

RÜZGAR ÇİFTLİĞİ POTANSİYELİNİN GÜVENİLİRLİĞE DAYALI TEORİK DAĞILIMI

Serkan Eryılmaz¹, Femin Yalçın²

¹Atılım Üniversitesi, ²İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
¹serkan.eryilmaz@atilim.edu.tr, ²femin.yalcin@ikc.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada; belirli sayıda rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliğinin, rüzgar türbinlerinin güvenilirlik değerlerini de göz önüne alarak elektrik üretim kapasitesinin teorik istatistiksel dağılımı elde edilmiştir. Genel olarak bir rüzgar türbininin performansını etkileyen dışsal ve içsel olmak üzere iki tür rastgelelik kaynağı vardır. Bunlardan dışsal olan ilgili bölgedeki rüzgar hızı ve içsel olanı da türbinin mekanik durumu (çalışma/bozulma) ile ilgili olan kaynaklardır. Bir rüzgar türbininin güvenilirliği, türbinin belirli koşullar altında arıza vermeden çalışabilmesi olasılığı olarak tanımlanabilir. Çalışmada rüzgar hızının dağılımına ve rüzgar türbininin güvenilirliğine bağlı olarak hem tek bir rüzgar türbini için hem de bir rüzgar çiftliği için elektrik üretim kapasitelerinin kesin dağılımları olasılık teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede belirli bir bölgedeki rüzgar hızı verisi ve kullanılacak olan rüzgar türbinlerinin modeline ilişkin bilgi kullanılarak çiftlik kurulmadan önce belirli sayıdaki rüzgar türbini ile çiftliğin üretim kapasitesinin ne olabileceği ya da belirli bir seviyede güç elde etmek için kullanılması gereken türbin sayısının ne olacağı belirlenebilecektir.

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi sisteminin temel bileşenleri olarak görev yapan rüzgar türbinlerinin performansını etkileyen dışsal ve içsel olmak üzere iki tür rastgelelik kaynağı vardır. Bunlardan dışsal olanı türbinin kurulu olduğu bölgedeki rüzgar rejimi, içsel olanı ise türbinin mekanik işleyişi ile ilgilidir. İçsel olan kaynak türbinin güvenilirliğini etkilemektedir. Genel olarak bir rüzgar türbininin güvenilirliği; türbinin belirli çevresel koşullar altında güç üretebilmesi olasılığı olarak tanımlanabilir. Aynı model rüzgar türbini farklı bölgelere kurulduğunda bölgelerdeki farklı çevresel koşullar hem türbinin güvenilirliğini hem de rüzgar hızındaki değişimden dolayı türbinin üretim kapasitesini etkileyecektir. Dolayısıyla, bir rüzgar türbininin performansı (güç üretim kapasitesi) rüzgar hızı ve türbin güvenilirliği'ne bağlı bir rastgele değişkendir.

Bu çalışmada; farklı kapasitelere ve güvenilirlik değerlerine sahip olabilen rüzgar türbinlerinden oluşmuş bir rüzgar çiftliğinin elektrik üretim kapasitesinin teorik istatistiksel dağılımı ve ortalama üretim kapasitesi elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar çoğunlukla belirli bölgelerden toplanmış güç verisine istatistiksel bir dağılımın uyumunun araştırması ile ilgili olup elde edilen dağılımlar empirik dağılımlardır ([1]-[4]). Bu tür bir empirik çalışmanın yapılabilmesi için kurulu bir rüzgar çiftliğinin bulunması gereklidir. Ancak teorik istatistiksel dağılımın bilinmesi, belirli bir bölgedeki rüzgar hızı verisi ve kullanılacak olan rüzgar türbinlerinin modeline ilişkin bilgi kullanılarak çiftlik kurulmadan önce belirli sayıdaki rüzgar türbini ile çiftliğin üretim kapasitesinin ne olabileceği ya da belirli bir seviyede enerji elde etmek için kullanılması gereken türbin sayısının ne olacağı konularında ön bilgi sağlayabilir.

