

Rüzgarın Gücü

Bölüm I - Rüzgar Enerjisinin Kaynağı

Tüm yenilenebilir enerjilerin kaynağı esas olarak güneştir. Gelgit ve Jeotermal enerjisi bu durumun dışındadır.

Güneşten dünyaya ulaşan enerjinin gücü toplam $1,74 \times 10^{14}$ kW'dır ve bu enerji gücü çeşitli şekillerde yeryüzüne dağılmaktadır. Başka bir deyişle, yeryüzünün her bir noktası ortalama olarak her an güneşten 1.000 watt gücünde enerji alır. Bu enerjinin yaklaşık % 1-2'si rüzgar enerjisine dönüşmektedir. (Türkiye'nin kurulu gücü ise yaklaşık $3,8 \times 10^7$ kW'dır.)

Dünya rüzgar enerji potansiyelinin, 50° kuzey ve güney enlemleri arasındaki alanda 26.000 TWh/yıl olduğu ve ekonomik ve diğer nedenlerden dolayı 9.000 TWh/yıl kapasitenin kullanılabilir olduğu tahmin edilmektedir.

Yine yapılan çalışmalara göre, Dünya karasal alanları toplamının %27'sinin (30 milyon km²) yıllık ortalama 5.1 m/s'den daha yüksek rüzgar hızının etkisi altında kaldığı hesaplanmaktadır. Bu rüzgar enerjisinden teknik olarak yararlanma imkanının olabileceği varsayımı ve 10 MW/km² üretim kapasitesi ile 300.000 GW kurulu güce sahip olunabileceği teorik olarak hesaplanabilmektedir.

Rüzgar Nasıl Oluşur?

Rüzgar, güneş enerjisinin dönüşmüş bir biçimidir. Rüzgarlar, güneşin atmosfer kütesine eşit olmayan biçimde yaymış olduğu ısı, yeryüzünün amorfik coğrafi yapısı ve dünyanın kendi etrafında dönmesi sonucu oluşurlar.

Karalar, denizler ve havaküre farklı özgül ısılarla dolayısıyla farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Sıcaklık dağılımı, coğrafi ve çevresel koşullara bağlıdır. Yerkürede ortaya çıkan sıcaklık ve buna bağlı basınç farklılıkları, rüzgarın oluşmasına neden olur.

Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava, "rüzgar" olarak isimlendirilmektedir.

Ekvator ve çevresi (0 derece enlemi) güneş ışınlarının yer yüzeyine geliş açılarındaki farklılıkları nedeniyle, güneş tarafından diğer enlemlere göre daha çok ısıtılır. Farklı ısınma ve farklı sıcaklık derecesi nedeniyle hava dolaşimleri başlamış olur. Sıcak hava, soğuk havadan daha hafiftir. Isınma sonucunda sıcak hava yukarıya doğru yükselir. Bu yükselme, yaklaşık olarak 10 km yüksekliğe kadar sürer.

Yükselen hava bu yükseklikte kuzeye ve güneye doğru ayrılır. Eğer yer küre dönmemiş olsa idi, yükselen hava basit olarak kuzey ve güney kutuplara gider ve kutuplarda aşağılara çöker, tekrar ekvatora doğru hareket ederek sürekli çevrimine devam ederdi.

Dünya Çevresinde Rüzgar Akımları

Hareket halindeki hava kütlesi, dünyanın dönüşünden dolayı kuzey yarım kürede sağa, güney yarım kürede sola doğru sapar. Sapmaya neden olan kuvvete “coriolis kuvveti”denir.

Hava kütleleri ekvatorunda ısınarak yukarıya doğru hareket ederler. Belli bir yükseklikten sonra, kuzeye ve güneye doğru hareketlerine devam ederler. Her iki kürede 30 derece enlemlerde “coriolis kuvveti” olarak isimlendirilen bir kuvvet vektörü, hava kütlelerinin daha yüksek enlemlere hareketini önleyerek kuzeye ve güneye doğru hareket etmesine neden olur.

Bu şekilde oluşan rüzgara da “jeostrofik rüzgar” denir. Aslında jeostrofik rüzgar, basınç gradyanı ve coriolis kuvveti arasındaki dengeden oluşan ve yeryüzeyi ile etkileşmeyen kuramsal bir rüzgardır. Bu rüzgar izobar'lara paraleldir.

