

Çekirdek yoğunluk kestirimi yönteminin rüzgâr türbini performans testinde kullanılması

Using the kernel density estimation method in wind turbine performance test

Ceyhun YILDIZ^{1*}, Mustafa ŞEKKELİ²

¹Elektrik ve Enerji Bölümü, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye.
ceyhun.yildiz@istiklal.edu.tr

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye.
msekkeli@ksu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.03.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 02.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 01.10.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.19488
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde (RES) gerçekleştirilen performans testleri, santral işletmecileri ve türbin üreticileri için oldukça önemlidir. Performans testlerinde enerji üretim hesabı için rüzgâr hız dağılımlarının modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, performans testlerinde kullanılan rüzgâr hız dağılım modellerinin Çekirdek Yoğunluk Kestirimi (ÇYK) yöntemi ile oluşturulması önerilmiştir. Önerilen yöntemin uygulaması Türkiye enterkonnekte elektrik şebekesine bağlı bir RES'e ait rüzgâr türbini (RT) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonucu elde edilen sonuçlar, literatürce kabul görmüş iki farklı yöntem ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Kıyaslanan yöntemlerden ilki International Electrotechnical Commission (IEC) 61400-12-2 No.lu Standartta önerilen Rayleigh fonksiyonu ile dağılım modelleme yöntemidir. İkincisi RES fizibilite çalışmalarında tercih edilen Weibull fonksiyonu ile dağılım modelleme yöntemidir. Değerlendirme sonucunda ÇYK, Rayleigh ve Weibull fonksiyonları kullanılan yöntemlerin sırasıyla %1.32, %4.36 ve %12.12 mutlak hata ile bir yıllık üretimi hesaplayabildiği görülmüştür. Bu durum önerilen yöntemin literatürce kabul görmüş ve çok yaygın olarak kullanılan iki yöntemden daha doğru sonuç verdiğini göstermektedir. Önerilen yöntemin bir diğer avantajı ise non-parametrik olması ve parametrik Weibull, Rayleigh fonksiyonu kullanan yöntemlerde olduğu gibi parametre hesabına ihtiyaç duymamasıdır.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr türbini, Performans testi, Çekirdek yoğunluk kestirimi.

Abstract

Performance tests performed in wind power plants (WPP) are very important for power plant operators and turbine manufacturers. In the performance tests, wind speed distributions must be modeled to calculate energy generation. In this study, it is proposed to create wind speed distribution models that used in performance tests by using Kernel Density Estimation (KDE) method. The application of proposed method is carried on the wind turbine (WT) of WPP that tied to Turkish interconnected electricity system. The results of the application were evaluated by comparing the two different methods that accepted in the literature. The first one of these is modelling distribution by using Rayleigh function that recommended in International Electro technical Commission (IEC) 61400-12-2 numbered Standard. The second method is modelling distribution by Weibull function, which is preferred in the WPP feasibility studies. As a result of the evaluation, the methods that use KDE, Rayleigh and Weibull functions were able to calculate one-year generation with 1.32%, 4.36% and 12.12% absolute errors, respectively. This situation shows that the proposed method gives more accurate results than the two widely used methods that accepted in literature. Another advantage of the proposed method is that it is non-parametric and does not require a parameter calculation, as in methods that use the parametric Weibull, Rayleigh function.

Keywords: Wind turbine, Performance test, Kernel density estimation.

1 Giriş

Son yıllarda; birçok ülke ekonomik, çevresel ve stratejik nedenlerle; kömür, doğalgaz gibi geleneksel enerji kaynakları yerine rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu yönelmeye paralel olarak dünya üzerinde yenilenebilir enerji kaynağı kullanan enerji santralleri kurulu gücü hızla artmıştır. Yenilenebilir enerji santralleri arasında RES'ler olgun teknolojisi ve kabul edilebilir seviyelerdeki yatırım maliyeti ile ilgi çekmektedir. RES tesisleri; çevresel etkilerinin düşük olması, kaynak maliyetlerinin sıfır olması ve ülkenin enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltması sebepleriyle geleneksel enerji tesislerine göre daha caziptirler.

RES'ler geleneksel enerji tesislerine kıyasla birçok yönden avantajlı olmalarının yanı sıra bazı dezavantajlı özelliklere de sahiptirler. Bu dezavantajlı özellikler, RES tesislerinin kaynak olarak kullandığı rüzgâr hız değerlerinin karakteristiklerinden

kaynaklanmaktadır. Rüzgâr hız değerleri bölgeye ve zamana göre değişen karmaşık atmosferik olaylara bağımlıdır. Bu sebeple belirli bir zaman aralığı ve bölgedeki rüzgâr hız değerlerini yüksek doğrulukta hesaplamak oldukça zordur. Fakat RES tesislerinin planlama ve işletim aşamalarında tesis bölgesindeki rüzgâr hız değerleri dağılımı modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu konuda literatür incelendiğinde rüzgâr hız değerleri dağılımlarının genelde Weibull ve Rayleigh gibi fonksiyonlar ile modellendikleri görülmektedir [1]-[7]. Bu fonksiyonlar arasında en çok tercih edilen iki parametrelili Weibull fonksiyonu olmuştur[8]-[12]. Weibull ve Rayleigh fonksiyonları genel olarak hız dağılımlarını modelleyebilseler de bölgeye göre değişiklik gösterebilen bazı hız dağılımlarını yüksek doğrulukta modelleyememektedirler. Bu fonksiyonların ikinci olumsuz yönü ise parametrik olmaları ve modelledikleri dağılımın şeklini alabilmeleri için doğru hesaplanmış parametrelere ihtiyaç duymalarıdır. Weibull ve

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Rayleigh gibi parametrik ve belirli dağılımları modelleyebilen fonksiyonlar yerine non-parametrik ve daha esnek yöntemlerin kullanımını avantaj sağlayacaktır. Non-parametrik ve esnek dağılım modelleme yöntemleri arasında ÇYK yöntemi öne çıkmaktadır[13],[14].

