ENERJİ ÜRETİM AMAÇLI RÜZGAR ÖLÇÜMÜ VE ANALİZİ

Yrd. Doç. Dr. Faruk ORAL
Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü,

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ
Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

Yrd. Doç. Dr. Ayhan ONAT
Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Enerji Eğitimi Anabilim Dalı

ÖZET

Sanayi ve teknolojideki hızlı gelişmeler, artan insan nüfusu, dünyada enerji tüketimini her geçen gün artırmaktadır. Son yıllarda tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artırmıştır. Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerjisi kaynakları içerisinde hem teknolojisi hem de kullanımı en hızlı şekilde gelişen enerji kaynağıdır.

Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için, rüzgar hız ve yön değerlerinin standartlara uygun periyodik olarak en az bir yıl ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla bölgede uygun yer veya yerlere rüzgar ölçüm istasyonunun kurulması gerekmektedir.

Bu çalışmada; enerji üretim amaçlı yapılan rüzgar ölçümleri ve rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi incelenmiştir. Sakarya-Esentepe bölgesi için örnek bir rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılmıştır. Bu amaç ile; Sakarya-Esentepe bölgesinde kurulan rüzgar ölçüm istasyonundan 2007 yılı Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs ve Haziran aylarına ait rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri kullanılarak, Sakarya-Esentepe bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelinin ön araştırılması yapılmıştır. Bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin istatistiksel olarak incelenmesinde, Weibull dağılımı kullanılmıştır. Bu amaçla sayısal çözümleme için, MATLAB programı geliştirilmiştir. Ayrıca rüzgar verilerinin analizinde WindPRO yazılımı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, Rüzgar ölçümü, İstatistiksel analiz.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünya nüfusunun artması, sanayi ve teknolojideki hızlı gelişmeler, enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu durum, ülkeleri yeni enerji kaynakları konusunda araştırmalara yönlendirmiştir [1]. Son yıllarda artan enerji ihtiyacının karşılanmasında, fosil enerji kaynaklarındaki rezerv azalışı, üretim ve kullanımında ortaya çıkan çevre kirliliği, tüm dünyada olduğu gibi, Türkiye'de de temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru bir yönelme gözlemlenmektedir [2].

Rüzgar enerjisi, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgar enerjisinin ana kaynağı güneştir. Güneşten yeryüzüne gelen enerjinin yaklaşık % 1-2'lik kısmı rüzgar enerjisine dönüşür [2]. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmamasından dolayı meydana gelen sıcaklık ve buna bağlı olarak basınç farklılıkları rüzgarı meydana getirir. Rüzgar enerjisi, rüzgarı meydana getiren hava akımının sahip olduğu kinetik enerjidir. Bu enerjinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

Rüzgar enerjisi, çok eski tarihlerden beri insanlar tarafından yel değirmenlerinde ve su pompalama işlemlerinde kullanılmıştır. Günümüzde ise modern rüzgar türbinleri yardımı ile rüzgar enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır [3].

Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için rüzgar hız ve yön değerlerinin düzenli periyotlarda sürekli olarak ölçülmesi gerekmektedir. Enerji üretimi amaçlı yapılan rüzgar potansiyeli ölçümleri çok hassas ve dikkat gerektirmektedir. Ölçümlerde çok ufak gibi görülen bir fark bile yatırımın ekonomikliğini ve planlamasını ciddi bir biçimde olumsuz etkilemektedir. Rüzgar enerji santralinin projelendirilmesi ve ekonomisi, temel olarak seçilen santral sahasında üretebilecek enerji miktarına bağlıdır. Bu enerji miktarının tespiti için; muhtemel enerji potansiyeli olan bölgelerde yapılan rüzgar ölçümlerinden elde edilen verilerin istatistiksel olarak analizinin yapılması gerekmektedir. Bu analiz sonucunda, bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı, hakim rüzgar yönü, ortalama güç yoğunluğu gibi büyüklüklerin belirlenmesi ile bölgede kurulabilecek rüzgar türbinleri için çok önemli bir bilimsel alt yapı oluşturulmuş olunacaktır [4].

Bu çalışmada; enerji üretim amaçlı yapılan rüzgar ölçümleri için kurulan rüzgar ölçüm istasyonlarında kullanılan standartlar, ölçüm yeri seçimi, rüzgar ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken hususlar, kullanılan ölçüm cihazları gibi konular ile ilgili bilgiler sunulacaktır. Ayrıca bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacıyla elde edilen rüzgar verilerinin kullanılması ile yapılan istatistiksel analiz konusu verilecektir. Örnek bir uygulama olarak, Sakarya Üniversitesi yakınında Esentepe yöresinde kurulan rüzgar ölçüm istasyonundan elde edilen rüzgar verileri yardımıyla istatistiksel analiz yapılarak bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmiştir.

