



Yenilikçi Uyarlanabilir Bir Zarf Koruma Sisteminin Farklı Rüzgar Türbinleri Üzerindeki Etkinliğinin İncelenmesi

Mustafa Şahin^{*1}, İlkyay Yavrucuk²

ÖZ

Bu çalışmada, rüzgar elektrik santrallerinde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerini aşırı yüklenmelerden korumak için geliştirilen yenilikçi uyarlanabilir bir zarf koruma sistemi kısaca açıklanmıştır. Türbinlere ve türbin çalışmasındaki değişikliklere uyarlanabilen yenilikçi sistem, rüzgar ve türbine ait durum değişkenlerini gerçek zamanlı olarak izlemektedir. Bu sayede, türbinin tehlikeli çalışması durumunu önceden sezmekte ve sadece gerektiğinde türbini korumak için türbin kanat yunuslama açısı kontrol sistemine müdahale etmektedir. Sistem tasarımı, rüzgar türbinlerini aşırı itki kuvvetinden koruyacak şekilde gerçekleştirilmiş olup bu çalışmada farklı kanat sayıları ve rotor çaplarındaki Türbin A, Türbin B ve Türbin C olarak adlandırılan rüzgar türbinleri üzerindeki etkinliği simülasyonlar ile incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, yeni zarf koruma sisteminin değişik rüzgar türbinlerine uyarlanabildiği ve türbin kanatlarının yunuslama açılarını topluca değiştirerek türbinleri önceden belirlenen itki kuvveti sınır değerleri içinde çalıştırarak koruyabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Uyarlanabilir zarf koruma sistemi, farklı kanat sayılı ve rotor çaplı rüzgar türbinleri, simülasyon testleri

Investigation of the Efficacy of a New Envelope Protection System on Different Wind Turbines

ABSTRACT

This paper briefly defines an adaptive envelope protection system, which is developed to protect the commonly used horizontal axis wind turbines in wind farms from excessive loads. The system, which can adapt to turbines and their operations, follows up wind and turbine variables. Thus, in advance, it detects the cases of excessive loads, and only when required, it interacts with the turbine blade pitch control system for turbine protection. The system is designed such that it protects turbines from high thrust forces. Here, the efficacy of the system is investigated through simulations on different horizontal axis turbines, referred to as Turbine A, Turbine B, and Turbine C with different number of blades and rotor diameters. Simulation results demonstrate that the protection system is highly effective in adaptation to various turbines and through changing the blade pitch angles, collectively, it protects them by operating within pre-defined thrust limits.

Keywords: Adaptive envelope protection system, wind turbines with different number of blades and rotor diameters, simulation tests

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 26.08.2022

Kabul/Accepted : 30.12.2022

¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM), Ankara musahin@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3670-5796

² Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara yavrucuk@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5677-756X



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

To operate wind turbines safely is quite important for continuous electricity generation. Excessive loads are not desired on wind turbines. Thus, the literature has many studies dealing with the reduction of turbine loads in terms of both fatigue and ultimate loads (Bossanyi, 2003; Petrovic, Baotic and Peric, 2012; Camb-long, Nourdine, Vecchiu and Tapia, 2012; Jelavic, Petrovic, Barisic and Ivanovic, 2013; Stubkier, Pedersen and Jonkman, 2014; Petrovic and Bottasso, 2015, 2017; Cetrini, Cianetti, Corradini, Ippoliti and Orlando, 2019; Xu, Yuan, Liu, Jiang, Gao, Shen and Cai, 2020). More recently, load reduction studies on smart rotors are also increasing (Bernhammer, Van Kuik and De Breuker, 2016; Oltmann, Sobotta and Hoffmann, 2017, Zhang, Yang and Xu, 2017; Zhang, Li, Tong and Xu, 2020; Gupta, Rotea, Chetan, Sakib and Griffith, 2021). In this study, the efficacy of an adaptive Envelope Protection System (EPS) algorithm in Ref (Şahin and Yavrucuk, 2020, 2021a, 2022) is further investigated through simulations on various Horizontal Axis Wind Turbines with different number of blades and rotor diameters. The adaptive EPS algorithm is developed for reducing turbine ultimate loads and tested under the change of operating points and blade icing in Ref (Şahin and Yavrucuk, 2020, 2021a, 2022) Here, the same algorithm is tested on three different turbines using the MS (Mustafa Sahin) Bladed Model (Şahin, 2018, 2021b; Şahin and Yavrucuk, 2017a). These turbines are a 3-bladed Turbin A with a 63-meter rotor radius, a 2-bladed Turbine B with a 63-meter rotor radius, and a 3-bladed Turbine C with a 54.2-meter rotor radius. The 3-bladed Turbine A corresponds to the NREL 5 MW turbine in the literature, while the 2-bladed Turbine B is obtained from the NREL 5 MW turbine by reducing the number of blades from 3 to 2. The 3-bladed Turbine C, on the other hand, is achieved by reducing the blade length of the NREL 5 MW turbine by 14.3 % from the tip.

Objectives

The goal of this paper is to examine the efficacy of a new adaptive EPS algorithm in Ref (Şahin and Yavrucuk, 2020, 2021a, 2022) for adaptation to various horizontal axis wind turbines and its protection ability. The algorithm is designed such that it reduces turbines' ultimate loads, i.e., excessive thrust forces, and operates them within a pre-defined thrust force limit. The protection action is carried out by varying the blade pitch angles, collectively depending on an extra blade pitch reference generated in real-time by the algorithm. The extra pitch reference is produced through monitoring the states of wind and wind turbine when the adaptive system is active and the turbine is about to operate with high thrust forces at any turbine operating region.

Methods

An EPS algorithm (Şahin and Yavrucuk, 2020, 2021a, 2022), which is inspired by an aircraft EPS algorithm (Unnikrishnan, Jeram and Prasad, 2004; Yavrucuk, Prasad and Unnikrishnan, 2009; Yavrucuk and Prasad, 2012), is designed with unique modifications and assumptions to eliminate excessive thrust forces during turbine operation. In order to achieve the target, the MS (Mustafa Sahin) Bladed Wind Turbine Simulation Model (Şahin, 2018, 2021b; Şahin and Yavrucuk, 2017a) is utilized for design, implementation, and simulation tests. The algorithm comprises a neural network that can monitor freestream wind and wind turbine conditions, i.e., states, accordingly, it adapts itself to operational conditions by automatically adjusting its neural network learning weights. Contrary to thrust clipping and peak shaving methods in Ref (Fischer and Shan, 2013; Petrovic and Bottasso, 2017), the protection is realized between cut-in and cut-out wind speeds. Also, compared to the protection algorithm in Ref (Petrovic and Bottasso, 2014, 2015, 2017) the EPS algorithm is an adaptive algorithm. Furthermore, it is simple in implementation and is straightforward in avoidance procedure. Applying an extra blade pitch reference to the blade pitch controller output is just enough to collectively change the blade pitch angles in order to eliminate high thrust forces. All the design and implementations are realized using the MS Bladed Model in MATLAB and Simulink environments. Here, the EPS algorithm in Ref (Şahin and Yavrucuk, 2020, 2021a, 2022) is tested for three different turbines referred to as Turbine A, Turbine B and lastly Turbine C. Turbine A is the NREL 5 MW turbine with 3 blades, Turbine B is a turbine with 2 blades obtained from the NREL 5 MW turbine by eliminating one of



its blades, whereas Turbine C is a turbine with 3 blades similarly obtained from the NREL 5 MW turbine by the reduction of the blade lengths. The simulation tests are presented for Region 3, or above rated region of all the wind turbines.

Results

The efficacy of the adaptive EPS algorithm is tested by employing simulation tests for Region 3 operations of three different horizontal axis turbines, i.e., Turbine A, Turbine B, and Turbine C, which have different numbers of blades and rotor diameters. Simulations of the new adaptive EPS algorithm are realized by the MS Bladed Model. Simulation results show that the adaptive EPS algorithm is capable of adapting to the aforementioned turbines, and changes in their operating point in Region 3. It effectively decreases/limits the turbines' high thrust forces when activated and the turbines are about to operate with high forces. Thus, all the above turbines are kept within pre-defined safe thrust limits, which are chosen 0.55 MN for Turbine A and Turbine B, and 0.50 MN for Turbine C. The algorithm reduces the excessive thrust forces and sometimes continues to ride turbines for some time at the pre-defined thrust limit value. This allows turbines to produce extra power in Region 3 against the power loss during protection.

