

# Küçük Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini için Basit Kontrol Tasarımı

## Simple Control Design for a Small Vertical Axis Wind Turbine

Adnan Şınlak, Can Kaleli, Aykut Özgün Önel, Serhat Yeşilyurt

Mekatronik Mühendisliği Programı  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

{adnansinlak, cankaleli, onol, syesilyurt}@sabanciuniv.edu

### Özetçe

Bu makalede, küçük dikey eksenli rüzgâr türbinin elde ettiği enerjiyi maksimize edecek basit bir kontrolör tasarlanmıştır. Bu önerilen kontrol algoritmasının amacı mevcut sistemlere kıyasla daha basit bir yapıda olmasıdır. Algoritma kontrol işlemini sisteme uygulanan yük katsayısını önceden belirlenen değer aralıklarında müdahalede bulunarak yapabilmektedir. Bunu yapmak için önceden enerjiyi maksimize eden bir optimizasyon yöntemiyle belirlenmiş olan sınır değerlerinden faydalanmaktadır. Bu makalede, değişik simülasyonlar sonucu elde edilen enerjiyi maksimize ederken, basitleştirilmiş bir dikey eksenli rüzgâr türbini modeli kullanılmıştır.

### Abstract

In this paper, a simple controller is designed to maximize the energy output of a small vertical axis wind turbine. The control algorithm offers a simple approach for easy implementation, and manipulates the load coefficient using the wind speed. The controller operates within prescribed limits of the angular that maximize the energy output of the generator. The prescribed limit conditions are obtained off-line from the optimization of the energy output. Simulations are conducted to demonstrate the performance of the controller.

### 1. Giriş

Günümüzdeki toplumsal gelişmelerden ötürü enerjiye duyulan ihtiyacın artmasıyla birlikte, artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak adına alternatif enerji kaynakları aranmaya başladı. Fosil yakıta karşı aranan alternatif kaynakların arasında hiç şüphesiz en eskisi rüzgâr enerjisidir. Nitekim rüzgâr enerjisinin kullanımı, dünyada olduğu gibi ülkemizde de hızla artmaktadır [1,2]. Tarihsel olarak dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kullanımı daha eskiye dayanmasına rağmen, uzun yıllar boyunca yatay eksenli rüzgâr türbinleri kullanıldı. Ancak, son yıllardaki artan avantajları sebebiyle dikey eksenli türbinler tekrar kullanılmaya başlandı. Bunun en büyük sebepleri ise dikey eksenli türbinlerin daha sert hava koşullarında çalışabiliyor olması ve yatay eksene göre daha az olan kanat açıklığıdır. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri kanatlar ve şafttan meydana gelen bir rotor ile genellikle şafta doğrudan bağlanan bir jeneratörden oluşan bir düzeneğe sahiptir.

Mevcut yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin önemli bir kısmı kanat açılarını değiştirerek sabit hızda çalışmak için tasarlanmıştır. Dolayısıyla bu sistemler tek bir hızda dönerek,

belirlenmiş sabit bir rüzgâr hızında maksimum verimle çalışmaya elverişlidir [3,4]. Buna ilaveten yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde sistemin çalışabileceği belirli bir rüzgâr hızı aralığı vardır. Düşük hızlarda türbinin enerji üretmesi zorlaşırken, yüksek hızlarda türbin zarar görmemek için kendini kapatmaktadır [5,6]. Öte yandan dikey eksenli rüzgâr türbinleri yüksek ve dalgalı rüzgâr hızlarında da problemsiz şekilde çalışabilmektedirler [7,8]. Ancak, bu koşullarda rüzgârdan olabilecek en yüksek enerjiyi alabilmek için kontrol algoritmasını dikkatli bir şekilde seçmek gerekmektedir.

Rüzgâr enerjisi çevrim sistemlerinde kullanılan en yaygın kontrol yöntemlerinden biri maksimum güç noktası izleyicisidir [9-11]. Ancak türbülanslı ve hızla değişen rüzgârda türbinin performansını arttırmak için daha gelişmiş kontrol yöntemleri kullanılması gerekmektedir [12,13]. Rüzgâr türbininin enerji çıkışını maksimize etmek için model öngörülü kontrolörün oldukça elverişli olduğu gösterilmiştir [14]. Bu yöntemde temel olarak kontrol değişkeni belirli bir öngörü ufku için optimize edilmekte ve daha sonra bu ufkun ilk elemanı kontrol olarak uygulanarak bir sonraki adımda aynı prosedür tekrar edilmektedir.