Rüzgar türbini karakteristiklerini ve rüzgar hızının istatistiksel dağılımını kullanarak bir rüzgar türbininin üretim kapasitesinin teorik dağılımı [5]'de elde edilmiştir. [6]'da belirli sayıda özdeş (aynı güvenilirlik değerlerine sahip aynı model) türbinden oluşan bir rüzgar çiftliği için toplam güç üretim kapasitesinin teorik istatistiksel dağılımı elde edilmiştir.

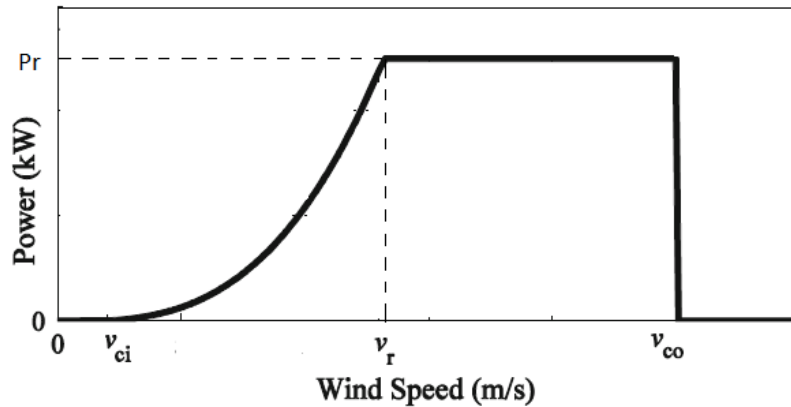
Bir rüzgar çiftliğinin potansiyeli, çiftlikte bulunan rüzgar türbinlerinin üretim kapasitelerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Her bir rüzgar türbininin güç üretim kapasitesi, ilgili bölgedeki rüzgar hızına ve türbinin mekanik durumuna bağlı bir rastgele değişken olduğundan M adet rüzgar türbininden oluşan bir çiftliğin potansiyeli M rastgele değişkenin toplamı olarak tanımlanır. Dolayısıyla rüzgar çiftliğinin potansiyelinin teorik dağılımını elde etmek için M rastgele değişkenin toplamının dağılımını bulmak gerekmektedir. Bunun için en uygun yöntemlerden birisi olasılık tekniklere dayalı konvolüsyon yöntemidir. Bu çalışmada; özdeş olmayabilen (farklı modeller ya da farklı güvenilirlik değerlerine sahip) rüzgar türbinlerinden oluşmuş bir rüzgar çiftliğinin potansiyelinin teorik dağılımı konvolüsyon yöntemi yardımıyla elde edilecek ve bu dağılımın ne tür uygulamalarda kullanılabileceği gösterilecektir.

2. RÜZGAR ÇİFTLİĞİ POTANSİYELİNİN MODELLENMESİ

M adet rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliğini ele alalım. Rüzgar hızının rastgele değişken olması bir rüzgar türbini tarafından üretilen gücün de rastgele değişken olmasına neden olmaktadır. Rüzgar çiftliğinin kurulacağı ya da kurulu olduğu bölgedeki rüzgar hızı V rastgele değişkeni ile gösterilecek olursa rüzgar hızı ile türbinin ürettiği güç arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır ([5]).

$$P_{WT}^{(j)} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ veya } v \geq v_{co} \text{ ise,} \\ P_r \frac{(v^3 - v_{ci}^3)}{(v_r^3 - v_{ci}^3)}, & v_{ci} \leq v < v_r \text{ ise,} \\ P_r, & v_r \leq v < v_{co} \text{ ise.} \end{cases} \quad (1)$$