2. RÜZGAR VERİLERİNİN ÖLÇÜMÜ

Bir bölgede rüzgar elektrik santralinin kurularak enerji üretiminin yapılması için, bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için enerji üretim amaçlı rüzgar ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Bu amaçla bölgede uygun görülecek yer veya yerlere standartlara uygun rüzgar ölçüm istasyonunun kurulması gerekmektedir. Rüzgar ölçüm istasyonları; bir ölçüm direği üzerine yerleştirilmiş ölçüm sensörlerinden oluşur. Rüzgar ölçüm istasyonlarında sağlıklı bir ölçüm yapılabilmesi için; rüzgar hızı, rüzgar yönü, sıcaklık, nem ve basınç gibi meteorolojik değişkenlerin ölçülmesi gerekmektedir. Enerji üretim amaçlı ölçme yüksekliği; en az 30 m veya kurulmak istenen türbinin göbek ekseni yüksekliğinde olması ve ölçümlerin en az bir yıl periyodik sürekli olarak yapılması gerekir. Ayrıca ölçüm yapılacak arazinin topoğrafik koşullarına göre ölçüm yüksekliği değişmektedir [5, 6].

2.1. Ölçüm Cihazları

Rüzgar ölçüm cihazları olarak; anemometre, yön sensörü, sıcaklık sensörü, nem sensörü ve basınç sensörü kullanılmaktadır. Rüzgar ölçümlerinde kullanılan en önemli sensörler, anemometre ve yön sensörleridir. Rüzgar hızı ve rüzgar yönünün yanı sıra diğer bazı meteorolojik parametrelerinin de ölçülmesi son derece faydalı olacaktır. Özellikle rüzgar enerjisi hesaplamalarında kullanılan bir değer olan hava yoğunluğunun hesaplanabilmesi için basınç, çevre sıcaklığı ve nemlilik değerlerinin ölçülmesi önemlidir [5, 6].

Anemometreler; rüzgar hızı ölçümlerinde kullanılan cihazlardır. Anemometreler, rüzgar hızını elektriksel sinyale dönüştüren sensörlerdir. Kupalı, ultrasonik ve propeller anemometre olmak üzere 3 tip anemometre vardır (Şekil 1). Rüzgar hızı ölçümlerinde çoğunlukla kupalı anemometreler kullanılmaktadır. Bu anemometreler, dikey bir eksene sahip olup rüzgarı yakalayan 3 kupası bulunmaktadır. Kupaların dakikadaki dönme sayıları elektronik olarak kaydedilerek rüzgar ölçümünü yaparlar. Ayrıca elektriksel olarak ısıtılmış şaftlı özel modelleri ile kupalı olan anemometreler soğuk iklim şartlarında da ölçme amacı ile kullanılabilir. Ultrasonik anemometreler; her bir

uçtan yayılan ses dalgasının diğer kol tarafından alınması sırasında geçen sürenin ölçülmesi prensibi ile çalışmaktadır. Kısaca seste oluşan faz kaymalarını ayırt ederek ölçüm yapmaktadır. Propeller anemometreler, pervaneli anemometre olarak bilinirler. Bu anemometrelerin çalışma prensibi de kupalı anemometreler ile aynıdır. Kupalı anemometreler rüzgar yönüne dik olarak yerleştirilirken, propeller anemometreler ise rüzgarın esme yönüne parelel olarak yerleştirilirler. Ayrıca bu tip anemometreler rüzgar yönüne paralel monte edildiğinde yatay rüzgar hızını, dik monte edildiğinde dikey rüzgar hızını ölçerler. Propeller anemometre aslında kombine bir sensördür. Hem hız hem de yön ölçümleri yapabilmektedir [5, 6].

Kaliteli ve iyi kalibre edilmiş anemometreler rüzgar enerjisi ölçümlerinde kullanılması bir gerekliliktir. Enerji üretim amaçlı rüzgar hızı ölçümlerinde; bağımsız ve akredite olmuş kuruluşlar tarafından rüzgar tünellerinde yapılan kalibrasyon sertifikasına sahip anemometreler kullanılmalıdır. Rüzgar hızı ölçümlerinde hız ve yönün aynı düzenekte olduğu kombine sistemler kullanılmamalıdır. Bu sistemlerde rüzgar hızı gölgelenebilmektedir. Yön sensörünün anemometreye yakın olması ölçüm kalitesini bozmaktadır. Ayrıca kullanılacak anemometrenin gövdesi keskin hatlara sahip olmamalı, küçük ve simetrik hatlara sahip olmalıdır. Aksi taktirde anemometre gövdesine gelen rüzgar, türbülans oluşturarak ölçüm sonuçlarının hatalı olmasına yol açacaktır. Kupaları ana gövdeye bağlayan bilyalı yataklar, mekanik sürtünmeyi en aza indirebilecek şekilde yüksek kalitede olmalıdır. Kullanılan anemometreler kesinlikle kalibrasyonlu olmalı ve bu kalibrasyon değerleri verileri toplayan cihaza tanıtılmalıdır [2, 5].