Gelişmiş kontrol yöntemleri tatmin edici bir performans sergileyebilmekle birlikte genellikle oldukça yüksek bir hesaplama gücü gerektirmektedirler; örneğin, model öngörülü kontrolörün her adımda optimizasyon işlemini tekrar etmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu makalede benzer bir performans sergileyecek basitleştirilmiş bir kontrol yapısı önerilmektedir. Önerilen kontrol yöntemi jeneratörden çekilen yükü kontrol etmektedir ve jeneratörün enerji çıkışını maksimize edecek şekilde optimize edilmiştir. Bu yöntemin basamak, dalgalı ve gerçek rüzgâr koşulları altında başarılı bir şekilde çalıştığı simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir.

### 2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbin Modeli

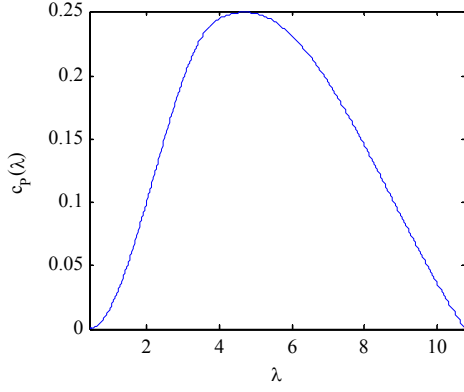
Dikey eksenli bir rüzgâr türbininde, kanatların aerodinamik olarak ürettiği güç aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{\text{rüzgâr}} = \rho c_p(\lambda) R H U^3 \quad (1)$$

burada  $\rho$  havanın hacimsel yoğunluğu,  $c_p$  güç katsayısı,  $R$  rotor yarıçapı,  $H$  rotor yüksekliği,  $U$  ise rüzgâr hızıdır. Bu denklemdeki  $\lambda$  değeri kanat ucu hız oranıdır ve (2)'deki gibi bulunur:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2)$$

denklemdeki  $\omega$  türbinin açısal hızıdır. Bu çalışmada, Şekil 1'de 10 m/s rüzgâr hızı için gösterilen, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonlarından elde edilmiş bir  $c_p - \lambda$  eğrisi kullanılmıştır.



Şekil 1: Kanat ucu hız oranı – güç katsayısı eğrisi

Türbinin dönel hareketi, kayıplar ihmal edilerek, sadeleştirilmiş olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{rüzgâr} - T_{jen} \quad (3)$$

burada  $J$  eylemsizlik momenti,  $T_{rüzgâr}$  rüzgâr torqu ve  $T_{jen}$  jeneratör torkudur ve bunlar aşağıdaki gibi hesaplanırlar:

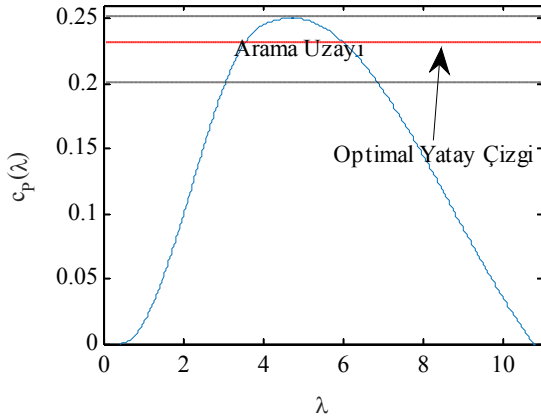
$$T_{rüzgâr} = P_{rüzgâr} / \omega \quad (4)$$

$$T_{jen} = c_L \omega \quad (5)$$

burada  $c_L$  jeneratörün tork ve geri elektromotor kuvveti katsayılarının derlenmesiyle yazılan ve bizim kontrol ettiğimiz değişken olan yük katsayısıdır.

