

RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN YENİLİKÇİ UYARLANABİLİR BİR ZARF KORUMA SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE FARKLI ROTOR ÇAPLARINDAKİ TÜRBİNLER ÜZERİNDE SİMÜLASYON TESTLERİ

Mustafa Şahin¹, İlkay Yavrucuk²

¹Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM),
²Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü,
 Orta Doğu Teknik Üniversitesi
¹musahin@metu.edu.tr, ²yavrucuk@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Rüzgar Elektrik Santrallerinde (RES) sıklıkla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin açma ve kesme rüzgar hızları arasındaki çalışması esnasında, türbülanslı rüzgarın etkisi sonucu rüzgar türbinlerinin yapısında ortaya çıkan aşırı yüklenmeleri engelleyen ve bu sayede de rüzgar türbininin zarar görmesini önleyen yenilikçi uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin geliştirilmesi ile ilgili olup, sistemin genel olarak çalışma mantığı, kısaca teorisi ve simülasyon testlerine yer verilmiştir. Koruma sistemi, dünyada rüzgar türbin sektörü için yenilikçi bir sistem olma özelliğini taşımaktadır. Bu çalışmada, ilgili sistemin farklı türbinlere ve bunların çalışma noktasındaki değişikliklerine uyarlanabilirliği ve zarf koruma sisteminin etkinliği iki farklı türbin sistemi üzerinde MS Bladed Rüzgar Türbin Modeli simülasyonları ile gösterilmiştir.

Terminoloji

a, b	Sistem Parametreleri	u	Sistem Girişi
F_i	İtki Kuvveti	\wedge	Yaklaşık Değer
Δ	Uyarlanabilir Sinir Ağı Çıkışı	K	Gözlemleyici Kazancı
u_{zarf}	Zarf Rüzgar Hızı	F_{i_s}	İtki Kuvveti Sınır Değeri
Ω	Türbin Rotor Devri	e	Hata
$\Delta\beta_{ref}$	Ekstra Kanat Yunuslama Açısı	ε	Tasarım Parametresi
Δu	Gerçek ile Zarf Rüzgar Hızları Arasındaki Fark	W	Sinir Ağı Öğrenme Ağırlıkları
$\delta(\mu)$	Uyarlanabilir Sinir Ağı Giriş Vektörü	n_1	Sinir Ağı Giriş Sayısı
n_2	Sinir Ağı Çıkış Sayısı	k	E-modifikasyon Kazancı
I	Birim Matrisi veya Sabiti	Γ	Sinir Ağı Öğrenme Hızı
\oplus	Kronocker Çarpımı	r	Doğrusal Olmayan İtki Kuvveti Dinamik Fonksiyonu

1. GİRİŞ

Rüzgar türbinlerinin güvenli olarak çalışması kesintisiz elektrik enerjisinin üretimi açısından önemlidir. Santraldeki bir türbinin zarar görmesi durumunda, onarım süreci epeyce vakit alabilir ve yüksek maliyetlerle sonuçlanabilir. Bu durumları önlemek amacıyla, literatürde, pek çok sayıda türbin koruma algoritmaları üzerine bilimsel çalışmalar mevcuttur[1–9]. Örneğin,

literatürde tepe tıraşlama (peak shaving) ve/veya itki kesme (thrust clipping) yöntemi olarak bilinen yöntemler modern rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır[8,10]. Ancak, bu yöntem ve/veya yöntemler, çevrim dışı olarak çalışmaktadır. Başka bir deyişle, rüzgar türbinlerinin mevcut çalışma koşullarını dikkate almayıp, önceden belirlenen bir programa göre çalışmaktadırlar. Üstelik bu sistemler, türbini sadece anma rüzgar hızı etrafındaki aşırı itki kuvvetine karşı korumaktadır. Ancak, rüzgar türbinleri türbülanslı rüzgarın etkisiyle sadece anma rüzgar hızı etrafında değil, açma ve kesme rüzgar hızları arasındaki bütün operasyonları esnasında tehlikeli çalışma durumlarına maruz kalmaktadır. Bu olay da, rüzgar türbinlerinin ömürlerini azaltmanın yanında, kanatlarının kırılmasını, kulelerinin zarar görmesi gibi vb. ciddi hasarlara yol açabilir. Örneğin, [7, 8, 11] numaralı referanslarda, bir türbin koruma sistemi algoritması verilmiştir. Bu sistem, optimizasyon tabanlı bir koruma sistemidir. Ancak, bu sistem uyarlanabilir/adaptif olmamanın yanında, rüzgar türbin sistemi için tasarlanan temel kontrolcülerin ne olduğunun açıkça bilinmesini gerektirdiğinden, farklı türbinlere uygulanmasında zorlukların çıkabileceği açıktır. Çünkü temel türbin kontrolcülerinin algoritması türbinden türbine, üreticiden üreticiye değişiklik gösterebilmektedir. İlgili sistemde, türbinleri korumak için hem jeneratör tork (güç elektroniği ünitesi) hem de kanat yunuslama açısı kontrolcülerine müdahale işlemi gerekmektedir. Bu da, türbinlerin kontrol sistemlerini iyice karmaşıklıkla sürükleyebilir.

