

RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALİ DİZAYN METODOLOJİSİ

Ahmet Hatipoğlu¹

1. GİRİŞ

Bu yazı, rüzgâr enerjisine ilgi duyan ve rüzgâr enerjisi ile ilgili belirli bir seviyede bilgi sahibi olan kişilerin faydalanması amacıyla rüzgâr santrali tasarım evrelerinin özet olarak anlatılması için hazırlanmış olup, karmaşık detaylara değinmeden rüzgâr enerjisi hakkında fikir ve bilgi vermeyi amaçlamaktadır.

Bütün rüzgârların kaynağı Güneş'tir. Dünya'nın küresel biçiminden dolayı, Güneş ışınları yeryüzünün farklı enlemlerinde farklı derecelerde ısınmaya neden olur. Oluşan bu ısınma farklarından dolayı havanın yoğunluğunda ve dolayısıyla basıncında farklılıklar oluşmaktadır. Basınç farklarından dolayı hava kütleleri yüksek basınçlı bölgelerden düşük basınçlı bölgelere doğru hareket ederler ve bu hareketler yeryüzündeki rüzgârları oluşturur. İnsanlık binlerce yıldır rüzgâr enerjisinden faydalanmaktadır. Tarih boyunca çeşitli türlerde yel değirmenleri geliştirilmiş

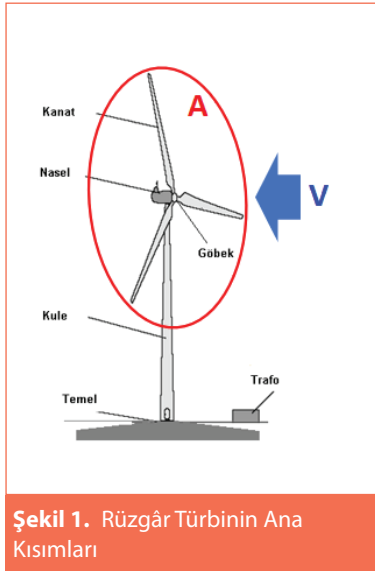
ve kullanılmıştır. Ancak günümüzde ticari şebeke bağlantılı çalışan rüzgâr türbinine en çok benzeyen türbin konsepti 1950'li yıllardan sonra ortaya çıkmaya başlamış olup, 1970'lerdeki küresel petrol krizi de alternatif enerji kaynağı olarak rüzgâr enerjisini daha ön plana çıkartmıştır. Enerji üretiminde artan çevresel etkilerin önemi, sürdürülebilirlik ve dışa bağımlılık gibi etkenler, rüzgâr enerjisine olan gereksinimi sürekli olarak arttırmaktadır.

2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ÇALIŞMA ESASI

Günümüz modern rüzgâr türbinlerinin yapısı Şekil 1'de kabaca gösterildiği şekilde olup, bu tasarımın teknik ve ekonomik olarak daha verimli hale getirilmesi için çalışılmaktadır.

Rüzgâr türbini, enerji üretiminde kullanılan diğer türbinler gibi doğrusal hareketli bir kütle kinetik enerjisini

¹ Makina Yüksek Mühendisi, Yenilenebilir Enerji Türkiye Müdürü, TotalEnergies- ahmet.hatipoglu@totalenergies.com



Şekil 1. Rüzgâr Türbinin Ana Kısımları

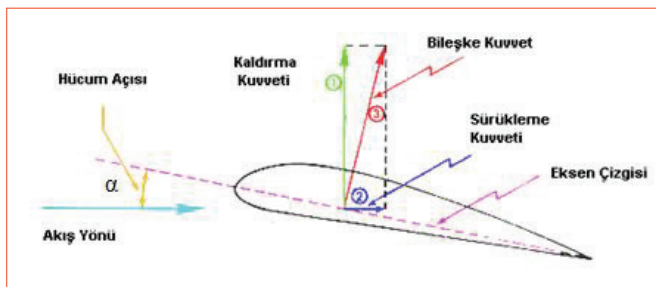
mekanik enerjiye dönüştüren bir mekanizmadır. Burada ki doğrusal hareketli kütle, havadır.

2.1 Rüzgâr Türbinini Aerodinamiği

Rüzgâr türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için kanat profili ve kanat profili üzerine etkiyen iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bu kuvvetler sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir be bu kuvvetlerin kanat profiline nasıl etki ettiği Şekil 2’de görülmektedir.

Sürüklenme kuvveti cismin üzerinde akış yönünde meydana gelen kuvvettir. Kanat profili üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti, hava akışının cismin üzerine 90°’lik açı ile geldiği durumda meydana gelirken, minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir [2].

Kaldırma kuvveti akışa dik olarak etki etmektedir. Uçakların yerden havalanması da bu kuvvet sayesinde olmaktadır. Kanat profili üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, havanın yüzeye 0° açı ile gelen bileşeni tarafından oluşturulur.



Şekil 2. Kanat Profiline Etki Eden Kuvvetler [1]

Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgeler akışaltı (“downstream”) bölgelerdir. Dolayısı ile hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelmiş olur. Hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça da basınç artar, bu olaya “Bernoulli Etkisi” denir ve kaldırma kuvvetinin cisim üzerinde emme veya çekme meydana getirmesini açıklar.

Hava akımı kanada yaklaşır ve kaldırma kuvvetinin etkisi ile kanat yukarı doğru çekilirken, sürüklenme kuvvetinin etkisi ile itilir. Kanat, bu iki kuvvetin bileşkesi olan yönde hareket etmek ister, ancak göbekten sabitlendiği için doğrusal olarak hareket edemez ve göbek etrafında dairesel hareket oluşur. Burada türbin rotorunu döndüren, kanatta oluşan kaldırma kuvvetidir.

Kanat profiline etkiyen sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri, hücum açısı (α) değiştiği zaman değişir. Kaldırma kuvveti her zaman profili terk eden rüzgârın doğrultusu ile 90° farklı açıda olurken sürüklenme kuvveti her zaman kanada gelen rüzgârın doğrultusunda olur. Rüzgâr türbinlerinin optimum aerodinamik verimle çalışmaları için, hücum açısının değişimine olanak sağlayan hatve (“pitch”) kontrol sistemleri vasıtasıyla kanatların açıları değiştirilir ve böylelikle operasyon sırasında türbin rotor hızı ve türbine etkiyen rüzgâr hızı dikkate alınarak kanat hücum açıları otomatik olarak ayarlanır.

Bütün bu bileşke kuvvetler ve hücum açısı değişimi sonucu değiştirilen aerodinamik verim değişkenlerinin hepsi dikkate alındığında, rüzgâr türbininin gücü aşağıda verilmiş genel ifade ile hesaplanır.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_e \quad (1)$$

Burada,

P : Rüzgâr türbininden üretilen güç

ρ : Havanın yoğunluğu

A : Rotor süpürme alanı

V : Rüzgâr hızı

C_e : Aerodinamik verimdir.

