

Rüzgâr Türbinlerinde Tork ve Kanat Eğim Açısı Kontrolü

Şehmus FİDAN¹ 

¹Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Programı, Batman
sehmus.fidan@batman.edu.tr

Hasan ÇİMEN² 

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Afyon
hcimen@aku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received:

15.02.2021

Kabul Tarihi/Accepted:

18.06.2021

Yayın Tarihi/Published:

30.06.2021

ÖZ

Geleneksel fosil yakıtlı enerji üretim santralleri çevre ve insan üzerinde büyük tahribatlara yol açmaktadır. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre üzerinde oluşacak tahribatları engellemede önemli bir rolü bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde popüler olan rüzgar türbinleri ve güneş panelleri ise ülkemizde artık birçok yerde bulunmakla birlikte halen yatırımlar sürmektedir. Bu çalışmada, asenkron generatörlü bir rüzgar türbininin kanat açısını ayarlayacak bir mekanizma önerilmiş ve tork kontrolü yapılmıştır. Değişken kanat açılı rüzgar türbinleri için, tasarım sonrasında elde edilen aerodinamik gücün değiştirilebilir tek parametresi performans katsayısıdır. Performans katsayısı, kanatların dikey ekseninde kendi etrafında çevrilmesiyle ayarlanmaktadır. Kanat açısı ayarlanarak, çeşitli rüzgar hızlarında optimum enerji elde edilebilir ve çıkış güç değişimleri azaltılabilir. Böylece çıkış gücü salınımları ve ayrıca yüksek hızlardaki mekaniksel yüklenmelerde azaltılabilmektedir. Kanat eğim açısını değiştirmek için hidrolik veya elektrik motorlu kanat hareket mekanizmaları kullanılmakla birlikte bu çalışmada sistem birinci dereceden bir transfer fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Matlab/Simulink yazılımının kullanıldığı bu çalışmada kanatları kendi ekseninde çevirebilmek için iki farklı hareket mekanizması modeli kullanılmıştır. Yapılan benzetim sonucunda 3 hız seviyeli kanat eğim mekanizmasının, kanatların aktif kalma zamanını azalttığı ayrıca standart kanat eğim mekanizmasına göre anahtarlama sayısının düştüğü belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Türbini, Asenkron Generatör, Aerodinamik Tork Kontrolü, Kanat Açısı Kontrolü, Kanat Hareket Mekanizması

ABSTRACT

Traditional fossil fuel power generation plants cause great damage to the environment and people. At this point, renewable energy sources can play an important role in reducing damage to the environment. Wind turbines and solar panels, which are very popular in renewable energy sources, have been found in many places in Turkey for a long time and investments are still continuing. In this study, a blade pitch mechanism to adjust the blade angle of an asynchronous generator based wind turbine and torque control has been proposed. The only tunable parameter of aerodynamic power obtained from post-design is the performance coefficient for a wind turbines. The performance coefficient is adjusted by turning the blades around themselves on the vertical axis. By adjusting the blade pitch angle, optimum energy can be obtained at various wind speeds and output power variations can be reduced. Thanks to blade angle control, output power oscillations can be reduced, as well as mechanical loads at high speeds. In this study, hydraulic and/or electric motor movement mechanisms are used to change the blade pitch angle which is evaluated as a first order transfer function. In this study, Matlab/Simulink software was used to model two different blade pitch mechanism. As a result of the simulation, it was determined that the 3 speed blade pitch mechanism decreases the active time of the blades movement and the number of switching decreases compared to the standard blade pitch mechanism.

