

# DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİNİN ÇIKIŞ (GÜÇ) KARAKTERİSTİĞİNİN MODELLENMESİ

Ulaş EMİNOĞLU

Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

ueminoglu@nigde.edu.tr

## ÖZET

*Son yıllarda enerji talebindeki artış ve sağlanan devlet destekleri enerji üretiminde Rüzgâr Türbini Sistemlerinin (RTS) kullanımının önemli oranda artmasına neden olmuştur. Değişken hızlı RTS'ler üretilen elektrik enerjisi miktarı açısından sabit hızlı RTS'lere nazaran daha avantajlı olup bu tip RTS'lerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada değişken hızlı RTS'lerin çıkış (güç) karakteristiğinin hesaplanması için yeni bir model önerilmektedir. Önerilen model popülasyonların çoğalmasında kullanılan S tipi büyüme eğrisinden faydalanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen model güç hesabında kullanılan genel ifadeye nazaran kullanılan parametre sayısı açısından avantajlı olup özellikle rotor verimliliğine ihtiyaç duyulmaksızın güç hesabına olanak sağlamaktadır. Modelin geçerliliği çok sayıda farklı tip ve büyüklükte RTS'lerin çıkış gücü bilgileri kullanılarak test edilmektedir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar modelin geçerli olduğunu ve bu tip RTS'lerin çıkış gücü hesabında kullanılabileceğini göstermektedir.*

## 1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları, maliyetin yanı sıra enerji teminine yönelik tüm süreçlerde ekolojik denge ile çevre üzerindeki olumsuz etkilerin en aza indirgenmesi açısından da önemlilik arz etmekte ve kullanımı her geçen gün artmaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi, hidrolik enerjiden sonra elektrik üretimi konusunda diğer kaynaklara göre daha yüksek kurulum kapasitesiyle sisteme enerji sağlandığı enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi; fosil yakıtların meydana getirdiği çevre kirliliği gibi etmenlerin olmadığı, dışa bağımlılıktan uzak, temiz enerji yaratması, işletme giderlerinin nispeten az ve fiyat belirsizliği riskinin asgaride olması nedeniyle yatırım yapılması tercih edilen projelerin başında gelmektedir [2].

Rüzgâr Türbini Sistemleri (RTS'ler), rüzgârdaki hareket enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [3]. Bir RTS genel

olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektronik kontrol elemanları ve kanatlardan oluşur. Türbinlerinin ürettikleri enerjinin beraberinde, genelde tüketiciye yakın yerde kurulu olmaları taşımadan kaynaklanan giderleri de önlemektedir. RTS'lerin güç kapasiteleri, rotor (kanat) yarıçap büyüklüklerine göre kW'lardan MW'lara kadar değişmektedir. Dünyadaki rüzgâr enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücü 1996 yılında 6 GW iken, 2012 yılının sonunda yaklaşık olarak 300 GW'a yükselmiş olup 2013 yılında 100 GW'lık bir artış beklenmektedir [4].

RTS'ler ile rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, seçilecek bölgenin meteorolojik özelliklerine ve en önemlisi de kullanılacak türbin sisteminin tasarımına bağlıdır. Ekonomik olarak enerji üretebilmek için RTS'nin kurulması düşünülen bölgede rüzgâr hızı, coğrafik özellikler (rakım sıcaklık gibi hava yoğunluğuna etki eden büyüklükler) ve arazi pürüzlülüğünün çok iyi belirlenerek tasarımında göz önünde bulundurulması

gerekmektedir [5]. RTS'ler çalışma prensibine göre üç gruba ayrılır. Bunlar;

- Sabit hız, sabit frekanslı RTS,
- Değişken hız, sabit frekanslı RTS,
- Değişken hız, değişken frekanslı RTS lerdir.

