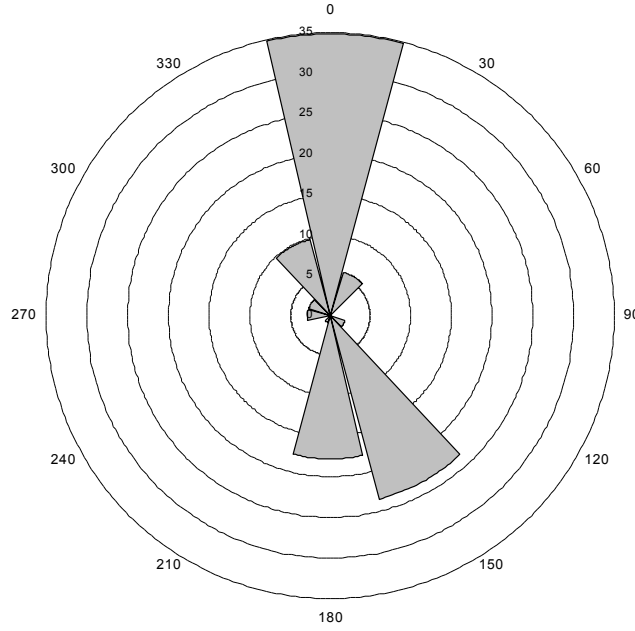


Şekil 11. Rüzgar Gülü

Enerji Gülü

Rüzgar gülü mikrokonuşlandırma çalışmaları yaparken iyi bir gösterge olmakla beraber zaman zaman yanıltıcı olabilmektedir. Mikrokonuşlandırma çalışmalarında rüzgar gülü yerine daha iyi bir gösterge olan enerji gülü tercih edilmelidir, (şekil 12). Böylece rüzgarın geldiği yön değil; enerjinin geldiği yön dikkate alınmış olacaktır.

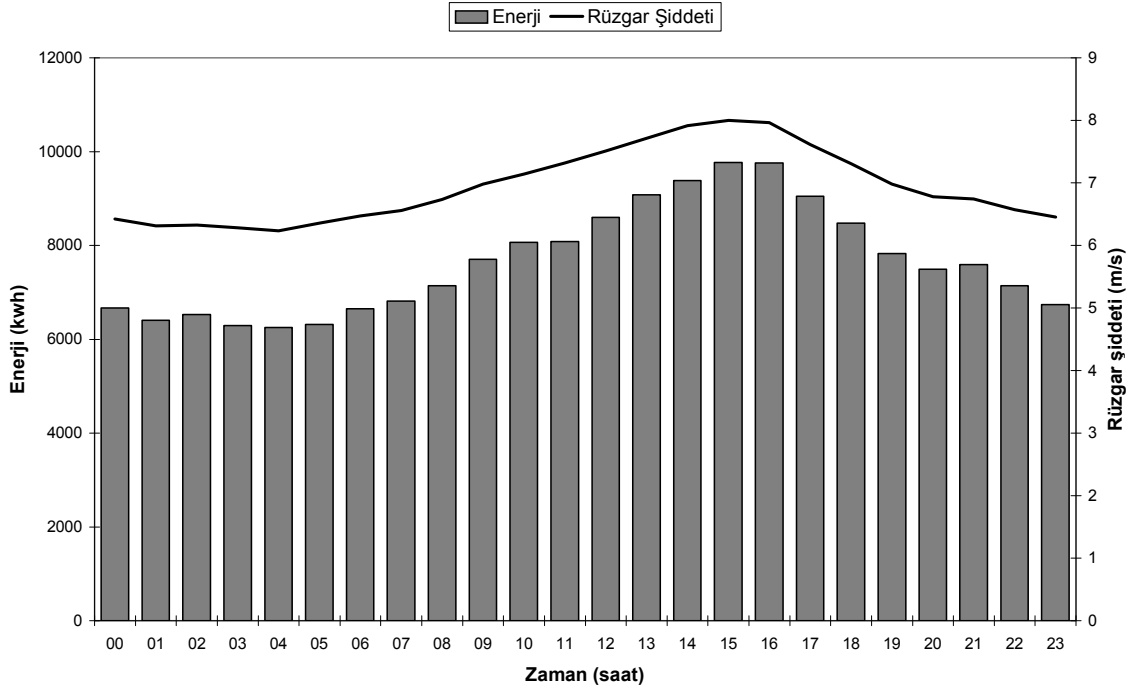
Dikkat edilirse aynı veriyle oluşturulmuş olan rüzgar gülü ve enerji gülünün aynı olmadığı, özellikle 330° sektörden gelen enerjinin daha az olduğu görülecektir.