Gerçekte coriolis kuvveti bir kuvvet değildir. Yalnızca dünyadaki belli bir yerdeki hava parselinin yatay olarak hareketine bir bakış açısı sağlar. Basınç gradyanları arasındaki akış, asıl rüzgarın hareket kuvvetidir.

Hava kütleleri yüksek basınç alanlarından dolayı tekrar aşağı seviyelere doğru inmeye başlarlar. Kutuplarda da havanın daha soğuk olmasından dolayı yüksek basınç alanları oluşur.

Ekvatorundan kutuplara doğru farklılaşan ısı dağılımı nedeniyle oluşan global rüzgar akımları, dünyanın kendi yörüngesinde dönmesi sonucu meydana gelen “Coriolis Kuvveti” nedeniyle yukarıdaki belli hakim rotaları meydana getirmektedir.

Bu rüzgar rotaları dominant rotalardır ve yeryüzü şekillerinden bağımsız olup 1.000 metre üzerinde global rüzgar akımlarını meydana getirirler. Coriolis kuvvetinden dolayı baskın rüzgar yönleri elementlere göre aşağıdaki şekilde oluşur.

	KUZEY YARIKÜRE			GÜNEY YARIKÜRE		
Enlem	90-60	60-30	30-0	0-30	30-60	60-90
Baskın Yön	NE	SW	NE	SE	NW	SE

Yer yüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri ise genel olarak, yerin dönmesinden kaynaklanan “coriolis” kuvveti ile yeryüzü ve akışkan havakütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenirler.

100 metreden daha az yüksekliklerde ise yukarıdaki birincil etmenlere ilave olarak yeryüzü coğrafyası da ikincil olarak etkili olmaya başlar ve ekonomik anlamda ilgi alanımıza giren yüzey rüzgar akımları bu kapsamda oluşur.

Rüzgar enerjisinde elde edilen güç Betz teoremine göre rüzgar hızının üçüncü kuvveti (küpü) ile orantılı olarak değişim gösterir.

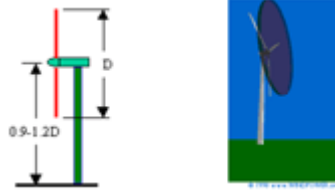
Bölüm II - Rüzgar'ın Enerji Üretme Fiziği

Rüzgar akımlarının taşıdığı kinetik enerjisinin kanatlı bir türbini mekanik olarak döndürmesi ve buna bağlı olan bir jeneratör grubunun elektrik üretmesi ile ekonomik çevrim tamamlanmaktadır.

Rüzgar Türbinleri genellikle 2 ya da 3 rotor kanatlı olup rüzgarın bu kanatlara uyguladığı basınç ile dairesel bir dönme hareketi oluşur.

Rüzgar türbinlerinin projelendirilmesi ile ilgili bir çok hesap, rotor kanatlarının taradığı dairesel alanının çapı ile (D) ifade edilir.

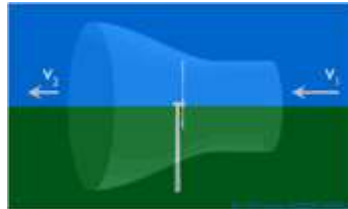
Buna göre tipik olarak bir rüzgar türbininin projelendirilmesinde direk ve rotor kanat uzunlukları, rotor kanatlarının bulunduğu merkez noktasının yerden yüksekliğinin söz konusu çap değerinin 0,9 – 1,2 katı arasında olacak şekilde ölçülendirilir.



Kanatların birbirine bağlandığı göbek kısmına monte edilmiş bir milin dönüşü ile mekanik enerji elde edilir. Bu mekanik enerji de mile akuple edilmiş bir elektrik jeneratörü aksamını döndürmek suretiyle elektrik enerjisi üretimi başlar.

Jeneratörün çıkışları ise elektriksel kablolama sistemi ile trafo ve dağıtım merkezlerine bağlanarak üretilen enerjinin enterkonnekte sisteme veya belli bir enerji tüketim noktasına iletimi sağlanır.

Türbin kanatlarının oluşturduğu dairesel düzleme dik açı ile girişinde rüzgar, silindire benzer bir hortum şekli meydana getirir. Bu silindirin dairesel kesit alanı türbin kanatlarının ön tarafındaki giriş ağzında daha dar, rüzgar hortumu türbin kanatlarının arka bölgesine ulaştığında ise daha geniştir.