1. GİRİŞ

Kesintisiz elektrik enerjisinin üretimi için rüzgar türbinlerinin güvenli olarak çalışması gerekmektedir. Rüzgar Elektrik Santrallerindeki (RES) herhangi bir türbinin zarar görmesi durumunda, ilgili türbinden herhangi bir elektrik enerjisi alınamaz. Ayrıca, türbini tekrardan devreye almak için yüksek masrafların ortaya çıkma ihtimalinin yanı sıra türbinin onarımı için uzun zaman gerekebilir. Bu tür istenmeyen durumları engellemek ve türbini korumak için literatürde çok miktarda türbin koruma algoritmaları üzerine bilimsel çalışmalar bulunmaktadır (Bossanyi 2003; Petrovic, Baotic ve Peric, 2012; Camblong, Nourdine, Vechiu ve Tapia, 2012; Jelavic, Petrovic, Barisic ve Ivanovic, 2013; Stubkier, Pedersen ve Jonkman 2014; Petrovic ve Bottasso 2015, 2017; Cetrini, Cianetti, Corradini, Ippoliti ve Orlando, 2019; Xu, Yuan, Liu, Jiang, Gao, Shen ve Cai, 2020). Son yıllarda, akıllı türbin rotorları için de koruma/yük azaltma yöntemleri üzerine bilimsel araştırmalar artmıştır (Bernhammer, Van Kuik ve De Breuker, 2016; Oltmann, Sobotta ve Hoffmann, 2017; Zhang, Yang, ve Xu, 2017; Zhang, Li, Tong ve Xu, 2020; Gupta, Rotea, Chetan, Sakib ve Griffith, 2021). Örneğin, literatürde RES'lerde en fazla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerini (Şekil 1) koruyabilmek için itki kesme ve/veya tepe traşlama yöntemi olarak adlandırılan koruma algoritmaları mevcuttur (Fischer ve Shan, 2013; Petrovic ve Bottasso, 2017). Bu yöntem veya yöntemler, çevrim dışı olarak çalışmakta olup türbinlerin anlık çalışma şartlarını dikkate almamaktadır. Başka bir deyişle, bu yöntem(ler) önceden belirlenen bir programa göre çalışmaktadır. Ayrıca, bu koruma sistemleri rüzgar türbinlerini sadece anma rüzgar hızı etrafında ortaya çıkan yüksek itki kuvvetlerine karşı korumaktadır.

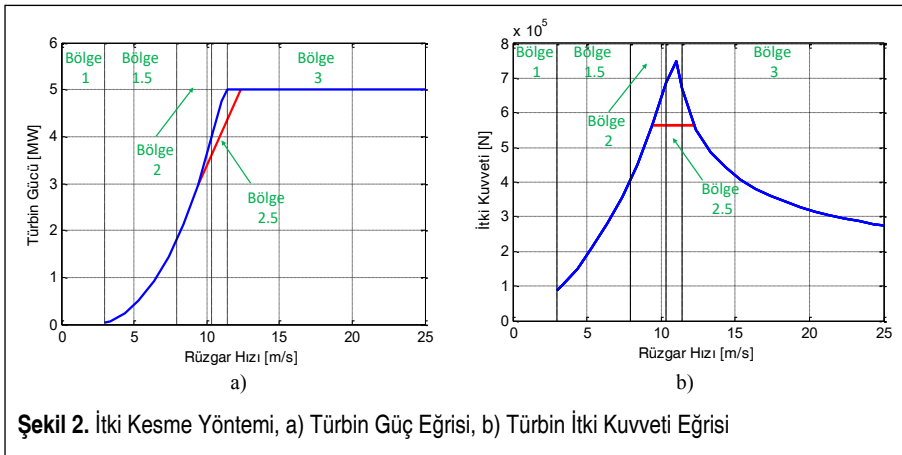
Gerçekte, rüzgar türbinleri anma rüzgar hızı etrafındaki türbin çalışmalarının yanı sıra açma rüzgar hızı ile kesme rüzgar hızı arasındaki bütün rüzgar hızlarında, türbülanslı rüzgarın etkisi ile yüksek itki kuvvetine maruz kalarak tehlikeli çalışma durumlarına düşmektedir. Bu durumlar, türbinlerin tasarım ömürlerini azalttığı gibi kanatlarının kırılması, kulelerinin zarar görmesi vb. önemli türbin kazalarına da neden olabilmektedir. Şekil 2'de itki kesme/tepe traşlama yönteminin ana mantığı kontrol edilen bir rüzgar türbinine ait güç



Şekil 1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini (Al-Ahmar, Benbouzid, Amirat & Ben Elghali, 2008)

ve itki kuvveti eğrileri üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2-b'den de görüleceği üzere, itki kesme yönteminde rüzgar türbini sadece anma rüzgar hızı etrafında ortaya çıkan yüksek itki kuvvetinden korunmaktadır. Koruma işlemi, türbin kanatlarının yunuslama açılarının anma rüzgar hızına yaklaşıldığında, toplu olarak artırılması ile gerçekleştirilmiştir. Koruma esnasında Şekil 2-a'dan görüleceği üzere, türbinin üretmiş olduğu güçte bir miktar kayıp oluşmaktadır. Bu koruma yönteminin dışında, Petrovic ve Bottasso (2014, 2015, 2017) farklı bir türbin koruma sistemi algoritması önermiştir. Önerdikleri koruma sistemi, optimizasyon tabanlı olup uyarlanabilir/adaptif bir algoritma değildir. Üstelik, ilgili algoritmanın tasarımı için rüzgar türbinlerindeki mevcut temel kontrolcülerin algoritmalarının da neler olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Temel türbin kontrolcülerinin algoritmaları türbinden türbine, üreticiden üreticiye değişebilmesinden ötürü optimizasyon tabanlı türbin koruma sistemi algoritmasının değişik türbinlere uygulanmasında zorlukların çıkabileceği açıktır. Ayrıca, ilgili koruma sisteminin tasarımında türbinleri koruyabilmek için jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı kontrolcülerine müdahale gerektiğinden, türbinlerin kontrol sistemleri daha da karmaşık bir hale dönüşmesi muhtemeldir.

Bu çalışmada, hava araçlarında bulunan uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin (Unnikrishnan, Jeram ve Prasad, 2004; Yavrucuk, Prasad ve Unnikrishan, 2009; Yavrucuk ve Prasad, 2012) teknolojisinden esinlenilerek geliştirilen ve türbinleri açma ve kesme rüzgar hızları arasındaki çalışmaları esnasında etkili olarak koruyabilen yenilikçi uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin çeşitli yatay eksenli rüzgar türbinleri üzerindeki etkinliği simülasyonlarla incelenmiştir. Yenilikçi zarf koruma sistemi, esen rüzgar ve etkisi sonucunda zamanla değişen türbin parametrelerini içinde barındırdığı uyarlanabilir bir sinir ağı aracılığı ile sürekli olarak izlemektedir. Bu sayede, ilgili sistem rüzgar türbininde meydana gelen çalışma değişikliklerini gerçek zamanlı olarak öğrenmekte ve sadece gerektiğinde türbine koruma amaçlı müdahale ederek, türbini güvenli bir





şekilde çalıştırmaktadır. Uyarlanabilir zarf koruma sisteminde, rüzgar türbinini tehlikelerden sakınma işlemi türbin kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışı, yani kanat yunuslama açısının referans değerinin ayarlanması ile sağlanmıştır. Bu sayede, türbin kanatlarının yunuslama açıları, türbinin anlık çalışma koşullarına bağlı olarak toplu bir şekilde değiştirilmek suretiyle türbin koruması gerçekleştirilmektedir. Burada, ilgili sistem kısaca açıklanmış olup sistem ile ilgili daha fazla bilgi Şahin (2018) ve Şahin ve Yavrucuk (2020, 2021a, 2022) kaynaklarından elde edilebilir. Sistem, daha önceden yatay eksenli tek bir türbinin değişen çalışma noktalarına ve kış aylarında kanatlarında oluşan buzlanmaya uyarlanabilirliği ve koruma etkinliği, Şahin ve Yavrucuk (2020, 2021a, 2022) tarafından irdelenmiştir. Bu çalışmada ise ilgili yenilikçi zarf koruma sisteminin tasarımında herhangi bir değişiklik gerçekleştirilmeden, farklı yatay eksenli türbinlere ve bunların çalışma noktalarındaki değişikliklere uyarlanabilmesi ve bu türbinler üzerindeki koruma etkinliği MS Bladed Model simülasyonları ile incelenmiştir. Bu türbinler, farklı kanat sayılarına ve uzunluklarına sahip yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Çünkü günümüzdeki RES'lerde değişik güçlere sahip farklı kanat uzunluklu çoğunlukla üç, nadiren iki kanatlı türbinler kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın devamı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde, MS Bladed Modeli kısaca tanıtılmış ve özellikleri belirtilmiştir. Ek olarak, yenilikçi zarf koruma sisteminin çalışma prensibi, teorisi ve uygulaması da kısaca açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, ilgili zarf koruma sisteminin farklı kanat sayısı ve rotor çaplarındaki türbinler üzerindeki simülasyon testlerine yer verilmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise zarf koruma sistemi hakkındaki görüş ve fikirler verilerek çalışma sonlandırılmıştır.