Güç formülünde havanın yoğunluğu, rotor süpürme alanı ve aerodinamik verim sonucu çarpan olarak etkilerken rüzgâr hızı sonucu küpü oranında etkilemektedir. Bu nedenle rüzgâr hızı, üretilecek gücün mertebesini belirleyen en önemli faktördür. Rüzgâr hızındaki %20’lik bir artış bile enerji üretiminde %70’in üzerinde bir artışa neden

olmaktadır. Bu nedenle türbin rotoruna gelen rüzgârın hızının çok hassas bir şekilde ölçülmesi ve modellenmesi gerekmektedir. Burada ölçülecek ve modellenecek olan diğer bir parametre ise havanın yoğunluğudur. Hava yoğunluğu deniz seviyesinden yüksekliğin artması ile ters orantılı bir şekilde azalmakla beraber, sıcaklık, basınç, nem gibi değişkenlerin değişiminden etkilenir.

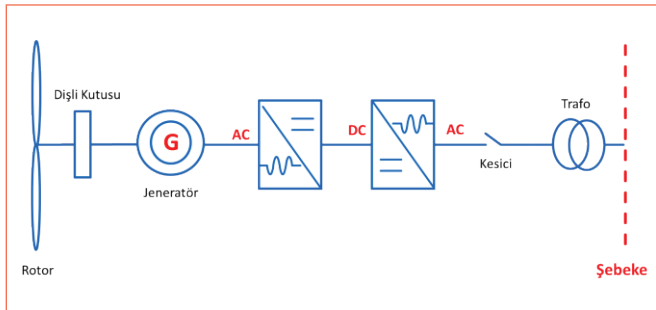
Bununla beraber formülde verilmiş olan aerodinamik verim (C_e) türbin tasarımına özel bir katsayı olup, en genel anlamda yatay eksenli bir rüzgâr türbininin rüzgardaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürebilme oranını ifade eder.

Rüzgâr akışındaki enerjiyi alarak dönen bir disk vasıtasıyla hava akışının momentumunun ve kütesinin korunması prensibinden hareketle, Alman fizikçi Albert Betz 1919 yılında, türbin rotoruna çarparak geçen hava kütesindeki kinetik enerjinin ne kararının mekanik enerjiye dönüştürülebileceğini belirlemiştir. Betz kanunu olarak kabul edilen bu çalışmaya göre, bir rüzgâr türbinin ulaşabileceği maksimum aerodinamik verim %59,3 (16/27)'tür. Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik verimi rüzgâr hızına bağlı olarak değişir, rüzgâr hızına bağlı olarak bir azami seviyeye ulaşır ve tekrar düşmeye başlar. Ancak hiçbir şekilde Betz limiti olan %59,3 değerini geçemezler. Şekil 17'de bir rüzgâr türbinin aerodinamik veriminin (C_e) rüzgâr hızına bağlı değişimi bir örnek rüzgâr türbini için gösterilmiştir.

2.2 Rüzgâr Türbininde Enerji Dönüşümü

Dönen türbin rotorundan üretilen mekanik güç, rotora bağlı jeneratör ile elektriksel güce dönüştürülür. Bir rüzgâr türbininde bu dönüşümü sağlayan ekipmanların konfigürasyonu Şekil 3'te verilmiştir.

Rüzgârın doğrusal hareketi rotorda dairesel harekete dönüştürülerek rotora bağlı dişli kutusunda dönüş hızı artırılır ve dişli kutusuna bağlı jeneratörde mekanik güç elektrik gücüne dönüştürülür. Şemada verilen dişli ku-



Şekil 3. Rüzgâr Türbininde Enerji Dönüşümü

tulu bir türbin modelidir. Bazı türbinlerde dişli kutusu bulunmaz ve dişli kutusu bulunmayan türbinler, dişli kutusunun sağlayacağı hız artışına ihtiyaç duymadan da düşük devirde çalışarak istenilen özelliklerde elektrik üretebilecek çok daha fazla kutuplu jeneratörler kullanır. Her iki tasarımın öne çıkan üstünlükleri vardır; ancak dişli kutulu ve dişli kutusuna sahip olmayan rüzgâr türbini tasarımlarının birbirine karşı genel geçer bir üstünlüğü yoktur.

Şebeke bağlantılı büyük rüzgâr türbinlerinde alternatif akım jeneratörleri kullanılır. Değişken rüzgâr hızlarına paralel olarak rotor hızı ve jeneratör hızı da değişeceğinden, değişken hızlı bir jeneratörün şebeke frekansına eşit ve sabit bir frekansta elektrik üretmesi mümkün olmayacaktır. Bu nedenle değişken frekanslı alternatif akım, inverter yardımıyla doğru akıma ve tekrar alternatif akıma çevrilir. Tekrar alternatif akıma çevrilirken, istenilen şebeke frekansına ayarlanmış olarak çevrilir. Şebeke frekansına eşit gerilim ve frekans değerinde elektrik üreten rüzgâr türbinin enerjisini şebekeye iletilmesi için bu aşamalardan sonra tasarım ve şebeke bağlantı durumuna bağlı olarak trafo ve ilgili diğer devre kesici ve kontrol ve izleme ekipmanına ihtiyacı vardır.

3. RÜZGÂR ÖLÇÜMÜ

Rüzgâr enerjisi santrali projesi geliştirmenin ilk aşamalarından birisi rüzgâr ölçümleridir. Rüzgâr ölçümü sadece rüzgâr türbinine gelen rüzgâr kütesinin enerji içeriğini hesaplamak için değil, aynı zamanda rüzgâr santrali sahası seçimi, türbin yerleşiminin konfigürasyonu ve türbin tipi seçimi gibi önemli aşamalarda da faydalanılan bir çalışmadır.

Bir rüzgâr santralının enerji üretiminin hesaplanması için santraldeki her bir rüzgâr türbininin rotor yüksekliğine gelen rüzgârın bilinerek her bir rüzgâr türbininin enerji üretiminin ayrı ayrı hesaplanması gerekir ancak zaman maliyet ve teknik zorluklardan dolayı her bir rüzgâr türbinin yerinde rüzgâr ölçümü yapmak pratik değildir. Bunun yerine santral içinde belirli konumlarda ve yüksekliklerde ölçülen rüzgâr, çeşitli modellemelerle her türbin konumu ve yüksekliği için hesaplanarak rüzgâr santralinin toplam enerji üretimi hesaplanır.

3.1 Ön Çalışmalar

Rüzgâr santrali kurulacak olan yerin tespitinde ilk aşamada yapılacak çalışma, varsa bölgede yapılmış olan rüzgâr ölç-

çüm verilerinin incelenmesidir. Bununla beraber, günümüzde kullanımı oldukça yaygınlaşmış olan “mesoscale” (orta ölçekli) rüzgâr haritaları da bölgenin rüzgâr karakteristiği ve hatta yaklaşık rüzgâr hızları hakkında da bilgi verecektir. Bölgenin topoğrafyasının da detaylı fiziki haritalar ile önden incelenmesi faydalı olacaktır. Yapılacak olan bu ön çalışma ile, rüzgâr santrali kurulacak sahanın da detaylı bir şekilde incelenmesi gerekir.

Santral sahasında yapılacak yerinde inceleme öncesi rüzgâr türbinlerinin kurulacağı yerler kesin olmasa bile belirlenmeli ve her bir türbin noktası incelenmelidir. Bununla beraber yapılacak diğer önemli ön çalışma da sahanın rüzgâr karakteristiği hakkında daha fazla bilgi edinmeye çalışmaktır. Kuvvetli ve sürekli rüzgârların olduğu bazı bölgelerde rüzgârın bitki örtüsü üzerinde belirgin bir etkisi görülmektedir. Şekil 4'te Söke Ovası'nda sürekli rüzgâra maruz kalan bir ağaçta meydana gelen kalıcı etki görülmektedir.