Sabit hızlı RTS'lerde kanat eğim kontrolü yapılarak rotor hızı sabit değerde tutulmakta veya çok küçük değişimlere müsaade edilmektedir. Rüzgâr hızı ile rotor verimliliği değiştiğinden genellikle rüzgârdan maksimum oranda güç üretimi yapılamamaktadır. Değişken hızlı RTS'lerde ise rotor hızı kontrol edilerek kanat uç hızı oranı en uygun değerde tutulmaktadır. Dolayısıyla bu tip sistemde rotor verimliliği maksimum değerde tutularak rüzgâr enerjisinden olası en yüksek oranda faydalanılmakta ve türbin çıkış gücü artmaktadır. Bu tip RTS'lerin dezavantajları ise; jeneratör ve şebeke arasında bağlantı için gerekli konvertörlerin karmaşıklığı ve maliyetin yüksek olmasıdır. Fakat son yıllarda güç elektroniğinde kaydedilen ilerlemeler ve yarı iletken teknolojisinin maliyetinin azalması bu tip RTS'lerin kullanımını cazip hale getirerek artmasına neden olmaktadır [6].

Bu çalışmada değişken hızlı RTS'lerde türbin çıkış gücünün hesabı için yeni bir model önerilmektedir. Bilindiği üzere türbin çıkış gücü kanat yarıçapı ve rüzgâr hızının yanı sıra rotor verimliliğinin fonksiyonu olup, rotor verimliliği tasarım parametreleri ve kanat uç hızı oranına göre değiştiğinden değeri teorik olarak gerçekçi şekilde belirlenememektedir. Önerilen modelde türbin çıkış gücü; kurulu güç (jeneratör gücü) ve nominal rüzgâr hızı değeri kullanılarak değişimi rüzgâr hızına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Model farklı tip ve sayıda türbinlerin gerçek çıkış gücü değerleri ile karşılaştırılarak geçerliliği test edilmiştir. Yapılan analizler modelin geçerli olduğunu ve türbin çıkış gücünün rotor verimliliği, kanat yarıçapı gibi büyüklüklere gerek kalmaksızın hesaplanabilmesine imkân sağladığını göstermektedir.

## 2. RTS'LERDE GÜÇ HESABI

RTS'ler, rüzgârda mevcut olan kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren mekanik sistemler olarak tanımlanabilir. Rüzgâr türbinleri yeryüzüne konumlandırılış eksenleri, hızları ve hız kontrol sistemlerinin kombinasyonu ile üretilmektedir. Yeryüzüne tam paralel olarak tasarlanan rüzgâr türbinlerine yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT), yeryüzüne dikey konumlandırılanlarına ise dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) denilmektedir [7]. Bir RTS'nin üreteceği gücü etkileyen faktörler; coğrafi konum, yerel yüzey yapısı, toprak seviyesinden yüksekliği ve hava yoğunluğu şeklinde sıralanabilir. Rüzgârdan elde edilen kinetik enerji; bir kanadın tam tur dönmesiyle oluşan rotor süpürme alanı ( $A$ ), havanın yoğunluğu ( $\rho$ ), kanat ucu hız oranı ve kanat açısına bağlı güç katsayısı (rotor verimi) ( $C_p$ ), ve rüzgârın hızı ( $u$ )'nun fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır [3].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p \quad (1)$$

Burada  $A$  rotor süpürme alanı,  $C_p$  ise güç katsayısı (rotor verimliliği) olup kanat uç hızı oranı ( $\lambda$ ) ve kanat açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak;

$$C_p(\lambda, \nu) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \theta - c_4 \theta^x - c_5 \right) e^{\left( \frac{-c_6}{\lambda} \right)} \quad (2-a)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \quad (2-b)$$

$$\lambda = \frac{R \eta w_r}{u} \quad (2-c)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $R$  rotor yarıçapı,  $c_1$ - $c_6$  ise türbin tasarım sabitleridir. RTS'ler için rotor verimliliğinin değeri ideal şartlarda 0.59 olup "Betz Limit" olarak adlandırılır [4]. Pratikte ise türbinlerin rotor verimliliği 0.4-0.5 değerleri arasında değişmektedir.