2. UYARLANABİLİR ZARF KORUMA SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ, TEORİSİ VE UYGULAMASI

Bu çalışmada geçen uyarlanabilir zarf koruma sistemi, insanlı ve insansız hava araçlarında kullanılan uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin teknolojisinden esinlenerek çok önemli değişiklikler ve varsayımlarla MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli (Şahin, 2018, 2021b; Şahin ve Yavrucuk, 2017a) kullanılarak rüzgar türbinleri için geliştirilmiş bir koruma sistemidir. MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli literatürde kısaca MS Bladed Modeli olarak da bilinmekte ve bu çalışmanın birinci yazarı tarafından yatay eksenli rüzgar türbinlerinin simülasyon işlemlerini gerçekleştirmek için geliştirilen bir modeldir. MS Bladed Modeli'nin ana yapısı pal elemanı momentum teorisi üzerine kurulmuştur. Ayrıca, MS Bladed Modeli çeşitli aerodinamik düzeltme formüllerine sahip olup değişik yapısal özelliklere sahip yatay eksenli rüzgar türbinlerini çeşitli çalışma koşullarında simülasyonlarını gerçekleştirebilmektedir. MS Bladed Modeli'nin mevcut versiyonunda türbin sistemi olarak, Amerika'nın Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı olan NREL'e ait 5 MW'lık üç kanatlı yatay eksenli türbin sistemi kullanılmaktadır (Jonkman, Butterfield, Musial ve Scott, 2009). İlgili



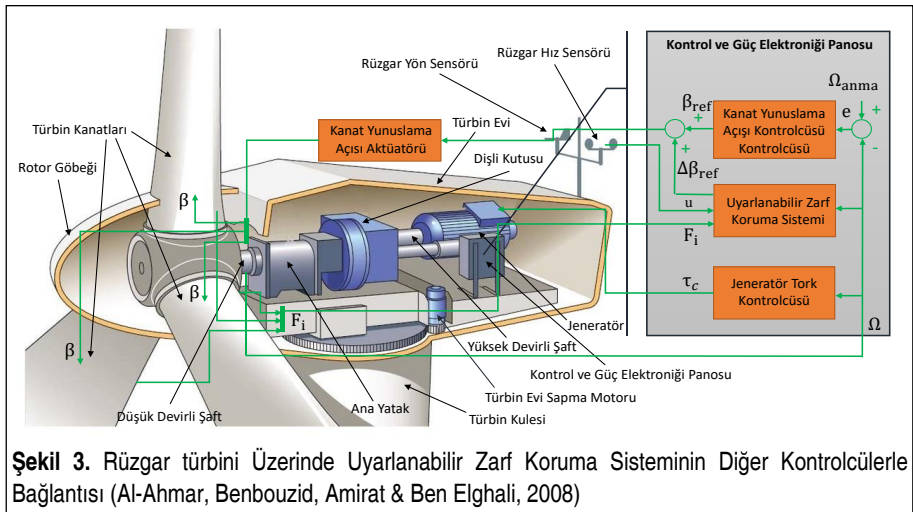
türbinin kontrol edilebilmesi için gerekli jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı gibi türbinin temel kontrolcülerinin tasarımları da MS Bladed Modeli yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Şahin, 2018; Şahin ve Yavrucuk, 2019a, 2019b). Geliştirilen yenilikçi zarf koruma sistemi de kontrol edilen NREL 5 MW'lık türbin sistemine eklenmiştir. Rüzgar türbin sistemlerini aşırı yüklenmelerden koruyan yenilikçi zarf koruma sisteminin çalışması kısaca şu şekilde açıklanabilir.

Öncelikle, uyarlanabilir zarf koruma sistemi Petrovic ve Bottasso (2014, 2015, 2017) tarafından önerilen optimizasyon tabanlı koruma sisteminin tasarımına kıyasla, rüzgar türbinlerinin temel kontrolcülerinin algoritmalarının bilinmesini gerektirmemektedir. Zarf koruma sistemi, türbin sensörlerinden alınan verilere göre, sadece gerektiğinde türbini korumak için türbine müdahalede bulunmaktadır. İlgili koruma sistemi, rüzgar ve türbinlere ait durum değişkenlerini uyarlanabilir/adaptif bir sinir ağı ile gerçek zamanlı olarak sürekli takip etmektedir. Böylece, koruma sistemi türbin çalışma koşullunu gerçek zamanlı olarak öğrenmekte ve istenilen bir türbin parametresinin değeri, öncesinde karar verilen kritik tasarım değerine yaklaşıldığında türbinin kanatlarına topluca müdahale etmek suretiyle türbini tehlikelerden sakınmaktadır. Sistem uyarlanabilir özelliğinden dolayı, farklı rüzgar türbinlerine de tasarımında herhangi bir değişikliğe gidilmeden uygulanabilir. Bu çalışmanın asıl amacı da, yenilikçi zarf koruma sisteminin bu özelliğini simülasyon testleri ile ortaya çıkarmaktır. Türbin çalışırken arzu edilen türbin parametresinin değeri, kritik değerinin altında ise türbin güvenli bir şekilde çalıştığı anlamındadır. Bu durumda, rüzgar türbini RES'lerdeki diğer sıradan rüzgar türbinleri gibi çalışmasına devam ederek elektrik üretimini gerçekleştirir. Yenilikçi zarf koruma sistemi sadece türbinin güvensiz çalışma durumuna düşecek olduğunda, başka bir deyişle önemli görülen bir türbin parametresinin önceden belirlenen kritik değerini aşacakken koruma işlemini yapmaktadır. Bu işlemi de kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışı olan yunuslama açısı referans değerinin ayarlanması ile gerçekleştirmektedir. Koruma işlemi esnasında bir miktar güç kaybı meydana gelmektedir, fakat türbinde oluşabilecek zararları engellemek çok daha önemli bir husustur. Bu çalışmada, türbin için kritik olarak alınan parametre türbinin itki kuvvetidir. Çünkü türbin itki kuvveti, türbin tasarımında önemli bir parametredir ve türbin çalışması esnasında belirli bir kritik değeri geçmemesi istenir. Burada, türbinin itki kuvvetini istenilen kritik değerinin altında tutulabilmesi için kanat yunuslama açısı referans değeri artırılarak kanatların yunuslama açılarının değeri topluca artırılmıştır. Bu sayede türbinin itki kuvvetinin değeri düşürülerek, değerinin önceden belirlenen kritik değerinin altında kalması sağlanmıştır. Nihayetinde de, türbin çalışması esnasında aşırı itki kuvvetinden ötürü oluşabilecek türbinin kanatların kırılması, kulesinin zarar görmesi vb. olumsuz olayların oluşumu engellenmiştir.

Şekil 3'de temel türbin kontrolcülerini ile yenilikçi uyarlanabilir zarf koruma sisteminin bağlantısı bir rüzgar türbini görseli üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, görselde bulunan rüzgar türbinine ait parçaların isimlerine de yer verilmiştir. Burada, türbin

kanatlarının görevi rüzgarın barındırdığı kinetik enerjisi mekanik enerjisine dönüştürmektir. Bu mekanik enerjinin de bir dişli kutusu üzerinden elektrik jeneratörüne aktararak elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanmıştır. Jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı kontrolcüleridir türbinin temel kontrolcüleridir ve türbinin ana çalışmasından sorumludurlar. Temel türbin kontrolcülerinin çalışması için çoğunlukla jeneratör şaftının devir bilgisi kullanılmaktadır, ancak nadiren de olsa rotor devir bilgisi kullanılabilir. MS Bladed Model yardımı ile temel türbin kontrolcülerinin tasarımında rotor devir bilgisi kullanılmıştır. Bu bilgiye göre de kontrolcüler arası geçiş dinamik olarak yapılmaktadır. Açma ve anma rüzgar hızları arasındaki rüzgarlarda, türbini aerodinamik olarak en etkili bir şekilde çalıştırmak için jeneratör tork kontrolcüsü kullanılırken, anma ve kesme rüzgar hızları arasındaki rüzgarlarda türbinden anma gücünü alabilmek için de kanat yunuslama açısı kontrolcüsü kullanılır (Stol ve Fingersh, 2004; Johnson, Pao, Balas ve Fingersh, 2006; Merabet, Thongam ve Gu, 2011; Şahin ve Yavrucuk, 2017b, 2019a, 2019b). Yenilikçi zarf koruma sistemi de, açma ve kesme rüzgar hızları arasındaki rüzgarlarda türbin çalışırken rotor hızı, itki kuvveti ve türbine gelen gerçek rüzgarın hız bilgilerini sürekli olarak izlenmekte ve türbin çalışma şartlarını gerçek zamanlı olarak öğrenmektedir. Bunun neticesinde, sınırlamak istediğimiz itki kuvveti değerini öncesinden tahmin edebilmekte ve ekstra bir kanat yunuslama açısı değeri de sistemce çıkış sinyali olarak üretilmektedir. Uygulamada bu çıkış sinyalinin değeri de kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkış değerinin ayarlanmasında kullanılmıştır (Şekil 3). İtki kuvveti değeri ise MS Bladed Modelinden alınmıştır, ancak gerçek rüzgar türbininde bu değer türbin kanatlarının kök kısmına yerleştirilen yük ölçme sensörlerinden alınabilir.