Bu durumda, kayıplar ihmal edilerek, jeneratörden elde edilecek güç aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_{jen} = T_{jen} \omega = c_L \omega^2 \quad (6)$$



Şekil 2: Optimizasyonu anlatan güç katsayısı-kanat uç hızı eğrisi

Sistemin referans hızı,  $\omega_{ref}$ , yani rüzgârdan maksimum gücün,  $P_{rüzgâr,ref}$ , elde edileceği duruma, gelmesi durumunda,  $\omega$ 'nın zamana bağlı değişiminin sıfır olması istenmektedir. Bu nedenle, bu noktada (3) denkleminde (4) ve (5)'i yerine koyduğumuzda (4) ve (5)'in birbirine eşit olması istendiği için referans yük katsayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$c_{L,ref} = \frac{P_{rüzgâr,ref}}{\omega_{ref}} = \frac{c_{p,ref} \rho R H U^3}{\omega_{ref}^2} \quad (7)$$

burada  $c_{p,ref}$  Şekil 1'de görülen eğrinin tepe noktasındaki  $c_p$  değeri,  $\omega_{ref}$  ise herhangi bir rüzgâr hızı için bu güç katsayısını sağlayan  $\lambda_{ref}$ 'ten elde edilen  $\omega$  değeridir. Sonuç olarak,

referans yük katsayısını türbin referans hızda dönerken sisteme uygulayarak çekilebilecek en yüksek güç olan  $P_{rüzgâr,ref}$ 'i jeneratörden çekmek hedeflenmektedir.

### 3. Kontrol Algoritması

Önceden de belirtilmiş olduğu gibi, kontrol algoritması jeneratör ile ilişkili yük katsayısını kontrol edecektir. Bu çalışmada, türbinin açılma hızına göre dörde ayrılarak basitleştirilmiş bir kontrol algoritması önerilmiştir. Bu algoritmaya göre yük katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c_L = \begin{cases} 0, & \omega < \omega_{alt} \\ K_p \left( c_{L,ref} - \frac{c_{L,ref}}{\omega_{ref} - \omega_{alt}} e \right), & \omega_{alt} < \omega < \omega_{ref} \\ K_p \left( c_{L,ref} + \frac{c_{L,ref}}{\omega_{ref} - \omega_{üst}} e \right), & \omega_{ref} < \omega < \omega_{üst} \\ c_{L,maks}, & \omega_{üst} < \omega \end{cases} \quad (8)$$

burada,  $e = \omega_{ref} - \omega$ , hatayı, bir başka deyişle, referans hız ile o anki hız arasındaki farkı,  $K_p$  oransal kazancı,  $c_{L,maks}$  maksimum yük katsayısını,  $\omega_{alt}$  ve  $\omega_{üst}$  ise alt ve üst hız limitlerini ifade etmektedirler. Önerilen kontrolör eğer hız alt limitin altındaysa hiç yük çekmez ve üst limitin üstündeyse belirlenen çekebileceği maksimum yükü çeker; diğer durumlardaysa, hızın referans hızın altında veya üstünde olmasına göre (8)'de gösterilen şekilde kazancı 1 olan bir oransal kontrol yasası uygular.

Sonuç olarak, türbinin hızı alt limitten yavaşken, hız alt sınıra gelene kadar türbinden enerji çekilmeyerek türbinin hızlanmasına izin verilecek, alt sınırdan sonra ise hızı referans hızı oturtacak kontrol yasası devreye girecektir. Benzer şekilde, türbin hızı üst limitin üzerindeyken, yük katsayısı alabileceği en yüksek değer olan  $c_{L,maks}$  değerini alarak türbini olabildiğince çabuk referans üst limite düşürecek ve daha sonra tekrar oransal kontrol yasasıyla hız referans hızı oturtulacaktır.