## 2.1 Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri hızlarına göre, sabit hızlı ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri basit, düşük maliyetli, sağlam, güvenilir olmalarından dolayı 90'lı yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktaydı. Ancak, doğrudan şebekeye bağlı olmalarından dolayı şebekede ciddi güç kalitesi problemlerine yol açmaları ve değişken hızlı türbinlerdeki enerji verimliliğine sahip olmamaları nedeniyle, bu tip türbinler günümüzde tercih edilmemektedir. Son yıllarda, değişken hızlı rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbin yatırımları içinde ön plana çıkmıştır. Bu türbinler, geniş bir rüzgâr hızı aralığında azami aoredinamik verim elde edilmesi için tasarlanmıştır. Bu tip türbinlerde genellikle bir asenkron veya senkron generator kullanılarak, türbin bir güç çevirgeci üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Güç çevirgeci generatör hızını kontrol ederek, rüzgâr hızındaki değişikliklerden ötürü meydana gelen güç dalgalanmalarının şebekeyi etkilemesini minimum seviyeye düşürmektedir. Bu tip RTS'lerde, Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) ve Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG) kullanılmaktadır [6]. Değişen rüzgâr hızına göre kanat açısı kontrol edilerek türbin hızının değiştirilmesi ile rotor kanat uç hızı oranı en uygun değerde veya buna yakın değerde tutulmakta ve maksimum değerde rotor verimliliği ile çalışılmasına olanak sağlanmaktadır. Bu tip RTS'lerde çıkış gücü;

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_{p\_max} u^3 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Rüzgar hızının nominal rüzgar hızından yüksek değerlerinde türbin hızı kontrol edilerek çıkış gücü nominal güç sınırında tutulmaktadır [4].

## 2.2 Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinde Çıkış (Güç) Karakteristiği İçin Yeni Bir Model

Denklem 3'de verildiği üzere değişken hızlı RTS'lerde çıkış gücü kanatlarda yakalanan gücün rotor verimliliği ile çarpımı sonucunda elde edilmektedir. Rotor verimliliğinin genel ifadesi Denklem 2'de verilmiş olup tasarım sabitleri ve kanat uç hızı oranına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla rotor verimliliğinin tam olarak değerinin belirlenmesi için tasarım sabitleri, kanat açısı ve kanat uç hızı oranı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Genel anlamda bunların tam olarak bilinmesi mümkün olmadığından analizlerde rotor verimliliği çoğunlukta 0.45 alınarak güç hesabı yapılmaktadır. Bu ise RTS çıkış (güç) karakteristiğinin rüzgâr hızının 3. Dereceden bir fonksiyonu olarak hesaplanmasına dolayısıyla yaklaşık bir çıkış karakteristiğinin oluşturulmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada çıkış gücü kontrol edilen değişken hızlı RTS'lerin çıkış karakteristiğinin oluşturulması için yeni bir model önerilmektedir. Model popülasyonların büyümesinde (çoğalmasında) kullanılan S tipi büyüme eğrisinden faydalanılarak geliştirilmiştir. Bu eğri;

$$P = \frac{I}{1 + e^{-(bu+c)}} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada b parametresi büyümenin durmaya başladığı denge evresine geçişi belirleyen parametre olup RTS'ler için türbin çıkış karakteristiğinde nominal rüzgar hızı ile değişen bir parametredir. Parametre c ise artış hızını karakterize etmektedir. Bu parametrelerin değeri çok sayıda farklı tip (Nordex, Vestas, Enercon vb.) ve büyüklükte rüzgâr türbini çıkış karakteristiği incelenerek eğri uydurma yöntemi ile belirlenmiştir. Eğri uydurmada geniş olarak kullanılan *Gauss-Newton* metodu [8] kullanılmıştır. Her bir türbin için çıkış gücünün rüzgâr hızına göre değerleri türbin kurulu gücüne bölünerek