Şekil 12. Enerji Gülü

Rüzgar Şiddetinin Gün İçerisindeki Değişimi

Özellikle şebekeden bağımsız uygulamalarda veya ulusal şebeke üzerindeki yükün gün içerisindeki değişiminin dikkate alınması gereken durumlarda rüzgar şiddetinin gün içerisindeki değişimini bilmek yararlı olabilir. Bunun için 24 saatlik periyot için her saate tekabül eden bir ortalama hesaplamak kaydıyla gün içi genel rüzgar değişimini belirlemek mümkündür.



Şekil 13. Rüzgar şiddetinin gün içerisindeki genel değişimi.

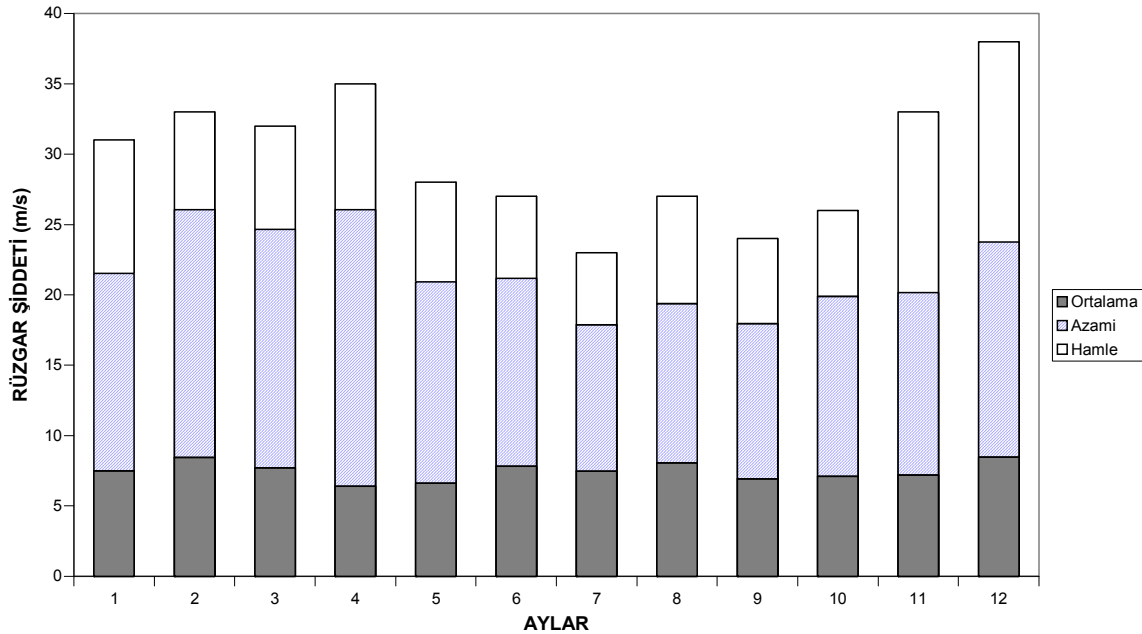
Sıcaklığın gün içerisindeki değişimiyle doğrudan ilgili olan gün içi rüzgar değişimi genellikle Şekil 13'tekine benzer bir yapı arzeder. Sabah saatlerinde düşük olan rüzgar şiddeti öğleden sonra azami değerine ulaşır ve akşam saatlerinde tekrar azalmaya başlar. Lokal etkiler nedeniyle bazı bölgelerde farklı patenlerin oluşması mümkündür.