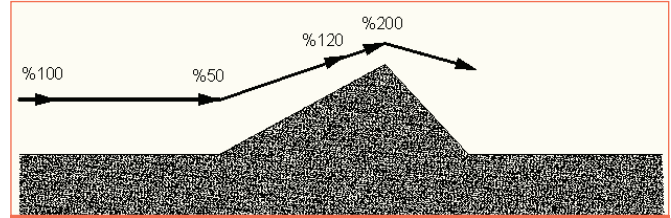
Şekil 4. Rüzgârın Bayraklama ("Flagging") Etkisi

Rüzgârın ağaç üzerinde bıraktığı bu etki bölgedeki rüzgârın şiddeti ve yönünü teyidi bakımından önemlidir. Bununla beraber, bölgede uzun zaman yaşayan insanlar da bölgenin rüzgâr karakteristiğini anlamak için faydalı bilgiler verebilirler. Sahada rüzgâr karakteristiğini anlamaya yardım edecek çalışmaların yanında, rüzgâr profilini etkileyebilecek unsurların ve topografyanın da dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Saha incelemesi esnasında yapılan çalışmalardan en önemlilerinden bir tanesi de rüzgâr ölçüm noktasının veya noktalarının tespit edilmesidir. Rüzgâr ölçüm sistemi konulacak nokta veya noktalar mümkün olduğu kadar sahanın rüzgâr karakteristiğini temsil edecek yerler olmalıdır. Rüzgâr karakteristiğinin kısmi olarak değişiklik gösterebileceği yerlere ölçüm direği konulması, ölçümlerde sapmalara neden olabilir. Sahanın büyüklüğüne göre bir veya birden fazla ölçüm sistemi kurulabilir. Aslında sahanın büyüklüğünden çok, saha içerisinde ne kadar

farklı rüzgâr karakteristiğine sahip alanların bulunduğu önemlidir. Farklı rüzgâr karakteristiklerine sahip alanlarda birden fazla noktada ölçüm yapılması gerekmektedir. Birden fazla noktada ölçüm yapmak sadece daha hassas sonuç alınmasını sağlamakla kalmayıp, santral tasarımı sırasında rüzgâr modellemesinde oluşan sapmaları da azaltacaktır.

Ölçüm noktası seçimi uzmanlık isteyen bir çalışma olup her saha için geçerli olan kuralların uygulanabileceği net bir yöntem yoktur. Ancak ölçüm yapılan noktanın, sahanın rüzgâr profilini en çok temsil eden nokta olması gerekir. Bu nedenle ölçüm sisteminin kurulacağı noktanın, çeşitli sebeplerden dolayı rüzgârın etkisi altında kalmış olan bir nokta olmaması gerekir. Rüzgârı etkileyen başlıca etmenler, yüzey şekilleri ve düşey engeller (ağaçlar, binalar, elektrik direkleri gibi)'dir.



Şekil 5. Bir Tepeye Çarpan Rüzgârın Hızının Yüzdesele Değişimi [3]

Şekil 5'te verilen basitleştirilmiş bir tepe örneğinde, tepeye çarpıp geçen rüzgârın hızındaki değişimler görülmektedir. Buna benzer bir coğrafyada ölçüm sisteminin konulacağı konum, ölçüm sonuçlarının doğruluğu bakımından daha da önem kazanmaktadır.

3.2 Rüzgâr Ölçüm Sistemi

Günümüzde en yaygın kullanılan rüzgâr ölçüm sistemleri, üzerinde çeşitli ölçüm cihazlarının bağlandığı rüzgâr ölçüm direkleridir. Bununla beraber rüzgâr ölçümünde kolaylık sağlayan lazer (LIDAR) ve ses dalgalarıyla (SODAR) rüzgâr ölçümü yapabilen yüksek teknoloji ürünü ölçüm ekipmanları da kullanılmakla beraber, rüzgâr ölçüm direkleri genel kabul görmüş ölçüm ekipmanlarıdır. Rüzgâr ölçümünde ideal yöntem rüzgâr türbininin rotor yüksekliğindeki rüzgâr hızının ölçülmesidir. Ancak çoğu zaman rüzgâr türbinine eşit yükseklikte rüzgâr ölçüm direği kurmak mümkün olmamaktadır.

Şekil 6'da görüleceği gibi en az iki farklı yükseklikte rüzgâr hızı ölçülürse, üçüncü bir yükseklikteki rüzgârın hızı hesaplanabilir. Bir bölgedeki rüzgâr hızı yerden daha yükseğe çıkıldıkça artar, bu artışa neden olan en önemli



Şekil 6. Farklı Yüksekliklerde Ölçülen Rüzgâr Hızlarından İstenilen Yükseklikteki Rüzgâr Hızının Hesaplanması [4]

- Rüzgâr hızı
- Rüzgâr yönü
- Sıcaklık
- Nem
- Basınç

Şekil 7'deki basitleştirilmiş görselde, bir rüzgâr ölçüm direğinde yer alan ekipmanların şematik gösterimi yer almaktadır.

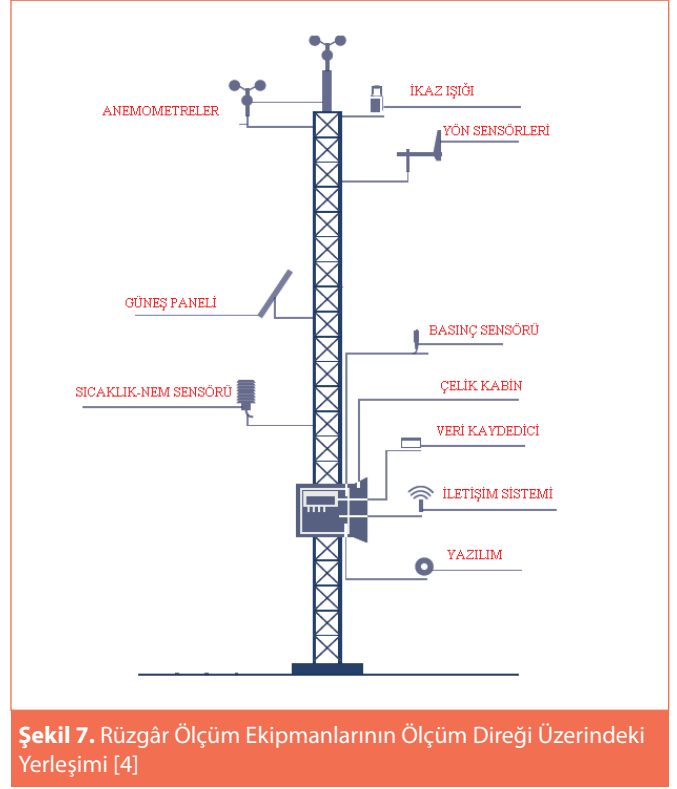
Bir rüzgâr santralının yıllık enerji üretimini hesaplamak için teoride en az bir yıl süre ile rüzgâr ölçümü yapmak gerekir. Ancak rüzgâr rejimindeki değişimler dikkate alındığında en az iki yıl ölçüm yapmak ve yapılmış olan iki yıllık ölçümü bölgeye yakın yerlerde yapılmış uzun dönem verilerle karşılaştırıp enterpole etmek çok daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır.