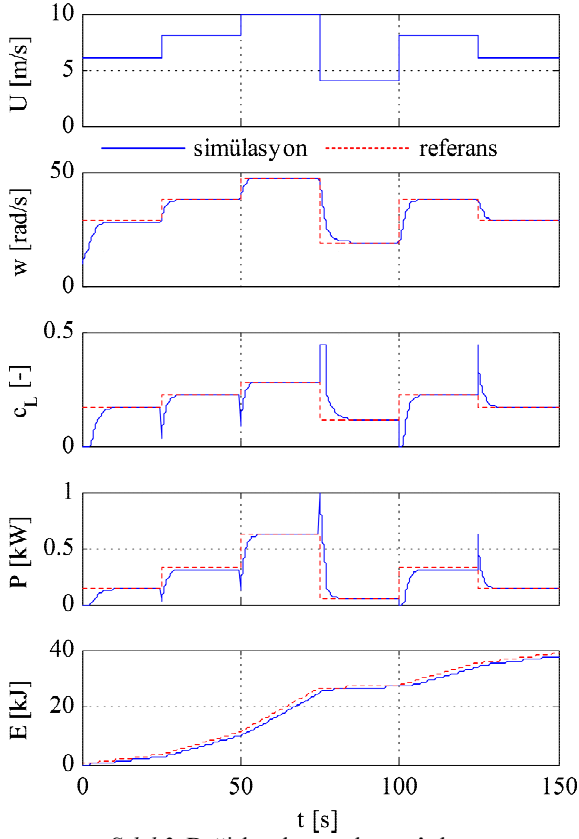
(6), (8) ve (9) denklemleri kullanılarak jeneratörden elde edilen enerji  $c_L$ 'nin bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Bu çalışmada amaç kontrolörü bu enerjiyi maksimize edecek şekilde optimize etmek olduğu için maliyet olarak 10 m/s sabit rüzgâr hızında yapılan 150 s'lik bir simülasyon sonunda elde edilen enerjinin negatifi kullanılmıştır; optimizasyon yöntemi olarak ise Matlab yazılımının fmincon fonksiyonundan faydalanılarak bir iç-nokta (interior-point) algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon esnasında ilk olarak maliyet değerini minimize edecek oransal kazanç değeri aranmış ve  $K_p$ 'nin optimal değeri 1 olarak bulunmuştur. Daha sonra ise bu değeri kullanarak kontrolörün çalışma bölgelerini belirleyen hız alt ve üst limitleri optimize edilmiştir. Bu değerler güç katsayısı eğrisini kesen yatay bir doğrunun eğriyle kesiştiği noktalardaki hız değerleri olarak kabul edilmiş ve Şekil 2'de gösterilen arama uzayı içerisinde, yani  $c_{p,ref}$ 'den ve bu değerinden geçen yatay doğruların arasında, oransal kazancın optimize edildiği şekilde optimize edilmiştir. Sonuç olarak  $\omega_{alt}$  ve  $\omega_{üst}$  limitlerin optimal değerleri  $c_{p,ref}$ 'in %92.11'inden geçen doğrunun kestiği hız değerleri olarak bulunmuştur. Yapılan simülasyonlar kontrolörün performansının oransal kazanca çok hassas olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte,  $\omega_{alt}$  ve  $\omega_{üst}$  değerlerinin performansı önemli bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir.

## 4. Sonuçlar

Bu çalışmada yapılan simülasyonlarda kullanılan türbin parametreleri ve değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Türbinin bir sonraki hızını hesaplamak için (3) denklemindeki integral işlemi ileri Euler yöntemi kullanılarak yakınsanmış ve simülasyonlarda  $10^{-3}$  saniyelik zaman adımları kullanılmıştır.

Tablo 1: Simülasyon parametreleri

Parametre	Tanım	Değer	Birim
$R$	Türbin Yarıçapı	1	m
$H$	Türbin Yüksekliği	2	m
$J$	Eylemsizlik Momenti	1.5	kg-m <sup>2</sup>
$U$	Rüzgâr Hızı	10	m/s