Bu çalışmada, [12–14] numaralı referanslardan yola çıkarak insanlı ve insansız hava araçlarının uyarlanabilir zarf koruma sisteminden esinlenilerek geliştirilen, rüzgar türbinlerinin açma ve kesme rüzgar hızları arasında etkili bir şekilde korunmasını sağlayan yenilikçi bir türbin koruma sistemi ele alınmıştır. İlgili sistem, önceden belirlenen bir programın aksine, esen rüzgar ve bu rüzgar sonucu türbine ait önemli parametrelerin anlık olarak sürekli olarak izlemesi ile görevini yerine getirmektedir. Bu sayede, ilgili sistem barındırdığı uyarlanabilir/adaptif bir sinir ağı vasıtasıyla, türbinde ve çalışmasında zamanla oluşan değişiklikleri öğrenerek, türbin sisteminin yeni dinamiğine uyarlanabilmekte ve türbinin kontrol sistemine gerektiğinde müdahale ederek rüzgar türbini tehlikeye sokmadan türbini güvenli olarak çalıştırmaktadır. Bu çalışmada, sakınma/müdahale işlemi türbin kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışı veya başka bir deyişle kanat yunuslama açısının referans değerinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. İstenirse, daha farklı yöntemler ile de sakınma/koruma işlemi sağlanabilir. Yenilikçi koruma sistemi, çalışan türbinin değişen çalışma noktalarına uyarlanabildiği gibi[15], türbin kanatlarında oluşan buzlanma, türbinin bakımsızlığı gibi vb. durumlara da uyarlanabilir. Bu çalışmada, ilgili sistemin çalışma noktasına uyarlanabilmesinin yanında, tasarımında hiçbir değişiklik yapılmadan başka bir rüzgar türbinine uyarlanabilme ve koruma kabiliyeti de MS Bladed Rüzgar Türbin Modeli simülasyonları ile incelenmiştir.

Çalışmanın devamı şu şekilde hazırlanmıştır. Bölüm 2’de kısaca MS Bladed Modeli ve mevcut özelliklerine yer verilmiştir. Yenilikçi uyarlanabilir zarf koruma sisteminin kısaca çalışma mantığı, teorisi ve uygulamasına değinilmiştir. Bölüm 3’te ise ilgili tasarlanan sistemin farklı rotor çaplarına sahip rüzgar türbinleri üzerindeki simülasyon testleri üzerinde durulmuştur. Son olarak da, Bölüm 4’te de ilgili sistemle ilgili olarak görüş ve düşünceler ile çalışma sonlandırılmıştır.

2. YENİLİKÇİ UYARLANABİLİR ZARF KORUMA SİSTEMİ

Yenilikçi uyarlanabilir zarf koruma sistemi, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli kullanılarak havacılık sektöründe hava araçları için kullanılan bir zarf koruma sisteminden yola çıkılarak geliştirilmiştir. MS Bladed Modeli ise, bu çalışmanın birinci yazarı tarafından yatay eksenli rüzgar türbinlerinin simülasyonu için geliştirilmiş pal elemanı teorisi üzerine kurulmuş bir türbin modelidir[16]. Çeşitli aerodinamik düzeltme formüllerine sahip olan MS Bladed Modeli, farklı yapısal özelliklere sahip yatay eksenli rüzgar türbinlerini çok çeşitli çalışma şartları altında simüle edebilmektedir. Türbin çalışması esnasında, her bir kanada ait aerodinamik veriler, MS Bladed Modelinden elde edilebilir. MS Bladed Modelinin mevcut versiyonunda kullanılan türbin sistemi, üç kanada sahip NREL'e ait 5 MW'lık rüzgar türbin sistemidir. Bu türbine ait jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı kontrolcülere de MS Bladed Modeli kullanılarak tasarlanmıştır[16–18]. Ayrıca, bu çalışmada açıklanan yenilikçi zarf koruma sistemi de türbin kontrol sistemine eklenmiştir.

Yenilikçi zarf koruma sistemi, rüzgar türbin sistemlerini türbülanslı rüzgarlar altında korumak için çok önemli modifikasyon ve varsayımlar kullanılarak geliştirilmiştir. İlgili sistemin çalışması kısaca şu şekilde anlatılabilir.

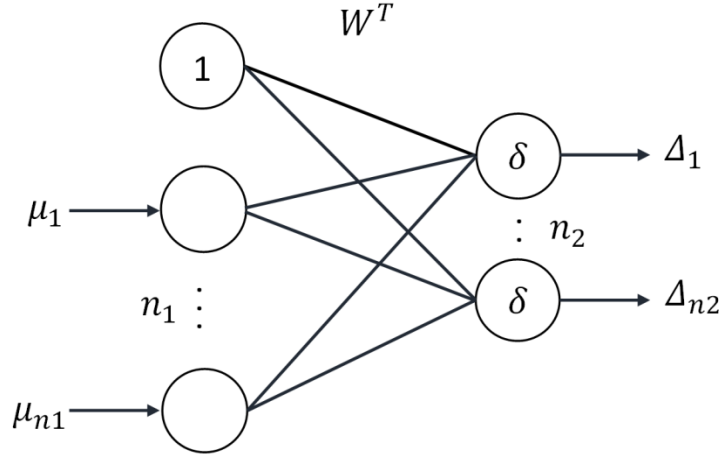
Öncelikle, yenilikçi sistem [7, 8, 11] numaralı referanslarda verilen koruma sisteminin aksine, mevcut türbine ait temel kontrol sistemlerinin algoritmalarının bilinmesini gerektirmemektedir. Başka bir deyişle, önerilen sistem türbinin temel kontrol sistemlerinden bağımsız olarak çalışmakta ve türbin sensörlerinden alınan verilere göre türbine koruma amaçlı müdahale etmektedir. Bu özelliği ile, farklı türbinlere de kolayca uygulanabilir ve uyarlanabilir. İlgili sistem, rüzgar ve rüzgar türbinlerine ait durum değişkenlerini gerçek zamanlı olarak izlemekte ve istenilen bir türbin değişkeni için önceden belirlenen/tanımlanan kritik tasarım değerine yaklaştığında türbin kanatlarına müdahale ederek türbini korumaktadır. Eğer, türbin çalışması esnasında ilgili değişken kritik tasarım değerinin altında seyrediyorsa, türbin güvenli olarak çalıştığı anlamına gelir, böylece rüzgar türbini rüzgar elektrik santrallerindeki sıradan türbinler gibi çalışmasına devam etmektedir. Yenilikçi zarf koruma sistemi sadece, türbin tehlikeye girecek olduğunda türbinin yunuslama açısı referans değerinin değiştirilmesi ile türbini tehlikelerden sakınmaktadır. Bu işlem esnasında, bir miktar güç kaybı oluşur, ancak türbinin kendisinde oluşabilecek zararı önlemek daha da önemlidir. Bu çalışmada, kritik olarak ele alınan parametre ise türbinin itki kuvveti olarak seçilmiştir. Çünkü itki kuvveti, türbin üzerinde önemli bir tasarım parametresidir. Kanat yunuslama açısı referans değerinin değişimi ile kanatların yunuslama açıları toplu olarak artırılarak, türbinin itki kuvveti azaltılmış ve bu sayede de itki kuvvetinin istenilen sınırlar içerisinde kalması sağlanmıştır. Sonucunda da, türbinde oluşabilecek kanatların kırılması, kulenin zarar görmesi gibi vb. durumların ortaya çıkması önlenmiştir.