Ölçüm sensörlerinden gelen sinyaller, ölçüm sistemi belleğine saniyelik olarak iletilir ve saniyelik olarak iletilen veriler bellekte onar dakikalık kayıtlar halinde depolanır. Ancak bellek her onar dakikalık kaydı, ilgili on dakikalık kayıt periyoduna ait olan altı yüz (on dakikadaki saniye sayısı) verinin minimum, maksimum, ortalama, standart

etkenler, yüzey pürüzlülüğü, düşey engeller ve yüzey şekillerinin rüzgârı yavaşlatma etkisinin ortadan kalkmasıdır. Aslında iki farklı yükseklikte rüzgâr hızının ölçümü bir bakıma zemine yakın seviyelerde rüzgârın ne kadar engellendiğinin de bir göstergesidir.

Rüzgâr ölçüm direkleri, ihtiyaç ve istenilen ölçüm yüksekliği dikkate alınarak boru veya kafes tipi olarak tercih edilebilir. Her iki durumda da ana gaye, ölçüm sensörlerinin istenilen yükseklikte sabitlenerek uzun dönem ölçüm verilerinin toplanmasıdır. Günümüzde artan yükseklik ihtiyacı ile, daha çok kafes tipi rüzgâr ölçüm direkleri kullanılmaktadır.

Bir rüzgâr ölçüm sisteminde temel olarak aşağıdaki veriler ölçülür ve kaydedilir:



Şekil 7. Rüzgâr Ölçüm Ekipmanlarının Ölçüm Direği Üzerindeki Yerleşimi [4]

sapma değerlerini hesaplayarak kaydeder. Böylelikle her parametre için kaydedilen onar dakikalık veri, ilgili parametrenin on dakikalık periyod içindeki değişimiyle ilgili bilgiyi de muhteva eder.

Günümüzde giderek yaygınlaşan diğer ölçüm sistemleri de LIDAR ("Light Detection and Ranging") ve SODAR ("Sonic Detection and Ranging") sistemleridir.

LIDAR, lazer ışınları ile rüzgâr ölçümü yapabilen bir sistemdir. Bu sistemde, uygun özellikteki bir kızılötesi (infrared) radyasyon demeti havadaki doğal aerosoller (toz partikülleri, polenler, zerrecikler) aydınlatır ve bunun sonucunda az miktarda ışık LIDAR sisteminin alıcısına geri yansır. Işın doğrultusundaki partikül hareketleri, ışığın frekansı ile Doppler etkisi arasında değişimlere yol açar.

Elde edilen frekans değişimi hassas bir şekilde ölçülerek ve ölçülen frekans değişimleri analiz edilerek partiküllerin hızı belirlenir. Rüzgârın yönünün tam olarak ölçülmesi için ayrı bir sinyal gönderilir [5].

SODAR sisteminin çalışma prensibi sonar sistemlerinin çalışmasına benzer. SODAR sistemi, ses darbeleri yayarak ve geri dönüş sinyallerini dinleyerek çalışır. Genelde dönüş sinyalinin yoğunluk ve Doppler frekansı değişimi, analiz edilerek rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve türbülansın be-



Şekil 8. LIDAR ve SODAR Sistemleri

lirlenmesinde kullanılır. Şekil 8'de ölçüm çalışmaları için kullanılan LIDAR ve SODAR sistemleri görülmektedir

LIDAR ve SODAR sistemleri kullanımı oldukça pratik ve rüzgâr ölçüm direğine olan ihtiyacı tamamen ortadan kaldıracak sistemlerdir. Özellikle ölçüm direği kurulumunun zor olduğu arazilerde faydaları ön plana çıkmaktadır. Ancak bazı sahalarda ölçüm hassasiyetleri klasik rüzgâr ölçüm sistemlerinden oldukça düşük olabilmektedir.

4. RÜZGÂRI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

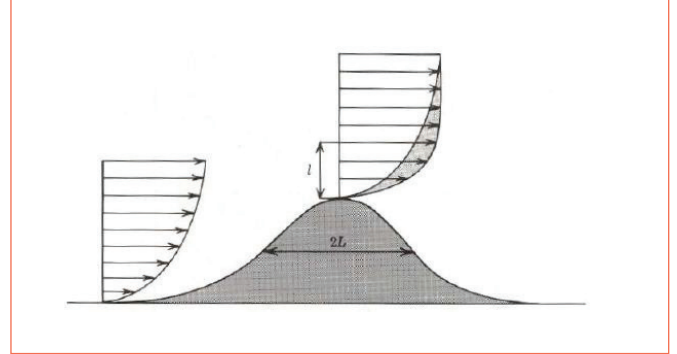
Hareket eden hava kütleleri pek çok etkiye maruz kalır ancak bu çalışmada yalnızca rüzgâr santrali bazında rüzgârı etkileyen faktörler incelenmiştir. Bir rüzgâr santrali tasarlanırken, her bir türbinin belirlenmiş işletme koşullarında maksimum enerji üretmesini sağlamak ana hedeflerden biridir. Bir rüzgâr türbininin enerji üretimi de başta rüzgâr hızı olmak üzere pek çok değişken ile doğrudan bağlantılıdır. Bir rüzgâr santrali sahasında ölçülmüş olan rüzgârın bazı özelliklerinin, santral sahasındaki türbin noktasına ulaşana kadar çeşitli etmenler tarafından değişimlere uğramasına neden olabilir.

4.1 Topografyanın ve Zemin Yüzeyinin Rüzgâra Etkisi

Belli bir noktada ölçülen rüzgârın karakteristiği, yüzeyin şekline ve yüzeyde yer alan engellerden dolayı değişir. Bu nedenle bir rüzgâr santrali tasarımı yapılırken, santral sahasındaki rüzgârı etkileyebilecek her şey dikkate alınmaktadır.

4.1.1 Yüzey Şekillerinin Rüzgâra Etkisi

Arazideki engebeler, rüzgâr hızlarını aşağı veya yukarı yönlü olarak değiştirebilir. Şekil 9'da görüleceği üzere, düz bir ovardan tepeye doğru esen rüzgâr bir tepeye yaklaştığında tepeye yakın kısımlarda rüzgâr hızında azalmalar görülür ancak tepenin doruk noktasına ulaştığında, aynı miktardaki hava kütlesi daha dar bir kesit-



Şekil 9. Rüzgârın Tepe Üzerinden Geçerken Uğradığı Değişim [6]

ten geçmeye zorlanır ve akış çizgileri sıkışır. Bu da rüzgâr hızının tepenin doruk noktasında artmasına neden olur. Zeminden olan yükseklik arttıkça bu etkilerin azaldığı da Şekil 9'da görülmektedir.

Rüzgâr bu tepenin sağ yamacına ulaştığında ise rüzgâr hızında ciddi bir düşüş olur.