Şekil 3: Değişken basamak rüzgâr hızı

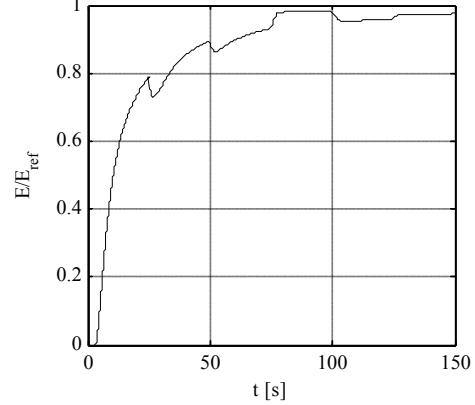
### 4.1. Değişken Basamak Rüzgâr Hızı

Önerilen kontrol metodunun performansı ilk olarak rüzgâr hızının 25'er saniyelik aralıklarla sırasıyla 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 4 m/s, 8 m/s ve 6 m/s olarak değiştiği ve türbinin ilk hızının 10 rad/s olduğu durum için test edilmiştir. Şekil 3 açıkça göstermektedir ki tüm sistem değişkenleri referans değerleri başarıyla takip etmektedirler. Kontrolör rüzgâr hızındaki ani artışlarda  $c_L$  değerini hızlıca düşürerek, türbin hızlanmasına izin vermiş; rüzgâr hızındaki ani düşüşlerde ise  $c_L$  değerini yükselterek türbini en kısa zamanda üst hız limitine götürmüştür. Türbin hızı alt ve üst limitler içindeyken, oransal kontrol yasası türbini başarıyla referans çalışma noktasına yerleştirmiştir. Bu sayede sistem o anki rüzgâr hızına bağlı

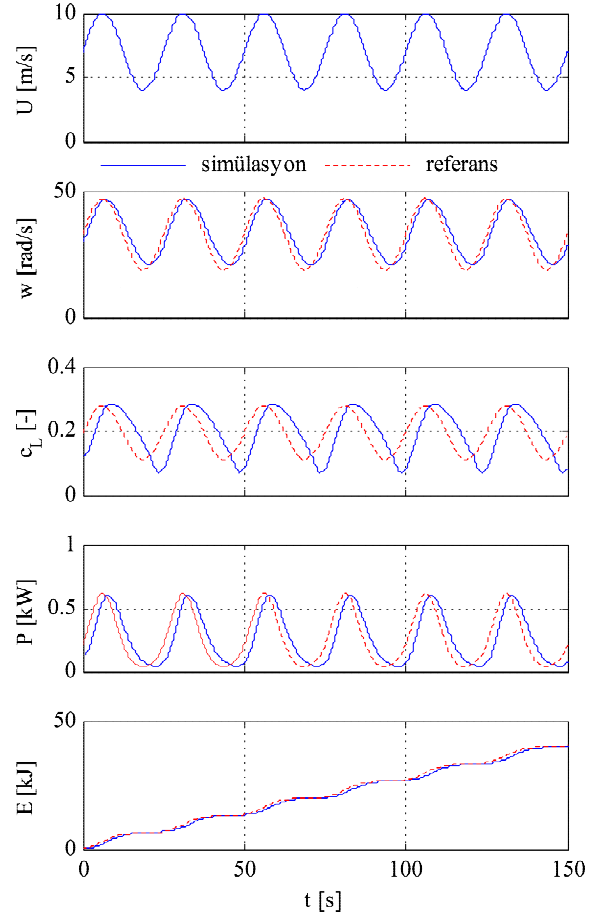
$\omega_{ref}$  değerini en kısa zamanda takip etmeyi başararak kontrolden kaynaklanabilecek enerji kayıplarını minimize etmiştir.

$$E(t) = \int_0^t P_{jen}(\tau) d\tau \quad (9)$$

Şekil 4’te  $t$  anında jeneratörden elde edilen ve (9)’daki gibi hesaplanan enerjinin,  $E$ , hızı sürekli ideal referans değerinde tutarak elde edilebilecek maksimum enerjiye,  $E_{ref}$ , oranının zamanla bire yaklaştığı görülmektedir. Bu oranın yüksek olması, sistemin verimliliğinin en belirgin göstergesidir.



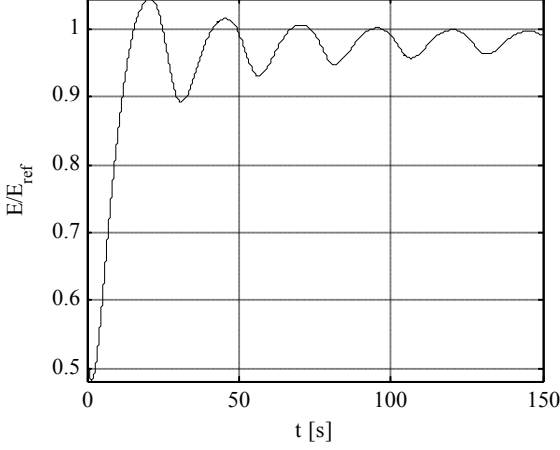
Şekil 4: Değişken basamak rüzgâr hızı için normalleştirilmiş enerji grafiği