Şekil 1'de yatay eksenli bir rüzgar türbini üzerinde temel türbin kontrolcülere ve uyarlanabilir zarf koruma sisteminin blok şeması görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, temel türbin kontrolcülere olan jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı kontrolcülere türbinin ana operasyonlarından sorumludur. Her iki kontrolcü yaygın olarak jeneratör şaftının devir bilgisini kullanmaktadır. Burada, bu bilginin yerine, rotor devri kullanılmıştır. Rotor devir bilgisine göre, bu iki kontrolcü arasında geçiş dinamik olarak yapılmaktadır. Jeneratör tork kontrolcüsü türbini açma ve anma rüzgar hızı arasındaki rüzgar hızlarında en verimli bir şekilde türbini

türbin sisteminin oldukça doğrusal olmamasından dolayı, türbinin itki değerini tüm çalışma noktalarında tahmin edemez.

$$\hat{F}_i = a\hat{F}_i + bu \quad (1)$$

Bu yüzden, gerçek türbin sistemi ile yaklaşık sistemin arasındaki boşluğu/belirsizliği/hatayı kapatmak için burada Şekil 2’de temel yapısı verilen uyarlanabilir/adaptif bir sinir ağı (LPNN) ile yaklaşık model desteklenmiştir.



Şekil 2. Uyarlanabilir sinir ağı yapısı (LPNN)

Ayrıca, sisteme bir de gözlemleyici eklenmiştir. Bu sayede, doğrusal olan yaklaşık modelin türbinin itki kuvvetini doğru bir şekilde tahmin etmesi sağlanmıştır. Denklem (2)’de genişletilmiş model olarak ifade ettiğimiz itki kuvveti için kullanılan model görünmektedir[13]. Bu model, gerçek türbinin çalışması esnasında türbinin itki kuvveti değerini anlık olarak tahmin etmektedir.

$$\hat{F}_i = a\hat{F}_i + bu + \Delta(F_i, \Omega, u) + K(F_i - \hat{F}_i) \quad (2)$$

Burada, Δ bahsettiğimiz uyarlanabilir sinir ağının çıkışıdır. Denklem (2)’nin son kısmında ise, yukarıda belirtilen gözlemleyici yer almaktadır. Rüzgâr türbini, mevcut esen rüzgâr altında çalışmasına devam ederken, sistem sınır parametre değeri olan itki kuvvetinin gerçek değerinin tahmin işlemi doğru bir şekilde gerçekleştirmekte ve buna bağlı olarak da aşağıdaki formül vasıtası ile türbinin sınır itki kuvveti değerine götüren sanal bir rüzgâr hızını hesaplamaktadır.

$$u_{zarf} = -b^{-1} (aF_{i_s} + \Delta(F_i, \Omega, u) + Ke - \hat{F}_i) \quad (3)$$

Burada, bu sanal rüzgâr hızı, zarf rüzgâr hızı, u_{zarf} olarak adlandırılmıştır. F_{i_s} ise, itki kuvveti için tanımlanan sınır değeridir. Aynı zamanda, uyarlanabilir zarf koruma sistemi algoritması, her bir zaman diliminde anlık olarak hesaplanmış olduğu zarf rüzgâr hızı, u_{zarf} ile türbine gelen gerçek rüzgâr hızını, u karşılaştırmaktadır. Eğer rüzgâr türbinine gelen gerçek rüzgâr hızı, zarf rüzgâr hızından düşük ise, rüzgâr türbini açısından herhangi bir tehlike yoktur ve türbin güvenli olarak çalışmaktadır. Ancak, gerçek rüzgârın zarf rüzgâr hızını aşması durumunda türbinin tehlikeye gireceği anlamında olup, türbin üzerinde oluşan itki kuvveti değerinin de önceden belirlenen sınır değerini aştığı ve türbin yapısının zarar görebileceği anlamını taşır. Bu durumda,

türbin sisteminin tehlikeden kurtarılması gerekir. Bu çalışmada, gerçek ve zarf rüzgar hızları arasındaki fark değeri, Δu bir tasarım parametresi, ε üzerinden elde edilen kanat yunuslama açısı referans değeri, $\Delta\beta_{ref}$ denklem (4) ile hesaplanmıştır. Bu değer, daha sonra türbinin kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışına, β_{ref} (Şekil 1), başka bir deyişle yunuslama açısının referans değerinin değiştirilmesini ve bu sayede de kanat yunuslama açılarının kolektif olarak arttırılarak, türbinin itki kuvvetinin sınır değeri içinde kalmasının sağlanması ile türbinin korunması işlemi gerçekleştirilmiştir.