4.1.2 Zemin Pürüzlülüğünün Rüzgâra Etkisi

Zemin pürüzlülüğü, zemin yapısının rüzgâr hızına olan etkisini belirtmek için kullanılan bir terimdir. Yüze pürüzlülüğü yüksek olan bir yerde, yüzeyle hareket halindeki hava kütlelerinin arasındaki sürtünmeden dolayı hava kütlelerinin hızı düşer. Bir zeminin pürüzlülüğü, üzerindeki pürüzlülük etmenlerinin boyut ve yüzey üzerindeki dağılımı ile belirlenir. Yüze pürüzlülüğü, pürüzlülük sınıfı veya pürüzlülük uzunluğu ile ifade edilen bir büyüklüktür. Pürüzlülük uzunluğu terimi, rüzgâr hızının teorik olarak sıfır olması gereken zeminden yukarı doğru olan mesafe olarak tanımlanabilir. Pürüzlülük sınıfı ise belli bir aralıktaki pürüzlülük uzunlukları için yapılan sınıflandırmayı temsil eder. Bir yüzeyin pürüzlülük uzunluğu ve buna bağlı olan pürüzlülük sınıfı yüksekse o yüzeyden geçen rüzgâr hızında daha fazla azalma olur. Ormanlar ve şehirler rüzgâr hızını dikkate değer bir oranda düşüren pürüzlülük etmenleridir. Bununla beraber asfalt yollar, havaalanları su yüzeyleri gibi düzgün yüzeye sahip olan yerler düşük pürüzlülüğe sahip alanlardır ve bu alanlarda yüzeyden kaynaklı rüzgâr hızı düşüşü çok az olur. Su yüzeyinin pürüzlülüğü asfalt bir yüzeyden daha azdır. Uzun otlar, çalılar ve fundalıklar ise rüzgâr hızını dikkate değer oranda azaltmaktadır.

Sadece pürüzlülüğe ve yüksekliğe bağlı olarak, ölçülen bir yükseklikteki rüzgâr hızından, yüksekliği bilinen ancak rüzgâr hızı bilinmeyen bir seviyedeki rüzgâr hızı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$v = \frac{v_{ref} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (2)$$

Burada,

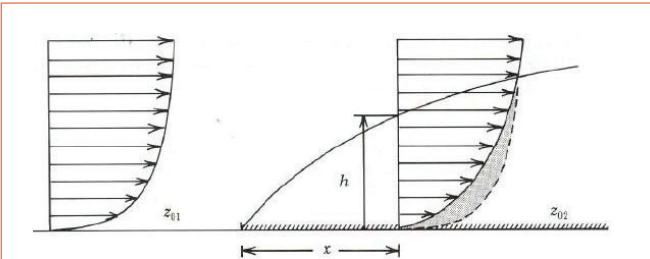
- v : h yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/s)
 v_{ref} : Yüksekliği ve rüzgâr hızı bilinen noktadaki rüzgâr hızı (m/s)
 h : Zeminden yükseklik (m)
 h_{ref} : Rüzgâr hızı bilinen yükseklik (m)
 z_0 : Pürüzlülük uzunluğu (m)

Tablo 1'de farklı yüzeylerin pürüzlülük sınıfı ve pürüzlülük uzunluğuna ilişkin değerler verilmiştir.

Tablo 1. Bazı Zemin Türlerine Göre Pürüzlülük Uzunluğu ve Pürüzlülük Sınıfı Değerleri [6]

Zemin Türü	Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Uzunluğu (z_0) (m)
Su yüzeyi	0	0,0002
Su ve toprak parçası karışımı düz alan	0,5	0,0024
Açık çiftlik alanı	1	0,03
Yoğun bitki örtüsüne sahip çiftlik alanı	2,5	0,2
Köy, kasaba, orman	3	0,4
Büyük kasabalar, şehirler	3,5	0,8
Yüksek binalara sahip büyük şehirler	4	1,6

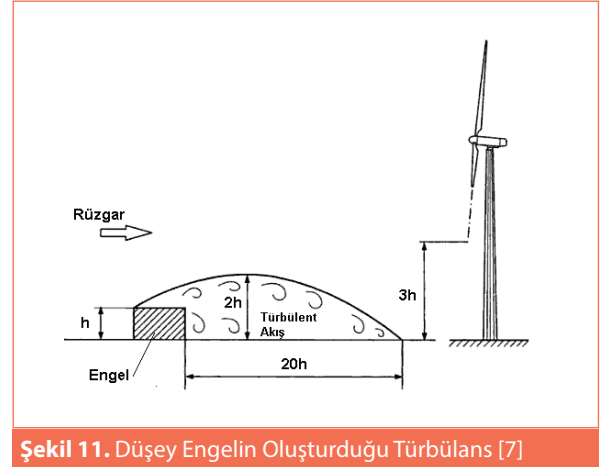
Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili bir diğer önemli konu ise, rüzgâr farklı pürüzlülük değerlerine sahip alanlardan geçerken maruz kaldığı değişimdir. Düşük pürüzlülük değerlerine sahip bir yüzeyden, yüksek pürüzlülük değerlerine sahip bir yüzeye geçen rüzgârın hızında Şekil 10'da görüldüğü gibi belli bir yükseklik değerine kadar azalma olur.



Şekil 10. Rüzgâr Hızının Farklı Pürüzlülüğe Sahip Alanlardaki Değişimi [6]

4.1.3 Düşey Engellerin Rüzgâra Etkisi

Düz bir arazide yer alan engeller rüzgârın akışına olumsuz yönde etki ederler ve akışı bozarlar. Bunun sonucunda araziye konumlandırılmış olan bir rüzgâr türbininin enerji üretimi olumsuz yönde etkilenir. Düz bir arazide akışı bozacak engelleri ağaç, çalı, kaya gibi doğal engeller ve bina, duvar ve diğer insan yapımı engeller olarak sınıflandırılırlar. Rüzgârın akışı engellerin oluşturduğu türbülans ile bozulur. Aşağıdaki şekilde bir engelin oluşturduğu türbülans alanının boyutları, engel boyuna kıyaslanarak verilmiştir.



Şekil 11. Düşey Engelin Oluşturduğu Türbülans [7]

Engelin arka tarafında oluşan türbülanslı alanın yüksekliği, engel yüksekliğinin iki katına çıkabilmekte ve bu alanın uzunluğu engel yüksekliğinin yirmi katı olabilmektedir. Engelin bu etkisinden kaçınmak için türbin rotoru en az engelin yüksekliğinin üç katına konumlandırılmalı ve mümkün olduğu kadar, türbin yeri engelden uzak olmalıdır [7].

Yüzey pürüzlülüğü ile düşey engel tanımlamaları çoğu zaman rüzgâr santrali tasarımı sırasında birbirinin içine girer. Sahadaki cisim kümelerinin düşey engel mi yoksa saha pürüzlülüğünü belirleyecek cisimler mi olduğuna karar vermek oldukça güçtür. Türbinlere 1000m'den daha yakın, yüksekliği türbin göbek yüksekliğinin ¼'ünden daha fazla olan cisimler, düşey engel olarak kabul edilmelidirler [7].