Burada $P_{WT}^{(j)}$ jnci rüzgar türbininin ürettiği gücü, v_{ci} türbinin devreye girme rüzgar hızını (cut-in wind speed), v_r türbinin nominal güce ulaştığı rüzgar hızını (rated wind speed), v_{co} türbinin devreden çıkma rüzgar hızını (cut-out rüzgar hızı), P_r türbinin nominal gücünü ve v rüzgar hızını ifade etmektedir. Bir rüzgar türbinine ait güç eğrisi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Rüzgar türbini güç eğrisi

v_{ci} , v_r , v_{co} ve P_r değerleri rüzgar türbini modellerine göre farklılık göstermekte olup bu çalışmada bu sayısal değerler rüzgar türbininin karakteristikleri olarak adlandırılacaktır. v_{ci} değeri, türbinin devreye girmesi ve güç üretebilmesi için gerekli olan rüzgar hızı olup rüzgar hızı bu değer altında olduğunda türbin güç üretememektedir. Rüzgar hızının v_{ci} ve v_r değerleri arasında olması durumunda türbin rüzgar hızının kübü ile orantılı artan elektrik gücü üretmektedir. Rüzgar hızı v_r ve v_{co} değerleri arasında iken türbin sabit nominal güçte üretim yapmakta olup rüzgar hızının v_{co} değerini aşması durumunda türbin kendisini korumak üzere durmakta ve güç üretmemektedir.

M adet türbinden oluşan bir rüzgar çiftliğinin üretim potansiyeli P_c , (2) numaralı eşitlik ile tanımlanır.

$$P_c = P_{WT}^{(1)} + P_{WT}^{(2)} + \dots + P_{WT}^{(M)} \quad (2)$$

(2) numaralı eşitlikte $P_{WT}^{(1)}, \dots, P_{WT}^{(M)}$ rastgele değişkenleri M adet türbine ait üretilen güçleri göstermektedir.

$F(v) = P\{V \leq v\}$ ile rüzgar hızı rastgele değişkenine ait birikimli dağılım fonksiyonu gösterilmek üzere tek bir rüzgar türbini tarafından gücün teorik dağılım fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [5], [6].

$$H(x) = P\{P_{WT}^{(1)} \leq x\} = \begin{cases} 0, & x < 0 \text{ ise,} \\ H_1(x), & 0 \leq x < P_r \text{ ise,} \\ 1, & x \geq P_r \text{ ise.} \end{cases} \quad (3)$$

$$H_1(x) = 1 - F(v_{co}) + F\left(\left[\frac{x}{P_r}(v_r^3 - v_{ci}^3) + v_{ci}^3\right]^{\frac{1}{3}}\right) \quad (4)$$

3. RÜZGAR ÇİFTLİĞİ POTANSİYELİNİN DAĞILIMI

Rüzgar hızı, türbin tarafından üretilen gücü etkileyen bir rastgele değişken olup ikinci bölümde açıklandığı üzere rüzgar hızının yeterli olmadığı (v_{ci} değerinin altında) ya da belirli bir seviyenin üstünde olduğu (v_{co} değerinin üstünde) durumlarda türbin güç üretememektedir. Türbinin güç üretemeyeceği bir diğer durum ise türbinin arızalanması ve işlevini yerine getirememesi durumudur. Birçok alt sistem ve bileşenden oluşan türbinin arıza vermesi olasıdır. Türbinin arıza vermeden çalışması (güç üretilmesi) olasılığı türbinin güvenilirliği olarak tanımlanır. Türbin güvenilirliğini etkileyen en önemli faktörlerden bazıları yıldırım düşmesi, yüksek rüzgar hızı, buzlanma gibi iklim koşullarıdır [7].

Belirli bir zaman aralığında i nci türbinin arızasız çalışması olasılığı p_i ile ifade edilsin, $i = 1, 2, \dots, M$. Türbinin her zaman arızasız çalıştığı bilindiğinde ($p_i = 1$ olması durumu), türbinin ürettiği gücün teorik dağılımı (3) eşitliğiyle verilmektedir. Gerçekte böyle bir durum söz konusu değildir. $i = 1, 2, \dots, M$ için i nci türbinin p_i olasılığı ile çalıştığı ve $1 - p_i$ olasılığı ile arızalı olup çalışmadığı göz önüne alındığında i nci türbin tarafından üretilen gücün dağılımı:

$$\begin{aligned} H(x; p_i) &= p_i P\{P_{WT}^{(1)} \leq x\} + (1 - p_i)I(x \geq 0) \\ &= \begin{cases} 0, & x < 0 \text{ ise,} \\ p_i H_1(x) + 1 - p_i, & 0 \leq x < P_r \text{ ise,} \\ 1, & x \geq P_r \text{ ise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