Rüzgar şiddetinin gün içerisindeki değişimi yerine rüzgar enerjisinin gün içerisindeki değişimini belirlemek, gün içerisinde enerjinin ne kadarının hangi saatte üretileceğinin bilinmesinin önemli olduğu durumlarda gerekebilir. Patenler genelde benzer olmakla beraber bir takım farklılıkların olması beklenmelidir (Şekil 13).

Rüzgar Şiddetinin Aylık Değişimi

Rüzgar şiddetinin yıl içerisindeki aylık değişimi özellikle yapılacak yatırımın finansal analizleri ve kredi geri ödemeleri açısından büyük önem arz etmektedir. Aslında buna yine rüzgar şiddetinin değil de üretilen enerjinin aylık değişimi olarak bakmak gereklidir. Bu incelemeler yapılırken her ay için gözlenen azami rüzgar şiddeti değerleri de belirlenebilir. Genellikle aylık ortalama rüzgar şiddeti ile aylık azami rüzgar şiddeti benzer bir değişim göstermezler (Şekil 14).

Burada sunulan azami rüzgar şiddeti ortalama alma periyoduna karşılık gelen (saatlik, 10 dakikalık v.s.) rüzgar şiddeti değeridir. Fakat esas önemli olan birkaç saniyelik ömüre sahip ve Gust (hamle) adı verilen rüzgar şiddetinde ani ve büyük miktardaki artış değerleridir. Bunlar rüzgar türbinlerinin ömürleriyle ve dayanıklılıklarıyla direkt ilgilidir.



Şekil 14. Aylık ortalama, azami rüzgar şiddetleri ve hamle (saatlik veri).

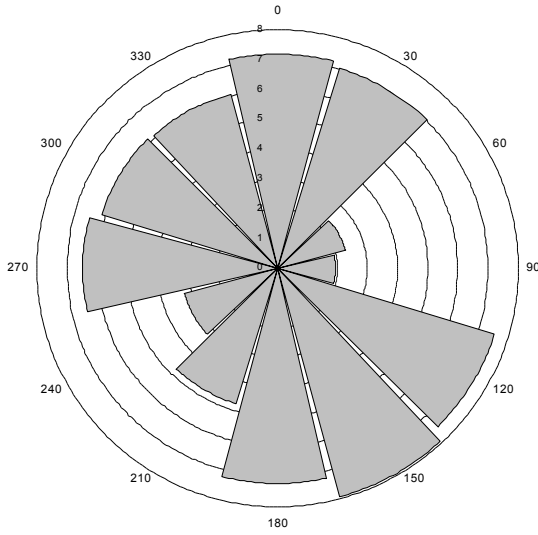
Rüzgar türbini seçerken ilgilenilen sahanın ekstrem değerleri belirlenmeli ve rüzgar türbininin sertifikasyonları incelenerek, türbininin tasarım karakteristiklerinin buna uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir. Rüzgar türbiniyle ilgili değerler genellikle rüzgar türbini spesifikasyonları ile birlikte imalatçı tarafından verilmektedir.