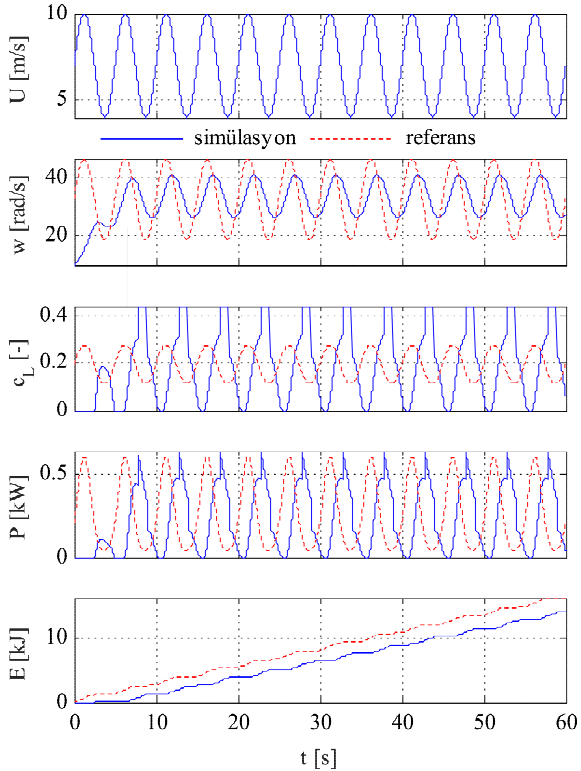
Şekil 5: 1/50 Hz sinüzoidal rüzgâr

## 4.2. Sinüzoidal Rüzgâr

Önerilen kontrolör ikinci aşamada devamlı olarak 1/50 Hz frekanslı bir rüzgâr hızına maruz bırakılmıştır. Uygulanan rüzgâr hızı 7 m/s'nin etrafında 3 m/s genlikle hareket edilecek şekilde kurgulanmıştır. Şekil 5'te de görüldüğü gibi, sistem referansı takip edebilmektedir. Ancak periyodik harekette sistemde oluşan bir gecikme mevcuttur.



Şekil 6. Sinüzoidal rüzgâr için normalleştirilmiş enerji grafiği



Şekil 7: 1/5 Hz sinüzoidal rüzgâr

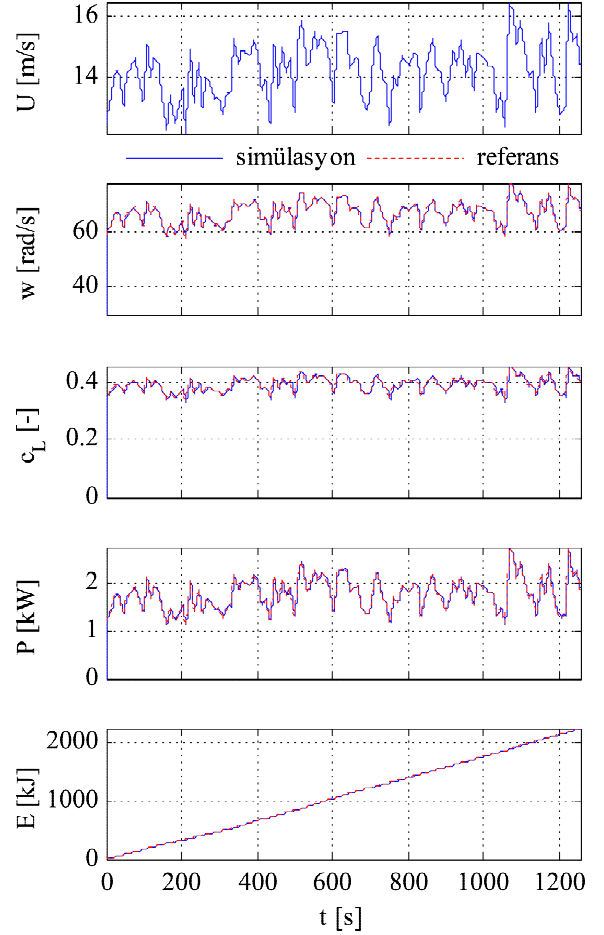
Şekil 6'da normalleştirilmiş enerji oranının 1 değerine salınarak yakınsadığı görülmektedir. Salınımın sebebi ise sistemde olan gecikmeden ötürü oluşan enerji kaybıdır. Periyodik harekette sistemin referans değerine tam oturması için uzun zaman geçmesi gerektiği gözlemlenmiştir. Farklı