ölçeklendirilmiş ve bu değişimlere Denklem (4) uydurularak c parametresinin değeri belirlenmiştir. Yapılan analizlerde bu parametrenin değeri kullanılan RTS'ler için -6.5 ile -8 arasında olduğu görülmüştür. Parametre b, P'nin değerinin sabitlendiği başka bir değişle artışın sonlandığı u değerini belirleyen parametre olup çok geniş değer aralığına sahiptir. Bu nedenle c=-7.5 değeri alınarak b parametresinin 0.6-2 arasında farklı değerleri için Denklem (4)'ün u'ya göre değişimleri elde edilmiştir. Bu değişimlerde P'nin 1 olduğu u<sub>n</sub> değeri belirlenerek b parametresinin u<sub>n</sub>'e göre değişimi Şekil 1'de "Gerçek Değer" olarak verilmiştir. Her bir b değeri için belirlenen u<sub>n</sub> değeri RTS'ler için nominal rüzgar hızını vermektedir. Dolayısıyla b parametresinin nominal rüzgar hızı değeri cinsinden ifade edilmesi mümkündür. Bu nedenle Şekil 1'de değişimi verilen eğriye;

$$b = b_1 e^{b_2 u_n} + b_3 e^{b_4 u_n} \quad (5)$$

şeklinde denklem uydurularak b parametresi türbin nominal rüzgar hızı cinsinden ifade etmek mümkündür. Eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen b<sub>1</sub>-b<sub>4</sub> katsayıları Tablo 1'de, bu katsayılar kullanılarak farklı u<sub>n</sub> değerleri için b parametresinin değişimi Şekil 1'de "Üssel Model" olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere b parametresinin gerçek değerleri ve uydurulan Denklem (5) ile hesaplanan değerler tamamen örtüşmektedir. Dolayısıyla Denklem (4)'de verilen S tipi çoğalma eğrisi ifadesinin türbin nominal gücü (P<sub>n</sub>) ile çarpılması sonucunda türbin çıkış gücü ifadesi;

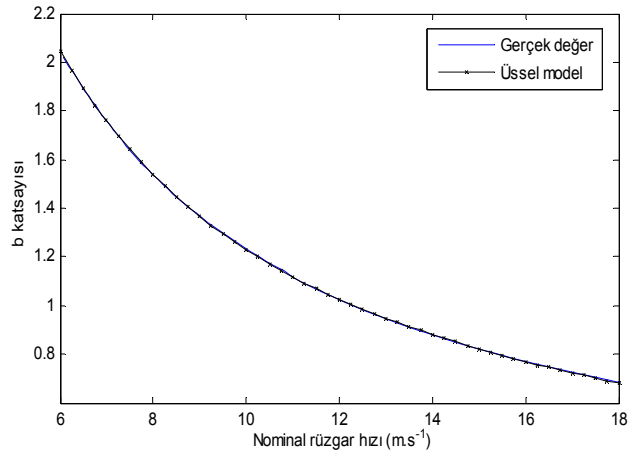
$$P_m = \frac{P_n}{1 + e^{-(bu+c)}} \quad (6)$$

şeklinde elde edilmiş olur. Elde edilen bu denklemde b parametresi türbin nominal rüzgar hızına bağlı olarak Denklem (5) ile ve c=-(6.5-8) aralığında bir değer alınarak RTS'nin çıkış gücünün rüzgar hızına bağlı olarak hesaplanması mümkün olacaktır. Dolayısıyla geliştirilen model, herhangi bir

RTS'nin kurulu gücü ve nominal rüzgar hızı kullanılarak çıkış karakteristiğinin oluşturulmasına veya herhangi bir rüzgar hızı değeri için rotor verimliliği, yarıçap ve bölgenin hava yoğunluğu değerlerine gerek kalmaksızın türbin çıkış gücünün hesaplanmasına imkan sağlayacaktır.