i nci türbinin güvenilirliğini ifade eden p_i 'ye ait tahmin değerinin hesaplanması için türbinin zaman içerisindeki bozulma verisine ihtiyaç vardır. Bu değer, türbinin bozulma oranını tahmin ettikten sonra hesaplanabilir. Türbin bozulma oranının tahmini için çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmıştır [8]. Bu çalışmada p_i değerinin tahmin edilmesi amaçlanmamakta, verilmiş p_i değerleri için türbinlerin ve çiftliğin güç üretim kapasitelerinin teorik dağılımı ile ilgilenilmektedir.

Türbinlerin birbirinden bağımsız ve farklı güvenilirlik değerlerine sahip olması durumunda (2) numaralı eşitlik ile tanımlandığı üzere M adet türbinden oluşan rüzgar çiftliğinin potansiyeli

birbirinden bağımsız ve farklı dağılıma sahip M rastgele değişkenin toplamıdır. P_r rastgele değişkeninin dağılımı aşağıdaki konvolüsyon eşitliği yardımıyla yinelemeli olarak hesaplanabilir.

$$H^{*M}(x; p_M) = \int_0^{P_r} H^{*M-1}(x; p_{M-1})h(y; p_M)dy, \quad (6)$$

$M \geq 2$. Burada $p_K = (p_1, \dots, p_K)$ vektörü, K adet türbine ait güvenilirlik değerlerini göstermekte olup $H^{*1}(x; p_1)$ değeri (5) nolu eşitlikte p_i yerine p_1 yazılması ile elde edilir. (6) numaralı eşitlikteki $h(y; p_M)$ olasılık yoğunluk fonksiyonunu göstermekte olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$h(y; p_M) = p_M h_1(y) + (p_M [F(v_{ci}) + 1 - F(v_{co})] + 1 - p_M) I(x = 0) + p_M [F(v_{co}) - F(v_r)] I(x = P_r) \quad (7)$$

(7) nolu eşitlikte $I(x = a)$, $x = a$ olduğunda “1”, diğer durumlarda “0” değerini alan gösterge fonksiyonunu ifade etmektedir.

İnci türbin tarafından üretilen ortalama güç;

$$p_i \int_0^{P_r} x h_1(x) dx + p_i P_r [F(v_{co}) - F(v_r)] \quad (8)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanırken, M adet türbinden oluşan rüzgar çiftliğinin ortalama güç potansiyeli (9) numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$\sum_{i=1}^M \left[p_i \int_0^{P_r} x h_1(x) dx + p_i P_r [F(v_{co}) - F(v_r)] \right] \quad (9)$$

4. UYGULAMALAR

Üçüncü bölümde gösterildiği üzere rüzgar çiftliği potansiyelinin teorik dağılımı; çiftliğin kurulu olduğu ya da kurulacağı bölgedeki rüzgar hızının dağılımına ve kullanılması planlanan rüzgar türbinlerinin modeline bağlıdır. Belirli bir bölgedeki rüzgar hızı çoğunlukla Weibull olasılık dağılımı ile modellenmekte olup ([9], [10], [11]) ancak bazı çalışmalarda rüzgar hızının bölgedeki rüzgar rejimine bağlı olarak farklı olasılık dağılımları ile modellenebileceği de gösterilmiştir [12].

Rüzgar hızını ifade eden V rastgele değişkeninin Weibull dağılımına sahip olması durumunda bu rastgele değişkenin birikimli dağılım fonksiyonu ve olasılık yoğunluk fonksiyonu sırasıyla (10) ve (11) numaralı eşitlikleriyle verilmektedir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^k} \quad (10)$$

$$f(v) = \left(\frac{k}{a}\right) \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^k} \quad (11)$$

(10) ve (11) numaralı eşitliklerde yer alan k ve a parametreleri sırasıyla konum ve ölçek parametrelerini göstermekte olup bilinmeyen bu parametreler ilgili bölgedeki rüzgar hızı verisine dayalı olarak çeşitli istatistiksel yöntemlerle tahmin edilebilmektedir. Literatürde, farklı

bölgelerdeki rüzgar hızı verilerini kullanarak bu verilere Weibull dağılımının uyumunu araştıran ve bilinmeyen k ve a parametrelerini ilgili bölge için tahmin eden birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin; [10]'da Alaçatı, Çeşme, İzmir bölgesinden elde edilmiş rüzgar hızı verisinin Weibull dağılımına uygun olduğu gösterilmiş ve a ve k parametrelerinin tahmin değerleri sırasıyla 2.05 ve 9.16 m/s olarak bulunmuştur.