$$\Delta\beta_{ref} = \varepsilon\Delta u \quad (4)$$

Yukarıda bahsettiğimiz uyarlanabilir sinir ağı çıkış, Δ denklem (5) ile hesaplanmıştır[13].

$$\Delta(F_i, \Omega, u) = W^T \delta(\mu) \quad (5)$$

Buradaki, W sinir ağının öğrenme ağırlıklarıdır. $\delta(\mu)$ ise, ilgili uyarlanabilir sistemin öğrenebilmesi için gerekli sinir ağının giriş vektörüdür.

Öğrenme ağırlıkların güncelleme kuralı ise, şu şekilde ifade edilir[13].

$$\dot{W} = \Gamma(\delta(\mu)e^T P - k\hat{W}\|e\|) \quad (6)$$

Burada, P aşağıdaki Lyapunov denkleminin çözümüdür.

$$(-K)^T P + P(-K) = -I \quad (7)$$

Ayrıca, ilgili sistemin giriş vektörü kronocker çarpanı vasıtası ile denklem (8) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\delta(\mu) = \delta(F_i, \Omega, u) = [1 F_i \Omega] \oplus [1 u] \quad (8)$$

Önerilen bu sistemde, türbin sisteminin değişkenleri hızlı ve yavaş olarak ayrılmıştır. Sınırlanması istenilen itki kuvveti ise, bu hızlı ve yavaş olarak adlandırılan değişkenlerin bir fonksiyonudur. MS Bladed Modeli ile yapılan incelemelerde, kontrol edilen türbinin birim basamak olarak artan rüzgar hızı girişine karşın kanat yunuslama açısının değişimi, rotor devrine göre rüzgardan daha çabuk etkilendiği, türbinin itki kuvveti üzerinde de baskın bir değişken olduğu ve bu nedenle de kanat yunuslama açısının hızlı değişken olduğu sonucuna varılmıştır. Rotor hızının da, yavaş değişken olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, itki kuvvetinin dinamiği denklem (9)'da olduğu gibi kendisinin bir fonksiyonu olarak düşünülmüştür.

$$\dot{F}_i = r(F_i, \Omega, u) \quad (9)$$

İlgili sistemin tasarımında, itki kuvveti için seçilen yaklaşık denklemdeki a ve b parametreleri sırasıyla -0.24 ve 0.0175 olarak seçilmiştir. Ayrıca, gözlemleyici kazanç değeri, $K = 50$ olarak alınmıştır. Öğrenme hızını gösteren, $\Gamma = 25$ olarak seçilmiştir. P değeri denklem (7) ile hesaplanmıştır. E-modifikasyon değeri, 0.02 olarak, tasarım parametresi olan ε ise, -2.5 olarak seçilmiştir.

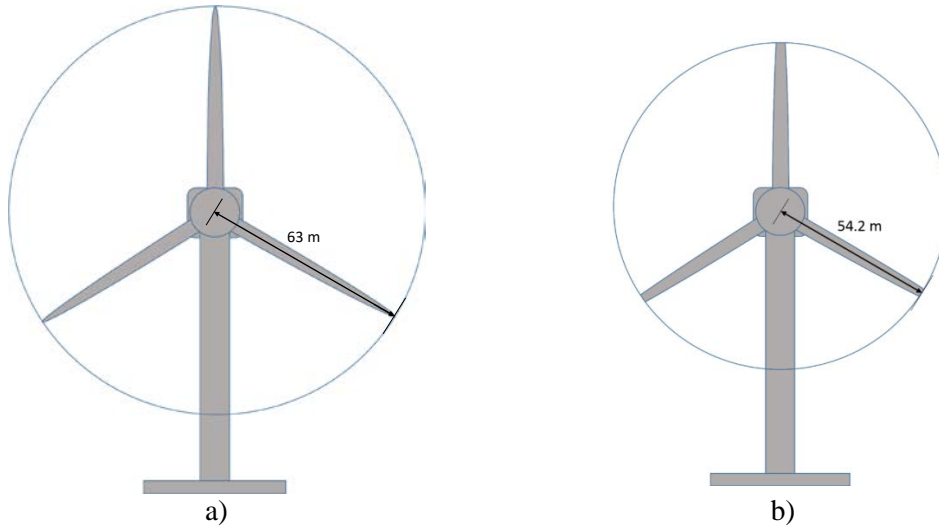
3. FARKLI ROTOR ÇAPLARINDAKİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ ÜZERİNDE SİMÜLASYON TESTLERİ

Bu kısımda, yenilikçi zarf koruma sistemi, Türbin A olarak adlandırılan NREL 5 MW'lık rüzgar türbini üzerinde, ardından da, Türbin B olarak adlandırdığımız NREL 5 MW'lık türbinin kanatlarının uç kısmından, uzunluğu toplam kanat uzunluğunun %14.3 civarındaki bir kanat parçasının çıkarılarak elde edilen daha kısa kanatlara sahip başka bir türbin sistemi üzerinde simülasyon testi gerçekleştirilmiştir. Türbin B'nin elde edilmesinde, kanat uzunlukları azaltıldığı için türbin sisteminin toplam atalet momenti de %5 oranında azaltılmıştır. Koruma sisteminin çalıştığına dair simülasyon sonuçları her iki türbin için de tam yük bölgesi (Bölge 3) için verilmiştir.