İlgili zarf koruma sisteminde, sınırlanması arzulanan türbin parametresi, önce yakla-

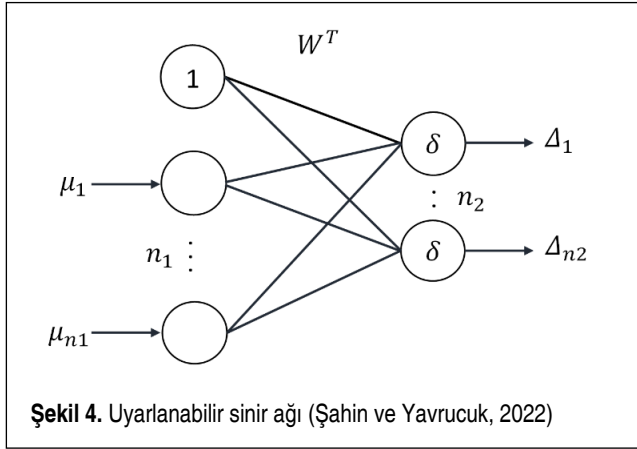


Şekil 3. Rüzgar türbini Üzerinde Uyarlanabilir Zarf Koruma Sisteminin Diğer Kontrolcülerle Bağlantısı (Al-Ahmar, Benbouzid, Amirat & Ben Elghali, 2008)

sık olarak doğrusal bir denklem ile ifade edilir. Bu çalışmada, bu parametre türbinin itki kuvvetidir. O nedenle, bu çalışmadaki formüllerin tamamı itki kuvveti göz önünde bulundurularak yazılacaktır. Örneğin, denklem (1)'de itki kuvveti için F_i terimi kullanılmıştır. Bu denklemde a ve b değerleri yaklaşık olarak seçilirken, u sistemin girişini yani rüzgar hızını temsil etmekte olup \hat{u} ise yaklaşık değer anlamındadır. Burada, yaklaşık denklemin kontrol edilen rüzgar türbininin itki kuvvetini, türbin çalışmasının herhangi bir anında tahmin etmesi arzulanır, fakat yaklaşık sistem (1) doğrusal olmayan türbin sisteminin itki kuvvetini tüm çalışma noktalarında tahmin edemez.

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

Bu nedenle, yaklaşık sistem ile gerçek türbin sistemin arasındaki hatayı yok etmek için Şekil 4'de görülen uyarlanabilir bir sinir ağı ile yaklaşık sistem/model genişletilmiştir. Bu sinir ağında, sinir ağının giriş vektörü δ (μ) ile, giriş ve çıkış sayıları sırasıyla n_1 ve n_2 ile, çıkışı ise Δ ile temsil edilmiştir.



Ayrıca, bir de gözlemleyici kullanılmıştır. Böylece, doğrusal yaklaşık modelin türbin sisteminin itki kuvvetini doğru olarak tahmin etmesi sağlanmıştır. İtki kuvveti için elde ettiğimiz ve genişletilmiş model olarak ifade ettiğimiz model Denklem (2)'de verilmiştir (Yavrucuk ve Prasad, 2012). Bu model, kontrol edilen rüzgar türbininin çalışması sırasında türbinin itki kuvveti değerini gerçek zamanlı olarak tahmin etmektedir.

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

Görüleceği üzere, genişletilmiş türbin modeli olan Denklem (2)'de uyarlanabilir sinir ağının çıkışı olan Δ ve son kısmında da yukarıda bahsedilen gözlemleyici görülmek-

tedir. Rüzgar türbini esen rüzgarın etkisi ile çalışırken, koruma sistemi itki kuvvetinin gerçek değerini doğru olarak tahmin etmekte ve buna göre de 3 numaralı denklem vasıtasıyla rüzgar türbinini sınır itki kuvveti değerinde çalıştıracak sanal bir rüzgar hızını hesaplamaktadır.

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

Bu sanal rüzgar hızı, zarf rüzgar hızı, u_{zarf} olarak isimlendirilmiştir. F_{i_s} ise itki kuvveti için tanımlanan ve türbinin güvenli çalışması için gerekli bir sınır/kritik değeridir. Gerçek itki kuvveti değeri, F_i ile yaklaşık itki kuvveti değeri, \hat{F}_i arasındaki hata, e ile gösterilmiştir. Ω ise türbinin rotor hızına karşılık gelmektedir. Aynı zamanda, zarf koruma sistemi anlık olarak hesapladığı zarf rüzgar hızı, u_{zarf} ile türbinden geçen gerçek rüzgar hızını, u sürekli olarak karşılaştırmaktadır. Rüzgar türbini üzerinden esen gerçek rüzgar hızı, zarf rüzgar hızının altında ise türbinin güvenli olarak çalıştığı anlamında olup türbin açısından herhangi bir tehlikeli durum olmadığı, türbinin itki kuvvetinin istenilen sınırlar içerisinde kaldığı anlamındadır. Gerçek rüzgar hız değeri, zarf rüzgar hız değerini geçmesi durumunda türbinin tehlikeye gireceğini, başka bir deyişle türbinin itki kuvvetinin belirlenen sınır değerini aştığı ve sonucunda da türbin yapısında zararların oluşabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, türbinin tehlikeden sakınılması gerekmektedir. Sakınma işleminde kullanılan ekstra kanat yunuslama açısı referans değeri, $\Delta\beta_{ref}$, denklem (4) vasıtası ile zarf ve gerçek rüzgar hızları arasındaki fark olan Δu 'nun bir tasarım parametresi olan ε ile çarpımı sonucu elde edilmiştir. Bu değer de, türbinin kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışının, β_{ref} (Şekil 3), ayarlamasında kullanılması ile kanat yunuslama açısının referans değeri değiştirilmektedir. Bu işlemin sonucunda da, kanat yunuslama açıları toplu olarak artırılmaktadır. Böylece, türbin rotorunun aerodinamiği değiştirilerek itki kuvvetinin önceden belirlenen sınır değeri içinde kalması sağlanarak türbin korunmaktadır.

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

Yukarıda adı geçen uyarlanabilir sinir ağı çıkışı, Δ denklem (5) ile belirlenmiştir (Yavrucuk ve Prasad, 2012).

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

Yukarıdaki denklemde, W sinir ağının öğrenme ağırlıklarına, $\delta(\mu)$ ise bu ağın giriş vektörüne karşılık gelmektedir. Öğrenme ağırlıklarının güncelleme kuralı ise denklem 6'da verilmiştir (Yavrucuk ve Prasad, 2012).

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

Burada, P aşağıdaki Lyapunov denkleminin çözümüne karşılık gelmektedir.



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

Denklem (8)'de verilen kronocker çarpanı ile de ilgili sistemin giriş vektörü bulunmuştur.

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

Zarf koruma sisteminde türbine ait durum değişkenleri hızlı ve yavaş olarak ikiye bölünmüştür. O halde, sınırlanması arzulanan itki kuvveti de bu türbin değişkenlerinin bir fonksiyonudur. MS Bladed Modeli ile itki kuvvetini etkileyen hızlı ve yavaş değişkenlerin hangi türbin parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Bu işlem gerçekleştirilirken, kontrol edilen 5 MW'lık rüzgar türbinine birim basamak olarak artan rüzgar hızı uygulanmıştır. Uygulanan bu rüzgar hızı sonucunda, kontrol edilen türbine ait kanat yunuslama açısındaki değişim, rotor devrine nazaran daha çok hızlı olduğu ve itki kuvveti üzerinde de etkinliğinin bir hayli yüksek olduğu görülmüştür. İncelemeler sonucunda, kanat yunuslama açısının hızlı bir türbin değişkeni olduğu, rotor devrinin ise yavaş değişken olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, itki kuvvetinin dinamiği, \dot{F}_i denklem (9)'daki gibi yazılmıştır.

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

Denklem 1'deki a parametresi -0.24, b parametresi ise 0.0175 olarak alınmıştır. Gözlemleyicinin kazancı olan K , 50 olarak seçilmiştir. Sinir ağının öğrenme hızını ifade eden Γ ise 25 olarak alınmıştır. Denklem (7) ile P değeri tespit edilmiştir. E-modifikasyon kazancı olan k 'nın değeri

0.02, tasarım parametresi olan ε 'nin değeri de -2.5 olarak alınmıştır. Zarf koruma sisteminin teorisi ve tasarımı ile ilgili daha fazla bilgi Şahin, (2018) ile Şahin ve Yavrucuk (2020, 2021a, 2022) kaynaklarında yer almaktadır.

3. FARKLI TÜRBİNLER ÜZERİNDE UYARLANABİLİR ZARF KORUMA SİSTEMİNİN ETKİNLİĞİ

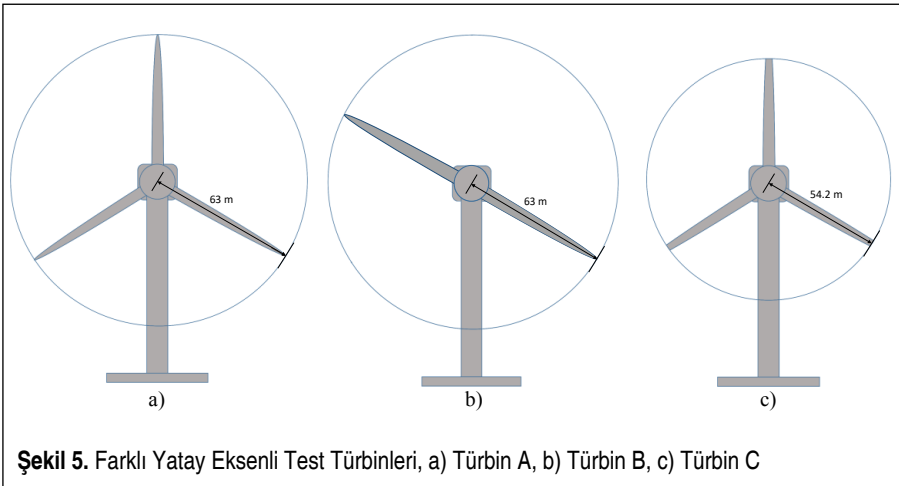
Bu bölümde, zarf koruma sisteminin etkinliği üç farklı rüzgar türbini üzerinde simülasyonlarla irdelenmiştir. Bu türbinler Türbin A, Türbin B ve Türbin C olarak adlandırılmıştır. Türbin A, NREL 5 MW'lık üç kanatlı türbine karşılık gelmektedir. Türbin B, NREL 5 MW'lık türbinin kanatlarından birinin çıkartılması sonucu elde edilen iki kanatlı bir türbin sistemi iken, Türbin C, aynı 5 MW'lık türbinin kanatlarının uçlarından, kanat uzunluğunun %14.3 civarındaki uç parçalarının çıkarılması sonucu oluşturulan daha kısa ve üç kanatlı bir türbin sistemidir. Türbin B'nin oluşturulmasında, NREL 5 MW'lık türbinden bir kanat çıkarıldığı için türbinin toplam rotor atalet momenti de %33.24 düşürülmüştür. Benzer şekilde, Türbin C de daha kısa kanatlara sahip oldu-

Tablo 1. Türbin A, Türbin B ve Türbin C'nin Bazı Özellikleri

	Türbin A	Türbin B	Türbin C
Rotor Kanat Sayısı	3	2	3
Rotor Yarıçapı	63 m	63 m	54.2 m
Rotor Atalet Momenti	38759228 kg.m ²	25878127.34 kg.m ²	36821266 kg.m ²

ğundan toplam atalet momenti, NREL 5 MW'lık türbine kıyasla %5 daha azdır. Tablo 1'de Türbin A, Türbin B ve Türbin C'ye ait bazı özellikler verilirken, Şekil 5'de ise bu türbinler resmedilmiştir.

