



Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanmasında Parametre Tahmin Yöntemlerinin İncelenmesi

Y. Murat BULUT^{1,*}, Emin AÇIKKALP²

¹*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi İstatistik Bölümü*

²*Bilecik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği*

Başvuru: 28/02/2013 Düzeltme: 07/05/2013 Kabul: 30/05/2013

ÖZET

Rüzgar gücü potansiyeli hesaplanmasında çok yaygın bir şekilde Weibull dağılımı kullanılmaktadır. Weibull dağılımının parametrelerini tahmin etmek için literatürde bir çok yöntem vardır. Ancak L-moment yöntemi rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmasında çok fazla kullanılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, küçük örnek hacimlerinde bile oldukça etkin sonuçlar veren L-moment yöntemini tanıtmaktır. Ayrıca Eskişehir ili 2009 Aralık ayı rüzgar hızı verilerine ilişkin iki parametrelili Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametreleri En Küçük Kareler, En Çok Olabilirlik ve L-moment yöntemleriyle tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, parametre tahmini, weibull dağılımı

ABSTRACT

Weibull distribution is widely used to compute wind power potential. There are a lot of estimation methods about Weibull distribution's parameters in literature. But L-moment estimation method is rarely used to compute wind power potential. The aim of this study is introduced L-moment estimation method which provide very effective results in small samples. Furthermore, in this study, shape and scale parameters of two parameter Weibull distribution were estimated with ordinary least squares, maximum likelihood and L-moment methods for actual wind speed data.

Keywords: Wind energy, parameter estimation, weibull distribution

1. GİRİŞ

Enerji toplumsal gelişmişliğin en önemli göstergelerinden biridir. Devletlerin ekonomik ve endüstriyel gelişiminde enerjinin payı büyüktür [1]. Rüzgar enerjisi elde edilmiş ve tüketim süreci aşamasında uzun dönemde hem ucuz hem de çevre için zararı oldukça az olan enerji çeşitlerindedir. Rüzgar enerjisi insanoğlunun uzun zamanlardan beri kullandığı bir enerji kaynağıdır. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisi büyük bir paya sahiptir. Rüzgar enerjisinin genel enerji kullanımındaki

payı dünya üzerinde giderek artmaktadır [2]. Günümüzde rüzgar enerjisinin kullanımının yaygın olduğu ülkelere Danimarka, İspanya, Almanya, Amerika ve Hindistan örnek gösterilebilir [3]. Türkiye'de yapılan rüzgar ölçümleri ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyelinin olduğunu göstermektedir [4]. Enerjinin yeterli, sürekli, düşük maliyetli ve çevreyle uyumlu bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması ekonomik dengeler ve kalkınma için çok önemlidir. Bu enerjinin kullanılabilmesi rüzgar rejiminin doğru modellenmesine bağlıdır [5].

Bu çalışmada Eskişehir Meteoroloji Müdürlüğü'nden alınan Eskişehir ili 2009 yılı Aralık ayına ait 10m ve 30m' den ölçülen rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. İlk olarak, rüzgar verilerinin Weibull dağılımına uygunluğu Anderson-Darling testi ile sınanmıştır. Daha sonra rüzgar verilerine ilişkin Weibull dağılımı parametreleri En Küçük Kareler (EKK), En Çok Olabilirlik (EÇO) ve L-moment (L-MoM) yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca üç yöntemle hesaplanan Weibull parametre tahminleri kullanılarak Eskişehir ilinin rüzgar gücü potansiyeli hesaplanmış ve parametre tahmin yöntemlerinin hesaplanan güç potansiyeli üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

$$f(x; \alpha, \beta) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right\}, x > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right\} \quad (2)$$

şeklinde elde edilebilir. İki parametrelili Weibull dağılımının beklenen değeri ve varyansı

$$E[x] = \alpha \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (3)$$

$$Var[x] = \alpha^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir [11-12]. Weibull dağılımı oldukça esnek bir dağılımdır. Bu esneklik şekil parametresine bağlıdır. Şekil parametresi $\beta=1$ olduğunda Üstel dağılım, $\beta=2$ olduğunda Rayleigh dağılımına, $\beta = 3.4$ olduğunda ise normal dağılıma dönüşür.