Bu durumda rüzgar, önüne engel olarak çıkan türbin kanatlarına ulaştığında türbinin ön tarafında basınç yükselir ve kanatlarda mekanik dönme hareketi oluşur. Ancak bu esnada türbin kanatları rüzgarı dağıttığı için arka tarafa geçerken rüzgar basıncı düşer.

Zira girişteki rüzgarın taşıdığı toplam kinetik enerjinin bir kısmı türbin kanatları üzerinden mekanik enerjiye dönüşmüş durumdadır ve enerjinin korunumu yasasına göre çıkıştaki kinetik rüzgar enerjisi miktarı da giriştekine göre azalmak durumundadır. Bu da rüzgar hortumunun dairesel alanının genişlemesi ve rüzgar çıkış hızının düşmesi şeklinde kendini gösterir.

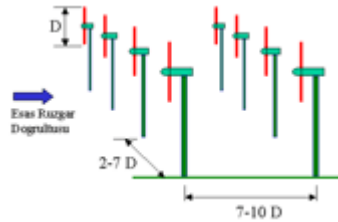
Dolayısıyla türbin kanatlarının dönmesi ile taranan dairesel alana giren rüzgarın hızı bu alandan çıkarken düşmektedir. ($V_2 < V_1$) Bu durumda ardarda paralel olarak türbinlerin yerleştirilmesinde belli mesafe sınırları ortaya çıkmaktadır. Zira türbinin arka tarafından itibaren ancak belli bir mesafeden sonra rüzgar basıncı tekrar normal ortam basıncına yükselmektedir.

Aşağıdaki resim sağdan rüzgarın türbin kanatlarına yaklaştıkça basıncın nasıl yükseldiğini ve türbin kanatlarının hemen arkasında oluşan negatif basıncın belli bir mesafe sonra tekrar nasıl ortam basıncına ulaştığını göstermektedir.



Rüzgar basıncının dolayısıyla rüzgar hızının bir türbinin çıkış ağzında girişe göre daha düşük olması ve ancak belli bir mesafe sonra tekrar muntakanın rüzgar akım kuvvetine ulaşması nedeniyle birden fazla türbinin belli bir bölgeye montajı ile ilgili bazı genel prensipler bulunur.

Buna göre; rüzgar doğrultusuna göre aşağıdaki şekilde olduğu gibi yerleştirilmiş tipik bir rüzgar çiftliği için aynı sırada yer alan türbinler arasında prensip olarak 2-7 D, sıralar arasında ise 7-10 D mesafe bırakılmak durumundadır.



Bölüm III - Rüzgar Enerjisinin Hesaplanması

Hareket halindeki her cisim kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar da hareket halinde bir hava akımı olduğundan kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik Enerji (E) eşitliği,

$$E = 1/2mV^2$$

ile verilmektedir. Burada m hareket eden cismin kütlesi, V ise hızıdır. Özgül kütle ρ olmak üzere, eşitlikteki m kütlesi

$$m = \rho H$$

şeklinde yazılır ve burada H, hacmi ifade etmektedir. Eğer rüzgar esme yönüne dik alan A ile, rüzgar yönündeki uzunlukta U ile gösterilirse bu durumda hacim,

$$H = AU$$

ile ifade edilir. V rüzgar hızında ve t süresinde kat edilecek mesafe ise, $U=Vt$ şeklinde olur. Böylece, ikinci denklemi birinci denklemde yerine koyacak olursak,

$$E = 1/2\rho AV^3$$

denklemi elde edilmiş olur. Burada $t=1$ ve $A=1$ alınır, birim zamanda birim alandaki enerji E, yani rüzgarın bir noktadaki enerjisi elde edilir.

$$E = 1/2\rho V^3$$

Havanın özgül kütlesi (ρ) deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında 1.223 kg/m^3 dir.

Rüzgar enerjisi analizinde kullanılan birimler,

$$\rho = [\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$V = [\text{m} / \text{s}]$$

$$E = 1/2\rho V^3 [\text{kg/m}^3][\text{m}^3/\text{s}^3]$$

olduğundan olarak ifade edilmektedir.

Buna göre;

Rüzgar enerjisinin rotor kanatları üzerinden mekanik enerjiye dönüşümü temel olarak havanın yoğunluğuna, rotor kanatlarının süpürdüğü alanın büyüklüğüne ve rüzgar giriş hızına bağlıdır.

$$P = (1/2) * \rho * V^3 * A$$

P (Güç –kW)

ρ (Havanın yoğunluğu : Deniz seviyesinde ortalama basınçta 15° C 'de kuru havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$ 'dür.)