Literatür incelendiğinde ÇYK yöntemi ile rüzgar hızı dağılımlarını modelleyen bazı çalışmalar görülmektedir [15]-[23]. [15] çalışmasında ÇYK yöntemi ile rüzgar hızı dağılımı modellenerek RES tesislerinin enerji üretimi açısından güvenilirliği IEEE test sisteminde incelenmiştir. Sonuçlar parametrik yöntemler ile karşılaştırıldığında ÇYK yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. [16] çalışmasında yeni bir çoklu değişen rüzgar koşulları modeli ÇYK yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu modelde on yıllık saha ölçümleri kullanılmış ve sonuçlar bazı istatistiksel yöntemler kullanılarak test edilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde ÇYK ile oluşturulan modelin performansının yüksek seviyede olduğu görülmüştür. [17] makalesinde farklı saha verileri ve ÇYK yöntemi kullanılarak oluşturulmuş bir rüzgar hızı dağılımı modeli anlatılmıştır. Makalede önerilen ÇYK temelli model ile literatürdeki farklı modeller karşılaştırılmış ve ÇYK temelli modelin üstün olduğu görülmüştür. [18]'de anlatılan çalışmada, Yunanistan'da işletilen RES tesisleri üretimleri modellenmiştir. Modelleme işlemi ÇYK temelli bir yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Model performansı saha verileri üzerinde test edilmiş ve sonuçların istenilen seviyeyi yakaladığı görülmüştür. [19]'da sekiz farklı sahadan alınan rüzgar hızı verileri ÇYK temelli bir yöntem ile modellenmiş ve ÇYK yönteminin literatürdeki farklı yöntemlere kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür. [20] çalışmasında, çok sayıda RES tesisi üretimlerine ait birleşik olasılık yoğunluk fonksiyonunun modellenmesinde ÇYK temelli bir yöntem önerilmiştir. Çalışma sonucunda önerilen yöntemin başarıyla çok sayıda RES üretimini modelleyebildiği görülmüştür. [21]'de rüzgar hızı dağılımlarını modellemek için ÇYK yöntemi önerilmiştir. Altı bölgeden alınan ölçüm değerleri kullanılarak rüzgar hızı dağılımları modellenmiştir. Ayrıca elde edilen modeller ve teorik bir RT güç eğrisi ile incelenen bölgelerde üretilebilecek enerji hesaplanmıştır. Çalışma sonunda ÇYK yöntemi ile oluşturulan enerji hesabı modelinin Weibull, Normal ve Rayleigh fonksiyonları kullanılarak oluşturulan modellerden daha başarılı olduğu görülmüştür. [22]'de RES planlama çalışmalarında kullanılan rüzgar hızı dağılımının modellenmesi için ÇYK yönteminin parametrik dağılım modelleme yöntemlerinden daha başarılı olduğu görülmüştür. Çalışma dört farklı bölgeden alınan rüzgar hızı ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. [23] çalışmasında bir bölgeye ait rüzgar hızı dağılımı modeli farklı parametrik yöntemler ve ÇYK yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplamalarda incelenen bölgeye ait bir yıllık rüzgar hızı ölçüm değerleri kullanılmıştır. Çalışmada yapılan hesaplamalara göre parametrik yöntemlerin günlük ortalama rüzgar hızı değerlerinin dağılımını başarıyla modelleyebildiği görülmüştür. Saatlik ortalama rüzgar hızı dağılımının ise ancak ÇYK yöntemi ile yüksek doğrulukta modellenenildiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma sonunda, bir bölge için RT seçiminde kullanılacak rüzgar hızı dağılımı modelinin ÇYK yöntemi ile oluşturulması önerilmiştir. Literatür taraması sonucunda ÇYK yönteminin rüzgar hızı dağılımı modellenmesinde diğer parametrik yöntemlere kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu makalede incelenen RT performans testi sürecinde ÇYK yönteminin henüz literatüre geçmiş bir çalışmada kullanılmadığı da tespit edilmiştir.

Bu çalışmada RES tesisleri devreye alındıktan sonra ihtiyaç duyulan RT performans testi için ÇYK temelli yeni bir yöntem önerilmiştir. RT performans testi uygulamalarında IEC 61400-12-2 No.lu Standartta tavsiye edilen yöntemler kabul görmektedir [24]. RT performans testleri ile türbinlerin nominal üretim değerlerinden sapma miktarları ölçülmektedir. RT'lerin nominal değerlerden uzaklaşması genelde türbinlerin imalat hatalarından kaynaklanmakta ve santral sahipleri için büyük maddi kayıplara sebep olmaktadır. Bu sebeple performans testlerinde, türbinlerin eksik üretimleri hassas bir şekilde hesaplanmalıdır. Performans testleri kabaca iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada RT'nin sahadaki güç eğrisi oluşturulmaktadır. İkinci aşamada ise bölgedeki rüzgar hızı dağılımı modellenmektedir. Son olarak hız dağılımı modeli, sahadaki güç eğrisi ve nominal güç eğrisi kullanılarak, gerçekleşmesi gereken ve gerçekleşebilecek üretim değerleri hesaplanmaktadır. Bu iki değer arasındaki fark RT'nin eksik üretim değeri olmaktadır. Çalışmada performans testinin ikinci aşaması için ÇYK yöntemi önerilmiştir.

Önerilen yöntemin uygulamasında yapılan tüm hesaplamalarda gerçek saha verileri kullanılmıştır. Bu veriler Türkiye'de işletilmekte olan bir RES'teki RT'ye aittir. Kullanılan veriler ve incelenen RT ile ilgili detaylı açıklamalar bir sonraki bölümde verilmiştir. Çalışma sonunda önerilen yöntemin performansı literatürce kabul görmüş iki yöntem ile kıyaslanmıştır. Bu yöntemlerden ilki IEC 61400-12-2 No.lu standartta tavsiye edilen ve Rayleigh fonksiyonu kullanılan yöntemdir. İkinci yöntem ise literatürde en çok tercih edilen Weibull fonksiyonu kullanılan yöntemdir. Sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada önerilen yöntemin literatürce kabul görmüş diğer iki yöntemden çok daha yüksek bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen yöntemin diğer üstünlüğü de non-parametrik olması ve diğer iki yöntemde olduğu gibi parametre hesabına ihtiyaç duymamasıdır.

Bu çalışmanın literatüre katkısı iki yönlü olmuştur:

- 1) ÇYK yöntemi ilk defa RT performans testinde kullanılmıştır,
- 2) Türkiye'deki bir RES sahasında rüzgar hızı dağılımı modeli ilk defa non-parametrik ÇYK yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur.

Bu makale altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, konuyla ilgili genel bilgiler, kısa bir literatür özeti ve çalışmanın ana hatları verilmiştir. İkinci bölümde, çalışmada incelenen RT kısaca tanıtılmış ve sahadan alınan veriler ile ilgili bazı detaylar özetlenmiştir. Makalenin üçüncü bölümünde, çalışmada önerilen yöntemin teorik alt yapısı ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen bulgular bulunmaktadır. 5. bölümde ise çalışma neticesinde çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalar için bazı öneriler bulunmaktadır. Son bölüm olan altıncı bölümde, çalışmada kullanılan kaynaklar verilmiştir.