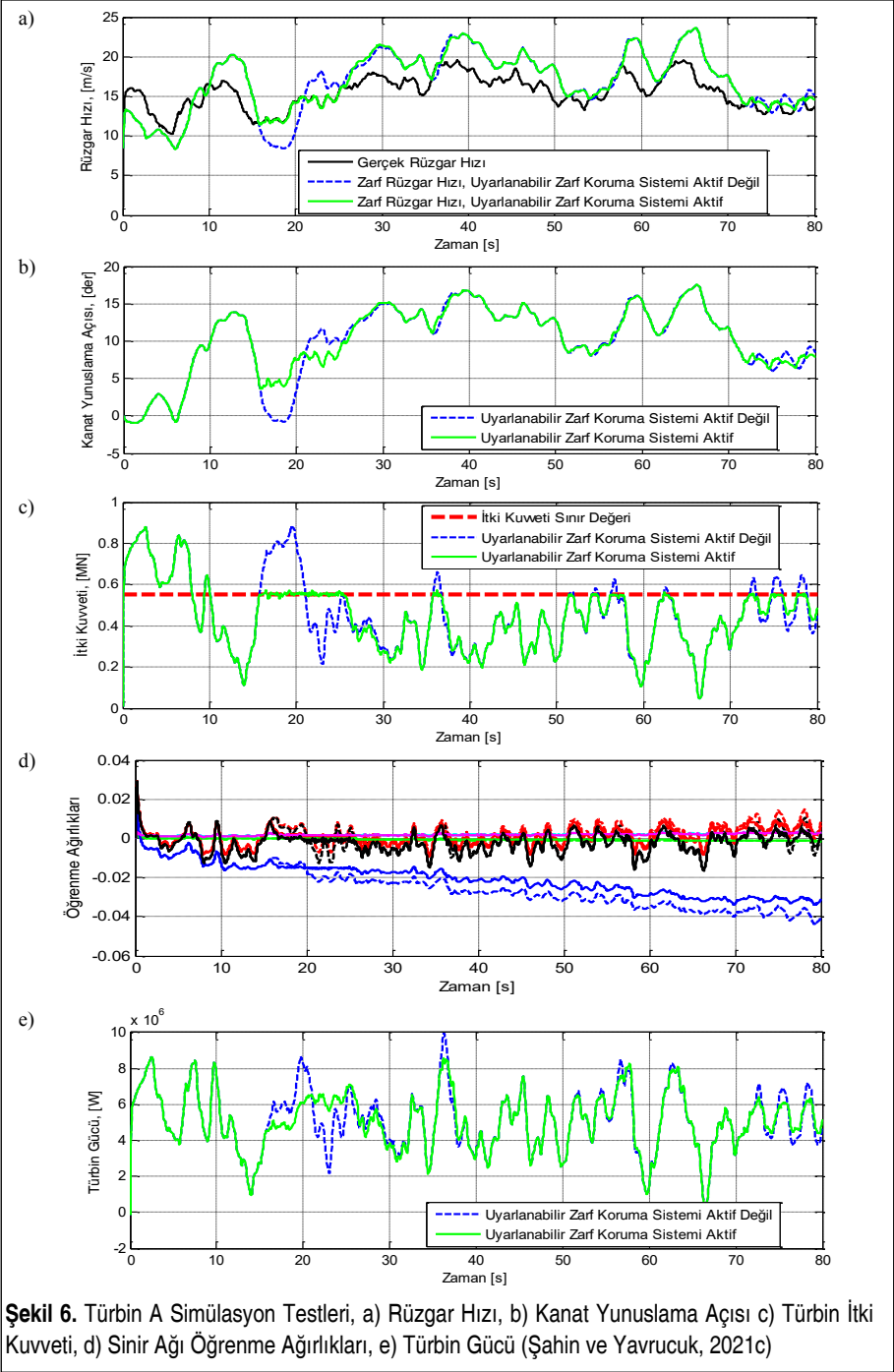
Yenilikçi zarf koruma sisteminin tasarımında herhangi bir değişiklik yapılmadan her üç türbin sistemi için de simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, türbinlerin tam yük bölgesindeki (Bölge 3) çalışmaları esnasında elde edilmiştir. Türbin A'ya ait test sonuçları Şekil 6'da verilirken, Türbin B ve Türbin C'ye ait test sonuçları ise Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Simülasyon testleri 80 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir. Zarf koruma sistemi bütün simülasyonların 10. saniyesinde aktif edilmiştir. Simülasyon testlerindeki kesik çizgili sonuçlar zarf koruma sisteminin aktif olmadığı durumdaki sonuçlar iken, daimi çizgili sonuçlar ise koruma sisteminin aktif edildiğinde elde edilen sonuçlardır. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'in a, b, c ve e'sindeki simülasyon sonuçları aynı rüzgar hızı ve türbin değişkenlerine aittir, ancak simülasyon sonuçlarının kolayca anlaşılabilmesi açısından farklı renklerle verilmiştir. Bu şekillerin d'sinde de, zarf koruma sisteminin öğrenme ağırlıklarının zamanla değişimi sistem aktif edildiğinde veya edilmediğindeki durumları için verilmiş ve aynı ağırlıklar aynı renklerle gösterilmiştir. İtki sınır değeri, Türbin A ve Türbin B için 0.55 MN seçilirken, Türbin C için 0.50 MN olarak seçilmiştir.