V (Rüzgar Hızı : Metre / saniye)

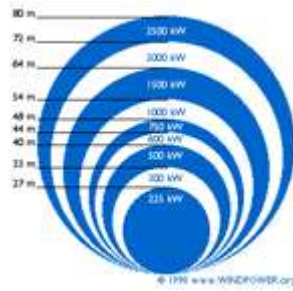
A (Türbin kanatlarının dönüşü ile süpürdüğü dairesel alanın büyüklüğü :

$$(\pi \times r^2)$$

Teorik olarak Betz yasasına göre ise herhangi bir rüzgar akımının taşıdığı kinetik enerjinin türbin mekanizması kullanılmak sureti ile ancak en fazla % 59'u mekanik enerjiye dönüştürülebilir. Bu değer, türbin sayısından bağımsız olup türbin mekanizması ile rüzgar üreten tüm düzenekler için geçerlidir.

Bir çiftçinin yatay düzlemde ektiği alanın metrekaresi bazında ifade edilmesine benzer şekilde rüzgar çiftliklerinde de türbin kanatlarının dikey düzlemde süpürdüğü alan önem taşır. Rotor kanatlarınca taranması planlanan alan ile buna karşılık seçilen türbin ve jeneratör ünitesinin elektriksel gücü arasında belli oran aralıkları bulunur.

Örneğin 44 metre çapındaki bir tarama alanına karşılık tipik olarak 600 kW gücünde bir türbin-jeneratör ünitesi seçilebilir. Söz konusu çap değeri iki katına çıkarıldığında türbin-jeneratör ünitesi çıkışında 4 katı güç elde edilir.



Türbin imalatçıları rüzgar şartlarına göre gerekli türbin-jeneratör gücünü tasarlarken bir optimizasyona giderler. Büyük bir jeneratörden tam güç alabilmek için büyük rüzgar akımları gerekirken görece düşük rüzgar akımlarının olduğu bir yörede en verimli çıkış gücünü elde etmek için belli bir rotor tarama alanına karşılık nispeten küçük bir jeneratör ünitesi veya tersinden belli bir jeneratör ünitesine karşılık ise rotor kanatları nispeten büyük olarak tasarlanır.

Eğer büyük rotor kanatlarına küçük bir jeneratör ünitesi bağlanırsa tüm yıl boyunca mutlaka enerji üretir vaziyette olacak ancak olası büyük rüzgar akımlarının ancak bir kısmı yakalanmış olacaktır.

Öte yandan büyük bir jeneratör ünitesi bağlandığında ise büyük rüzgar akımlarında verimli çalışma olacak ancak düşük rüzgar akımlarında mekanik dönüş elde edilemeyecektir.

Tasarım yapılırken, bir enerji hammadde girdisi olarak bedava kabul edilebilecek rüzgarın verimli olarak tüketilmesi veya bir türbinden yıllık olarak üretilen toplam enerjinin maksimum olması gibi bir varsayımdan yola çıkılmaz.

Bölgede gözlenen yıllık rüzgar akımlarının dağılımına bakılarak belli bir rotor kanat çapına karşılık türbin-jeneratör ünitesi seçilir. Nihai olarak ise birim maliyetin minimum olması ana hedefdir.

Büyük güçte ünite seçmenin avantajları :

Daha büyük kapasiteli bir türbinin birim enerji maliyeti (işletme+yatırım) görece daha düşük olur. Zira direkt enstalasyonu, ulaşım altyapısı ve elektrik şebekesine bağlantı ve kontrol sistemleri türbin kapasitesinden ağırlıklı olarak bağımsızdır ve her halükarda yapılması gerekir.

Özellikle deniz üstü rüzgar çiftliklerinde inşaat maliyeti türbin gücünden neredeyse tamamen bağımsızdır. Bakım masrafları ise seçilen türbin gücü ile ilişkili değildir.

Birden fazla türbin için yeterli uygun arazi üretmede zorlukların bulunduğu durumda yüksek bir direk üzerinde tek bir büyük güçte türbin seçmek de daha uygun olacaktır.

Küçük güçte ünite seçmenin avantajları :

Yerel şebeke büyük güçteki bir enerji beslemesine uygun olmayabilir. Örneğin, küçük yerleşimlerin olduğu yerlerde genellikle elektrik kablo şebekesi görece güçlü değildir.