2 Rüzgar türbini ve kullanılan veriler

Bu bölümde, çalışmada önerilen yöntemin uygulama sürecinin gerçekleştirildiği RT ve süreçte kullanılan veriler tanıtılmıştır.

2.1 Rüzgar türbini

İncelenen RT, Türkiye'de faaliyet göstermekte olan bir RES'te işletilmektedir. Ticari kısıtlamalardan dolayı RT marka modeli ve santral ismi makalede açıklanmamıştır. Saha çalışması aşamasında kaydedilmiş, RT'ye ait genel bir görünüş Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. RT genel görünüşü.

Figure 1. General view of WT.

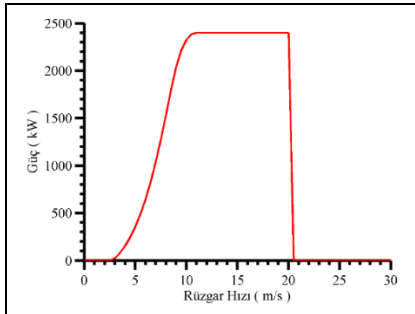
RT, santral uygulamalarında çoğunlukla tercih edilen yatay eksenli ve üç kanatlı bir modeldir. Bu RT'nin bazı teknik özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Rüzgar türbini özellikleri.

Table 1. Wind turbine specifications.

Özellik	Değer
Kule Yüksekliği (m)	91
Rotor Çapı (m)	117
Nominal Gücü (kW)	2400
Devreye Giriş Hızı (m/s)	3
Devreden Çıkış Hızı (m/s)	20

RT'lere ait en önemli karakteristik bilgilerden birisi de türbin güç eğrileridir. Güç eğrileri farklı rüzgar hız değerleri ile türbin çıkış elektriksel güç değerlerini ilişkilendirmektedir. RT üretici firmalar türbinleri için referans güç eğrileri oluşturmaktadır. Bu üretici firma güç eğrileri santral kurulmadan önce fizibilite çalışmalarında yapılan hesaplamalarda kullanılmaktadır. Santral kurulduktan sonra devreye alınan türbinlerin fizibilite çalışmalarında yapılan hesaplamalardaki üretim değerlerini yakalamaları beklenmektedir. Bu beklenti ancak RT'lerin nominal değerlerde çalışması ile gerçekleşebilecektir. RT'lerin nominal değerlerde çalışıp çalışmadığı santral devreye alındıktan sonra yapılan RT performans testleri ile tespit edilmektedir. Çalışmada incelenen RT'ye ait nominal güç eğrisi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. RT güç eğrisi.

Figure 2. WT power curve.

Güç eğrileri genelde dört bölgeye ayrılarak incelenmektedir. Bu bölgeleri sınırlayan üç değer küçükten büyüğe doğru; devreye giriş hızı, nominal çıkış gücüne ulaşılan hız ve devreden çıkış hızıdır. İncelenen türbin için bu değerler sırasıyla 3, 11 ve 20(m/s)'dir. Santral kurulduktan sonra RT'ler genelde üretici

firmanın verdiği güç eğrisi değerlerini yakalayamamaktadır. Bu durumun iki temel sebebi vardır. İlki üretici firmalarının güç eğrilerini ideal koşullarda oluşturmalarıdır. Sahada zamana göre değişen hava yoğunluğu ve topografik engeller gibi etkenler RT'nin çalıştığı koşulları ideal olmaktan uzaklaştırabilmektedir. İdeal olmayan koşullarda çalışan RT güç eğrisi doğal olarak ideal koşullar için oluşturulmuş eğriden sapmaktadır. Bu sapmalar genelde kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır. İkinci sebep ise RT'nin imalatındaki hatalardan kaynaklanmaktadır. İmalat hataları RT devreye alındıktan sonra yapılacak performans testleri ile tespit edilmeli ve hızlıca giderilmelidir. Performans testi süreci için IEC 61400-12-2 No.lu Standartta önerilen yöntemler, uygulamalarda ve bilimsel literatürde kabul görmüştür [25]-[28]. Bu çalışmada test sürecinin standarttaki son aşaması olan toplam üretim hesabı için yeni bir yöntem önerilmiştir.

2.2 Rüzgar türbini SCADA sistemi verileri

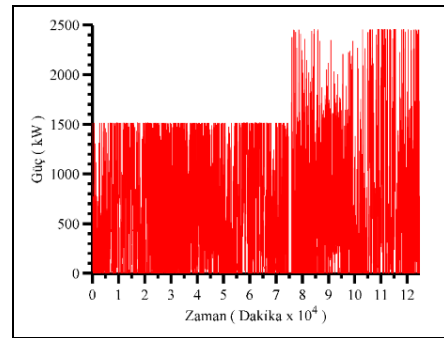
Performans testinin son aşaması olan toplam üretim hesabından önceki süreçte bir kısım verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen performans testinde kullanılan veriler IEC 61400-12-2 No.lu Standartta tanımlanan formatta, RT SCADA sistemi üzerinden alınmıştır. Alınan verilerdeki hatalı değerler bazı filtreleme işlemleri ile çıkartılmıştır. Filtreleme işlemi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada RT'nin çalışma aralığı (3 - 20 m/s) dışında gerçekleşen üretim veri setinden çıkartılmıştır. İkinci aşamada rüzgar hız değerlerinin üretim için yeterli olduğu fakat RT üretiminin sıfır olduğu değerler veri setinden çıkartılmıştır. Veriler ile ilgili bazı bilgiler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Rüzgar türbini SCADA sisteminden elde edilen verilerin özellikleri.

Table 2. Properties of the data obtained from wind turbine SCADA system.

Özellik	Değer
Örnekleme zamanı(dk.)	10
Veri sayısı (adet)	131575
Filtreleme sonrası (adet)	124871
Tarih Başlangıç	01.10.2015 06:50
Tarih Bitiş	01.04.2018 23:50

RT SCADA sisteminden dört tür veri alınmıştır. Bu veriler; RT çıkış gücü, rüzgar hızı, basınç ve sıcaklıktır. Performans testlerinde kullanılan en önemli veri gerçekleşen RT çıkış gücü değerleridir. Şekil 3'te sahadan alınan çıkış gücü değerleri verilmiştir.