rüzgâr frekanslarında yapılan simülasyonlar göstermiştir ki sistemde her daim mevcut olan bu gecikme rüzgâr frekansı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Bu gecikme etkisini göstermek için sistem 3 m/s genlikli, 1/5 Hz frekansta da test edilmiştir. Şekil 7 frekans 10 katına çıkarıldığında gecikmenin de gözle görülür bir şekilde arttığını açık bir şekilde göstermektedir. Ancak kontrolörün hala kararlı bir şekilde çalıştığı görülmektedir.

## 4.3. Gerçek Rüzgâr Verisi

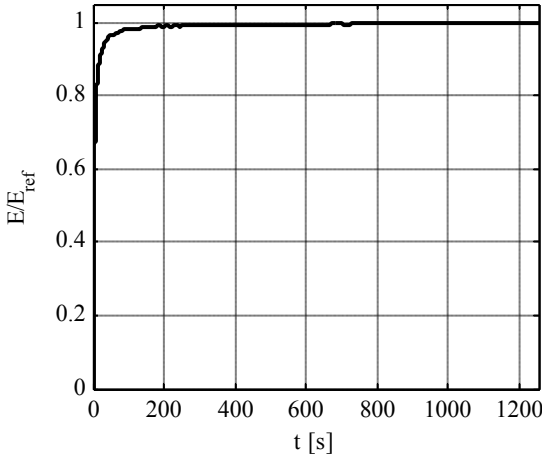
Son olarak önerilen kontrolör [10] makalesinde verilen 20 dakikalık gerçek rüzgâr verisine 10 m/s'lik bir ofset eklenerek test edilmiştir. Şekil 8'deki sonuçlar göstermektedir ki önceden değişken basamak ve sinüzoidal rüzgârda başarılı bir performans gösteren kontrolör gerçek rüzgâr hızında da gayet başarılı bir performans sergilemektedir. Rüzgâr hızı grafiği olan  $U$  ile açısal hız grafiği olan  $w$  birbirleriyle uyum içinde olduğu ve referans değerlerin kesintisiz bir şekilde takip edilebildiği gözlemlenmektedir.



Şekil 8: Gerçek rüzgâr verisi

Sonuç olarak elde edilen enerji grafiği (Şekil 9) oldukça tatmin edici olmuştur. 20 dakikanın sonundaki enerji kaybı yaklaşık 8.2kJ olarak belirlenmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere, sistemin mevcut aerodinamik yapısıyla elde edebileceği en yüksek enerji değeri olan  $E_{ref}$ 'i hızla takip ettiği gözlemlenmiştir, kaybın en önemli kısmı ilk geçiş anında yaşanmıştır. Gerçek rüzgârdaki enerji kaybı sinüzoidal

rüzgârdaki enerji kaybına göre daha azdır. Bunun en önemli sebebi ise kontrol algoritmasının basit yapısı nedeniyle değişim hızı çok yüksek olan sinüzoidal rüzgâr hızıyla türbin hızını birbirine senkronize edememiş olmasıdır; ancak, gerçek rüzgâr için bu işlemi başarıyla yapabildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 9: Gerçek rüzgâr verisi için normalleştirilmiş enerji grafiği