Düşey engellerin yükseklikleri, proje yapılacak olan sahada yapılan görsel incelemelere dayanılarak belirlenir. Bu ölçümün etkinliği tamamen projeyi geliştiren kişinin tecrübesine bağlıdır. Aynı zamanda saha ziyareti yapılırken düşey engellerin koordinatları da kayıt altına alınmalıdır. Daha sonra harita üzerinden mesafeler ölçülebilir. Eğer

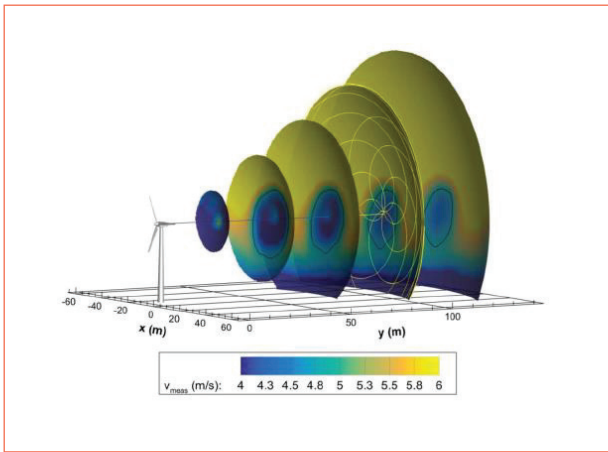
bir düşey engelin yüksekliği türbin göbek yüksekliğinin $\frac{1}{4}$ 'ünden az ve türbine 1000m'den daha uzak ise, bu düşey engelin hesaplama sonuçları üzerine nerdeyse hiçbir etkisi bulunmadığından, bu tip düşey engeller ihmal edilebilir niteliktedir.

Ancak bazı düşey engeller yüzey pürüzlülüğü ögesi olarak kabul edilirler. Düşey engelin boyut ve konumundan başka rüzgâr geçirgenliği (porozitesi) de dikkate alınmalıdır.

4.1.4 Türbinlerin Gölgeleme Etkisi

Enerjinin korunumu kanununa göre, rüzgârdan elektrik enerjisi üreten bir türbine giren rüzgârın enerjisi türbinden çıkan rüzgârın enerjisinden daha az olmalıdır. Bundan dolayı rüzgâr türbininin arkasındaki rüzgârın enerjisi türbine giren rüzgârın enerjisinden daha az olacaktır. Türbini terk eden, türbinin arkasındaki kuyruk rüzgâr, türbülanslı bir karaktere sahip olacak ve hızı daha düşük olacaktır. Bir rüzgâr santralinde türbinlerin birbirini bu şekilde etkilemesinden dolayı verim düşmesine neden olan bu etkiye, gölgeleme etkisi veya bazı kaynaklarda perdeleme etkisi denir. Yabancı kaynaklardaki tanımlamalar ise "Wake Effect" veya "Park Effect" şeklindedir. Şekil 12'de, rüzgârın türbinden geçtikten sonra maruz kaldığı gölgeleme etkisi, görselleştirilerek verilmiştir. Rüzgâr hızındaki düşüşün etkisi, türbini geçtikten sonra oldukça uzun bir mesafede ve genişleyerek devam etmektedir.

Bu nedenle rüzgâr türbinleri, gölgeleme etkisini asgari seviyede tutacak şekilde birbirinden uzak şekilde konumlandırılırlar.



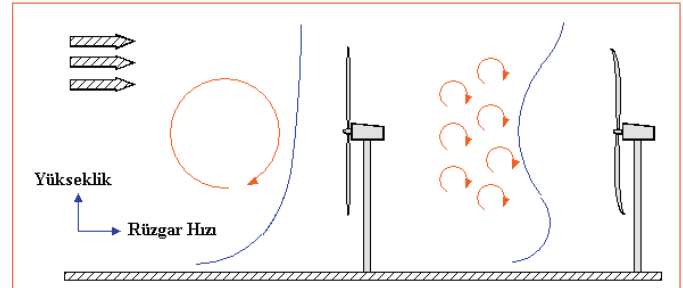
Şekil 12. Rüzgâr Türbininin Oluşturduğu Gölgeleme Etkisi [8]

Gölgeleme etkisinin rüzgâr santrali performansı üzerine olumsuz etkileri:

- Türbülans yoğunluğunu arttırması,
- Ortalama rüzgâr hızını kısmi olarak düşürmesi,
- Rüzgâr hızında simetrik olmayan düşüşlere neden olması,
- Bu asimetrik rüzgâr hızı düşüşlerinden dolayı türbinlerde yüksek miktarda mekanik yüklerin oluşması olarak sıralanabilir.

Türbülans

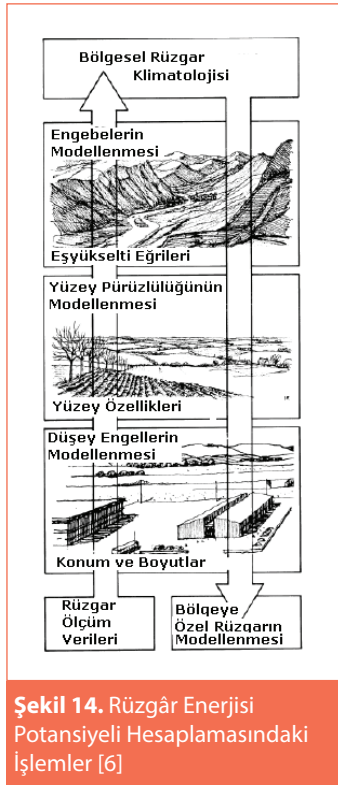
Yüzey şekillerinin ve düşey engellerin rüzgâr akışına olumsuz etkisi sadece rüzgâr hızını düşürmeleri değildir. Hız değişiminin yanında türbülansa da neden olurlar. Türbülans en genel anlamıyla düzenli olmayan hava akışıdır. Türbülans, hava akışını bozup üretim kayıplarına neden olmasının yanısıra, türbinlerde ciddi mekanik arızalara da neden olmaktadır. Şekil 13'te türbülansın dikey rüzgâr profili ve türbin üzerindeki etkileri basitleştirilmiş olarak gösterilmiştir.



Şekil 13. Türbülansın Düşey Rüzgâr Profiline Etkisi ve Türbin Üzerinde Oluşturduğu Düzensiz Mekanik Yükler [3]

5. RÜZGÂR ANALİZİ VE MODELLEME

Burada bahsedilen bütün çalışmaların temelinde tek amacı türbinlerin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını belirlenerek yıllık enerji üretiminin hesaplanmasıdır. Bu hesaplamalar oldukça karışık ve uzun olduğundan, rüzgâr enerjisi üretim analizleri için özel olarak geliştirilmiş yazılımlardan faydalanılır. Rüzgâr ve atmosferik koşullar, doğaları gereği anlık değişebilen parametrelerdir ve bu değişimlerden dolayı sürekli ölçülen hava koşullarına ait oldukça fazla sayıda veri kaydedilir. Bu nedenle rüzgâr enerjisi hesaplamalarında kullanılan yazılımlar akış modellemesi ve rüzgâr analizi yapmanın yanı sıra çok fazla miktardaki rüzgâr verisinin istatistiksel analizini de



Şekil 14. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Hesaplamasındaki İşlemler [6]

yapmak zorundadır. Şekil 14'te bu hesaplamaların işlem sırası ve hesaba katılan parametreler genel hatlarıyla gösterilmiştir.

5.1 Saha Zemin Haritaları

Ölçülmüş olan rüzgârın saha zemininden kaynaklı uğrayacağı değişimlerin hesaplanabilmesi için, santral sahası ve santral sahasının yakın çevresi için gerekli bilgileri içeren çeşitli haritalar oluşturulur.