**Şekil 5.** Farklı Yatay Eksenli Test Türbinleri, a) Türbin A, b) Türbin B, c) Türbin C

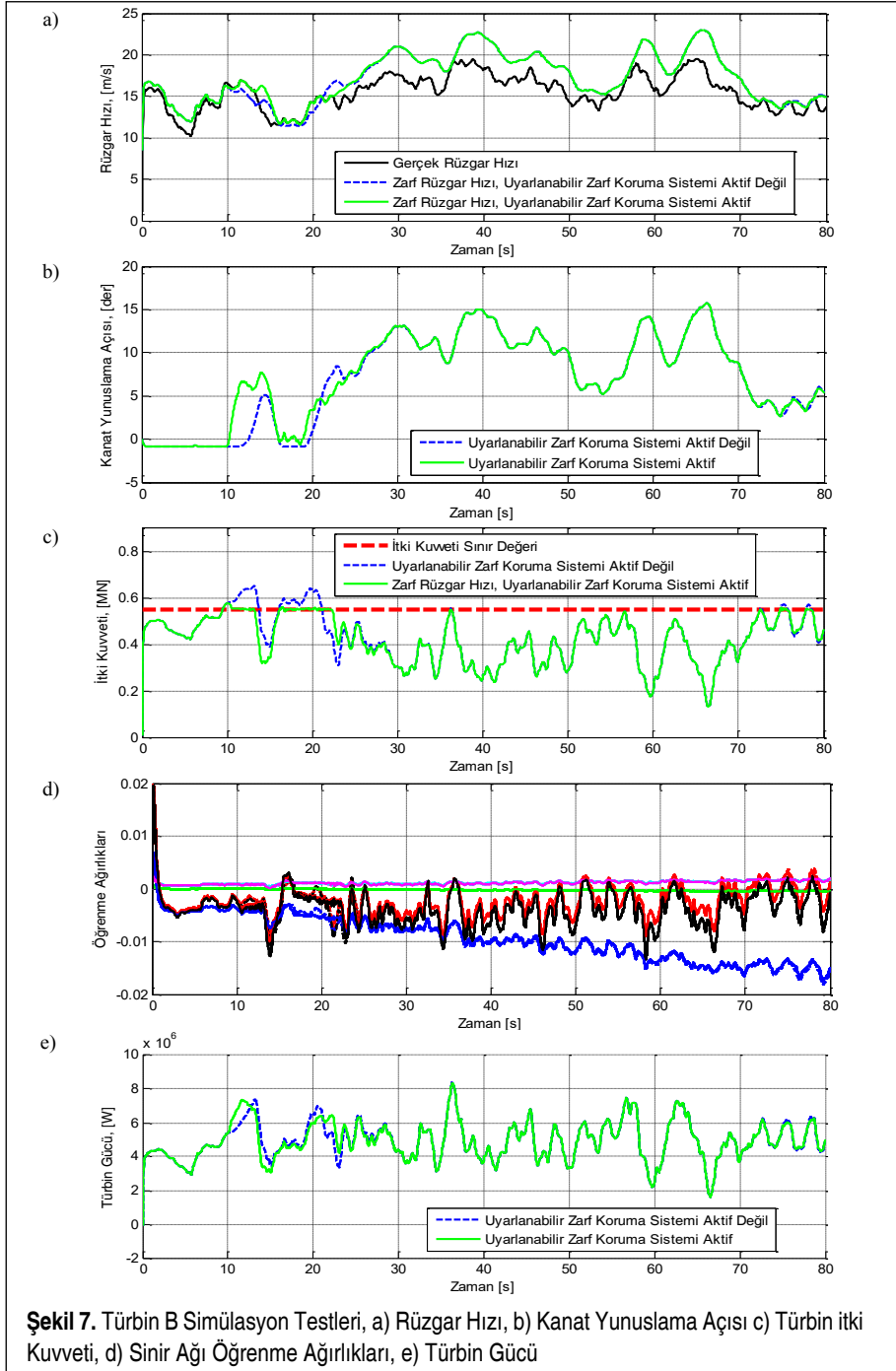


Şekil 6’da temel türbin kontrolcülerıyla kontrol edilen Türbin A’ya ait simülasyon test sonuçları görülmektedir. Kontrol edilen Türbin A’ya, 16 m/s ortalama değerli normal türbülanslı gerçek rüzgarın (Şekil 6-a) uygulanması sonucu, uyarlanabilir zarf koruma sisteminin aktif olmadığı durumda türbinin itki kuvveti değeri bazı zaman dilimlerinde önceden karar verilen 0.55 MN sınır değerini aşmaktadır (Şekil 6-c). İtki kuvvetinin sınır değerini aşması durumu, gerçek rüzgarın zarf rüzgar hızını geçtiği anlarda ortaya çıkmaktadır (Şekil 6-a). Türbinin güç regülasyonu için kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün kanat yunuslama açısının değerini nasıl ayarladığı ise Şekil 6-b’de görülmektedir. Türbinin üretmiş olduğu güçteki ani değişimler de Şekil 6-e’de verilmiştir. Koruma sisteminin aktif veya değilken ki durumlarda zaman kaybetmeden türbini korumak için hazırolda bekleyip, türbinin çalışma şartlarını takip etmesi sonucunda sinir ağının öğrenme ağırlıklarında meydana gelen değişimler de Şekil 6-d’de görülmektedir. Önceden rüzgarı ve türbinin çalışmasını izleyerek türbin çalışma koşullarını sürekli öğrenen zarf koruma sistemi, simülasyonun 10. saniyesinde aktif olduğu anda, türbin güvenli çalışma durumuna geçtiği için türbin kanatlarının yunuslama açısına müdahale etmemiştir. Örneğin, simülasyon testinin 15 ile 21. saniyeleri aralığında ortaya çıkan yüksek itki kuvvetinden (Şekil 6-c) dolayı, koruma sisteminin türbin kanat yunuslama açısı değerini ayarlamasıyla (Şekil 6-b) türbin korunmuştur. Benzer şekilde, simülasyonun diğer saniyelerinde de görülen yüksek itki kuvvetinin (Şekil 6-c) zarf koruma sistemince engellendiği (Şekil 6-b) görülmektedir. Sistemin türbini koruması esnasında öğrenme ağırlıklarındaki değişimler de Şekil 6-d’de verilmiştir. Simülasyon sonuçları dikkatli bir şekilde incelenirse, zarf koruma sistemi türbinin çalışma noktasında meydana gelen değişimlere uyarlanabilmekte ve türbinin tehlikeli çalışma durumunu önceden sezerek türbini tehlikelerden sakınmaktadır. Zarf koruma sistemi, türbini korumanın yanı sıra türbini itki sınır değerinde bir müddet daha tutarak, koruma sırasında türbinde meydana gelen güç kaybına karşılık türbine bir miktar da güç üretmektedir (Şekil 6-e). Bu durum, kaybolan güce karşılık güç elde etmek anlamına geldiğinden, arzu edilen bir durumdur. Örnek verilecek olursa, koruma esnasında simülasyonun 15 ile 21. saniyeleri arasında türbinin ürettiği güç düşerken, 21 ile 26. saniyeleri arasında türbin gücü, koruma sisteminin aktif değilken ki duruma kıyasla bir miktar yükselmiştir (Şekil 6-e). Zarf koruma sisteminin, türbinin tehlikeli çalışması durumu bitmesine rağmen, ara ara belirli bir süre daha türbini koruması, yunuslama açısı kontrol sisteminin çıkışını ayarlayarak kapalı devre rüzgar türbin sisteminin dinamiğini değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Anlaşılacağı üzere, sistem aktif iken türbinin itki kuvvetinin değeri, önceden belirlenen 0.55 MN sınır değeri içinde seyretmekte (Şekil 6-c) ve rüzgar türbini artık güvenli olarak çalışmasına devam etmektedir.

Şekil 7’de ise aynı zarf koruma algoritmasına sahip ve 16 m/s ortalama değerli aynı rüzgar (Şekil 7-a) etkisinde çalışan iki kanatlı Türbin B’nin simülasyon test sonuçları verilmiştir. Bir önceki simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında, rüzgar türbini iki



Şekil 6. Türbin A Simülasyon Testleri, a) Rüzgar Hızı, b) Kanat Yunuslama Açısı c) Türbin İtici Kuvveti, d) Sinir Ağı Öğrenme Ağırlıkları, e) Türbin Gücü (Şahin ve Yavrucuk, 2021c)

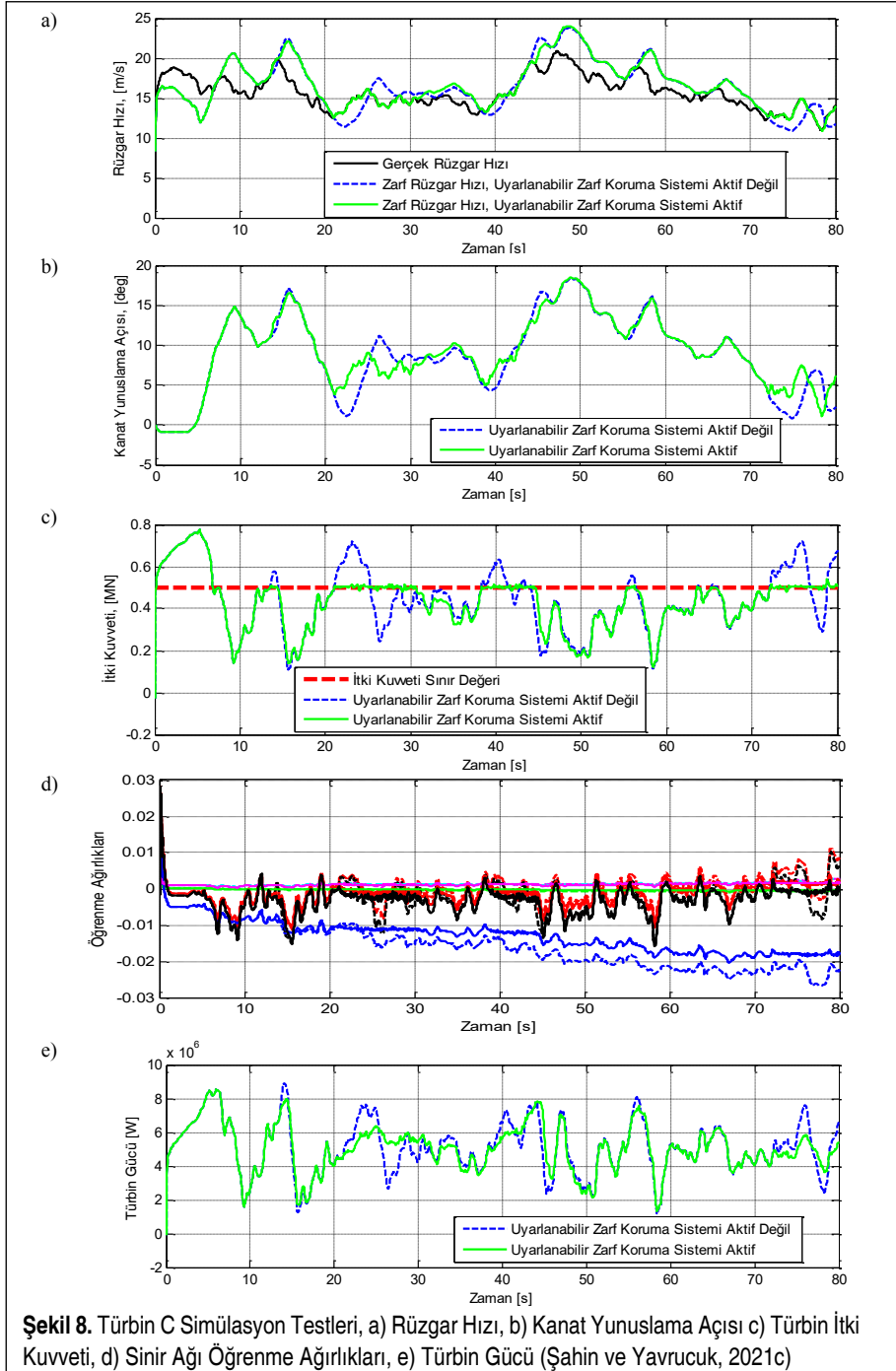


Şekil 7. Türbin B Simülasyon Testleri, a) Rüzgar Hızı, b) Kanat Yunuslama Açısı c) Türbin İtki Kuvveti, d) Sinir Ağı Öğrenme Ağırlıkları, e) Türbin Gücü

kanatlı olduğu için aynı rüzgar altında çalışan üç kanatlı Türbin A'ya nazaran daha az itki kuvveti (Şekil 7-c) oluşturmakta ve daha az türbin gücü (Şekil 7-e) üretmektedir. Burada, Türbin B için de itki kuvvetinin sınır değeri yine 0.55 MN olarak seçilmiştir.