Çizelge 1'de Türbin A ve B'ye ait rotor yarıçapı ve atalet momentlerinin değerleri yer almaktadır.

Çizelge 1. Türbin A ve Türbin B'ye ait bazı özellikler

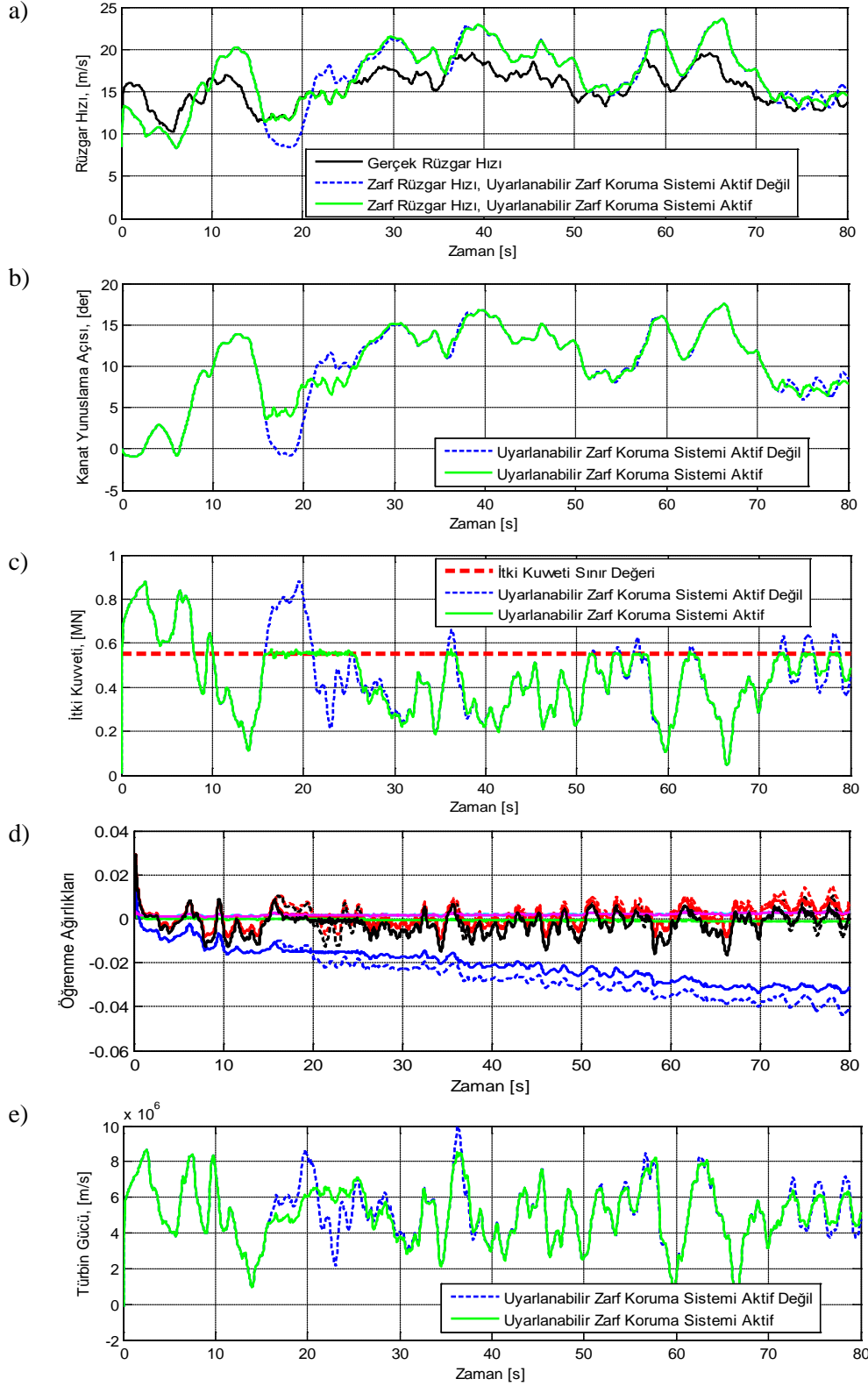
Türbin A		Türbin B	
Rotor Yarıçapı	63 m	Rotor Yarıçapı	54.2 m
Rotor Atalet Momenti	38759228 kg.m ²	Rotor Atalet Momenti	36821266 kg.m ²



Şekil 3. Test türbinleri, a) Türbin A, b) Türbin B

Şekil 3'te Türbin A ve Türbin B resmedilmiştir. Uyarlanabilir zarf koruma sisteminde herhangi bir tasarım değişikliği yapılmadan her iki türbin sistemi üzerinde simülasyon testleri yapılmıştır. Bu testler, Türbin A ve Türbin B için sırasıyla, Şekil 4 ve Şekil 5'te görülmektedir. Her iki test işlemlerinde, simülasyon süresi 80 saniye olarak alınmış, ve yenilikçi uyarlanabilir zarf koruma sistemi simülasyonların 10. saniyesinde aktif edilmiştir. Testlerdeki, kesik çizgili sonuçlar yenilikçi zarf koruma sisteminin aktif değilken ki sonuçlara karşılık gelmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5'in a, b, c ve e'sindeki sonuçlar aynı rüzgar ve türbin parametrelerine ait olsa da, okuyucunun simülasyon sonuçlarını daha kolay değerlendirebilmesi açısından farklı renklerle sunulmuştur. İlgili şekillerin d'sinde ise, sinir ağının aynı öğrenme ağırlıklarının sistem aktif veya değilken ki değişimleri aynı renklerle verilmiştir. Türbin A için sınırlanması istenilen itki sınır değeri 0.55 MN seçilirken, Türbin B için bu değer, 0.50 MN olarak alınmıştır.