Birden çok türbinin bulunduğu bir rüzgar çiftliğinde nihai elektrik çıkışı dalgalanmalara daha az maruz kalır. Zira rüzgarın olası gelişigüzel doğrultusu bir çok türbinin bulunduğu bir alanda enerji çıkışını dengede tutabilir.

Büyük bir türbinin montajı için çok özel taşımacılık hizmetleri ve büyük vinçler gerekir. Bu da küçük boy sistemlerin yeterli olduğu yerlerde özellikle önem taşır.

Yıldırım düşmesi gibi muhtelif doğal vb. risklere karşılık birden çok türbinin olduğu koşulda genel işletme riski azalır.

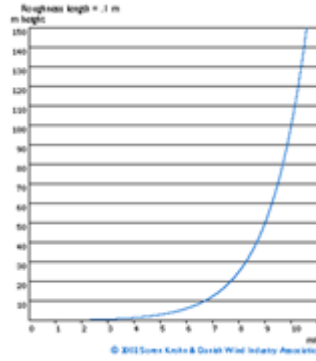
Estetik görüntünün önem taşıdığı bazı bölgelerde küçük boy sistemler tercih edilebilir. Ancak buna karşılık büyük boy sistemler ise dönüş hızlarının daha yavaş olması nedeniyle çok sayıda küçük ve nispeten hızlı türbinlerle dolu bir çiftliğe göre daha az görüntü kirliliği sağlayabilir.

Bir kilometreden daha fazla yüksekliklerde rüzgarın hızı ve doğrultusu yeryüzü şekillerinden ciddi olarak etkilenmez. Ancak daha düşük yüksekliklerde rüzgar hızı gerek yeryüzü cisimlerinden gerekse bunların çizdiği sınır şekillerinden sürtünme nedeniyle etkilenir. Rüzgar endüstrisinin ilgilendiği atmosfer aralığı da 100 metre civarındaki ekonomik yüksekliklerdir.

Herhangi bir bölgedeki ekonomik rüzgarların durumu “Avrupa Rüzgar Atlası” kodlamasına içinde “yüzey pürüz sınıfı” ve “pürüz mesafesi” gibi değerlerle klasmanlandırılır. Bu tablolardaki değerler yükseldikçe rüzgarın hızının artan oranda yüzey pürüzlerinden etki aldığı ve hızının azaldığı dolayısıyla taşıdığı enerjinin düşeceği kabul edilmektedir.

Yüzey Pürüz Sınıfı 0–4 arasında yarımşar puan ara ile toplam 8 kademedir oluşur. Pürüz Mesafesi ise teorik olarak rüzgar hızının 0 m/sn olduğu noktanın yerden yüksekliğidir.

Aşağıdaki eğride tipik olarak belli bir bölge içinde rüzgar hızının yüksekliğe göre değişimi gösterilmektedir.



Bu şekil bize, rüzgar hızının yere yaklaştıkça azaldığını ve bir rüzgar perdesi durumu oluştuğunu göstermektedir.

Rüzgar perdesi olgusu türbin tasarımında önemli bir husustur. Zira türbin kanatlarının bir tam dönüşünde kanatların en üst noktada iken maruz kaldığı rüzgar kuvveti en alt konumdaki rüzgar kuvvetine göre daha fazla olmaktadır.

Örneğin, göbek yüksekliği 40 metre olan türbin direğine monte edilmiş yarıçapı 20 metre olan rotor kanatlarının rüzgar enerjisi ile dönmekte olduğu bir durumda kanatlara üst noktadan geçerken uygulanan rüzgar kuvvetinin hızı 9,3 m/sn iken en alt noktasında bu değer 7,7 m/sn'ye düşmektedir.

Herhangi bir z yükseklikteki rüzgar hızı ise aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$v = v_{REF} \times \ln(z/z_0) / \ln(z_{REF}/z_0)$$

v : Yerden z yüksekliğindeki hesaplanması istenen rüzgarın hızı.

v_{REF} : z_{REF} yüksekliğinde önceden bilinen referans rüzgar hızı.

ln(...) : Doğal logaritma fonksiyonu.

z : Hızı hesaplanacak rüzgar akımının yerden yüksekliği.

z₀ : Hakim rüzgar doğrultusundaki "Düzensizlik Mesafesi" (Bu değer düzensizlik sınıf tablosundan elde edilir.)

z_{REF} : v_{REF} referans hızını önceden bildiğimiz rüzgarın yerden yüksekliği.