3. PARAMETRE TAHMİN YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada istatistikte yaygın olarak kullanılan parametre tahmin yöntemlerinden EKK, EÇO yöntemleri ve literatürde henüz yaygın bir şekilde kullanılmayan L-MOM yöntemi ele alınmıştır. Bu bölümde ele alınan 3 yöntem kısaca tanıtılacaktır.

$$\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) \right\} = \beta \ln x - \beta \ln \alpha \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemde $Y = \ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) \right\}$ ve $X = \ln x$ olarak alınıp $a = -\beta \ln \alpha$ ve $b = \beta$ dönüşümleri yapılarak $Y = a + bX$ doğrusal denklemi elde edilir [14].

Burada Weibull dağılımının tahminlerini elde etmek için $F(x_i)$ değerlerinin parametrik olmayan

2. WEIBULL DAĞILIMI

Rüzgar enerjisi potansiyelin hesaplanmasında en sık kullanılan dağılım Weibull dağılımıdır. Bu dağılım 1930'lu yıllarda İsveçli fizikçi Waloddi Weibull tarafından bulunmuştur. Weibull dağılımı şekil parametresin göre esneklik sağladığından rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında bir çok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir [6-10]. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu

3.1. En Küçük Kareler Yöntemi (EKK)

En küçük kareler yöntemi uygulamada çok sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntem iki değişken arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için kullanılmakta olup regresyon yöntemi olarak da bilinir [13].

Weibull dağılımının parametrelerinin EKK yöntemi ile tahmin edilmesi için (2) nolu eşitlikteki dağılım fonksiyonunun doğrusallaştırılması gerekmektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (2) nolu eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak (5) nolu eşitlik elde edilir.

tahminlerinin kullanılması gerekmektedir. $F(x_i)$ 'leri hesaplamak için farklı eşitlikler bulunmaktadır. Bu çalışmada $F(x_i)$ 'ler için Weibull'un ortalama sıra tahmin edicisi $\hat{F}(x_{(i)}) = \frac{i}{N+1}$ kullanılmıştır.

$Y = a + bX$ denkleminde $\hat{F}(x_{(i)})$ yerine yazıldığında Weibull dağılımının α ve β

parametrelerinin en küçük kareler tahmin edicileri (6) ve (7) nolu eşitliklerdeki gibi elde edilir.

$$z_{(i)} = \ln x_{(i)} \text{ ve } y_{(i)} = \ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - F(x_{(i)})} \right) \right\}$$

olmak üzere;

$$\hat{\beta} = \frac{(\sum z_{(i)} y_{(i)}) - (\sum z_{(i)}) (\sum y_{(i)})}{(\sum z_{(i)}^2) - (\sum z_{(i)})^2}$$

(6)

$$\hat{\alpha} = \exp \left\{ - \frac{\sum y_{(i)} - \hat{\beta} \sum z_{(i)}}{\hat{\beta}} \right\}$$

(7)

$$L(\alpha, \beta; x_1, \dots, x_n) = \frac{\beta^n}{\alpha^{n\beta}} \prod_{i=1}^n x_i^{\beta-1} \exp \left\{ - \frac{1}{\alpha\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \right\} \tag{8}$$

$$\ln L(\alpha, \beta; x_1, \dots, x_n) = n \ln(\beta) - n\beta \ln(\alpha) + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(x_i) - \frac{1}{\alpha\beta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \tag{9}$$

$$\left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^\beta} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i)}{n} \right) \right] - \hat{\beta} = 0 \tag{10}$$

Bu çalışmada (10) nolu denklemin çözümünde Modified Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Ölçek parametresinin EÇO tahmin yöntemiyle tahmin edilmesinde benzer olarak (9) nolu denklemdaki log-olabilirlik fonksiyonunun birinci türevi alınarak (11) denklemi elde edilir. (11) nolu denklem yardımıyla ölçek parametresinin EÇO tahmin edicisi hesaplanır.

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\beta}{n} \right)^{\left(\frac{1}{\hat{\beta}} \right)} \tag{11}$$

3.3. L-MoM Yöntemi

L-Moment tahmin yöntemi sıra istatistiklerine (order statistics) dayanan bir yöntemdir (ayrıntılı bilgi için bakınız; [15]). Yöntem sıra istatistiklerine dayandığından dolayı parametre tahminine başlamadan önce rüzgar hızı verilerinin küçükten büyüğe doğru sıralanması ve bu sıralanmış değerlerin kullanılması gerekmektedir.

$$x_{(1)} < x_{(2)} < \dots < x_{(n)}$$

sıralanmış rüzgar hızı verilerini gösterebilir. Moment yöntemindeki mantığa paralel olarak öncelikle örnekleme ilişkin değişim katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Örnekleme ilişkin değişim katsayısı (12) yardımıyla hesaplanabilir.