(a) Kupalı anemometre (b) Ultrasonik anemometre (c) Propeller anemometre

Şekil 1. Anemometre [5]

Yön sensörleri; rüzgarın esme yönünün belirlenmesinde kullanılan cihazlardır. Rüzgar ölçümleri yapılırken rüzgarın hızının yanında, yönünün de ölçülmesi gereken bir diğer meteorolojik parametredir. Ölçüm yapılan bölgedeki rüzgar, belirli bir hakim yönden esebileceği gibi, farklı yönlerde ve farklı yüzdelerde de esebilmektedir. Rüzgar yönlerinin değişen frekanslarını ve rüzgar hızlarının dağılımını göstermek için yönünün ölçülmesi gerekir. Yön sensörü; rüzgarın esme yönünü elektriksel sinyale çeviren sensördür [5,6].

Rüzgar ölçümlerinde ana cihazlar, anemometre ve yön sensörü olmakla beraber yardımcı cihazlar olan, sıcaklık, nem ve basınç sensörleri de kullanılmaktadır. Termometre olarak bilinen sıcaklık sensörü, ortamın çevre sıcaklık değerini ölçmektedir. Genellikle ölçüm direğinin 2 veya 3. metresine monte edilir. Rüzgar ölçüm amaçlı kullanılan nem sensörleri, tek veya bazen de sıcaklık sensörü ile beraber kombine olabilmektedir. Neme karşı duyarlı olan materyal karbondan yapılmış olup nem değişiminde direnci değişmektedir. Bu direnç değişiminden yararlanılarak ortamın bağıl nem değerini ölçmektedir. Rüzgar ölçüm ortamının basınç değeri ise basınç sensörü ile ölçülmektedir [5].

Data logger; anemometre, yön sensörü ve rüzgara ait çeşitli özellikleri ölçen sensörlerden gelen bütün verilerin elektronik olarak saklandığı ve değerlendirilmesinin yapıldığı ortamı sağlayan cihazdır. Kısaca rüzgar veri toplayıcılarıdır. Farklı markalara ait ve değişik dizaynlarda bulunabilirler. Data logger'lar; rüzgar verilerini, üzerlerinde bulunan data chiplerinde depolarlar [5,6].

2.2. Rüzgar Ölçüm İstasyonu Yer Seçimi ve Kurulumu

Enerji üretim amaçlı rüzgar ölçümlerinin yapılabilmesi için; rüzgar türbinlerinin (RT) kurulması düşünülen alanların en uygun yer veya yerlerine rüzgar ölçüm istasyonunun kurulması gerekmektedir. Rüzgar ölçüm istasyonu; bir ölçüm direği üzerine yerleştirilmiş ölçüm sensörlerinden meydana gelir. RES santral sahasının topoğrafik durumuna göre, sahayı en iyi temsil edecek bir yada daha fazla ölçüm noktası belirlenir ve bu ölçüm direkleri bu noktalara konuşlandırılır. Ölçüm direkleri santral sahasındaki hakim rüzgar önüne dik olacak şekilde yerleştirilir. ölçüm direğinin yüksekliği en az RT'nin kule yüksekliğinin 2/3 katı kadar yapılır. Ayrıca ölçüm yapılacak arazinin topoğrafik koşullarına göre ölçüm yüksekliği değişmektedir [36, 48, 56]. Günümüzde ölçüm sisteminde; boru ve kafes konstrüksiyon olmak üzere iki tip çelik direk kullanılmaktadır. Ölçüm direğinin mekanik ve elektronik olmak üzere iki önemli kısmı mevcuttur. Mekanik kısmı; taban ankraj plaka, çelik halatlar, borular, kızaklar ve diğer ek malzemeler; elektronik kısmı ise; anemometre, yön sensörü, veri toplayıcı, kablolar vb. gibi diğer elektronik cihazlardan oluşur [5].

Rüzgar ölçüm istasyonunun kurulacağı yerlerin belirlenmesi çok öneme sahiptir. seçim yapılacak yer, topoğrafik açıdan son derece uygun olmakla birlikte bu alanda engel yüksekliğinin 10 katı mesafeden daha yakında başka yüksek engeller bulunmamalıdır. Çünkü bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 10 katı kadar mesafe içinde ise, bu nesne yakın çevresel engel olarak tanımlanır. Tepe arkalarında yer seçimi tercih edilmemelidir. Aksi taktirde oluşacak türbülans nedeniyle ölçülecek rüzgar hızı gerçek değerinden çok fazla uzaklaşabilmektedir. Ölçüm istasyonunun kurulacağı yerlerde rüzgar akışının daima laminer olması, ölçüm sonuçlarını daha gerçekçi yapacaktır. Yer seçimi yapılırken deneyimli uzmanların görüşünün alınması yapılacak hatayı önleyecektir. Ayrıca rüzgar ölçüm istasyonunun kurulacağı noktalara ait 1/25.000 ölçekli harita üzerinde UTM (Universal Transfer Mercator) ve coğrafi koordinatları ile deniz seviyesinden olan yükseltisi, uzman elemanlar tarafından tespit edilmelidir [6].