Şekil 4'te verilen ve Türbin A'ya (NREL 5 MW) ait olan simülasyon sonuçlarından anlaşılacağı üzere, 16 m/s ortalama değere sahip normal türbülanslı gerçek rüzgar (Şekil 4-a) altında çalışan ve temel türbin kontrolcülerıyla kontrol edilen ve aktif olmayan zarf koruma sistemi ile, Türbin A zaman zaman önceden belirlenen 0.55 MN itki kuvveti sınır değerini geçmektedir(Şekil 4-c).

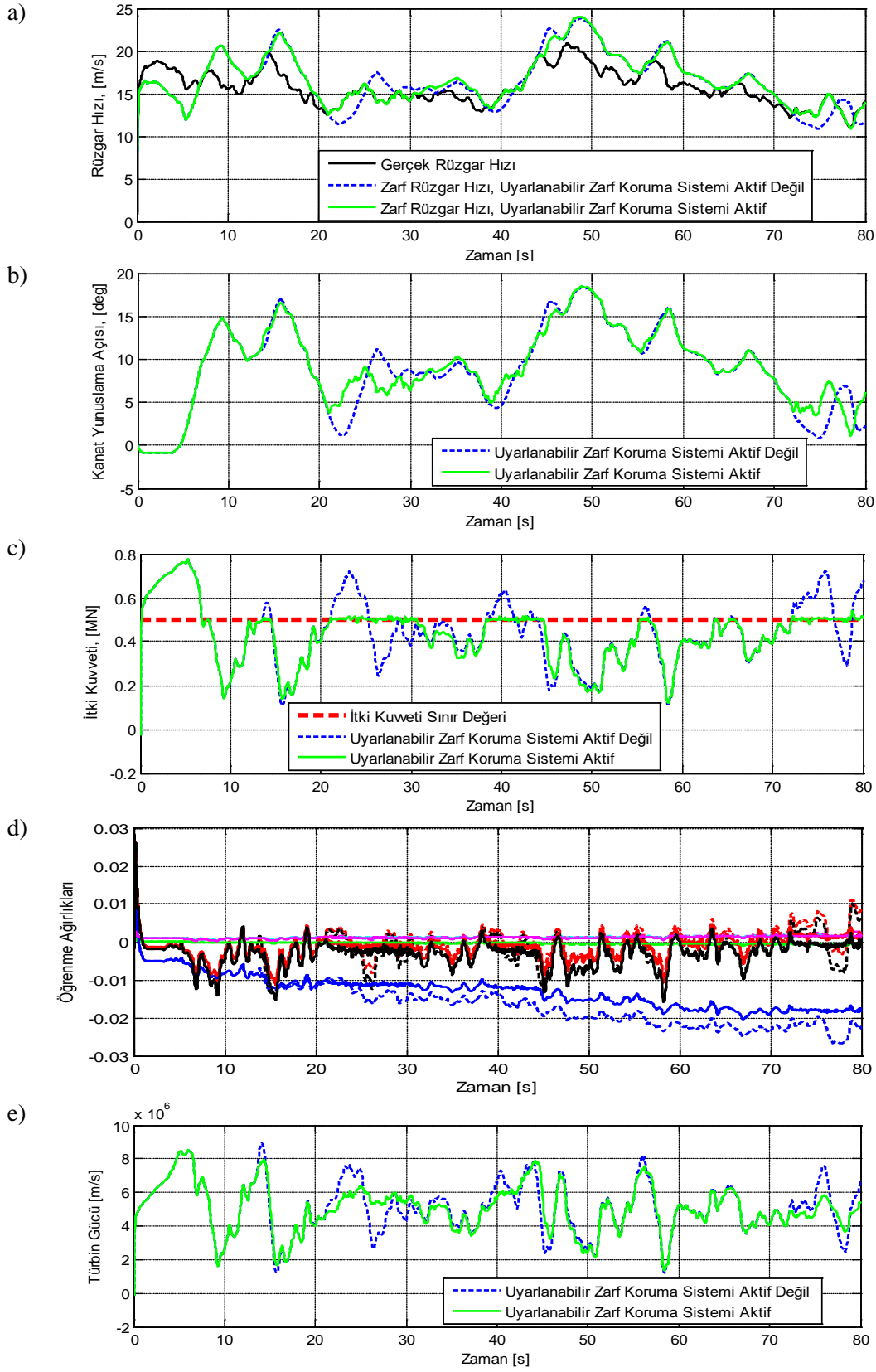


Şekil 4. Türbin A simülasyonları (Bölge 3), a) Rüzgar hızı, b) Kanat yunuslama açısı c) İtke kuvveti, d) Öğrenme ağırlıkları, e) Türbin gücü

Bu sınır değerini geçme durumu, gerçek rüzgarın zarf rüzgar hızından yüksek olduğu zaman dilimlerinde oluşmaktadır(Şekil 4-a). Kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün, türbininin gücünü regüle edebilmek için kanat yunuslama açısını nasıl değiştirdiği ise, Şekil 4-b'de görülmektedir. Buna bağlı olarak türbin gücündeki ani değişiklikler de Şekil 4-e'de verilmiştir. Zarf koruma sisteminin aktif edilmeden, hazır bir durumda bekleyip türbinin çalışmasını izlemesi ve buna göre de türbindeki değişikliği öğrendiği sinir ağı ağırlıklarındaki değişiklikler de Şekil 4-d'de görülmektedir. Yenilikçi zarf koruma sistemi simülasyonun 10. saniyesinde aktif edildiğinde, önceden rüzgarın ve türbinin çalışmasını takip eden yenilikçi uyarlanabilir zarf koruma sistemi, o anda türbin tehlikesiz çalışma durumuna geçtiği için sistem türbin kanatlarının yunuslama açısını değiştirmemiştir. Ancak, görüleceği üzere, örnek olarak simülasyonun, 15 ve 21. saniyeleri arasında oluşan aşırı itki kuvveti (Şekil 4-c), zarf koruma sistemi tarafından türbin kanat yunuslama açısının değiştirilmesi ile önlenmiştir (Şekil 4-b).