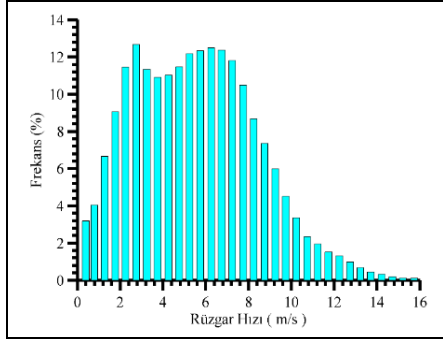
Şekil 3: RT çıkış gücü değerleri.

Figure 3. WT output power values.

Şekildeki grafikten anlaşılacağı üzere incelenen RT sahadan çalışmaya başladığında nominal çıkış gücü değerini yakalayamamaktadır. Bu durum türbindeki imalat hatasından

kaynaklanmaktadır. Hata tespit edildikten uzun süre sonra türbin kanatlarında revizyona gidilmiş ve türbin performansı istenilen seviyeye getirilmiştir. Revizyon yapılmaya kadar oldukça yüksek miktarda üretim ve gelir kaybı oluşmuştur.

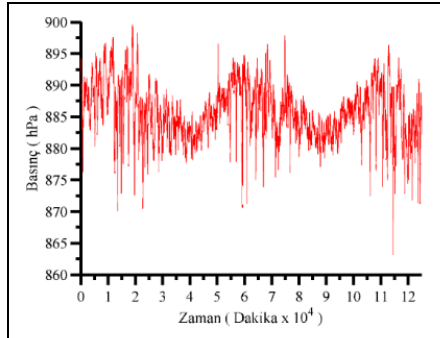
Performans testlerinde kullanılan bir diğer önemli veri ise rüzgar hızı değerleridir. Şekil 4'te RT SCADA sisteminden alınan rüzgar hızı değerleri verilmiştir. Rüzgar hızı ve çıkış gücü değerleri kullanılarak RT'nin sahada oluşturduğu güç eğrisi elde edilmektedir. Ayrıca rüzgar hızı dağılımları modellenerek RT'nin bir yılda üretebileceği enerji miktarı hesaplanmaktadır.



Şekil 4. Rüzgar hızı dağılımı.

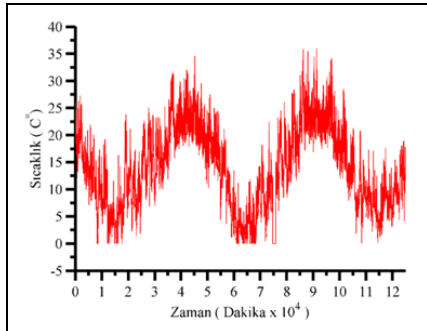
Figure 4. Wind speed distribution.

Performans testlerindeki hesaplamalarda hava yoğunluğuna da ihtiyaç duyulmaktadır. Hava yoğunluğu, basınç ve sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Çalışmada kullanılan sıcaklık ve basınç değerleri sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi hava yoğunluğu zamanla değişen ve RT performansını etkileyen bir büyüklük olduğundan çıkış gücü ve rüzgar hızı değerleri bu etkiden arındırılmalıdır.



Şekil 5. Basınç değerleri.

Figure 5. Pressure values.

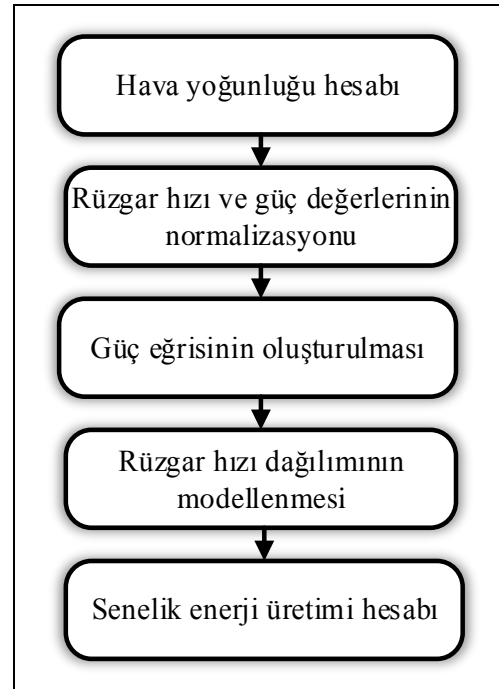


Şekil 6. Sıcaklık değerleri.

Figure 6. Temperature values.

3 Teorik alt yapı

Bu bölümde, çalışmada önerilen performans testi metodunun teorik alt yapısı ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Metotta yapılan hesaplamalar beş aşamada tamamlanmıştır. Sürece ilişkin akış diyagramı Şekil 7'deki gibidir. Sürecin ilk aşamasında hesaplamalarda ihtiyaç duyulan hava yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. İkinci aşamada rüzgar hızı ve güç değerleri, hava yoğunluğu değerleri kullanılarak normalize edilmiştir. Üçüncü aşamada bu normalize değerler kullanılarak RT güç eğrisi elde edilmiştir. Dördüncü aşamada rüzgar hız değerlerinin dağılımları çalışmada önerilen ve literatürde genel olarak kabul edilen yöntemler kullanılarak modellenmiştir. Son aşamada bu modeller ve RT güç eğrisi kullanılarak senelik enerji üretimi ve geliri hesaplanmıştır. Bu beş aşama ilerleyen alt bölümlerde daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 7. Performans testi akış diyagramı.

Figure 7. Flow chart of the performance test.

3.1 Hava yoğunluğu hesabı

Bir RT çıkış gücü, elektriksel ve mekanik verimler ihmal edildiğinde Denklem (1) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Denkleme bakıldığında RT çıkış gücü (P) ile rüzgar hızı (v) arasında kübik bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu sebeple RT üretimleri ile ilgili hesaplamalar yapılırken v 'deki değişimler her zaman dikkate alınmaktadır. Diğer iki değişken hava yoğunluğu (ρ) ve kanat süpürme alanı (A) ile güç arasında ise doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. A , seçilen RT kanat çapı değişmeyeceğinden hesaplamalarda sabit olarak alınmaktadır. Fakat ρ , sahadaki iklim koşullarına bağımlı olarak değiştiğinden sabit bir değer olarak kullanılması sonuçları olumsuz yönde etkileyecektir [29],[30]. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için ölçülen P ve v değerleri değişken ρ değerlerine göre normalize edilmiştir. Normalizasyon işleminde kullanılacak ρ değerleri Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

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

$$\rho = \frac{p}{R.T} \quad (2)$$

P ve v değerlerinin normalizasyonunda IEC 61400-12-2 standardında önerilen bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem bir sonraki alt bölümde açıklanmıştır.