Rüzgar ölçüm istasyonunda kullanılan ölçüm cihazları tamamen doğal atmosferik şartlarda çalıştığından kapalı yerlerde çalışan diğer cihazlara göre ekonomik ömürleri daha kısadır. Paslanma, korozyon, çürüme, aşınma ve buzlanma gibi etkenler yüzünden cihazların ölçüm değerleri normalden hızla uzaklaşır. Bu sebeple, rüzgar ölçüm cihazları ve kayıt sistemleri ile elektronik devreleri sıklıkla kontrol edilmeli, bakımları standartlara uygun olarak zamanında yapılmalıdır. Rüzgar ölçüm istasyonunda kullanılacak anemometreler mutlaka uluslararası kabul görmüş enstitülerin rüzgar tünellerinde kalibre edilmiş kalibrasyon sertifikasına sahip olmaları gerekmektedir. Rüzgar ölçüm direklerinde en az 2 anemometre ile 1 adet yön sensörü olmalıdır. Ölçüm direğine yerleştirilecek anemometrelerden bir tanesi, direğin en tepesine, merkez eksenine yerleştirilir. Diğer anemometre ve yön sensörleri, yan kollar ile ölçüm direğine monte edilir. Yine ölçüm direğinin en üst noktasına yıldırım koruma çubuğu (paratoner) eklenmelidir. Ölçüm direğinin yüksekliğinin artması sonucunda kullanılacak anemometre sayısı arttırılır. Örneğin 50 m'lik bir ölçüm direğinde; 10, 30 ve 50 metrelerde anemometre kullanılması daha uygundur. Sıcaklık, basınç ve nem sensörleri genellikle 2 veya 3. metrelere monte edilir. Yine 2 veya 3.metrelere, veri toplayıcı ve gerekirse PV (güneş pili) paneli monte edilmelidir. Ayrıca yan kol mesafeleri, sensörlerin ölçümlerini etkilemeyecek şekilde ayarlanması gerekmektedir. Her bir sensör için, bir yan kol bağlantısı yapılmalıdır. Sensörlerin birbirlerinin ölçümlerini etkilememesi için iki sensörün en üst noktaları arasındaki mesafe en az 1,5 m olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Birden fazla anemometre kullanılması durumunda; iki anemometre arasında en az 15-20 m mesafe bırakılmalıdır [5,6].

2.3. Ölçüm Sistemi

Rüzgar ölçüm istasyonlarından alınan en az bir yıllık rüzgar hızı, yönü ve ortam çevre sıcaklığı ölçüm değerleri bir data logger'a iletilir. Ölçüm aletlerinde üretilen sinyal voltajı kablolar yardımıyla data logger'da işlenerek ölçüm değerleri depolanır. Depolanan veriler bilgisayar ortamına aktarılıp değerlendirilir. Ölçüm sistemi; anemometre ve yön sensörleri, ölçüm değerlerini her 10 saniyede bir okuyarak sonuçları 10 dakikalık ortalamalar olarak data logger'a kaydetmektedir [2].

3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Rüzgar hızının istatistiksel analizlerinde, iki parametreli Weibull ve Weibull'un şekil parametresinin 2 olduğu durum olan Rayleigh dağılımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Rayleigh dağılımı tek parametreli olduğu için Weibull'a göre daha az esnektir; ancak parametrelerinin hesaplanması daha kolaydır [7]. Weibull dağılımı bir çok çalışmada rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Rüzgar enerjisi analizi yapan çoğu bilgisayar yazılımları da Weibull dağılımının kullanılmasını bir zorunluluk haline getirmiştir. Weibull dağılımı; rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasında tercih edilen dağılım metodudur [8-14]. Rüzgar verilerinin analizi yoluyla elde edilen Weibull parametreleri kullanılarak herhangi bir rüzgar hızının frekansı konusunda hassas bir tahminde bulunmak mümkün olabilmektedir. Weibull yoğunluk fonksiyonu; rüzgarın herhangi bir hızda esme sıklığını gösteren fonksiyondur. Weibull yoğunluk fonksiyonunun elde edilebilmesi için şekil ve ölçek parametrelerinin bilinmesi gerekir.

Rüzgar hızı için, iki parametreli Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel ifadesi,

$$f(v)=\frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1}\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \tag{1}$$

Şeklindedir [8, 12]. Burada v rüzgar hızını (m/s), k şekil, c ise ölçek parametresini ifade etmektedir. Weibull dağılımının eklemeli (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise,

$$F(v)==1-\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \tag{2}$$

biçiminde ifade edilebilir [8, 13]. Weibull eklemeli olasılık yoğunluk fonksiyonu, rüzgar hızının belli bir *v* değerinden küçük yada eşit gerçekleşme olasılığını verir.

Ortalama rüzgar hızı,

$$v_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv \tag{3}$$

formülünden hesaplanabilir [8, 13, 14]. Eşitlik (3) (1) eşitliği yardımı ile yeniden düzenlenirse, ortalama rüzgar hızı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir [8, 13].

$$v_m = c\Gamma(1+\frac{1}{k}) \tag{4}$$

Burada $\Gamma(.)$, gama fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [7].

$$\Gamma(y)=\int_0^{\infty} e^{-x}x^{y-1}dx \tag{5}$$

Weibull dağılımı parametrelerinin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Grafik metodu, en yüksek olabilirlik metodu en çok kullanılan yöntemlerdendir. Grafik metodunun temel ilkesi; rüzgar hızı verilerini temsil eden doğru ile gözlenen rüzgar hızı verileri arasındaki dikey farkları minimum yapmaya dayanır. En yüksek olabilirlik metodu ise; Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerinin diğer bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde; olasılık yoğunluk fonksiyonuna ait *c, k,* parametrelerini, gözlemlenen rüzgar verilerinden tahmin etmek için kullanılabilir. Bu amaçla olabilirlik fonksiyonu tanımlanır. Olabilirlik fonksiyonunu en yüksek yapan *c* ve *k* parametreleri, belirlenen tahminlerdir [7, 12, 13, 15, 16].