Aynı şekilde, simülasyonun diğer zamanlarında da oluşan aşırı itki kuvvetinin (Şekil 4-c) koruma sistemi tarafından türbin kanatlarına müdahale edilerek (Şekil 4-b) önlediği görülmektedir. Buna bağlı olarak da öğrenme ağırlıklarındaki değişimler Şekil 4-d'de verilmiştir. Dikkat edilirse, uyarlanabilir zarf koruma sistemi, türbinin çalışma noktasındaki değişikliklere uyarlanabilmek de ve türbinin tehlikeli çalışmasını önceden anlayarak türbini korumaktadır. Ayrıca, ilgili sistem yeri geldiğinde türbini korumanın yanında, türbini itki kuvveti de sınır değerinde bir süre daha tutarak, koruma esnasında türbinde oluşan güç azalmasına karşın, bir miktar da fazla güç üretmektedir(Şekil 4-e). Bu bir nevi kaybedilen güce karşın, güç üretmektir ki, bu da istenilen bir durumdur. Örneğin, simülasyonun 15 ile 21. saniyesi arasında türbin gücü azalırken, 21 ile 26. saniye arası türbinin ürettiği güç koruma sisteminin aktif olmadığı duruma göre bir miktar artmıştır. Burada, uyarlanabilir zarf koruma sisteminin türbini tehlike bittikten sonra zaman zaman bir müddet korumaya devam etmesi, ilgili sistemin yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışına müdahale ederek kapalı devre türbin sisteminin dinamiğinin değişmesine yol açtığından kaynaklanmaktadır. Görüleceği üzere, yenilikçi uyarlanabilir koruma sistemi aktif edildiğinde, türbinin itki değeri önceden belirlenen sınırlar içinde kalmakta (Şekil 4-c) ve türbin güvenle çalışmaktadır.

Şekil 5'te ise, ilgili uyarlanabilir zarf koruma sisteminin Türbin B üzerinde yapılan MS Bladed Model simülasyon testleri görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 5-a'da verilen ve yine 16 m/s ortalama değere sahip farklı normal türbülanslı gerçek bir rüzgar altında çalışan Türbin B sisteminin itki kuvveti, zaman zaman önceden belirlenen sınır değerini aşmaktadır(Şekil 5-c). Bir önceki simülasyonda da olduğu gibi, bu durum gerçek rüzgar hızının, zarf rüzgar hızını aştığı zaman aralıklarında meydana gelmektedir(Şekil 5-a). Türbin kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, türbinin kanatlarının açılarını değiştirerek(Şekil 5-b) türbin gücünü ayarlamaya çalışmaktadır(Şekil 5-e). Aktif olmayan zarf koruma sisteminin ağırlıkları ise, türbin ve rüzgardaki değişikliklerin takip edilmesi ile değişmekte (Şekil 5-d) türbin çalışma koşulu, başka bir deyişle çalışma noktasındaki değişimler sürekli olarak zarf koruma sistemi tarafından öğrenilmektedir. Bu sayede, zarf koruma sistemi aktif edildikten hemen sonra, koruma işlemine başlayabilmektedir. Bu simülasyonda da, uyarlanabilir zarf koruma sistemi, simülasyonun 10. saniyesinde aktif edildiğinden, sistem türbinin itki kuvveti değeri önceden belirlenen sınırı aşmasını önleyerek, türbini güvenli bir şekilde çalıştırmıştır(Şekil 5-c).