3.2 Normalize rüzgar hızı ve güç hesabı

Denklem (1)'e göre P değerlerinin v ve ρ olmak üzere iki değişkenden etkilendiği görülmektedir. O halde P değeri hesaplanırken bu iki değişken dikkate alınmalıdır. Fakat, RT performans testlerinde kullanılan güç eğrileri sadece P değerlerinin v ile olan ilişkisini vermektedir. Çünkü üretici firmalar RT'lerine ait güç eğrilerini sabit bir ρ değeri için oluşturmaktadır ve bu üretici güç eğrileri performans testlerinde referans olarak kullanılmaktadır. Testlerde referans olarak kullanılacak başka bir eğri olmadığından ρ değerlerinin P üzerindeki etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu kapsamda IEC 61400-12-2 Standardı ölçüm değerlerine uygulanabilecek ve ρ etkisini ortadan kaldıracak bir normalizasyon işlemi önermektedir. Bu işlem, ölçülen P ve v değerleri için sırasıyla Denklem (3) ve Denklem (4) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$P_n = P_{10dk} \frac{\rho_0}{\rho_{10dk}} \quad (3)$$

$$V_n = V_{10dk} \left(\frac{\rho_{10dk}}{\rho_0} \right) \quad (4)$$

Normalize edilmiş P ve v değerleri ile incelenen RT'nin sahada gerçekleşen güç eğrisi oluşturulacaktır. Bu saha eğrisi ile üretici eğrisi kullanılarak RT'nin bir yılda üretebileceği ve üretmesi gereken enerji miktarları hesaplanacaktır. İncelenen RT'nin sahadaki güç eğrisi bir sonraki bölümde anlatılan yöntem ile elde edilmiştir.

3.3 Güç eğrisi hesabı

Güç eğrisi hesaplama yöntemi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ölçülen minimum ve maksimum hız değerleri arasında kalan mesafe 0.5 (m/s)'lik aralıklara bölünmektedir. Daha sonra bu aralıklarda kalan hız ve bu hız değerlerinde gerçekleşmiş güç değerleri tespit edilmektedir. Son aşamada ise her 0.5 (m/s)'lik aralıktaki hız ve güç değerlerinin ortalamaları Denklem (4) ve Denklem (5) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} V_{n,k,i} \quad (5)$$

$$P_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} P_{n,k,i} \quad (6)$$

Her k hız aralığı için hesaplanan (V_k, P_k) ikilileri RT güç eğrisini oluşturmaktadır. Hesaplanan saha güç eğrisi ile üretici firma güç eğrisi karşılaştırılarak RT performansı değerlendirilebilmektedir. Ayrıca bu eğriler RT'nin bir yılda üretmesi gereken ve üretebileceği enerji miktarı hesabında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada RT performans değerlendirmesi enerji üretimleri üzerinden yapılmıştır. Enerji üretimi hesabının yapılabilmesi için RT bölgesindeki rüzgar hızı dağılımı modellenmelidir. Bir sonraki bölümde incelenen RT lokasyonundaki rüzgar hızı dağılımı modelleme süreci anlatılmıştır.

3.4 Weibull, Rayleigh fonksiyonları ve Çekirdek Yoğunluk Kestirimi yöntemi ile rüzgar hız dağılımının modellenmesi

Rüzgar hızı dağılımı modelleri; santral kurulumu, enerji potansiyeli belirleme ve performans testleri gibi süreçlerde kullanılmaktadır. Bu modellerin hassasiyeti hesaplama sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle santral kurulumu ve kurulmuş bir santralin performans testi süreçlerinde hız dağılımı modeli hassasiyeti oldukça önemlidir. Çünkü santral yatırım maliyeti ve santral gelirleri çok yüksek maddi değerlerdir. Rüzgar hızı dağılımlarının literatürdeki çalışmalarda genelde parametrik fonksiyonlar olan Weibull ve Rayleigh fonksiyonları kullanılarak modellendiği görülmektedir [1]-[7]. Weibull ve Rayleigh fonksiyonları sırasıyla Denklem (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$f(v|a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{v}{a} \right)^{b-1} e^{-(v/a)^b} \quad (7)$$

$$f(v|c) = \frac{v}{c^2} e^{-\left(\frac{v^2}{2c^2}\right)} \quad (8)$$

Denklem (7) ve (8) incelendiğinde Weibull fonksiyonunda a ve b olmak üzere iki parametreye, Rayleigh fonksiyonunda ise bir parametreye (c) ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu parametrelerin değerleri, fonksiyonların dağılımları modelleme performansını doğrudan etkilemektedir. Uygun parametre seçimi ile ilgili literatürde bir kısım çalışmalar bulunmaktadır [31]-[33]. Her ne kadar en iyi parametreler tespit edilebilse de bu fonksiyonlar yapısal özelliklerinden dolayı her hız dağılımını aynı doğrulukta modelleyememektedirler. Bu çalışmada parametre seçimine ihtiyaç duymayan (non-parametrik) ÇYK yöntemi de, rüzgar hızı dağılımını modellemek için kullanılmıştır. ÇYK yönteminde Denklem (9)'da verilen eşitlik kullanılmaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki $K(\cdot)$, çekirdek fonksiyonudur. Bu çalışmada Gauss fonksiyonu çekirdek fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

$$f(v) = \frac{1}{Nd} K \left(\frac{v - v_i}{d} \right) \quad (9)$$

ÇYK yöntemi, Weibull ve Rayleigh fonksiyonlarına kıyasla daha esnek bir yapıya sahip olduğundan farklı dağılımları daha yüksek doğrulukta modelleyebilmektedir.

Bu çalışmada önerilen ÇYK yönteminin etkinliğini kıyaslamak amacıyla Weibull ve Rayleigh fonksiyonları kullanılarak iki ayrı dağılım modeli daha oluşturulmuştur. Weibull ve Rayleigh fonksiyonlarında kullanılan parametreler, Maximum Likelihood Estimation yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır[34]. Oluşturulan dağılım modelleri kullanılarak senelik enerji üretimi ve gelir hesaplamaları yapılmıştır. Gerçekleşen ve hesaplanan değerler kıyaslanarak model performansları tespit edilmiştir. Bir sonraki bölümde hız dağılım modellerinden senelik enerji üretimi ve gelir hesaplama yöntemi anlatılmıştır.