Arzu edilirse başka sınır değerleri de seçilebilir. İki kanatlı rüzgar türbini, 9.45 ile 13.7 saniyeleri, 16.1 ile 21.1 saniyeleri arasında itki sınır değerini aştığı görülmektedir (Şekil 7-c). Aynı şekilde, simülasyonun son 10 saniyesinin içinde de itki kuvveti seçilen sınır değerini az da olsa geçmektedir. Bu durum, önceden de belirtildiği üzere gerçek rüzgarın zarf rüzgar hızını aştığı zamanlarda ortaya çıkmaktadır. Uyarlanabilir zarf koruma sistemi aktif edilmediğinde, türbin santraldeki sıradan türbinler gibi çalışmakta ve türbin kanatlarının yunuslama açıları, yunuslama açısı kontrolcüsü tarafından toplu olarak ayarlanarak (Şekil 7-b) türbin gücü regüle edilmektedir (Şekil 7-e). Koruma sisteminin ağırlıkları ise sistem aktif değilken türbin ve rüzgarda oluşan değişikliklerle değişmekte (Şekil 7-d), türbin çalışma şartları, yani çalışma noktasındaki değişimler devamlı olarak zarf koruma sisteminde takip edilerek öğrenilmektedir. Böylece, sistem aktif olduktan çok kısa bir süre içinde koruma işlemini gerçekleştirmektedir. Türbinin çalışmasını takip eden ve türbin çalışmasına uyarlanan sistem, simülasyonun 10. saniyesinde aktifleştirildiğinde, itki kuvvetinin istenilen değeri aşacağını anlayıp kanat yunuslama açısının referans değerini artırmaktadır. Bu işlem de, kanatların yunuslama açılarını artırarak (Şekil 7-b), türbinin itki kuvvetinin sınır itki değerini aşmasını engellemekte ve türbini aşırı itki kuvvetinden korumaktadır (Şekil 7-c). Simülasyon sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, yukarıda üç kanatlı NREL 5 MW'lık türbin için tasarlanan tek bir uyarlanabilir zarf koruma sistemi iki kanatlı türbinin çalışmasına da uyarlanarak, bu türbin için de etkin bir şekilde koruma işlemini yapabildiği görülmektedir. Şekil 7-d'de ise zarf koruma sisteminin aktif ve değilken ki durumlarda zarf koruma algoritmasının öğrenme ağırlıklarındaki değişimler görülmektedir. Öğrenme ağırlıklarındaki kesik çizgili değişimler, zarf koruma sisteminin aktif değilken ki sonuçlara karşılık gelirken, devamlı çizgili sonuçlar ise sistem aktifken ki ağırlıklardaki değişimlere karşılık gelmektedir. Uyarlanabilir zarf koruma sistemi aktif ve değilken ki durumlarda türbinin gücünde meydana gelen değişimler de Şekil 7-e'de verilmiştir. Görüleceği üzere, bir önceki simülasyon sonuçlarında olduğu gibi, koruma esnasında kapalı devre türbin sisteminin dinamiğinde değişiklik meydana geldiği için bir taraftan türbin gücünde azalma olurken, bir taraftan da artma meydana gelmektedir.

Şekil 8'de ise aynı uyarlanabilir zarf koruma sisteminin daha küçük rotor çaplı Türbin C üzerinde yapılan simülasyon test sonuçları görülmektedir. İlgili sistemin testinde, 16 m/s ortalama değerli başka bir türbülanslı rüzgar verisi (Şekil 8-a) kullanılmıştır. Uygulanan bu rüzgarın etkisi altında çalışan Türbin C sisteminin itki kuvveti, çoğu kez seçilen itki sınır değerini geçmektedir (Şekil 8-c). Bu durum, yine yukarıdaki diğer simülasyonlarda da görüldüğü gibi, gerçek rüzgar hızının zarf rüzgar hızını geçtiği anlarda oluşmaktadır (Şekil 8-a). Zarf koruma sistemi simülasyonun 10. saniyesinde



aktifleştirildiğinde, sistem kanatların yunuslama açısını artırarak (Şekil 8-b) türbinin itki kuvvetinin sınır değerini geçmesini engellemiş (Şekil 8-c) ve bu sayede türbini güvenli olarak çalıştırmıştır. Zarf koruma sisteminin aktif ve değilken ki anlarda koruma sisteminin sinir ağının öğrenme ağırlıklarında ortaya çıkan değişimler Şekil 8-d'de sunulmuştur. İlgili sistem, kanat yunuslama açısı kontrol sisteminin çıkışını değiştirdiğinden kapalı devre türbin sisteminin dinamiği değişmektedir. Sonucunda da, zarf koruma sistemi türbinin korumasına gerek olmadığı anlarda, rüzgar türbinini sınır itki değerinde belirli bir süre daha çalışmasını sağlayarak, aktifleştirilmeden ki ve az güç ürettiği anlarda bile, türbinden bir miktar daha güç alınmasını da beraberinde getirmiştir (Şekil 8-e). Çoğunlukla türbin koruma yöntemlerinde güç azaltma yöntemi ile türbinler güvenli olarak çalıştırıldığından, buradaki zarf koruma sisteminin bir miktar fazla güç üretmeye olanak sağlaması bir nevi arzu edilen bir durumdur.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, RES'lerde en çok kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerini türbülanslı rüzgarların etkisiyle türbinlerde oluşan aşırı yüklenmeleri engelleyebilen yenilikçi uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin çalışma prensibi, teorisi, tasarımı, uygulanması kısaca açıklanmış ve farklı türbinler üzerindeki etkinliği incelenmiştir. İlgili zarf koruma sistemi, rüzgar ve türbin değişkenlerini uyarlanabilir bir sinir ağı ile gerçek zamanlı olarak izlemekte ve türbinde oluşan değişiklikleri öğrenmektedir. Sistem, rüzgar türbinlerini aşırı itki kuvvetinden koruyacak şekilde tasarlanmıştır. Türbini aşırı itki kuvvetinden koruma işlemi, tehlike anında türbin kanatlarının yunuslama açısının toplu olarak artırılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu artırma işlemi, ekstra bir kanat yunuslama açısı referans değerinin zarf koruma sistemi tarafından üretilmesi ve bunun da kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün çıkışına bağlanması ile gerçekleştirilmiştir. Uyarlanabilir zarf koruma sistemi, içinde barındırdığı uyarlanabilir sinir ağı sayesinde, tasarımında değişiklik yapılmadan istenilen türbine ve türbinde meydana gelen değişikliklere uyarlanmakta ve etkili bir koruma işlemi yapabilmektedir. Bu çalışmada, ilgili sistem türbinlerin çalışma noktasına uyarlanabilmesinin yanında, farklı rüzgar türbinlerine de uyarlanabilme ve koruma yeteneği MS Bladed Model simülasyonlarıyla irdelenmiştir. Simülasyonlar için Türbin A, Türbin B ve Türbin C olarak isimlendirilen farklı kanat sayılarına ve rotor çaplarına sahip yatay eksenli rüzgar türbinleri kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, tasarlanan tek bir uyarlanabilir zarf koruma sisteminin farklı türbinlere ve bunların çalışma noktalarındaki değişikliklere uyarlanabildiği, aktifleştirildiğinde türbinleri istenilen bir sınır itki değeri içinde çalıştırdığı ve böylece türbinlerin üzerinde oluşan yüksek itki kuvvetini etkin bir şekilde yok ettiği görülmüştür. Ek olarak, ilgili sistem türbinlerin gücünü düşürerek koruma işlemini yerine getirirken, bir taraftan da Bölge 3'te türbinlerin düşük güç ürettiği anlarda türbinlerden ekstra bir güç elde etme olanağı da sunduğu görülmüştür. Sonuç olarak, farklı rüzgar türbinleri üzerinde test edilen uyarlanabilir zarf koruma sistemi,



rüzgar türbin sektörü için yenilikçi bir sistemdir. İlgili koruma algoritmasının, rüzgar elektrik santrallerindeki türbinlerde kullanılması durumunda, türbinlerin aşırı itki kuvveti/yüklenmeleri engellediğinden, türbinlerin kanatlarının kırılması, kulelerinin zarar görmesi ve hatta türbinlerin yıkılması vb. olası hasarları yok etmenin yanı sıra türbinlerin servis ömürlerinde de bir artış sağlanacağı beklenmektedir.