Rüzgar hareket halinde bir hava akımı olduğundan kinetik enerjiye sahiptir. Birim alan için rüzgardan elde edilebilecek güç,

$$P(v) = \frac{1}{2}\rho v^3 \tag{6}$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada P(v), v hızındaki rüzgarın sahip olduğu gücü ve ρ se havanın yoğunluğunu ifade etmektedir. Weibull dağılımı için ortalama rüzgar gücü yoğunluğu ise,

$$P_m = \frac{1}{2}\rho \int_0^\infty v^3 f(v) dv \tag{7}$$

eşitliği ile ifade edilebilir [14, 17]. (1) ve (7) eşitliklerinin ortak çözümünden Weibull dağılımı için en genel halde ortalama güç yoğunluğu P_m aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [8, 7].

$$P_m = \frac{1}{2}\rho c^3 \Gamma\left[1+\frac{3}{k}\right] \tag{8}$$

4. ÖRNEK BİR UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu çalışmaya örnek olması bakımından, Sakarya–Esentepe bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacıyla kurulan rüzgar ölçüm istasyonundan elde edilen rüzgar hızı ve yönü değerleri, istatistiksel analizde kullanılmıştır. Bu istasyonda 10 ve 30 metre de rüzgar hızı, 30 metre de rüzgar yönü ile 3 metrede çevre sıcaklığı değerlerinin ölçümü periyodik olarak yapılmaktadır. Bu analiz çalışmasında rüzgar hızı dağılımının belirlenmesinde, iki parametreli Weibull dağılımı kullanılmıştır. Analizde, rüzgar ölçüm istasyonundan elde edilen 2007 yılı Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs, Haziran aylarını içeren rüzgar verileri kullanılmıştır. Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerinin belirlenmesi, grafik metodu yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Rüzgar verilerinin analizinde kullanılmak üzere MATLAB programı geliştirilmiştir. Ayrıca rüzgar verilerinin analizinde, grafiklerin oluşturulmasında WindPRO yazılımı kullanılmıştır. Bölgenin aylık istatistiksel rüzgar enerjisi analizi yapılmış olup, Weibull parametreleri, rüzgar hız dağılım frekansı, ortalama rüzgar hızı ile güç yoğunluğu değerleri bulunmuştur.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

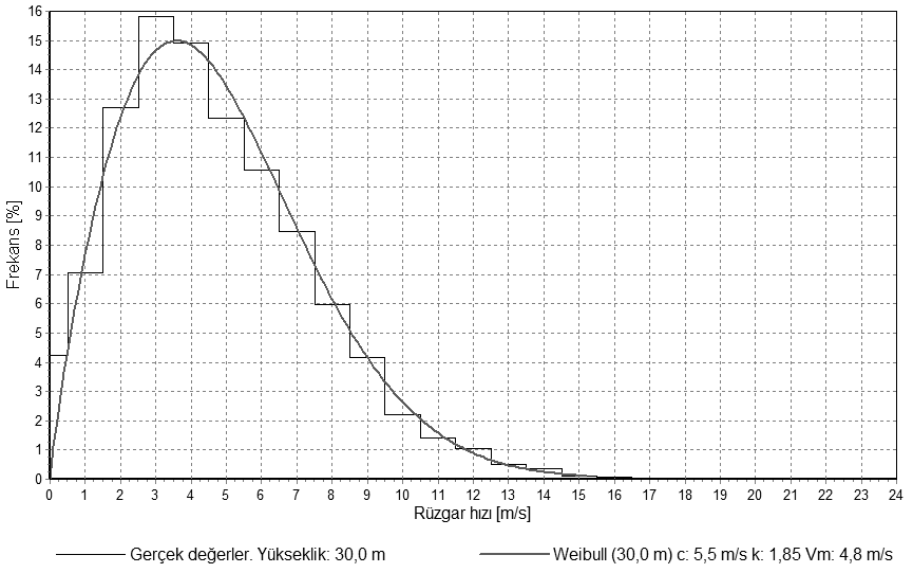
Tablo 1'de 2007 yılı için 6 aylık bir zaman periyodunu kapsayan, aylık ortalama rüzgar hızı, Weibull parametreleri ile ortalama güç yoğunluğu değerleri verilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi aylık ortalama rüzgar hızının gerçek değerlerinin; 3.85 ile 6.16 m/s arasında değiştiği, en yüksek ortalama rüzgar hızının Ocak ayında, en düşük ortalama rüzgar hızının ise Haziran ayında olduğu ve tüm aylar için ortalama rüzgar hızının gerçek değerinin 4.76 m/s olduğu belirlenmiştir. Aynı tabloda Weibull dağılımına göre aylık ortalama rüzgar hızının 3.92 ile 6.22 m/s arasında değiştiği, en yüksek ortalama rüzgar hızının Ocak ayında, en düşük ortalama rüzgar

hızının ise Haziran ayında gerçekleştiği ve tüm aylar için ortalama rüzgar hızının 4.84 m/s olduğu belirlenmiştir. Tabloda görülebileceği gibi, tüm aylar boyunca ortalama (k) şekil parametresinin 1.85 ve (c) ölçek parametresini ise 5.45 m/s olduğu bulunmuştur.