3.2. En Çok Olabilirlik Yöntemi (EÇO) (Maximum Likelihood Method)

İki parametrelili Weibull dağılımının parametrelerinin tahmininde EÇO yöntemi kullanıldığında (8) nolu denklemdaki olabilirlik fonksiyonunun logaritması alınarak (9) denkleminde verilen log-olabilirlik fonksiyonu elde edilir. (9) nolu denklemin birinci türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesiyle şekil parametresinin tahmin edicisi direkt olarak elde edilemez. Tahmin ediciyi elde edebilmek için iteratif yöntemlerden yararlanmak gerekir. (9) denkleminde verilen log-olabilirlik fonksiyonunun şekil parametresi için türevi alındıktan sonra şekil parametresi (10) denklemini sağlayan $\hat{\beta}$ değerine eşittir.

$$CV_{L-MoM} = \left\{ \frac{\left(\frac{2}{n} \right) \left[\sum_{i=2}^n \left(\frac{i-1}{n-i} \right) (x_i) \right]}{\left(\frac{1}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)} - 1 \right\} \tag{12}$$

İkinci adımda örnekleme ilişkin hesaplanan değişim katsayısı yardımıyla şekil parametresi tahmin edilir.

$$\left\{ 1 - \left[2^{-\left(\frac{1}{\hat{\beta}} \right)} \right] \right\} = CV_{L-MoM} \tag{13}$$

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Eskişehir ili 2009 yılı Aralık ayı 10m de ölçülen veriler yardımıyla Hellman Yükseltme Bağıntısından kullanılarak 30m için rüzgar hızları hesaplanmıştır. Hellman bağıntısı

$$V_{rist} = V_{rölç} \left(\frac{H_{ist}}{H_{ölç}} \right)^b \tag{14}$$

şeklinde yazılabilir. Burada; V_{rist} , $V_{rölç}$, H_{ist} ve $H_{ölç}$ sırasıyla istenen rüzgar hızı (m/s), ölçülen rüzgar hızı (m/s), istenen yükseklik (m), ölçüm yapılan yükseklik (m) ve yüzey durumunu göstermektedir [16]. b yeryüzü sürtünme katsayısı yüzey durumuna göre seçilmektedir.

Bu çalışmada $b=0.34$ olarak alınmıştır (b hakkında ayrıntılı bilgi için bakınız; [17]).

10m ve 30m için elde edilen verilerin iki parametrelili Weibull dağılımına uygunluğu Anderson-Darling testi ile sınanmış ve A^2 istatistiği 10m ve 30m için (15) de verilen formül kullanılarak 2.08 olarak hesaplanmıştır.

$$A^2 = -N - \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{N} [\ln F(Y_i) + \ln (1 - F(Y_{N+1-i}))] \right\} \quad (15)$$

Anlamlılık düzeyi 0.05 alındığında A^2 istatistiğine ait kritik değer 2.49 olarak hesaplanmıştır. Anderson-Darling testi sonucunda; 10m ve 30m' den alınan rüzgar hızlarının dağılımının 0.05 anlamlılık düzeyinde iki

parametrelili Weibull dağılımına sahip olduğu kabul edilmiştir. Burada belirtilen $F(Y_i)$ Weibull kümülatif dağılım fonksiyonunu ve Y_i' ler ise sıralanmış değerleri göstermektedir [18].

Çizelge 1. Weibull dağılımına ilişkin parametre tahminleri

Parametreler	Yöntem					
	EKK		EÇO		L_MoM	
	10m	30m	10m	30m	10m	30m
Ölçek parametresi(α)	2.19	3.19	2.22	3.23	2.21	3.22
Şekil parametresi(β)	2.56	2.56	2.36	2.36	2.35	2.35
MSE Değerleri	0.120868	0.158268	0.029276	0.087792	0.02665	0.085203

Çizelge 1 incelendiğinde rüzgar hızının ölçüldüğü yüksekliğin şekil parametresinde (β) farklılığa neden olmadığı görülmektedir. 30m' deki rüzgar hızının daha fazla değişkenlik gösterdiği söylenebilir. Çünkü ölçek parametresi (α) bu tahmin yöntemlerinde 10m için daha küçük, 30m için daha büyük olarak tahmin edilmiştir.