3.5 Senelik enerji üretimi hesabı

Çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda incelenen RT'nin gerçekleştirebileceği senelik enerji üretim ve gelir değerleri elde edilmiştir. Bu değerler nominal değerler ile kıyaslanarak üretim ve gelir kaybı hesabında kullanılabilir. Bu çalışmada ayrıca hız dağılım modellerinin performansları da kıyaslanmıştır. Üretim hesabında Denklem (10),(11) ve (12) kullanılmıştır.

$$E = t \cdot \int_0^{\infty} P(v)f(v)dv \quad (10)$$

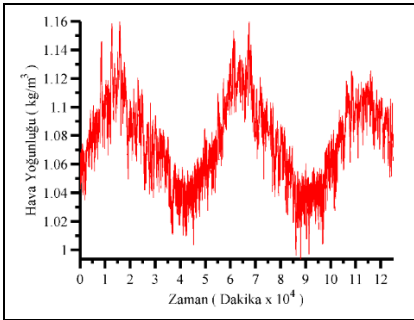
$$V_k \leq v \leq V_{k+1} \quad (11)$$

$$P(v) = \frac{(P_{k+1} - P_k)}{(V_{k+1} - V_k)}(v - V_k) + P_k \quad (12)$$

Denklem (10)'daki $P(\cdot)$ güç eğrisi fonksiyonudur. Bu fonksiyon herhangi bir (v) rüzgar hızı değeri için RT'nin üretebileceği güç değerini vermektedir. $f(\cdot)$ fonksiyonu ise (v) rüzgar hızı değerinin tekrar sayısını vermektedir. $P(\cdot)$ ve $f(\cdot)$ fonksiyonlarının tüm (v) değerlerinde aldığı değerler çarpılıp toplandıktan sonra elde edilen sonuç (t) üretim süresi ile çarpılarak enerji hesaplanmaktadır. Denklem (11) ve (12) $P(\cdot)$ güç eğrisi fonksiyonunu tanımlamaktadır. Denklem (11) ile (v) hız değerinin güç eğrisinde hangi hız aralığına düştüğü tespit edilmektedir. Aralık tespitinden sonra güç değeri Denklem (12) ile kurulan doğrusal ilişki ile hesaplanmaktadır. RT geliri hesaplanan enerji değeri ile Türkiye'de RES tesislerinin desteklenmesi amacıyla uygulanan sabit fiyat olan (7.3 Dolar Cent/kWh) çarpılarak elde edilmiştir. Bu bölümde yapılan tüm hesaplamalar sonucu elde edilen bulgular bir sonraki bölümde verilmiştir.

4 Bulgular

Bu bölümde RT performans testi sürecinde elde edilen bulgular özetlenmiştir. Sürecin ilk adımında ölçülen rüzgar hızı (v) ve RT çıkış gücü (P) değerlerinin normalizasyonu için ihtiyaç duyulan hava yoğunluğu (ρ) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan ρ değerleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Hesaplanan hava yoğunluğu değerleri.

Figure 8. Calculated air density values.

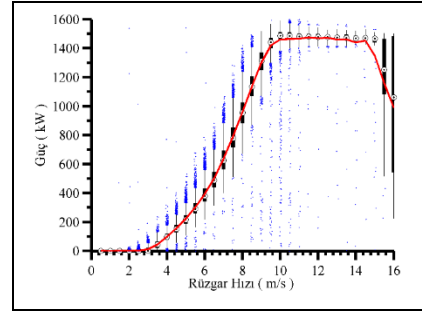
Ayrıca ρ değerleri ile ilgili bazı istatistiksel özellikler Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo 3'teki değerler ve Şekil 8'deki grafik incelendiğinde ρ değerlerindeki değişimin ihmal edilmemesi gerektiği görülmektedir.

Tablo 3. Hava yoğunluğu değerlerinin istatistiksel özellikleri.

Table 3. Statistical properties of air density values.

İstatistiksel Özellik	Değer (kg/m ³)
Minimum	0.9937
Maksimum	1.1659
Ortalama	1.0789
Standart sapma	0.0294

Normalize edilmiş P ve v değerleri kullanılarak RT'nin sahada gerçekleştirdiği güç eğrisi oluşturulmuştur. Elde edilen güç eğrisi grafiği Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Sahada gerçekleşen güç eğrisi.

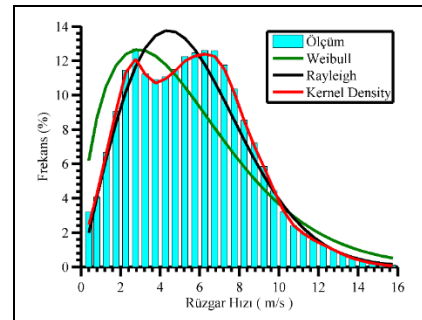
Figure 9. Power curve on the field.

Grafikte güç eğrisi ve her hız aralığında gerçekleşmiş üretim değerleri kutu grafik olarak verilmiştir. Kutu grafiklerdeki siyah dikdörtgenler verilerin birinci (Q_{25}) ve üçüncü (Q_{75}) çeyrekleri arasında kalan kısmını kapsamaktadır. Dikdörtgenlerin içindeki siyah nokta medyan değeridir. Alt ve üst bıyık sınır değerleri ise Denklem (13) ve (14) kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitliklerde kullanılan z katsayısı 1.5 olarak alınmıştır.

$$B_a = Q_{25} - z(Q_{75} - Q_{25}) \quad (13)$$

$$B_{\bar{u}} = Q_{75} + z(Q_{75} - Q_{25}) \quad (14)$$

Sahada gerçekleşen güç eğrileri üretici firmaların güç eğrileri ile kıyaslanarak RT performans değerlendirmesinde kullanılabilir. Fakat tesiste oluşan maddi zararın hesaplanabilmesi için toplam eksik üretim hesaplanmalıdır. Bu çalışmada RT'nin sahadaki performans değerlendirmesi bir yıllık üretim ve gelir değerleri hesaplanarak yapılmıştır. Senelik üretim hesabı için sahadaki rüzgar hızı dağılımının modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki RT performans testi sürecinde rüzgar hızı dağılımı modeli için literatürde henüz bu süreçte kullanılmamış ÇYK yöntemi kullanılmıştır. ÇYK yönteminin modelleme performansı gerçek dağılım ve literatürce kabul görmüş Weibull ve Rayleigh fonksiyonları ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Hız dağılım modelleri çıktılarını görsel olarak kıyaslamak amacıyla Şekil 10'da verilen grafik oluşturulmuştur.



Şekil 10. Rüzgâr hızı dağılımları.