Anahtar Kelimeler: Wind Turbines, Aerodynamic Torque Control, Blade Pitch Control, Blade Pitch Mechanism

1. Giriş

Artan enerji talebi ve tükenen fosil yakıtları, dünyada gelişmekte olan, gelişmiş ülkelerin ve dünya siyasetinin şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır. Oluşturulan enerji politikaları gereği sera gazı salınımının azaltılması, enerjinin verimli kullanılması, iletim hatları üzerinde oluşan kayıpların azaltılması, yenilenebilir enerji kaynakları için teşviklerin sağlanması vb. geleceğimizin enerji dünyasını şekillendirmeye yönelik bir dizi çalışmalar yapılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlarına rakip olabilecek düzeyde ve geleceğin enerji talebine karşılık verebilecek miktarda olmasına rağmen sahada halen çözülmesi gereken birçok problem bulunmaktadır.

Fosil yakıtlı enerjiler dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak özellikle petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıt rezervlerinin azalması, bu yakıtların sebep olduğu küresel ısınma, sürekli değişen petrol fiyatlarının ülke ekonomilerinde strese sebep olması, enerji savaşları ve sömürünün oluşması gibi politik, ekonomik birçok problemin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Yapılan bazı çalışmalarda fosil yakıtlı enerjilerin yıllık tüketim hızının fosil yakıtların oluşum hızlarından yaklaşık 300 bin kat daha fazla olduğu gösterilmiştir. Yani günlük yakıt tüketimi nerdeyse bin yıllık fosil yakıt üretimine denk gelmektedir. Bu veriler, fosil kaynaklı yakıtların çok sürmeden tükeneceği manasına gelmektedir. Bu durumda fosil kaynaklı yakıtların alternatifi olarak yenilenebilir enerji kaynaklı santrallerin kullanımının önemi artmaktadır (Aydm, 2013; Koç, 2013).

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları denilince akla ilk olarak rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle vb. yakıt türleri gelmektedir. Bunlara ek olarak hidrolik, gelgit, deniz (okyanus) akıntıları gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da bahsetmek mümkündür. Belirtilen kaynaklar dünyada doğal olarak oluştuğu için çevresel sorunları minimum düzeyde kalmaktadır. Önde gelen enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi temel olarak güneşin dünyayı farklı sıcaklıklarla ısıtmasıyla meydana gelmektedir. Güneş kaynaklı ısınma; hava sıcaklığı, basınç ve nemin farklı olmasına dolayısıyla hava hareketlerine neden olmaktadır. Bu noktada bu değişiklikler yüksek basınçtan alçak basınca doğru hava hareketlerini oluşturur (Çolak, 2008).

Rüzgar enerjisinin önemli avantajları bulunmaktadır. Temel olarak yenilenebilir olmasının yanısıra orta seviye teknoloji gerektiren, bölgesel olarak sürekli esintilerin tespit edilebildiği bölgelerde kolayca kurulabilen, temiz, düşük maliyetli, yerden yeterince yüksekte sürekli esintilerin olması sebebiyle birçok yere kurulabilen, kurulduğu yerde kapladığı arazi nispeten küçük olan özelliklere sahiptir. Bunlara ek olarak dünya var olduğu sürece bu enerjinin sınırsız olduğundan bahsedilebilir (İlkılıç, 2009). Rüzgar türbinleri rüzgar esintisi kaynaklı kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür böylece bir generatör yardımıyla elektrik enerjisi üretmek mümkün olur. Yapılan çalışmalar neticesinde rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör, güç elektroniği, kanatlar gibi ekipmanlarda yaşanan iyileşmeler neticesinde maliyetler düşmüş ve fosil yakıt kaynaklı santraller ile rekabet edebilecek düzeye gelmiştir. Fosil kaynaklı yakıtların geleceği bu denli sorunlara gebeyken yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde önemli yere sahip olan rüzgar türbinlerinin birçok ülke için devlet politikası haline gelmesi kaçınılmaz olmuş ve ciddi ekonomik, teknolojik destekler almıştır (Aydın, 2013; Koç, 2013).