Zarf koruma sisteminin aktif ve aktif değil iken uyarlanabilir sinir ağı öğrenme ağırlıklarında meydana gelen değişiklikler, Şekil 5-d’de görülmektedir. Burada da, uyarlanabilir zarf koruma sistemi türbinin kanat yunuslama açısı kontrol sistemini çıkışını veya kanat yunuslama açısının referans değerini değiştirerek türbine müdahale ettiğinden kapalı devre türbin sisteminin dinamiği değişmiştir. Bu sayede de, zarf koruma sistemi türbin koruma işlemi bitmesine rağmen türbinin sınır itki değerinde bir müddet daha çalıştırarak, aktif olmadığı ve güç üretmediği zaman dilimlerinde dahi, türbinin bir miktar daha fazla güç üretmesini sağlamıştır(Şekil 5-e). Bu durum bir nevi istenilen bir durumdur. Çünkü genelde koruma yöntemleri güç azaltma metodu ile türbinleri korumaktadır. Ancak, buradaki (Bölge 3) zarf koruma sistemindeki sakınma işlemi, zaman zaman bir müddet daha devam ettiğinden korumasız türbinin az güç ürettiği çalışma anlarında, zarf koruma sistemi aktif olan türbin ekstra bir güç üretmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, RES’lerde sıklıkla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerini türbülanslı rüzgarlar altında koruyabilecek yenilikçi uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin teorisine, tasarımına ve MS Bladed Modeli ile uygulanmasına yer verilmiştir. İlgili sistem, iki farklı türbin sistemi üzerinde MS Bladed Modeli kullanılarak, hem türbinlerin çalışma noktasına uyarlanabilmesi hem de farklı türbinlere uyarlanabilmesi kabiliyeti simülasyonlarla gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, tasarlanan tek bir yenilikçi zarf koruma sisteminin farklı türbinlere ve onların değişen çalışma noktalarına uyarlanabildiği, aktif edildiğinde türbinin önceden belirlenen itki sınırları içerisinde çalıştığı ve bu sayede de türbinin üzerinde oluşan aşırı itki kuvvetini azalttığı görülmüştür. Ayrıca, ilgili sistem türbin gücünü azaltarak koruma işlemini gerçekleştirirken, Bölge 3’te bir taraftan da türbinin az güç ürettiği zaman aralıklarında, türbinden ekstra bir güç alınmasını sağladığı da gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmadaki sistem rüzgar türbin sektöründe, yenilikçi bir sistem olma özelliğini taşımakta olup, rüzgar elektrik santrallerinde kullanılması durumunda, türbinlerde oluşan aşırı yüklenmeleri önlediğinden, türbinlerin servis ömürlerinde bir artışı sağlayacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Stubkier, H. C. Pedersen, and J. M. Jonkman, “Analysis of load reduction possibilities using a hydraulic soft yaw system for a 5-MW turbine and its sensitivity to yaw-bearing friction,” *Eng. Struct.*, vol. 69, pp. 123–134, 2014.
- [2] H. Camblong, S. Nourdine, I. Vechiu, and G. Tapia, “Control of wind turbines for fatigue loads reduction and contribution to the grid primary frequency regulation,” *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 284–291, 2012.
- [3] E. A. Bossanyi, “Individual blade pitch control for load reduction,” *Wind Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 119–128, 2003.
- [4] V. Petrovic, M. Baotic, and N. Peric, “Reduction of wind turbine tower oscillation based on individual pitch control,” in *20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, 2012, pp. 1499–1505.
- [5] A. Cetrini, F. Cianetti, M. L. Corradini, G. Ippoliti, and G. Orlando, “On-line fatigue alleviation for wind turbines by a robust control approach,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 109, no. January, pp. 384–394, 2019.

- [6] M. Jelavic, V. Petrovic, M. Barisic, and I. Ivanovic, "Wind turbine control beyond the cut-out wind speed," in *European Wind Energy Conference and Exhibition*, 2013.
- [7] V. Petrovic and C. L. Bottasso, "Wind Turbine Envelope Riding," in *AIAA Scitech, 33rd Wind Energy Symposium*, 2015, no. 5-9 January, pp. 1–8.
- [8] V. Petrović and C. L. Bottasso, "Wind turbine envelope protection control over the full wind speed range," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 836–848, 2017.
- [9] B. Xu *et al.*, "A Pitch Angle Controller Based on Novel Fuzzy-PI Control for Wind Turbine Load Reduction," vol. November, no. 6086, 2020.
- [10] B. Fischer and M. Shan, "A Survey on Control Methods for the Mitigation of Tower Loads," 2013.
- [11] B. C. L. Petrovic, V., "Wind turbine optimal control during storms," *J. Physics, Conf. Ser.*, vol. 524, no. 1, 2014.
- [12] I. Yavrucuk, S. Unnikrishnan, and J. V. R. Prasad, "Envelope Protection for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles," *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 32, no. 1, pp. 248–261, 2009.
- [13] I. Yavrucuk and J. V. R. Prasad, "Online Dynamic Trim and Control Limit Estimation," *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 35, no. 5, pp. 1647–1656, 2012.
- [14] S. Unnikrishnan, G. J. Jeram, and J. V. R. Prasad, "Tactile Limit Avoidance Cueing Using Adaptive Dynamic Trim," in *Proceedings of the American Helicopter Society 60th Annual Forum*.
- [15] M. Sahin and İ. Yavrucuk, "Adaptive Envelope Protection Control for the below and above Rated Regions of Wind Turbines," *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Energy Power Eng.*, vol. 14, no. 10, pp. 275–283, 2020.
- [16] M. Sahin, "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, METU, Ankara," Middle East Technical University, 2018.
- [17] M. Sahin and I. Yavrucuk, "Performance Comparison of Two Turbine Blade Pitch Controller Design Methods Based on Equilibrium and Frozen Wake Assumptions," in *Ankara International Aerospace Conference, AIAC 2019*, 2019, no. September, pp. 1–16.
- [18] Sahin, M. and Yavrucuk, İ., "Rüzgâr Türbini Kanat Yunuslama Açısı Kontrolcüsü Tasarımı ve Performans Analizi," in *5. İzmir Rüzgâr Sempozyum*, 2019.
- [19] K. E. Johnson, L. Y. Pao, M. J. Balas, and L. J. . Fingersh, "Control of Variable Speed Wind Turbines-Standard and Adaptive Techniques for Maximizing Energy Capture," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 26, no. 3, pp. 70–81, 2006.
- [20] A. Merabet, J. Thongam, and J. Gu, "Torque and Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines in All Operating Regimes," in *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 1–5.
- [21] K. A. Stol and L. J. . Fingersh, "Wind Turbine Field Testing of State-Space Control Designs," *Technical Report NREL/SR-500-35061*, no. September, Golden, Colorado, 2004.
- [22] M. Sahin and İ. Yavrucuk, "Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Kısmi ve Tam Yük Bölgeleri için Kontrolcü Tasarımı," in *YEKSEM 2017*, 2017, p. 12.