Şu şekilde tanımlanan varsayımsal örneği ele alalım. Rüzgar hızı dağılımının $a = 2.05$ ve $k = 9.16$ parametre değerleri ile Weibull dağılımına uygun olduğu Alaçatı, Çeşme, İzmir bölgesinde kurulması planlanan rüzgar çiftliğinde karakteristikleri Tablo 1'de verilen iki tür rüzgar türbininin kullanılacağı düşünülsün.

Tablo 1. A ve B tipi rüzgar türbinlerine ilişkin karakteristikler

Türbin karakteristiği	A tipi türbin	B tipi türbin
P_r	800 kW	1000 kW
v_{ci}	3 m/s	3.5 m/s
v_r	15 m/s	15.5 m/s
v_{co}	25 m/s	25 m/s

Rüzgar çiftliğinin m_1 adet A tipi türbin ve $m_2 = M - m_1$ adet B tipi türbinden oluşması ve A tipi türbinlerin güvenilirliğinin p_A ve B tipi türbinlerin güvenilirliğinin p_B olması durumunda; m_1 , m_2 , p_A ve p_B 'nin farklı değerleri için çiftliğin ortalama güç potansiyeli hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'deki sonuçlara göre; A tipi türbinlerin arızasız çalışması olasılığı 0.98, B tipi türbinlerin arızasız çalışması olasılığı 0.97 olduğunda ve rüzgar çiftliğinde her bir tipteki türbinlerden üçer adet bulunduğu çiftliğin beklenen (ortalama) gücü 1255.2336 kW olacaktır. Tablo 2'den açıkça görüldüğü üzere herhangi bir türbinin güvenilirliği artırıldığında çiftliğin ortalama gücü de artmaktadır. Tablo 2'deki veriler kullanılarak m_1 adet A tipi türbin ve $m_2 = M - m_1$ adet B tipi türbin ile kurulacak bir rüzgar çiftliğinin ortalama (beklenen) kapasite faktörünü hesaplamak mümkündür. Örneğin; ilgili bölgede $m_1 = 3$ adet A tipi ve $m_2 = 3$ adet B tipi türbin kullanılması, $p_A = 0.98$ ve $p_B = 0.97$ olması durumunda çiftliğin ortalama kapasite faktörü $1255.2336/(3 \times 800 + 3 \times 1000) = 0.2324$ (%23.24) olacaktır. Her iki tip türbinin de 0.98 güvenilirlik değerine sahip olması durumunda üçer adet türbin kullanılırsa ortalama kapasite faktörü $1262.1088/(3 \times 800 + 3 \times 1000) = 0.2337$ (%23.37) olarak elde edilir.

Tablo 2. $M = m_1 + m_2$ türbinden oluşan rüzgar çiftliğinin ortalama güç potansiyeli

p_A	p_B	m_1	m_2	Ortalama Güç (kW)
0.98	0.97	3	3	1255.2336
		5	3	1647.4561
		3	5	1699.8334
0.98	0.98	3	3	1262.1088
		5	3	1654.3314
		3	5	1711.2922
0.97	0.98	3	3	1256.1054
		5	3	1644.3257
		3	5	1705.2888

Üçüncü bölümde verilen (6) numaralı eşitlik yardımıyla rüzgar çiftliğinin belirli bir seviyeden daha fazla ya da daha az güç üretebilme olasılığı hesaplanabilir. Tablo 3'de p_A , p_B , m_1 ve m_2 'nin Tablo 1'deki değerleri için rüzgar çiftliği tarafından en az $c = 1000$ kW seviyesinde güç üretebilme olasılıkları hesaplanmıştır. Tablo 3'deki veriler ışığında, ilgili bölgede $m_1 = 3$ adet A tipi ve $m_2 = 3$ adet B tipi türbin kullanılması, $p_A = 0.98$ ve $p_B = 0.97$ olması durumunda çiftliğin en az 1000 kW güç üretebilmesi olasılığı 0.3882'dir.