Tablo 1. Parametre b hesabı için katsayılar

| b <sub>1</sub> | b <sub>2</sub> | b <sub>3</sub> | b <sub>4</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 5.822          | -0.3398        | 1.79           | -0.0548        |

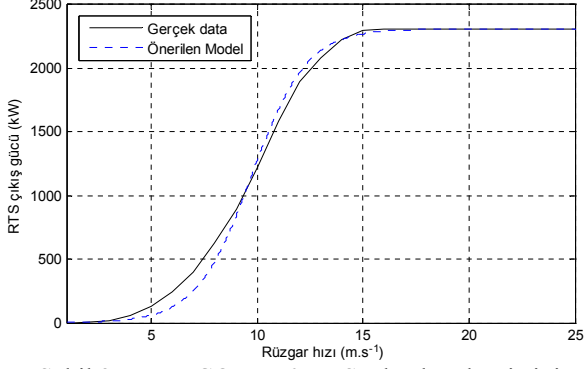


Şekil 1. Önerilen modelde b parametresinin RTS nominal rüzgar hızına göre değişimi

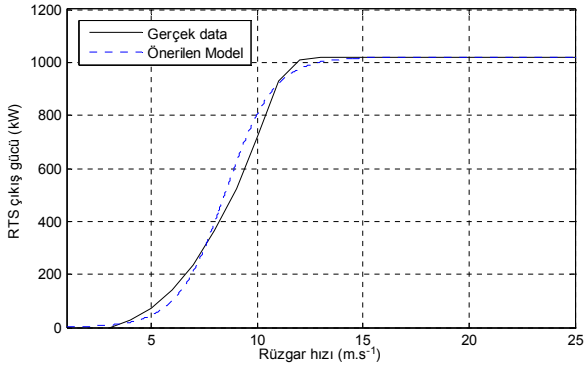
### 2.3 Geliştirilen Modelin Test Edilmesi

Önerilen modelin RTS'ler için kullanılabilirliği farklı güç ve tipte yatay eksenli RTS'lerin gerçek çıkış gücü bilgileri kullanılarak test edilmiştir. Şekil 2'de kurulu gücü P<sub>n</sub>=2300 kW, nominal rüzgar hızı u<sub>n</sub>=16 m.s<sup>-1</sup> ve rotor yarıçapı R=35.5 m olan ENERCON E70 rüzgar türbini sisteminin rüzgar hızına göre çıkış gücünün değişimi verilmiştir. Denklem (6) kullanılarak çıkış gücünün değişimi şekilde ayrıca verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere önerilen model ile elde edilen çıkış karakteristiği türbinin gerçek çıkış (güç) karakteristiğini büyük ölçüde karşılamaktadır. Önerilen model ayrıca bir çok RTS için uygulanarak P<sub>n</sub>=1020 kW, u<sub>n</sub>=14 m.s<sup>-1</sup> ve R=27 m olan NORDIC tipi RTS ve P<sub>n</sub>=500 kW, u<sub>n</sub>=15 m.s<sup>-1</sup> ve R=19.5 m olan VESTAS V39 tipi rüzgar türbinleri için türbin çıkış

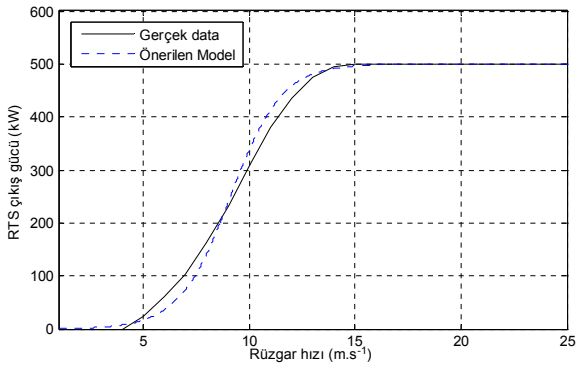
karakteristikleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’de verilmiştir. Benzer şekilde farklı tipteki bu türbinler için de önerilen modelin türbin çıkış gücü değişimini karakterize ettiği, RTS’lerin çıkış gücü hesabında modelin kullanılabilirliğini Şekil 3 ve Şekil 4’den yararlanarak söylemek mümkündür.