Ayrıca MSE değerleri incelendiğinde 10m'deki rüzgar hızı için en küçük MSE değerinin L-MoM yönteminde elde edildiği görülmektedir. Buna karşın en büyük MSE değeri ise EKK yöntemi ile bulunmuştur. 10m'deki rüzgar hızı verilerine ilişkin en iyi tahmini L-MoM yönteminin yaptığı en kötü tahmini ise EKK yönteminin yaptığı gözlenmiştir. 30m'deki rüzgar hızı verilerine ilişkin MSE değerleri incelendiğinde ise 10m'dekine benzer olarak en iyi tahminin L-MoM yöntemi ile en kötü tahminin ise EKK yöntemi ile yapıldığı görülmüştür. 10m'deki rüzgar hızı verilerine ilişkin MSE değerleri 3 yöntemde de 30m'deki MSE değerlerine göre daha küçüktür. Bunun bir nedeni 30m'deki rüzgar hızı verilerinin değişkenliğinin 10m'dekilere göre daha fazla olmasıdır. Bu nedenle rüzgar hızı analizleri için 10m'deki veriler kullanılarak yapılacak tahminler 30m için elde edilecek tahminlerin hesaplanmasında kullanılabilir.

10m ve 30m'deki rüzgar hızı verileri için genel olarak bakıldığında L-MoM yöntemi ile EÇO yönteminin birbirlerine yakın değerler verdikleri görülmektedir, EKK yöntemi ise diğer iki yöntemle göre belirgin bir şekilde zayıf sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak literatürde yaygın olarak kullanılmayan L-MoM yönteminin literatürde sık olarak kullanılan EKK ve EÇO yönteminden daha iyi tahminler verdiği görülmektedir. Bu yüzden rüzgar hızı verilerinin tahmininde L-MoM yönteminin kullanılmasının uygun olacağı görülmektedir. L-MoM yönteminin diğer yöntemlere göre avantajı ise küçük örneklemlerde bile iyi tahmin yapabilmesidir. Bundan dolayı maliyette göz önünde bulundurularak daha az verileri için L-MoM yöntemi ile tahmin yapılması yararlı olacaktır.

Ayrıca üç farklı yöntemle modellenen rüzgar hızı verilerine ilişkin tahmin edilen güç yoğunluğu Çizelge 2' de verilmiştir. Tahmin edilen güç yoğunluğu

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \alpha^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{\beta} \right) \quad (16)$$

formülü yardımıyla hesaplanabilir [19]. Kuru havada 1 atm basınç ve 15 °C de standart hava yoğunluğu değeri 1.22 olmaktadır. Tahmini güç yoğunluğu formülünde standart hava yoğunluğu $\rho=1.22$ olarak alınmıştır.

Çizelge 2. Rüzgar hızının tahmin edilen güç yoğunlukları

Güç yoğunluğu(P_w)	EKK		EÇO		L_MoM	
	10m	30m	10m	30m	10m	30m
	6.95	21.49	7.65	23.58	7.56	23.43

Sonuç olarak, bu çalışmada rüzgar enerjisi potansiyelinde sıklıkla kullanılan Weibull dağılımı ele alınmıştır. Son zamanlarda Weibull dağılımının parametre tahmini için çok sık kullanılmaya başlayan L-moment yöntemi tanıtılmıştır. Eskişehir ili 2009 yılı Aralık ayına ilişkin veri seti için ilk olarak dağılıma uygunluk sınaması yapılmış ve verilerin Weibull dağılımına uyduğu görülmüştür. Daha sonra ise Weibull dağılımına ilişkin parametreler EKK, EÇO ve L-MoM yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Rüzgar hızının ölçüldüğü yüksekliğin ölçek parametresini (α) etkilediği fakat şekil parametresini (β) etkilemediği görülmüştür. Bu nedenle farklı yüksekliklerdeki rüzgar gücü potansiyelinin hesaplanmasında ölçek parametresinin (α) doğru tahmin edilmesinin çok önemli olduğu görülmektedir.

Küçük örneklem hacimlerinde etkin tahminler veren L-Moment yöntemi özellikle rüzgar enerjisi üretimi için yapılan fizibilite çalışmalarında faydalı olacaktır.