Rüzgar hızının frekans dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Ayrıca sektörel tüm aylar için; ortalama rüzgar hızı, Weibull parametreleri ile frekans değerleri, Tablo 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde; en büyük rüzgar hızı frekansının % 20.85 değerinde kuzey yönde olduğu ve bu yönde yıllık ortalama rüzgar hızının 5.16 m/s olduğu görülmüştür. Tablo 2 ve Şekil 3'de görüldüğü gibi bölgede hakim rüzgar yönünün kuzey olduğu, hakim yönde Weibull (k) şekil parametresinin 2.41, (c) ölçek parametresinin ise 5.82 m/s değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kuzey–doğu ve kuzey–batı yönlerinde önemsenecek büyüklükte bir rüzgar frekansının olduğu görülmüştür. Sektörel ortalama rüzgar hızı değerleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Tablo 2 ve Şekil 3 incelendiğinde; yıllık ortalama rüzgar hızı değerinin kuzey, kuzey-doğu, kuzey-batı, batı ve güney yönlerinde 4 m/s'lik hız değerinden büyük olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Aylık ortalama rüzgar hızı, Weibull parametreleri ile ortalama güç yoğunluğu

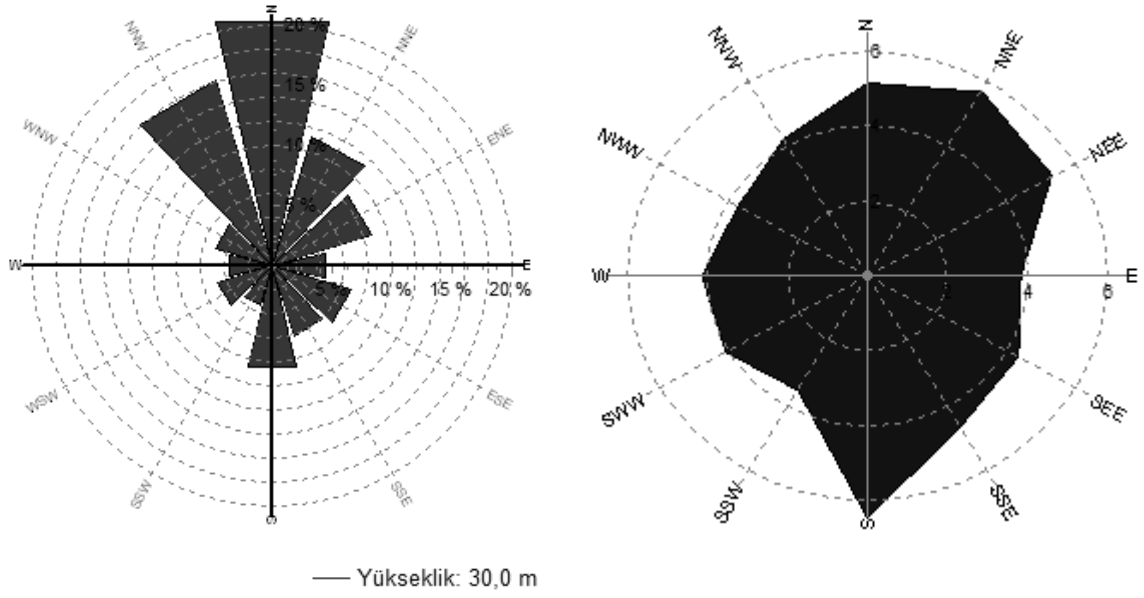
	Weibull dağılımı				Gerçek değerler	
Aylar	V_m (m/s)	k	c (m/s)	P_m (W/m^2)	V_m (m/s)	P_m (W/m^2)
Ocak	6.22	2.11	7.02	258.00	6.16	261.19
Şubat	5.37	1.99	6.06	177.06	5.23	178.54
Mart	5.28	1.91	5.95	178.77	5.27	181.05
Nisan	4.24	2.03	4.79	86.53	4.16	87.90
Mayıs	3.99	1.94	4.50	76.60	3.91	77.74
Haziran	3.92	1.90	4.41	72.95	3.85	74.43
6 Aylık	4.84	1.85	5.45	142.58	4.76	143.61