Şekil 2. ENERCON E70 RTS çıkış karakteristiği



Şekil 3. NORDIC tipi RTS çıkış karakteristiği



Şekil 4. VESTAS V39 RTS çıkış karakteristiği

RTS’lerin tasarımı ve maliyet analizlerinde yıllık enerji üretim miktarı, enerji maliyeti hesabı açısından gereklidir. Yıllık enerji

üretimi, RTS’nin belirlenen ortalama gücü kullanılarak hesaplanır. Ortalama güç ise ortalama rüzgâr hızının yerine ortalama rüzgâr hızı dikkate alınarak rüzgâr hızının dağılımı (genellikle Weibull dağılımı) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [9], [10].

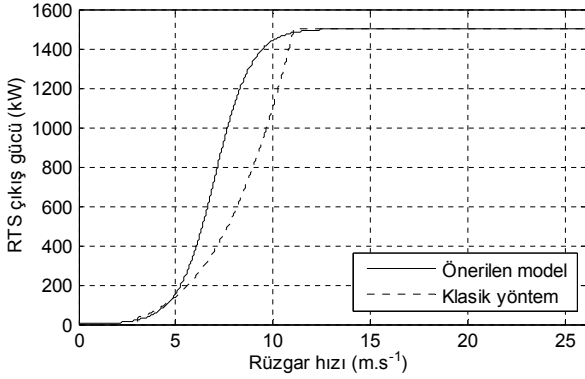
$$P_o(u_o) = \int_0^{\infty} P_m(u) f_w(u) du \quad (7)$$

Burada  $P_o$  ortalama rüzgar hızı ( $u_o$ ) değeri için RTS ortalama gücü,  $P_m$  Denklem (1) kullanılarak türbinin çalıştığı rüzgar hızı aralığı için elde edilen türbin çıkış gücü ve  $f_w$  ise rüzgar hızı olasılık yoğunluk (Weibull Dağılım) fonksiyonudur. Verilen bu ortalama güç hesabında integral sınırları için alt limit türbinin çalışmaya başladığı rüzgâr hızı ve üst limit olarak türbinin devreden çıktığı maksimum rüzgâr hızı kullanılmaktadır. RTS ortalama gücü kullanılarak yıllık enerji üretim miktarı kayıpların ihmal edilmesi ve sürekli çalışma durumu için;

$$YEÜ = 8760 \times P_o(u_o) \quad (8)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [9]. Çalışmanın bu bölümünde önerilen model RTS’lerin yıllık enerji üretimi ve enerji maliyet hesabı için geçerliliği test edilmiştir. Bunun için Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayımlanan raporda [9] verilen RTS ve analiz sonuçları kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan RTS için tasarım büyüklükleri, bölgenin hub yüksekliği değerinde rüzgâr potansiyeli Tablo 2’de verilmiştir. Tabloda verilen RTS bilgileri kullanılarak önerilen model ve Denklem (3) ile türbin çıkış karakteristiği oluşturularak Şekil 5’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere klasik model (Denklem 3) ile elde edilen çıkış karakteristiği Şekil 2-4’de verilen RTS gerçek eğrileri dikkate alındığında türbin sisteminin çıkış karakteristiğini tam olarak verdiğini söylemek mümkün değildir. Diğer taraftan önerilen model ile elde edilen eğrinin gerçekte RTS’lerin çıkış eğrisine daha yakın olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca önerilen model Denklem (7)’de kullanılarak