Figure 10. Wind speed distributions.

Model performanslarını daha açık şekilde ortaya koymak amacıyla tüm modellerin determinasyon katsayıları (r^2) hesaplanmıştır. r^2 'ler Denklem (15) kullanılarak elde edilmiştir. Denklemdeki n toplam grup sayısıdır. Buradaki her grup 0.5 (m/s) uzunluğunda bir hız aralığını temsil etmektedir.

x_i ve y_i sırasıyla, i 'inci grup için model ile hesaplanan ve gerçekleşen olasılık değerleridir. \bar{y} ise tüm grupların olasılık değerlerinin ortalamasıdır.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

Hesaplanan r^2 değerleri Tablo 4'te verilmiştir. r^2 değeri büyüdükçe modelin başarı seviyesi yükselmektedir.

Tablo 4. Modeller için hesaplanan r^2 değerleri.

Table 4. Calculated r^2 values for models.

	ÇYK	Rayleigh	Weibull
r^2	0.9981	0.9430	0.7875

Ayrıca rüzgar hızı dağılımlarından enerjiye dönüşümde üretici ve saha güç eğrisi olmak üzere iki farklı güç eğrisi kullanılarak tüm yöntemler için iki ayrı hesaplama yapılmıştır. Böylece incelenen RT'nin sahada gerçekleştirdiği performans ve türbinin beklenen (nominal) performansı kıyaslanabilmektedir. Önerilen ÇYK yönteminin sonuçlarını yaygın olarak kullanılan Weibull ve Rayleigh fonksiyonu temelli yöntemlerin sonuçları ile kıyaslamak amacıyla incelenen RT'nin toplam üretimi, geliri ve kapasite faktörü hesaplanmıştır. Toplam üretim değeri performans testlerinde elde edilen en temel sonuçtur. Gelir ise üretim değerine bağlı olarak değişmektedir ve maddi kayıpları ortaya koymak için hesaplanmaktadır. Bu çalışmada gelir hesabı, Türkiye'de RES üretimlerine destekleme amacıyla uygulanan birim fiyat (7.3 Dolar cent/KWh) ile üretim değerleri çarpılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı fiyatlardan satış yapan tesislerde gelir değişim gösterecektir. Son olarak, hesaplanan kapasite faktörü RT'nin incelenen zaman aralığında gerçekleştirdiği üretim değerinin bu zaman aralığında RT'nin sürekli nominal güçte çalışması durumunda elde edilecek üretim değerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Tüm sonuçlar Tablo 5'te özetlenmiştir.

5 Sonuç

RES tesisleri devreye alındıktan sonra yapılan performans testleri tesisteki RT'lerin sahadaki performanslarını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada RT performans testi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem test sürecinin toplam üretim hesabı kısmına yeni bir yaklaşım getirmiştir.

Çalışmada önerilen yöntemin uygulaması Türkiye'de işletilmekte olan bir RES tesisinde gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan tüm veriler tesisteki SCADA sisteminden alınmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürce kabul gören iki yöntem ile kıyaslanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda önerilen yöntemin %1.32 mutlak hata ile gerçekleşen üretimleri hesaplayabildiği görülmüştür. Literatürde kabul gören Weibull ve Rayleigh temelli yöntemlerin ise sırasıyla %12.12 ve %4.36 mutlak hata ile gerçekleşen üretimleri hesapladığı görülmüştür. Bu durum önerilen yöntemin literatüre kıyasla daha etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir. Çalışma sonucunda elde edilen neticeler ışığında RT performans testinde ÇYK yönteminin kullanımı RT üretici firmalar ve RES işletmecileri arasında

yaşanan anlaşmazlıkların çözümünde kullanılması önerilmektedir.

6 Conclusions

The performance tests realized after the commissioning of the WPP facilities reveals the performance of WTs in the facility. In this study, a novel method is proposed for WT performance test. The proposed method has brought a new approach to the total generation calculation part of the test process.

The application of the method proposed in this study is conducted in a WPP facility which is operated in Turkey. All data used in the calculations are taken from the SCADA system at the facility. The results are compared with the two methods accepted in the literature and the results are evaluated. As a result of the evaluations, it is seen that the proposed method can calculate the realized generations with 1.32% absolute error. Weibull and Rayleigh based methods, which are accepted in the literature, calculated the generations with 12.12% and 4.36% absolute errors, respectively. This situation shows that the proposed method is more effective than the literature. In the light of the results obtained from this study, the use of KDE method in WT performance test is recommended to be used in the resolution of disputes between WT manufacturers and WPP operators.

7 Semboller ve kısaltmalar

A	: Süpürme alanı (m ²),
a	: Weibull fonksiyonu parametresi,
b	: Weibull fonksiyonu parametresi,
B_a	: Kutu grafik alt bıkık sınır değeri,
B_u	: kutu grafik üst bıkık sınır değeri,
c	: Rayleigh fonksiyonu parametresi,
d	: Çekirdek olasılık dağılım fonksiyonu bant genişliği,
E	: Senelik enerji üretimi (kWh),
$f(\cdot)$: olasılık dağılım fonksiyonu,
$K(\cdot)$: Çekirdek fonksiyonu,
n	: Grup sayısı,
N	: Veri sayısı,
N_k	: k aralığındaki değer sayısı,
p	: Hava basıncı (Pa),
P	: Rüzgar gücü (W),
$P(\cdot)$: Güç eğrisi fonksiyonu (kW),
P_{10dk}	: Ölçülen 10 dk. ortalama güç (kW),
P_k	: k aralığı için ortalama güç (kW),
P_n	: Normalize güç (kW),
$P_{n,k,i}$: k aralığındaki i 'inci normalize güç değeri (kW),
r^2	: Determinasyon katsayısı,
R	: Gaz sabiti = 287,05 (J/(kg.K)),
Q_{25}	: Verilerin ilk çeyreği,
Q_{75}	: Verilerin üçüncü çeyreği,
T	: Sıcaklık (K),

Tablo 5. Performans testi sonuçları.

Table 5. Results of the performance test.