Topografik Harita:

Topografik sayısal haritanın hassasiyeti rüzgâr analizlerinin hassasiyetini etkileyeceğinden, özellikle engebeli sahalar için hassas topografik haritaların kullanılması önemlidir.

Yüzey Pürüzlülüğü:

Santral sahası ve etrafındaki bütün alanların pürüzlülük uzunlukları veya pürüzlülük sınıfları rüzgâr analizi hesaplamaları için bir girdidir. Bundan dolayı da bahse konu bütün alanların pürüzlülük değerlerinin olduğu bir pürüzlülük haritası hazırlanır.

Topografik haritalarlar ve pürüzlülük haritaları pek çok bölge için günümüzde sayısallaştırılmış olarak temin edilebilmektedir.

Ancak temin edilen sayısal haritaların hassasiyetinin ve doğruluğunun sınanması gerekir.

Düşey Engeller:

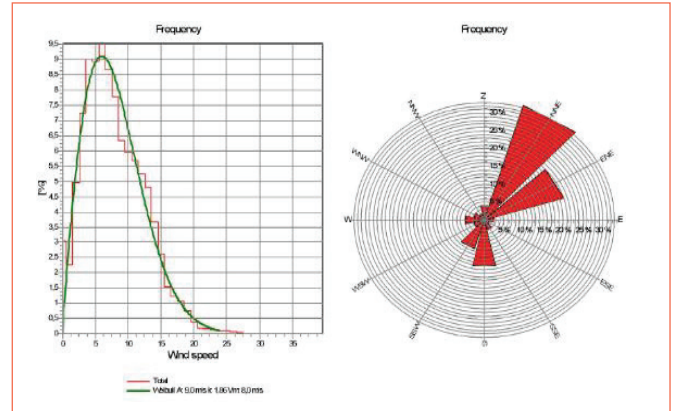
Santral sahası ve yakın çevresindeki düşey engellerin tamamı koordinatları, en ve boy değerleri ile, hesaplamalarda kullanılacak yazılımda işlenir.

Bazı durumlarda nelerin düşey engel, nelerin pürüzlülük faktörü olduğunu kestirmek kolay değildir. Örneğin bir bölgede bulunan bir veya birkaç tane ağaç pürüzlülük etmeni olarak tanımlanabilirken, sık ağaçlardan oluşan bir koru düşey engel sınıfına girebilmektedir.

5.2 Rüzgâr Analizleri

5.2.1 Veri Temizleme

Ölçüm sisteminde veriler düzenli bir şekilde kaydedilir ancak, çok çeşitli nedenlerden dolayı (teknik arızalar, hatalı sensör montajı, donma, yıldırım veya diğer etkenler gibi) veriler düzenli kaydedilemez veya sensörler hatalı ölçüm yaparlar. Bu nedenle öncelikle hatalı veya boş verilerin temizlenerek, ölçüm sisteminin gerçek ölçüm sonuçlarının belirlenmesi gerekir.



Şekil 15. Temizlenmiş Rüzgâr Verileri ile Oluşturulmuş Weibull Dağılımı ve Rüzgâr Gülü Grafikleri

5.2.2 Uzun Dönem Veri Korelasyonu

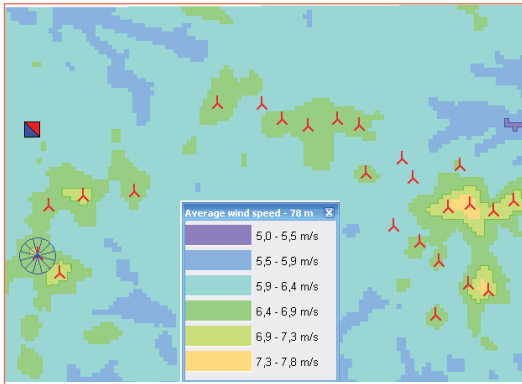
Rüzgâr ölçümleri yıllık bazda değerlendirilir ve ideal durumlarda bir bölgenin yıllık ortalama rüzgâr hızı aynı olması gerekir. Ancak çoğu zaman yıllara sair ortalama rüzgâr hızlarında uzun dönem değişimler veya bölgenin yıllık rüzgâr hız ortalamasına uymayan yıllar olduğu görülür. Bundan dolayı kısa dönem rüzgâr ölçümleri, uzun dönem çalışacak bir rüzgâr santralinin ömrü boyunca yapacağı enerji üretimini doğruya en yakın şekilde hesap-

lamak için yeterli olmayabilir. Bu nedenle rüzgâr santrali sahasına yakın bölgelerde ölçülmüş olan uzun dönem rüzgâr verileri çeşitli istatistik yöntemlerle kıyaslanır ve verilerdeki benzerliklerden, kısa dönem rüzgâr verilerinin uzun dönem eğilimleri hesaplanarak, uzun dönem için daha güvenilir rüzgâr verileri hesaplanır

5.2.3 Akış Modelleme

Hesaplanan uzun dönem rüzgâr verileri, nümerik veya CFD ("Computational Fluid Dynamics"- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemleri ile rüzgâra etki eden bütün değişkenlerin hesaba katılarak santral sahası içindeki rüzgârın hız ve yön değişimleri rüzgâr hızlarının yükseklikle beraber değişim karakterini, çeşitli sebeplerden oluşan türbülans gibi hesaplama sonuçları ortaya konur. Bütün bu hesaplamaların neticesinde santral sahasına özel iklim koşulları belirlenmiş olur. Şekil 16'da Türkiye'de kurulması planlanan bir rüzgâr santrali için hesaplanmış rüzgâr haritası görülmektedir.

Sahanın rüzgâr analizi yapıldıktan sonra, Şekil 16'da ve rildiği gibi zeminden istenilen yükseklik seviyesindeki rüzgâr hızı veya spesifik üretim değerlerini gösteren haritalar oluşturulabilir.