SEMBOLLER

a, b	Yaklaşık sistem parametreleri
F_i	Türbin itki kuvveti
Δ	Sinir ağının çıkışı
u_{zarf}	Zarf rüzgar hızı
Ω	Türbin rotor devri
$\Delta\beta_{ref}$	Ekstra kanat yunuslama açısı
Δu	Gerçek ile zarf rüzgar hızlarının fark değeri
$\delta(\mu)$	Sinir ağının giriş vektörü
n_1	Sinir ağının giriş sayısı
n_2	Sinir ağının çıkış sayısı
I	Birim matrisi veya sabiti
\oplus	Kronocker çarpanı
u	Sistem girişi, rüzgar hızı
\wedge	Yaklaşık değer
K	Gözlemleyici kazancı
F_{i_s}	İtki kuvveti sınır değeri
e	Hata
ε	Tasarım parametresi
W	Sinir ağı öğrenme ağırlıkları
k	E-modifikasyon kazancı
Γ	Sinir ağının öğrenme hızı
r	Doğrusal olmayan itki kuvvetinin fonksiyonu

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir önceki versiyonu, 23-24 Eylül 2021 tarihleri arasında Makine Mühendisleri Odası ve Elektrik Mühendisleri Odası tarafından düzenlenen 6. İzmir Rüzgar Sempozyumu'nun "Rüzgar Enerjisinde Yeni trendler ve Teknolojiler" adlı 7. Oturumunda "Rüzgâr Türbinleri İçin Yenilikçi Uyarlanabilir Bir Zarf Koruma Sis-



teminin Geliştirilmesi ve Farklı Rotor Çaplarındaki Türbinler Üzerinde Simülasyon Testleri” başlığı altında sunulmuş ve sektörle buluşturulmuştur. Konferansı düzenleyen yetkililerinin yönlendirilmesi sonucu, sempozyum bildirisinde geçen yenilikçi uyarlanabilir zarf koruma sistemi, farklı kanat sayılarındaki türbinler üzerindeki etkinliği de incelenerek daha da genişletilmiş ve Mühendis ve Makine Dergisine iletilmiştir.

KAYNAKÇA

- Al-Ahmar, E., Benbouzid, M. E. H., Amirat, Y. & Ben Elghali, S. E. (2008). DFIG-based wind turbine fault diagnosis using a specific discrete wavelet transform. *18th International Conference on Electrical Machines, ICEM'08*, Vilamoura, Portekiz.
- Bernhammer, Lars. O., Van Kuik, Gijs A. M. & De Breuker, R. (2016). Fatigue and extreme load reduction of wind turbine components using smart rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 154, 84–95. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.001>
- Bossanyi, E. A. (2003). Individual blade pitch control for load reduction. *Wind Energy*, 6(2), 119–128. Doi: <https://doi.org/10.1002/we.76>
- Camblong, H., Nourine, S., Vechiu, İ. & Tapia, G. (2012). Control of wind turbines for fatigue loads reduction and contribution to the grid primary frequency regulation. *Energy*, 48(1), 284–291. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.035>
- Cetrini, A., Cianetti, F., Corradini, M. L., Ippoliti, G. & Orlando, G. (2019). On-line fatigue alleviation for wind turbines by a robust control approach. *International Journal of Electrical and Power & Energy Systems*, 109, 384–394. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.011>
- Fischer B. & Shan, M. (2013). A survey on control methods for the mitigation of tower loads. Fraunhofer-Institute for *Wind Energy and Energy Systems Technology, IWES, Proje Raporu* 01/104256. Erişim adresi: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/f0c70706-6842-454d-a14f-4fa050f7787a/content>
- Gupta, A., Rotea, M. A., Chetan, M., Sakib, M. S. & Griffith, D. T. (2021). A methodology for robust load reduction in wind turbine blades using flow control devices. *Energies*, Cilt: 14 (12), 1-29. Doi: <https://doi.org/10.3390/en14123500>
- Jelavic, M., Petrovic, V., Barisic, M. & Ivanovic, I. (2013). Wind turbine control beyond the cut-out wind speed. *European Wind Energy Conference and Exhibition, Bec/Viyana, Avusturya*.
- Johnson, K. E., Pao, L. Y., Balas, M. J. & Fingersh, L. J. (2006). Control of variable speed wind turbines-standard and adaptive techniques for maximizing energy capture. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(3), 70–81. Doi: 10.1109/MCS.2006.1636311
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. & Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. NREL/TP-500-38060, *National Renewable Energy Laboratory*. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf>



- Merabet, A., Thongam, J. & Gu, J. (2011). Torque and pitch angle control for variable speed wind turbines in all operating regimes. *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Roma, İtalya.
- Oltmann, N. C., Sobotta, D. & Hoffmann, A. (2017). Load reduction of wind turbines using trailing edge flaps. *Energy Procedia*, 136, 176–181. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.316>
- Petrovic, V., Baotic, M. & Peric, N. (2012). Reduction of wind turbine tower oscillation based on individual pitch control. *20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Barsenola, İspanya.
- Petrovic, V. & Bottasso, C. L. (2014). Wind turbine optimal control during storms. *Journal of Physics: Conference Series*, 524(1). Doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012052
- Petrovic, V. & Bottasso, C. L. (2015). Wind Turbine Envelope Riding. *AIAA Scitech, 33rd Wind Energy Symposium*, Kissimmee, Florida.
- Petrovic, V. & Bottasso, C. L. (2017). Wind turbine envelope protection control over the full wind speed range, *Renewable Energy*, 111, 836–848. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.021>
- Stol K. A. & Fingersh, L. J. (2004). Wind turbine field testing of state-space control designs. NREL/SR-500-35061, *National Renewable Energy Laboratory*. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35061.pdf>
- Stubkier, S., Pedersen, H. C. & Jonkman, J. M. (2014). Analysis of load reduction possibilities using a hydraulic soft yaw system for a 5-MW turbine and its sensitivity to yaw-bearing friction. *Engineering Structures*, 69, 123–134. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.022>
- Şahin, M. & Yavrucuk, İ. (2017a). Dynamical modelling of a wind turbine system with precone and tilt angles. 9th Ankara International Aerospace Conference, AIAC 2017, Ankara, Türkiye.
- Şahin, M., Yavrucuk, İ. (2017b). Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin kısmi ve tam yük bölgeleri için kontrolcü tasarımı. 9. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, YEKSEM 2017*, Antalya, Türkiye.
- Şahin, M. (2018). Dynamic modeling, control and adaptive envelope protection system for horizontal axis wind turbines (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye. Erişim adresi: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12622891/index.pdf>
- Şahin, M. & Yavrucuk, İ. (2019a). Performance comparison of two turbine blade pitch controller design methods based on equilibrium and frozen wake assumptions. 10th Ankara International Aerospace Conference, AIAC 2019, Ankara, Türkiye.
- Şahin, M., Yavrucuk, İ. (2019b). Rüzgar türbini kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarımı ve performans analizi. 5. *İzmir Rüzgar Sempozyumu*, İzmir, Türkiye.



- Şahin, M. & Yavrucuk, İ. (2020). Adaptive envelope protection control for the below and above rated regions of wind turbines. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy Power Engineering*, 14(10), 275–283.
- Şahin, M. & Yavrucuk, İ. (2021a). An algorithm for wind turbine protection under iced rotor blades. *11th Ankara International Aerospace Conference, AIAC 2021, Ankara, Türkiye*.
- Sahin, M. (2021b). MS (Mustafa Sahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli ve bazı önemli yetenekleri. *EMO Bilimsel Dergi*, 11(1), 7-19.
- Şahin, M., Yavrucuk, İ. (2021c). Rüzgar türbinleri için yenilikçi uyarlanabilir bir zarf koruma sisteminin geliştirilmesi ve farklı rotor çaplarındaki türbinler üzerinde simülasyon testleri. *6. İzmir Rüzgar Sempozyumu*, İzmir, Türkiye.
- Şahin, M. & Yavrucuk, İ. (2022). Adaptive envelope protection control of wind turbines under varying operational conditions. *Energy*, 247(123544). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123544>
- Unnikrishnan, S., Jeram, G. J. & Prasad, J. V. R. (2004). Tactile limit avoidance cueing using adaptive dynamic trim. *Proceedings of the American Helicopter Society 60th Annual Forum*, Baltimore, Maryland.
- Xu, B., Yuan, Y., Liu, H., Jiang, P., Gao, Z., Shen, X. & Cai, X. (2020). A Pitch Angle Controller based on Novel Fuzzy-PI Control for wind turbine load reduction. *Energies*, Cilt: 13(22), 6086, 1-16. Doi: <https://doi.org/10.3390/en13226086>
- Yavrucuk, I., Prasad, J. V. R. & Unnikrishnan, S. (2009). Envelope protection for autonomous unmanned aerial vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(1), 248–261. Doi: <https://doi.org/10.2514/1.35265>
- Yavrucuk, I. & Prasad, J. V. R. (2012). Online dynamic trim and control limit estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 35(5), 1647–1656. Doi: <https://doi.org/10.2514/1.53116>
- Zhang, M., Yang, H., & Xu, J. (2017). Numerical investigation of azimuth dependent smart rotor control on a large-scale offshore wind turbine. *Renewable Energy*, 105, 248–256. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.063>
- Zhang, M., Li, X., Tong, J. & Xu, J. (2020). Load control of floating wind turbine on a tension-leg-platform subject to extreme wind condition. *Renewable Energy*, 151, 993–1007. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.093>