Rüzgar Gradyanı Eksponenti veya Pürüz Yüksekliği

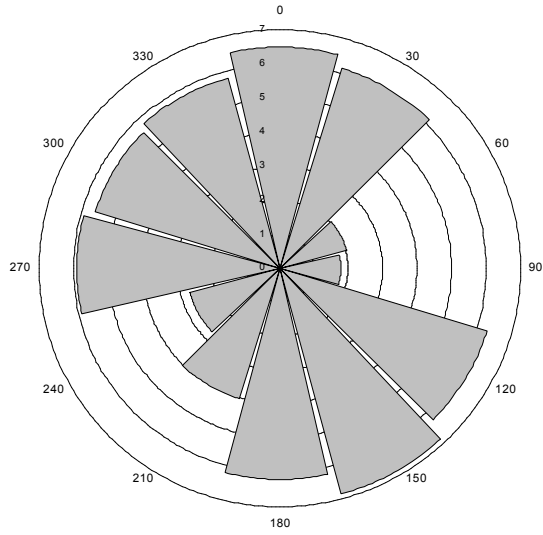
Yüzey pürüzlülüğünün rüzgar şiddeti üzerinde önemli etkileri olduğu yukarıda belirtilmiştir. Proje sahasında iki seviyede ölçüm yapılmış olması durumunda 2 yükseklik seviyesinde her bir sektör için ortalama bir rüzgar şiddeti değeri hesaplamak kaydıyla bölgenin sektörel olarak rüzgar gradyanı eksponentleri (α) ve pürüz uzunlukları (z_0) aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir. Şekil 15 ile 16'da 2 ölçüm seviyesi için sektörel ortalama rüzgar şiddeti değerleri ve Şekil 17'de sektörel rüzgar gradyanı eksponentleri için birer örnek sunulmuştur ($z_2 > z_1$).

$$V_2 = V_1 (z_2 / z_1)^\alpha$$

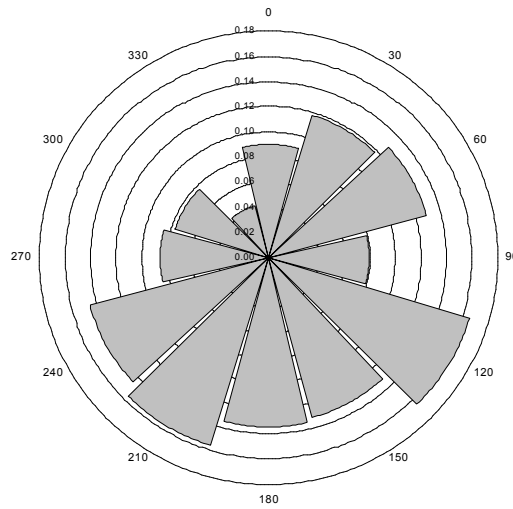
$$z_0 = 15.25 \exp(-1/\alpha)$$



Şekil 15. z_2 için sektörel ortalama rüzgar şiddetleri.



Şekil 16. z_1 için sektörel ortalama rüzgar şiddetleri.



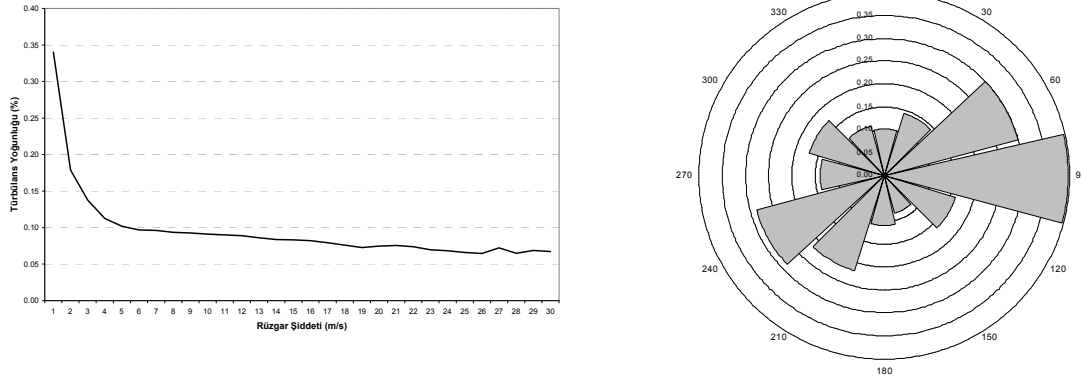
Şekil 17. Sektörel rüzgar gradyanı eksponentleri

Buradan hareketle bir rüzgar türbininin enerji üretimini hesaplamak üzere veriler yine yukarıdaki eşitlikler yardımıyla türbinin poyra yüksekliğine taşınabilir. Bu, direkt olarak ham veri üzerinden (düşük rüzgar şiddeti değerlerinde zaman zaman negatif rüzgar gradyanı eksponentleri hesaplanacağından problem yaratabilir) veya hesaplanan Weibull parametrelerinin taşınması şeklinde yapılabilir.