SEMBOLLER

x_i : Gözlenen Rüzgar Hızları
 α : Ölçek Parametresi
 β : Şekil Parametresi
 $f(\cdot)$: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
 $F(\cdot)$: Kümülatif Fonksiyon
 $E(\cdot)$: Beklenen Değer
 $Var(\cdot)$: Varyans
 $\Gamma(\cdot)$: Gamma Fonksiyonu
 y_i : Sıralanmış Gözlemler
 A^2 : Anderson-Darling Test İstatistiği
 N : Gözlem Sayısı
 V_{rist} : İstenen Rüzgar Hızı (m/s)
 $V_{ölç}$: Ölçülen Rüzgar Hızı (m/s)
 H_{ist} : İstenen Yükseklik (m)
 $H_{ölç}$: Ölçüm Yapılan Yükseklik (m)
 b : Yüzey Durumunu
 CV : Değişim Katsayısı
 P_w : Güç Yoğunluğu
 ρ : Standart Hava Yoğunluğu

KAYNAKÇA

- [1] Akdağ, A. S. ve Dinler, A., “A New Method to Estimate Weibull Parameters for Wind Energy Applications”, *Energy Conversion and Management*, 50, 1761-1766, 2009.
- [2] Uçar, A. ve Balo, F., “Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Generation Potentiality in Uludağ-Bursa”, *Turkey. Applied Energy*, 86, 333-339, 2009.
- [3] Ahmed, S. A., “Wind Energy as a Potential Generation Source at Ras Benas, Egypt”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2167-2173, 2010.
- [4] Akpınar, S. ve Akpınar, E. K., “Estimation of Wind Energy Potential Using Finite Mixture Distribution Models”, *Energy Conversion and Management*, 50, 877-884, 2009.
- [5] Albostan A., Eren L., Çekiç Y., “Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi”, *ELECO 2008*, 24-26 Kasım, Bursa.
- [6] Şen, Z. ve Şahin A., “Regional Assessment of Wind Power in Western Turkey by the Cumulative Semivariogram Method”, *Renewable Energy*, 12(2), 169-177, 1997.
- [7] Şahin A.Z. ve Aksakal A., “Wind Power Energy Potential at the Northeastern Region of Saudi Arabia”, *Renewable Energy*, 14(1-4), 435-440, 1998.
- [8] Lun, I.Y.F. ve Lam J.C., “A Study of Weibull Parameters Using Long-term Wind Observations”, *Renewable Energy*, 20, 145-153, 2000.
- [9] Ülgen K. ve Hepbaşlı, A., “Determination of Weibull Parameters for Wind Energy Analysis of İzmir, Turkey”, *International Journal of Energy Research*, 26, 495-506, 2002.
- [10] Çelik, A.N. ve “A Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Rayleigh Models at Southern Region of Turkey”, *Renewable Energy*, 29, 593-604, 2004.
- [11] Cohen, A. C., “Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based On Complete and On Censored Samples”, *Technometrics*, 7(4), 579-588, 1965.
- [12] Johnson, N.L. ve Kotz, S., Balakrishnan, N., “Continuous Univariate Distributions. Volumel: Second Edition”, *Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. A Wiley – Interscience Publication: John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore*, 1994.
- [13] Akdi, Y., “Matematiksel İstatistiğe Giriş”, *Gazi Kitabevi, Ankara*, 2011.
- [14] Hossain, A.M. ve Zimmer, W.J., “Comparison of Estimation Methods for Weibull Parameters: Complete and Censored Samples”, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 73(2), 145-153, 2003.
- [15] Hosking, J. R. M. ve Wallis, J. R., “Regional Frequency Analysis”, *Cambridge University Press*, 1990.
- [16] Demirci, E. ve Şenlik, İ., “Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yerleşkesi Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Dönemsel Değerlendirilmesi”, *Rüzgar Enerjisi Sempozyumu*, 04-05 Haziran 2009, Samsun.
- [17] Şen, Ç., “Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılaştırılması”, *Dokuz Eylül Üniversitesi*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,
2003.

- [18] Anderson T. W. ve Darling D. A., “A Test of Goodness of Fit”, *Journal of the American Statistical Association*, 49(268), 765-769, 1954.
- [19] Bilgili, M. ve Şahin, B., “Statistical Analysis of Wind Energy Density in the Western Region of Turkey”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(13), 1224-1235, 2010.