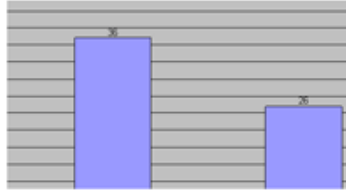
Bölüm IV - Rüzgar Üretim Miktarının Tespiti

Rüzgar'dan elde edilen enerjinin toplam değeri rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğu için rüzgar santralının projelendirilmesi aşamasında rüzgar hızı ölçümlerinde yapılacak hatalar veya varsayım hatalarının projenin toplam maliyetine olan etkisi çok ciddi olmaktadır.

Aşağıdaki tabloda gerçek proje değerlerinden elde edilen sonuçlar tipik olarak bu durumu göstermektedir.

51 MW büyüklüğünde bir rüzgar santralının üç ayrı rüzgar hızı değerlerinde ortalama MWh başına toplam üretim maliyeti verilmektedir.

% 30 civarındaki rüzgar hızı değişiminde projenin ortalama MWh başına maliyeti % 85 değişebilmektedir.



Rüzgar Türbinleri Enerji Üretim Miktarının Belirlenmesi

Yeni kurulacak olan rüzgar enerji santralından üretilecek enerjinin mevcut enerji nakil sistemine entegrasyonunun sağlanması gereklidir. Bu entegrasyonun yapılacağı hat kapasitesi, kısa devre gücü, gerilim oynamaları, harmonikler, reaktif güç vb. gibi bir takım kriterler dikkate alınarak yatırımcı, kurmayı düşündüğü rüzgar enerji santralının kurulu güç kapasitesini belirlemelidir. Kaç tane rüzgar türbini kurulacak, bunların birim gücü ne olacak ve arazi üzerine nasıl konumlandırılacak gibi sorulara cevap bulunmalıdır. Piyasada çeşitli model ve büyüklükte rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Yatırımcı amacını da gözönünde bulundurarak fiyat, teknik özellikler, bölgeye ait frekans dağılım tablosu, verim, garanti, hazırda bulunma ve türbin referansları gibi kriterleri dikkate alarak en uygun rüzgar türbinini seçmelidir.

Yatırımcı, rüzgar türbini seçimini yaptıktan ve arazi üzerindeki konumlandırmayı (micrositing)

- frekans dağılım tablosu,
- ilgili renk dağılımları
- rüzgar türbinine ait teknik kriterleri

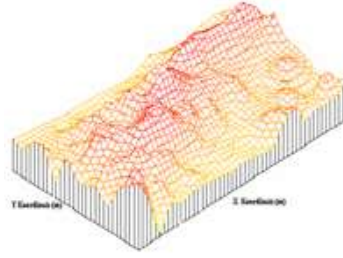
göz önüne alarak planlandıktan sonra her bir rüzgar türbin yerine ait 1/25 000 ölçekli harita üzerinde UTM koordinatlarını tespit etmelidir.

Bu aşamaya kadar elde edilen rüzgar atlas istatistik bilgileri, rüzgar türbinine ait karakteristik değerler ve rüzgar türbinlerinin UTM koordinatlarına ilişkin veriler birlikte kullanılarak rüzgar türbinlerinin tek tek veya birarada üretebilecekleri yıllık enerji miktarları özel bilgisayar programları ile hesap edilir.

Örnek Bir Santral Sahasının Enerji Üretim Miktarları



SİTE NO	X Koordinatı (m)	Y Koordinatı (m)	RAKIM (m)	Rüzgar Hızı (m/s)	Enerji Yoğunluğu (W/m ²)	Enerji Miktarı (kWh/yıl)
Site 1	115	308	392	6.41	299.76	1.574.620
Site 2	231	308	382	6.37	298.31	1.557.140
Site 3	372	313	360	6.10	268.43	1.422.740
Site 4	487	321	349	5.94	238.48	1.324.320
Site 5	628	333	357	6.13	235.69	1.374.520
Site 6	769	333	291	5.98	245.15	1.349.070
Site 7	872	397	363	7.48	576.42	2.104.900
Site 8	000	474	354	6.25	277.07	1.488.590
Site 9	077	577	352	5.97	233.72	1.321.370
Site10	199	647	371	6.15	257.79	1.425.480



Santral Sahasının 3 Boyutlu Topoğrafik Yapısı ve Yıllık Enerji Miktarlarının Arazi Üzerinde Dağılımı

HAZIRLAYAN

Rahmi Aksoy

TSKB Mühendislik Bölümü Danışmanı