Tablo 3. $M = m_1 + m_2$ türbinden oluşan rüzgar çiftliğinin minimum $c = 1000 \text{ kW}$ seviyesinde güç üretme olasılığı

p_A	p_B	m_1	m_2	Olasılık
0.98	0.97	3	3	0.3882
		5	3	0.4507
		3	5	0.4588
0.98	0.98	3	3	0.3879
		5	3	0.4521
		3	5	0.4613
0.97	0.98	3	3	0.3906
		5	3	0.4518
		3	5	0.4593

5. SONUÇ

Bu çalışmada; belirli sayıda rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliğinin, rüzgar türbinlerinin güvenilirlik değerlerini de göz önüne alarak elektrik üretim kapasitesinin teorik istatistiksel dağılımı elde edilmiş ve bu dağılımın kurulması planlanan rüzgar çiftliğinin potansiyelinin değerlendirilmesinde nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir. Belirli bir bölgedeki rüzgar hızı verisinden hareketle elde edilmiş olan olasılık dağılımı ve rüzgar türbini karakteristikleri girdi olarak ele alındığında çalışmada elde edilmiş bulgular ile kurulması planlanan rüzgar çiftliğinin performansı değerlendirilebilecektir. Çalışmada kurulmuş olan model ve elde edilmiş sonuçlar rüzgar türbinlerinin belirli bir zaman aralığında çalışma olasılıklarını (güvenilirliklerini) girdi olarak almaya olanak sağlamaktadır. Çeşitli alt sistem ve bileşenlerinde meydana gelen arızalardan dolayı çalışmaması olası olan rüzgar türbinleri için çiftlik potansiyelinin değerlendirilmesinde bu durumun analize dahil edilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Safari, B. (2011). Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 925-935.
- [2] Masseran, N., Razali, A. M. ve Ibrahim, K. (2012). An analysis of wind power density derived from several wind speed density functions: The regional assessment on wind power in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6476-6487.
- [3] Zhang, Y., Wang, J. ve Luo, X. (2015). Probabilistic wind power forecasting based on logarithmic transformation and boundary kernel. *Energy Conversion and Management*, 96, 440-451.
- [4] Taylor, J. W. ve Jeon, J. (2015). Forecasting wind power quantiles using conditional kernel estimation. *Renewable Energy*, 80, 370-379.
- [5] Louie, H. ve Slougher, J. M. (2014). Probabilistic modeling and statistical characteristics of aggregate wind power. *Large Scale Renewable Power Generation, Green Energy and Technology*, 19-51, Springer Science+Business Media, Singapore.
- [6] Eryilmaz, S. (2017). Theoretical derivation of wind plant power distribution and its applications, *Applied Energy*, değerlendirme aşamasında.
- [7] Slimacek, V. ve Lindqvist, B. H. (2016). Reliability of wind turbines modeled by a Poisson process with covariates, unobserved heterogeneity and seasonality. *Wind Energy*, 19, 1991-2002.
- [8] Tavner, P. J., Xiang, J. ve Spinato, F. (2007). Reliability analysis of wind turbines. *Wind Energy*, 10, 1-18.

- [9] Chang, T. P. (2011). Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*, 88, 272-282.
- [10] Ozay, C. ve Celiktaş, M. S. (2016). Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. *Energy Conversion and Management*, 121, 49-54.
- [11] Wais, P. (2017). Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis. *Renewable Energy*, 103, 15-29.
- [12] Mohammadia, K., Alavi, O. ve McGowana, J.G. (2017) Use of Birnbaum-Saunders distribution for estimating wind speed and wind power probability distributions: A review. *Energy Conversion and Management* 143, 109-122.