Şekil 2. Rüzgar hızı frekans dağılımı

Tablo 2. Sektörel ortalama rüzgar hızı, Weibull parametreleri ve frekans

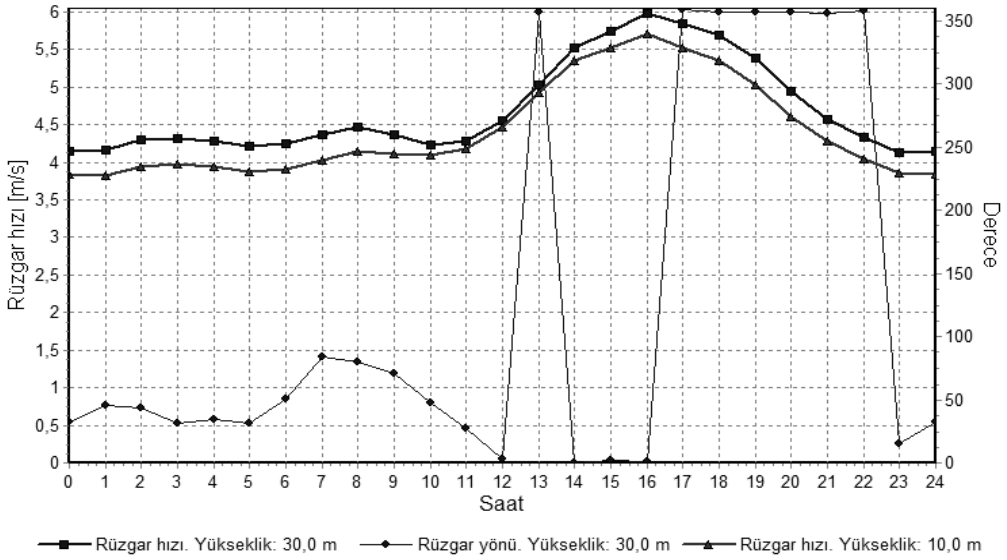
Sektör	c (m/s)	V_m (m/s)	k	Frekans (%)
0-N	5.82	5.16	2.41	20.85
1-NNE	6.43	5.70	1.99	11.27
2-ENE	6.01	5.36	1.72	8.67
3-E	4.33	3.87	1.68	4.57
4-ESE	4.87	4.36	1.62	6.90
5-SSE	5.17	4.64	1.55	6.14
6-S	7.30	6.48	2.52	8.64
7-SSW	3.93	3.50	1.73	3.43
8-WSW	4.58	4.10	1.64	4.78
9-W	4.49	4.14	1.30	3.70
10-WNW	4.20	3.74	1.82	4.95
11-NNW	4.78	4.24	2.23	16.09
Ortalama	5.45	4.84	1.85	100



Şekil 3. Sektörel ortalama rüzgar frekansı ve hızı

Şekil 4'de tüm aylar için saatlik ortalama rüzgar hızı ve yön değerlerinin değişimi verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi ortalama hız değerlerin 30 m'lik ölçüm yüksekliğinde; saat 14:00 ile 20:00 arasında 4-6 m/s arasında değiştiği, yıllık ortalama hız değerinin saat 12:00' dan saat 17:00'a kadar artarak yaklaşık 6 m/s değerine kadar yükseldiği ve daha sonra normalleştiği belirlenmiştir. Benzer durumun 10 m'lik ölçüm yüksekliği içinde görülmüştür.

Aylık ortalama güç yoğunluğunun değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de gösterildiği gibi aylık ortalama güç yoğunluğunun en büyük gerçek değeri 261.19 W/m^2 olup Ocak ayında, en küçük değeri ise Haziran ayında 74.43 W/m^2 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde aylık ortalama güç yoğunluğunun Weibull dağılımına göre en büyük değeri Ocak ayında 258 W/m^2 olarak, en küçük değeri ise Haziran ayında 72.95 W/m^2 olduğu görülmüştür. Tüm aylar boyunca ortalama güç yoğunluğunun gerçek değeri 143.61 W/m^2, Weibull değeri ise 142.58 W/m^2 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Saatlik ortalama rüzgar hızı ve yönü

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; enerji üretimi, amaçlı yapılan rüzgar ölçümleri ve rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi incelenmiştir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin istatistiksel analizi için örnek bir uygulama yapılmıştır. Bu amaç ile; Sakarya – Esentepe bölgesinde kurulan rüzgar ölçüm istasyonunda, 2007 yılı Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs,Haziran aylarını kapsayan ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin ön araştırılması, Weibull dağılımı kullanılarak yapılmıştır. Bulunan önemli sonuç ve öneriler aşağıda özetlenebilir.

1. Rüzgar elektrik santral projelerinde, rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde, mutlaka enerji üretim amaçlı rüzgar ölçümlerinin yapılması gerekmektedir.
2. Enerji üretim amaçlı rüzgar ölçümlerinin yapılabilmesi için, rüzgar elektrik santral sahasında uygun yer veya yerlere rüzgar ölçüm istasyonu kurulması, bu istasyonlarda yapılan rüzgar ölçümlerinin standartlara uygun en az bir yıl periyodik sürekli olarak yapılması gerekmektedir.
3. Enerji amaçlı rüzgar ölçümleri çok dikkat ve hassasiyet gerektirmektedir. Bu nedenle rüzgar ölçüm istasyonunun kurulması ve ölçüm cihazlarının seçiminde uluslar arası standartlara uyulması önem taşımaktadır.
4. Weibull dağılımına göre yapılan analizde; 30 m yükseklik içim tüm aylar için ortalama rüzgar hızı 4.84 m/s, aylık ortalama en yüksek rüzgar hızının Ocak ayında, en düşük ise Haziran ayında olduğu belirlenmiştir. Tüm aylar için Weibull parametreleri k ve c değerleri; 1.85 ve 5.45 m/s olarak hesaplanmıştır.