## 5. Sonuç

Bu makalede, dikey eksenli rüzgâr türbinleri için tasarlanmış ve sistemin referans değerlerini takip ederek enerji kaybını minimize eden bir kontrolör anlatılmıştır. Kontrolörün tasarımı aşamasında, parametreler jeneratörden elde edilecek enerjiyi maksimize edecek şekilde seçilmiştir. Önce oransal kontrolörün optimal kazanç değeri bulunmuş ve daha sonra, önerilen yöntemin performansında önemli bir rol oynayan, türbin açılma hızının alt ve üst sınırları belirlenmiştir. Kontrol algoritması jeneratör ile ilişkili yük katsayısını değiştirerek türbin hızını olabildiğince hızlı bu sınırlara getirmekte ve sonrasında oransal kontrol işe girerek türbinin referans çalışma noktasında çalışmasını sağlamaktadır. Önerilen yöntem öncelikle değişken basamak girişi için test edilmiştir. Rüzgâr hızının belirli bir zaman aralığında sabit kalıp, ardından değişmesi ve yine belirli bir zaman aralığında sabit kalmasının sistem üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Sistemin referans değerini takip ederek enerji kaybını minimize ettiği görülmüştür. Ardından sistem sinüzoidal rüzgâr ile test edilerek kontrolörün hızla değişen rüzgârda da kararlı bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Son olarak gerçek rüzgâr verisi ile sistem çalıştırılmış ve simülasyon sonuçları sistemin referans değerlerini oldukça başarılı bir şekilde takip ederek enerji kaybını minimize etmekte başarılı olduğu göstermiştir. Önerilen kontrolör oldukça basit bir yapıda olmakla beraber genel olarak oldukça tatmin edici bir performans elde etmiştir.

Bu çalışmayı yaparken mevcut kontrol algoritmalarına alternatif olarak daha basitleştirilmiş bir kontrol algoritması tasarlamayı planlamıştık. Bunu yapmak istememizdeki en büyük sebep ise günümüzde artan rüzgâr enerjisi kullanımından daha da verimli yararlanmak istememizdir. Sonuç olarak tasarım olarak gayet basit, ancak çok işlevsel bir kontrol algoritması tasarlamayı başardık. Bundan sonraki adımlarımızda bu kontrol algoritmasındaki gecikme süresini düşürüp, sistemin enerji kaybını daha da azaltmayı planlıyoruz.

## Kaynakça

- [1] Herbert, G. J., Iniyar, S., Sreevalsan, E., & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 11(6), 1117-1145.
- [2] 'Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu', TUREB, 2015.
- [3] M. Mirzaei, N. Poulsen and H. Niemann, (2015) Robust model predictive control of a wind turbine, In *American Control Conference*, Montréal.
- [4] Song, Y. D., Dhinakaran, B., & Bao, X. Y.(2000). Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3), 293-308.
- [5] Bianchi, F. D., De Battista, H., & Mantz, R. J. (2006). *Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design*. Springer.
- [6] Evren, S., Unel, M., Aksit, M. F.(2013). Modeling and control of a variable speed variable pitch angle prototype wind turbine. *Mathematical and Computational Applications*, 18(3), 408-409.
- [7] Danao, L. A., & Howell, R. (2012). Effects on the performance of vertical axis wind turbines with unsteady wind inflow: a numerical study. In *50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, Nashville, TN, USA*.
- [8] Danao, L. A., Edwards, J., Eboibi, O., & Howell, R. (2013). The performance of a vertical axis wind turbine in fluctuating wind—A numerical study. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 3, pp. 3-5).
- [9] Abdullah, M. A., Yatim, A. H. H., Tan, C. W., & Saidur, R. (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3220-3227.
- [10] Koutroulis, E., & Kalaitzakis, K. (2006). Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(2), 486-494.
- [11] Hui, J., & Bakhshai, A. (2008, June). A new adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems. In *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE* (pp. 4003-4007). IEEE.
- [12] McIntosh, S. C., Babinsky, H., & Bertenyi, T. (2008, January). Unsteady power output of vertical axis wind turbines operating within a fluctuating free-stream. In *46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, Reno, Nevada*.
- [13] McIntosh, S. C., Babinsky, H., & Bertenyi, T. (2007, January). Optimizing the energy output of vertical axis wind turbines for fluctuating wind conditions. In *45th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, Reno, Nevada*.
- [14] Hovgaard, T. G., Larsen, L. F., Jorgensen, J. B., & Boyd, S. (2013, July). MPC for wind power gradients—utilizing forecasts, rotor inertia, and central energy storage. In *Control Conference (ECC), 2013 European* (pp. 4071-4076). IEEE.