RTS'nin yıllık enerji üretim miktarı Denklem (8) ile  $YE\ddot{U}=7090$  MWh olarak belirlenmiş bu değer [9]'da verilen çalışmada  $YE\ddot{U}=7140$  MWh olarak belirlenmiştir. Hata oranı çok düşük değerli olup modelin değişken hızlı RTS'lerin çıkış gücü ve enerji hesabında kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 5. 1500 kW RTS'nin çıkış (güç) karakteristiği

Tablo 2. Örnek RTS'nin özellikleri ve rüzgâr potansiyeli bilgileri

| $P_n$<br>(kW)                    | $R$<br>(m)                       | $h$<br>(m)                    | $C_{p\_max}$ | $u_n$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $\lambda$ |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|-----------|
| 1500                             | 35                               | 65                            | 0.47         | 11.39                         | 7         |
| $u_{ci}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $u_{co}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $u_o$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $k_w$        | $c_w$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $\alpha$  |
| 3                                | 26                               | 7.558                         | 2.215        | 8.814                         | 0.143     |

### 3. SONUÇ

Son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kullanımını her geçen gün artırmaktadır. Bu tip rüzgâr türbinlerinin en önemli avantajı rüzgâr hızına göre türbin hızı ayarlanarak maksimum oranda güç üretilebilmesidir. Bu çalışmada değişken hızlı RTS'lerin çıkış gücü hesabı için yeni bir model önerilmiştir. Önerilen model, popülasyonların gelişiminde kullanılan S tipi büyüme eğrisi türbin çıkış karakteristiğine uyarlanarak geliştirilmiştir. Farklı tip ve güçte türbin çıkış karakteristikleri kullanılarak geçerliliği test edilmiş ve modelin kullanılabilir olduğu görülmüştür. Önerilen modelin en büyük avantajı türbin rotor yarıçapı hava yoğunluğu,

maksimum rotor verimliği gibi bir çok parametre yerine türbin kurulu gücü ve nominal rüzgâr hızı bilgileri kullanılarak çıkış karakteristiğinin oluşturulabilmesine imkan sağlamasıdır. Ayrıca RTS'lerin tasarım optimizasyonu çalışmalarında genel denklem kullanılarak çok sayıda parametrenin belirlenmesi yerine önerilen modelin kullanılarak daha az sayıda tasarım parametresi ile optimizasyonun gerçekleştirilmesine bölge için en uygun türbin kurulu gücünün kolaylıkla belirlenebilmesine imkân sağlayacağını söylemek mümkündür.

### 4. KAYNAKLAR

- [1] Zervos A., *Wind Energy-The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power*, European Wind Energy Association, 2009.
- [2] Gökçınar, R.E. ve Uyumaz, A., "Rüzgâr Enerjisi Maliyetleri ve Teşvikleri", *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008)*, 17-19 Aralık 2008, 699-706.
- [3] Heier, S., *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley, Newyork, 1998.
- [4] Barambones, O. "Sliding Mode Control Strategy for Wind Turbine Power Maximization", *Energies*, Vol. 5, pp. 2310-2330, 2012.
- [5] Hau, E., *Wind Turbines-Fundamentals, Technologies, Application and Economics*, 2nd Edition, Springer-Verlag, 2005.
- [6] Koç, E., Güven, N. "Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi", *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt.1, pp.51-55, 2011.
- [7] Nurbay, N., Çınar A., "Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Türbinlerin Birbirleriyle Karşılaştırılması", *3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, 164-168, 2005.

- [8] Chapra S.C., Canale R.P., *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill, 1988.
- [9] Fingersh, L., Hand, M., Laxson, A., "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model", National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-500-40566), USA, 2006.
- [10] Kurban, M., Kantar, Y.M., Hoccođlu, F.O., "Rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanılması", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Vol.10, pp.14-21, 2006.