5. Bölgede sektörel bakımdan hakim rüzgar yönünün Kuzey olduğu ve bu yönde %20.85'lik bir frekans değerine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca Kuzey-doğu ve Kuzey-batı istikametlerinde önemsenecek rüzgar frekansının olduğu görülmüştür.
6. Weibull dağılımına göre 10 m ve 30 m yükseklikllerde yapılan ölçümlerde elde edilen verilerin saatlik değişimleri hesaplanmış ve ortalama saatlik rüzgar hızı değerlerinin özellikle saat 12:00 dan başlayarak arttığı ve bu artışın saat 17:00'a kadar sürdüğü ve sonrası azalarak normalleştiği görülmüştür. Ortalama rüzgar hızında artışın görüldüğü bu saatlerde hakim rüzgar yönünün Kuzey olduğu belirlenmiştir.
7. Weibull dağılımına göre tüm aylar için ortalama güç yoğunluğunun değeri 142.58 W/m^2, aylık ortalama güç yoğunluğunun en yüksek değeri Ocak ayında, olduğu belirlenmiştir.
8. Aylık ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerlerinin gerçek ve Weibull sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.
9. Sonuç olarak Sakarya – Esentepe bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelinin Weibull dağılımına göre yapılan istatistiksel analizinde, Weibull sonuçları ile gerçek sonuçların birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin iyi sayılabilecek bir düzeyde olmadığı fakat, bölgede ölçüm yüksekliğinin artırılması, rüzgar verilerinin en az bir yılı kapsayacak şekilde değerlendirilmesi ve arazinin farklı bölgelerinde rüzgar ölçümünün yapılıp araştırılmasıyla birlikte bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından elverişli olması beklenmektedir.

7. KAYNAKLAR

[1] Oral, F., Ekmekçi, İ., Sakarya bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli, V. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Kayseri, 16-17 Ekim 2009.

[2] Oral, F., Ekmekçi, İ., Rüzgar Ölçüm İstasyonu Standartları ve Sakarya-Esentepe Rüzgar Ölçüm İstasyonu, IV. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Kayseri, 23-24 Kasım 2007.

[3] ÖZGÜR, MA., Kütahya rüzgar karakteristiğinin istatistiksel analizi ve elektrik üretimine uygulanabilirliği, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, Haziran 2006.

[4] Oral, F., Ekmekçi, İ., Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında Weibull dağılımının kullanılması, VIII.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu/UTES'2010, Bursa, Türkiye, 1-3 Aralık 2010.

[5] Durak, M., Özer, S., Rüzgar enerjisi: teori ve uygulama, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği Yayını, Ankara, Mart 2008.

[6] Oral, F., Sakarya-Esentepe yöresi rüzgar enerjisi potansiyelinin yeni bir yaklaşımla belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, Ekim 2010.

[7] Johnson, GL., Wind Energy Systems, Electronic Edition, Manhattan, 2001, KS.

[8] Celik AN., A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey, Renewable Energy 2003;29:593-604.

[9] Bansal C., Bhatti TS., Kothari DP., On some of the design aspects of wind energy conversion systems, Energy Conversion and Management 2002;43:2175-87.

[10] Persaud S, Flynn D, Fox B., Potential for wind generation on the Guyana coastlands, Renewable Energy 1999;18:175-89.

[11] Lun IYF, Lam JC., A study of Weibull parameters using long-term wind observations, Renewable Energy 2000;20:145-53.

[12] Seguro JV, Lambert TW., Modern estimation of the parameters of the Weibull wind Speed distribution for wind energy analysis, Journal of Wind Engneering and Industrial Aerodynamics 2000; 85:75-84.

[13] Ulgen K, Hepbasli A., Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey. International Journal of Energy Research 2002; 26:495-506.

[14] Gökçek M, Bayülken A, Bekdemir Ş., Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey. Renewable Energy 2007;32:1739-1752.

[15] Akdağ, S.A., Güler, Ö., Weibull dağılımı parametrelerinin belirleme metotlarının karşılaştırılması, VII.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu/UTES'2008, S:707-714, İstanbul, Türkiye, 17 – 19 Aralık 2008.

[16] Almalı, M. N., İki Parametreli Weibull Dağılışında Parametrelerin Tahminlenmesi için Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması ve Rüzgar Hızı Verilerine Uygulanması, Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 2005.

[17] Arslan O., Technoeconomic analysis of electricity generation from wind energy in Kutahya, Turkey. Energy 2010;35:120-131.