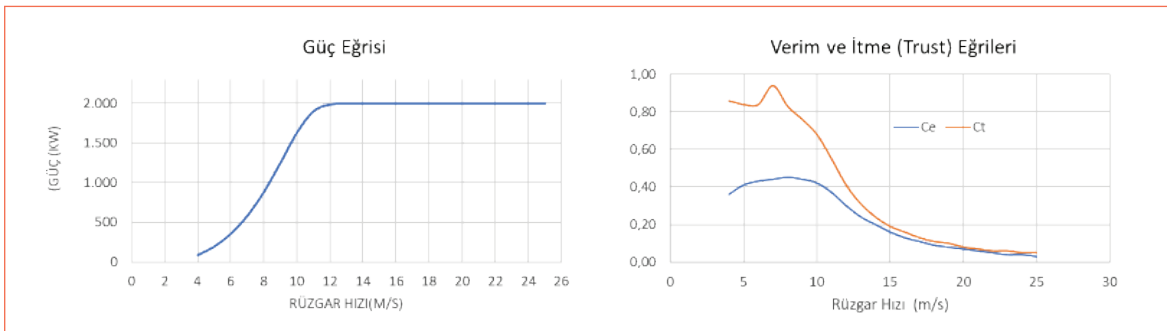
Şekil 16. Rüzgâr Kaynak Haritası

5.3 Türbin Seçimi ve Yerleşimi

Sahanın rüzgâr profili hesaplandıktan sonra, türbin yerleşimi için uygun olan yerler tespit edilir. Rüzgâr hızlarının en yüksek olduğu yerler türbin kurulumu için öncelikli değerlendirilecek yerlerdir. Ancak rüzgâr türbini noktalarının seçiminde dikkat edilecek diğer unsurlar da vardır. Bunlardan bir tanesi de türbinlerin birbirine olan mesafesidir. Türbin mesafeleri hem türbinlerin birbirine olan gölgeleme etkisinin büyüklüğü bakımından hem de türbin kaynaklı türbülans seviyesi bakımından önemlidir. Bundan dolayı türbinler, türbin kaynaklı rüzgâr hızı düşüşlerinden ve türbin kaynaklı türbülansın en az seviyede etkilenerek şekilde sahaya konumlandırılırlar. Bununla beraber sahada diğer unsurlardan dolayı oluşan türbülanslı alanlar, türbin montajı için problem çıkaracak alanlar ve sahadaki düşey engeller gibi unsurlar da türbin yerleşiminde dikkate alınır. Sahaya konulacak rüzgâr türbinlerinin de saha karakteristiklerine uygun rüzgâr türbinleri olması gerekmektedir. Bunun için IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu), ortalama rüzgâr hızı, türbülans yoğunluğu, darbe rüzgâr hızı gibi verilere göre rüzgâr santrali kurulacak alanların sınıflandırılmasında kullanılan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemle farklı sahalar için geliştirilen rüzgâr türbinleri de sınıflandırılmış olup, rüzgâr türbini seçimi yapılırken öncelikle sahanın IEC rüzgâr sınıfı belirlenir ve sahaya uygun aynı IEC rüzgâr sınıfında türbinler arasından en uygun türbin seçilir.

5.4 Enerji Üretim Hesaplamaları

Türbinlerin rotor yüksekliklerindeki rüzgâr hızları ve hava yoğunluğu bilindikten sonra enerji üretimini hesaplamak için gerekli diğer değişken, rüzgâr türbininin verimidir. 2 MW gücündeki bir rüzgâr türbininin verim ve güç eğrisi grafikleri Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. 2 MW Gücündeki Bir Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi ve Verim Grafikleri

Şekil 17'de türbin verimi C_e ile gösterilmiştir ve grafikten de anlaşılacağı gibi bir türbinin verimi rüzgâr hızına bağlıdır. Bununla beraber şekilde, rüzgâr hızından dolayı oluşan itmenin mertebesi ile alakalı olan itme eğrisi (C_t) de verilmiştir. Enerji üretim hesabında her bir rüzgâr türbininin, gelen serbest rüzgâra bağlı olarak üretileceği enerji ve her bir rüzgâr türbininin diğer türbinlerin gölgeleme etkisi altında üreteceği enerjideki düşüş de hesaplanır. İtme eğrisindeki katsayıdan hem rotora çarpan rüzgârdan dolayı oluşan itme kuvveti hem de türbin rotorunu terk eden rüzgâr hızındaki azalma hesaplanabilir.

5.4.1 Belirsizlik ve Kayıplar

Rüzgâr santralının yıllık enerji üretim hesaplamasında santralin tasarımından dolayı kaçınılmayacak kayıplar ve olası diğer kayıplar da dikkate alınarak net enerji üretiminin hesaplanması gerekir. Bu kayıpların başlıcaları elektriksel kayıplar, rüzgâr türbinlerinin işletilmesi kaynaklı kayıplar, emreamadelik, buzlanma, bakım ve aşırı rüzgâr kaynaklı kayıplardır.

Rüzgârdan elde edilebilecek olan elektrik enerjisinin miktarı hesaplanırken ideal şartlarda üretilebilecek enerjiden azalmalara sebep olacak olan bütün bu etmenler dikkate alınır. Ancak buna rağmen yine de rüzgâr ölçümünden enerji üretim hesabına kadar ele alınan aşamalarda mutlaka belirsizlikler vardır. Örneğin rüzgâr ölçüm verileri, uzun dönem rüzgâr korelasyonu saha topografisinin ve pürüzsüzlüğünün tanımlanma şekli, rüzgâr türbininin güç eğrisi ve hatta enerji üretim hesaplamalarında kullanılan yöntemler bile belirsizlik içerir. Çeşitli matematiksel yöntemlerle bu birbirinden bağımsız belirsizliklerden toplam bir belirsizlik hesaplanıp, toplam belirsizliğin enerji üretim hesaplama sonuçları üzerine olan etkisi analiz edilir. Daha geniş bir ifadeyle, rüzgâr santralının hesaplanmış olan enerji üretim değerlerinden daha fazla enerji üretme olasılıkları hesaplanarak, enerji üretim miktarının, daha sonra yapılacak olan finansal fizibiliteye etkisi daha detaylı şekilde incelenir

6. SONUÇ

Rüzgâr enerjisi geçtiğimiz yirmi yılda büyük bir gelişim göstermiş olup, günümüzde üretilen enerjinin maliyeti ve konvansiyonel enerji üretim santrallerinden daha avantajlı hale gelmeye başlamıştır. Bu gelişimle beraber, rüzgâr enerjisi ülkemizde ve dünyada hatırı sayılır bir endüstri haline gelmiştir. Artan rüzgâr enerjisi santralleri ile, rüzgâr santrallerinin kapasiteleri de artmıştır. Buna paralel olarak, artan yatırım hacimleri ve artan rekabet, rüzgâr enerjisinden elde edilecek enerji maliyetinin doğru hesaplanması daha önemli hale getirmiştir.

Enerji maliyetinin en önemli girdilerinden birisi de enerji üretim miktarı olduğundan, bir rüzgâr santralının tasarımı öncesinde yapılacak bütün teknik çalışmalarda gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek yapılması planlanan rüzgâr santrali yatırımlarının ekonomikliği bakımından hayati öneme sahiptir. Rüzgâr santrali sahasının seçimi, rüzgâr ölçümü ve rüzgâr santrali tasarımı son derece karmaşık, itina, tecrübe ve bilgi birikimi gerektiren süreçlerdir. Bu yazının amacı da rüzgâr enerjisi ve rüzgâr santrali tasarımı ile ilgilenen ve ilgilenecek teknik birikim sahibi kişilere yararlı olabilecek, konu ile ilgili özet bilgi verilmesidir.

KAYNAKÇA

1. http://www.dynamicflight.com/aerodynamics/aero_force/, (son erişim tarihi 12.05.2021)
2. **Martin O. L. Hansen**, 2008 "Aerodynamics of Wind Turbines"
3. **Durak M., Özer S.** 2008 "Rüzgâr Enerjisi Teori ve Uygulama"
4. <https://www.ammonit.com>(son erişim tarihi 12.05.2021)
5. **Harris ve Locker** 2007 Smith, D.; Harris, M.; Ciffey, A.; Mikkelsen, T.; Joergensen, H.; Mann, J.; Danielian, R. "Wind LIDAR Evaluation at the Danish Wind Test Site in Høvsøre" EWEA Avrupa Rüzgâr Enerjisi Konferansı, Londra, 2004
6. **Nielsen, P.**, 2008 "WindPRO 2.6 User Guide" EMD International
7. **E. Hau**, 2006 "Wind Turbine, Fundamentals, Technologies, Application, Economics,"
8. <https://www.energy.gov/>(son erişim tarihi 12.05.2021)