Hız Dağılımı	Weibull		Rayleigh		ÇYK		Gerçekleşen
	Nominal	Saha	Nominal	Saha	Nominal	Saha	
Güç Eğrisi							
Üretim (MWh)	6074.33	3914.11	6371.82	4259.79	6535.68	4395.21	4453.81
Gelir (\$)	443426	285730	465142	310965	477105	320850	325128
Kapasite Faktörü (%)	27.74	17.87	29.09	19.45	29.84	20.07	20.34
Üretim Mutlak Hatası (%)	36.38	12.12	43.06	4.36	46.74	1.32	0.00

t	: Enerji üretimi süresi (sa.),
V_{10dk}	: Ölçülen 10 dak. ortalama rüzgar hızı (m/s),
V_k	: k aralığı için ortalama rüzgar hızı (m/s),
V_n	: Normalize rüzgar hızı (m/s),
$V_{n,k,i}$: k aralığındaki i 'inci rüzgar hızı değeri (m/s),
x_i	: i 'inci grubun hesaplanan olasılık değeri,
y_i	: i 'inci grubun gerçek olasılık değeri,
\bar{y}	: Tüm grupların ortalama olasılık değeri,
z	: Kutu grafik katsayısı=1.5,
ρ	: Hava yoğunluğu (kg/m ³),
ρ_0	: Referans hava yoğunluğu (kg/m ³),
ρ_{10dk}	: Ölçülen 10 dk. ortalama hava yoğunluğu (kg/m ³).

8 Kaynaklar

- [1] Celik AN. "A statistical analysis of wind power density based on the weibull and rayleigh models at the southern region of Turkey". *Renewable Energy*, (29)4, 593-604, 2004.
- [2] Ucar A, Balo F. "Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey". *Applied Energy*, 86(10), 1864-1872, 2009.
- [3] Bekele G, Palm B. "Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia". *Applied Energy*, 86(3), 388-396, 2009.
- [4] Chang TP. "Performance comparison of six numerical methods in estimating weibull parameters for wind energy application". *Applied Energy*, 88(1), 272-282, 2011.
- [5] Garcia A, Torres J, Prieto E, Francisco AD. "Fitting wind speed distributions: a case study". *Solar Energy*, 62(2), 139-144, 1998.
- [6] Balouktsis A, Chassapis D, Karapantsios TD. "A nomogram method for estimating the energy produced by wind turbine generators". *Solar Energy*, 72(3), 251-259, 2002.
- [7] Seguro J, Lambert T. "Modern estimation of the parameters of the weibull wind speed distribution for wind energy analysis". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84, 2000.
- [8] Burton T, Sharpe D, Jenkins N. *Handbook Of Wind Energy*. 1st ed. West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2001.
- [9] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2nd ed. West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2010.
- [10] Carta JA, Ramirez P, Velazquez S. "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 933-955, 2009.
- [11] Dorvlo AS. "Estimating wind speed distribution". *Energy Conversion and Management*, 43(17), 2311-2318, 2002.
- [12] Morgan EC, Lackner M, Vogel RM, Baise LG. "probability distributions for offshore wind speeds". *Energy Conversion and Management*, 52(1), 15-26, 2011.
- [13] Chiu ST, "A comparative review of bandwidth selection for kernel density estimation". *Statistica Sinica*, 6(1), 129-145, 1996.
- [14] Turlach BA. "Bandwidth selection in kernel density estimation: a review". Working Paper, *Institut fur Statistik und Okonometrie, Humboldt-Universitat zu Berlin*, 1993.
- [15] Hu B, Li Y, Yang H, Wang H. "Wind speed model based on kernel density estimation and its application in reliability assessment of generating systems". *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(2), 220-227, 2016.
- [16] Xu X, Yan Z, Xu S. "Estimating wind speed probability distribution by diffusion-based kernel density method". *Electric Power Systems Research*, 121, 28-37, 2015.
- [17] Jeon J, Taylor JW. "Using conditional kernel density estimation for wind power density forecasting". *Journal of the American Statistical Association*, 107(497), 66-79, 2012.
- [18] Miao S, Xie K, Yang H, Karki R, Tai HM, Chen T. "A mixture kernel density model for wind speed probability distribution estimation". *Energy Conversion and Management*, 126, 1066-1083, 2016.
- [19] Zhang J, Chowdhury S, Messac A, Castillo L. "Multivariate and multimodal wind distribution model based on kernel density estimation". *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, Washington, DC, USA August 7-10, 2011.
- [20] Yang N, Huang Y, Hou D, Liu S, Ye D, Dong B, Fan Y. "Adaptive nonparametric kernel density estimation approach for joint probability density function modeling of multiple wind farms". *Energies*, 12(7), 1356, 2019.
- [21] Hu B, Li Y, Yang H, Wang H. "Wind speed model based on kernel density estimation and its application in reliability assessment of generating systems". *Journal of Modern Power System and Clean Energy*, 5(2), 220-227, 2017.
- [22] Wang J, Hu J, Ma K. "Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 881-899, 2016.
- [23] Samal RK, Tripathy M. "Estimating wind speed probability distribution based on measured data at Burla in Odisha, India". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(8), 918-930, 2019.
- [24] International Electro-technical Commission. "IEC 61400-12-2: Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry". 2012.
- [25] Mittelmeier N, Blodau T, Kühn M. "Monitoring offshore wind farm power performance with SCADA data and an advanced wake model". *Wind Energy Science*, 2(1), 175-187, 2017.
- [26] Krishna VB, Ormel F, Hansen KS. "Alternative approach for establishing the nacelle transfer function". *Wind Engineering*, 40(4), 307-318, 2016.
- [27] Hernandez W, López-Presa J, Maldonado-Correa J. "Power performance verification of a wind farm using the friedman's test". *Sensors*, 16(6) 816, 2016.
- [28] Haemi-Nasab MG, Franchini S, Davari AR, Sorribes-Palmer F. "A procedure for calibrating the spinning ultrasonic wind sensors". *Measurement*, 114, 365-371, 2018.
- [29] Bingöl F. "Rüzgar enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması". *Journal of Polytechnic*, 21(2), 273-281, 2018.
- [30] Yıldız C, Tekin M, Gani A, Kececioğlu OF, Acikgoz H, Sekkeli M. "Considering air density effect on modelling wind farm power curve using site measurements". *PressAcademia Procedia*, 5(1), 420-430, 2017.
- [31] Akdağ SA, Dinler A. "A new method to estimate weibull parameters for wind energy applications". *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766, 2009.
- [32] Safari B, Gasore J. "A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the weibull and rayleigh models in Rwanda". *Renewable Energy*, 35(12), 2874-2880, 2010.

[33] Kundu D, Raqab MZ. "Generalized rayleigh distribution: different methods of estimations". Computational Statistics & Data Analysis, 49(1), 187-200, 2005.

[34] Johnson NL, Kotz S, Balakrishnan N. *Continuous Univariate Distributions*. 2nd Ed. West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2000.