Weibull A parametresinin taşınması yukarıda verilen eşitliklerde V_1 ve V_2 'nin sırasıyla A_1 ve A_2 olarak değiştirilmesiyle yapılabilir. Weibull k parametresinin taşınmasında ise literatürde bulunabilecek yöntem -yani her 1 m yükseklik artışı için referans yüksekliğe ait k değerine 0.008 ilave edilmesi- kullanılabilir.

Türbülans Yoğunluğu

Rüzgar türbinlerinin yaşam süreci üzerinde önemli etkileri olan türbülans, ortalamadan olan sapmaları ifade etmekte olup, en basit yöntemle ölçülen ortalama rüzgar şiddetinin ölçülen standart sapma değerine bölünmesiyle elde edilir, ($I_u = U / \sigma$).



Şekil 18. Rüzgar şiddetine ve sektöre bağlı olarak türbülans yoğunluğu.

Şekil18'de türbülans yoğunluğunun rüzgar şiddetine ve sektörlere göre değişimine birer örnek sunulmuştur. Görüleceği üzere türbülans yoğunluğu rüzgar şiddeti arttıkça azalmaktadır. Aynı durum yer seviyesinden olan yüksekliğin artması durumunda da geçerlidir. Bunu aşağıdaki eşitliklerden de görmek mümkündür.

$$I_u(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad \text{veya} \quad I_u(z) = \frac{\alpha}{1 + \alpha \ln(z/15.25)}$$

Türbülans yoğunluğunun bilinmesi durumunda bu eşitlik yardımıyla z_0 ve α değerlerini hesaplamanın mümkün olduğu da açıkça görülmektedir.

Hava Yoğunluğu

Rüzgardaki enerji, sahip olduğu hız ve dolayısıyla taşıdığı kinetik enerjidir ($\frac{1}{2} mu^2$). Buradaki m , v hacminden u hızıyla geçen havanın kütlesidir. Kütle, $m = \rho v$ olduğuna göre (ρ havanın yoğunluğu), S alanından t zamanında u şiddetiyle geçen hava hacmi $S \cdot u \cdot t$ ve havanın kütlesi de $m = \rho \cdot S \cdot u \cdot t$ olur. Sonuç olarak rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji,

$$E_k = \frac{1}{2} \rho S u^3 t \quad \text{ve güç ise} \quad P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \rho S u^3 \quad (\text{Watt})$$

şeklinde bulunur. Rüzgarın sahip olduğu güç yoğunluğu ise

$$E = \frac{P}{S} = \frac{1}{2} \rho u^3 \text{ (Watt/m}^2\text{)}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki güç, rüzgar şiddeti ve dolayısıyla güç yoğunluğu enstantane değerlerdir.

Görüleceği üzere rüzgarın sahip olduğu güç hava yoğunluğuna bağlıdır. Hava yoğunluğu şu eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{kg/m}^3)$$

P : basınç (hPa veya N/m²)
 R : havanın özgül gaz sabiti (287.16 J/kg°K)
 T : sıcaklık (°K)

Enerji üretimi hesapları yapılırken seçilen rüzgar türbininin güç eğrisi proje sahasının hava yoğunluğuna göre düzeltilmelidir. Bu işlem yapılırken kanat açılarındaki değişiklikler dikkate alınmalıdır.

Bunun yanısıra hava yoğunluğunun yükseklikle değişeceği ve poyra yüksekliği için düzeltilmesi gerektiği bilinmelidir. Hava yoğunluğunun yükseklikle değişimi şu bağıntıyla verilmektedir.

$$\rho = \left(\frac{P_0}{RT} \right) \exp\left(\frac{-gz}{RT} \right)$$

P_0 : standart deniz seviyesindeki hava basıncı (1013.25 hPa) veya yakın bir istasyonda gözlenmiş deniz seviyesine indirgenmiş basınç
 g : yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²)
 z : deniz seviyesinden olan yükseklik.

EKSTREM KOŞULLAR

Rüzgar türbinleri belirli ekstrem koşullara dayanacak şekilde tasarlanırlar. Bu yüzden bir proje sahasına uygun rüzgar türbini seçilirken ekonomik kriterlerin yanısıra rüzgar türbininin tasarım parametrelerinin proje sahasının koşullarına uygun olup olmadığının dikkatle incelenmesi gerekmektedir.

İncelenmesi gereken bazı ekstrem koşullar, incelenmeleri ve hesaplanmalarıyla ilgili detaylara girmeden kısaca aşağıda sıralanmıştır. Bu konuyla ilgili ayrıntıları IEC Standartları'ndan temin etmek mümkündür.

1. Ekstrem rüzgar şiddeti (1 yıllık ve 50 yıllık)
2. Ekstrem hamle,
3. Ekstrem yön değişimi,
4. Ekstrem koherent hamle,
5. Ekstrem koherent hamle ve yön değişimi,
6. Ekstrem rüzgar kayması,
7. Diğer Ekstrem koşullar (Sıcaklık, Yıldırım, Buzlanma, Deprem, Elektrik şebekesi koşulları).

KAYNAKLAR

1. -----Meteorological Aspects of The Utilization of Wind As An Energy Source, WMO-No: 575, Switzerland, 1981.
2. Freris, L.L. Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall International, UK, 1990.
3. Troen, I., Petersen, L., European Wind Atlas, Risoe National Lab., Roskilde DK, 1989.
4. van der Hoven, J.L., Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour, Journal of Meteorology, vol. 14, 1957.
5. Türksoy, F., Aslan, Z., Okçu, D., Rüzgar Hızı İçin Ortalama Alma Peryotlarının Karşılaştırılması, II Ulusal Temiz Enerji Semp. Tebiğleri, İstanbul, 1997.
6. Türksoy, F., Yazar, A., Erdallı, Y., Rüzgar Enerjisi ve Teknolojileri Projesi Sonuç Raporu, TÜBİTAK-MAM, Kocaeli, 1994.
7. Türksoy, F., Saatlik ve Aylık Rüzgar Verisiyle Rüzgar Enerjisi Modellemesi, Doktora Tezi, ITU Fen Bil. Enst., İstanbul, 1997.
8. IEC Standard 61400-1 Wind Turbine Generator Systems - Part 1: Safety Requirements, 1999

ÖZGEÇMİŞ

Dr. Ferdi Türksoy 1969 yılında Kıbrıs'ta doğdu, ilk, Orta ve Lise Eğitimlerini Kıbrıs'ta tamamladıktan sonra 1986 yılında İTÜ, Meteoroloji Mühendisliği bölümünde yüksek öğrenimine başladı. Sırasıyla 1990 yılında Lisans (Net güneş Radyasyonu), 1993 yılında Yüksek Lisans (konvektif sınır tabaka ve düşey rüzgarlar) ve 1997 yılında Rüzgar Enerjisi Meteorolojisi konusunda Doktora eğitimlerini tamamladı. 1993-1998 yılları arasında TÜBİTAK-MAM Enerji Sistemleri Bölümü'nde rüzgar enerjisi proje yöneticisi ve araştırmacı olarak görev yapan Dr. Türksoy, Ocak 1999 itibarıyla NORDEX Energy GmbH Türkiye Bölge Müdürü ve uluslararası projelerde rüzgar enerjisi meteorolojisi uzmanı olarak görevini sürdürmektedir. Dr. Türksoy'un rüzgar ve rüzgar enerjisi konusunda çeşitli yayınları bulunmaktadır.