Literatürde, rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin kalitesini iyileştirmek amacıyla yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca normal işletme süresince rüzgar türbinlerindeki güç değişimleri gözlemlenerek elde edilen verilere dayalı güç kalitesini iyileştirmeye yönelik analizler yapılmıştır. Bu analizler; sistem kararlılık analizi, güç elektroniği dönüştürücülerinin analizi ve farklı türdeki generatörlerin çıkış güçlerinin kararlılık analizi olarak ifade edilebilmektedir (Öztürk, 2008; Ackermann, 2012; Beinke vd., 2017, Ding vd., 2016). Rüzgar türbinlerinde üretilen enerjinin kalitesi kadar rüzgar türbinlerinin aktif kullanım süreleri de oldukça önemlidir. Shahmaleki (2018) çift beslemeli asenkron generatörlü bir rüzgar türbini için bulanık mantık tabanlı bir kontrolör önermiştir. Bu sayede kanat açısının doğrusal olmayan karakteristiğini kontrol altında tutabilmiştir. Dişli kutusu ve kanatlarında hesaba katıldığı bir çalışma yapan Oh vd. (2015) kolektif kanat açısı kontrolü önermiş ve sonuçların başarılı olduğunu göstermişlerdir. Geliştirdikleri kolektif kanat açısı kontrolü tabanlı mekanizmayı uygulamak için küçük güçlü bir rüzgar türbinine uygulama yapmış ve sonuçları sunmuşlardır. Barambones (2019) gerçek zamanlı kayan kip mod kontrol tabanlı kanat açısı kontrolü hakkında yayınladığı yayında güçlü aerodinamik torku anlık olarak izlemeyi başardığını belirtmiştir. Corradini (2017) yüksek rüzgar hızlarında gözleyici tabanlı optimum güç üretimini izleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmada rüzgar hızının ölçümüne gerek kalmaksızın sensörsüz olarak dizayn ettiği gözleyici tasarımının başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Hosseini ve Shahgholian

(2017) yüksek rüzgar hızlarında optimum güç elde etmek için bulanık mantık tabanlı bir kontrolör ve bulanık sinir ağı tabanlı iki kontrolör önermiş ve bunları karşılaştırmışlardır. Bulanık sinir ağı tabanlı önerdikleri kontrolörün daha iyi sonuçlar verdiğini güç maksimizasyonu için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Lin vd. (2018) Pareto eşitliklerine dayalı optimizasyon analizi yöntemini kullanarak kanat açısı kontrolörü hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile çok amaçlı optimal bir kontrolör tasarımı ile karmaşık olan iki katmanlı bir kontrolör tasarladıklarını belirtmişlerdir. Bashedy vd. (2020) türbülanslı hava şartlarında rüzgar türbinini işletebilecek güçlü adaptif kanat açısı kontrolörü önermişlerdir. Önerdikleri sistemde beş serbest dereceli bir model kullanmışlardır. Kulka (2004) yaptığı çalışmada kanat eğim açısını ayarlayarak kontrol altına aldığı tork sayesinde mekanik stresi azaltmıştır. Jiao vd. (2019) kanat eğimi için yapay zekâ tabanlı bir kontrolör önermiş ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Benzer şekilde Sahoo vd. (2016) bulanık mantık tabanlı bir kontrolör önermişlerdir. Song vd. (2017) model öngörülü kontrol yöntemini önermiş ve sonuçların başarılı olduğunu belirtmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı rüzgâr türbini kanat eğim açısının ayarlanmasıyla türbinin yüksek rüzgâr hızlarında nominal değerlerde güç üretebilmesini sağlamaktır. Belirtilen amaca ulaşabilmek için bu çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbinlerini oluşturan ekipmanların matematiksel modelinden, rüzgârdan elde edilen gücün oluşumunu etkileyen parametrelerden, rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren asenkron generatörlerden ve kanatların kontrolünü sağlamak için kullanılan kanat eğim ekipmanlarının modelleme süreçleri ele alınmıştır.

Nominal rüzgar hızlarının altında çalışırken büyük çaplı rüzgar türbinlerinin kanat açısının rüzgara karşı sürekli çevrilmesi mekanik olarak sıkıntılara sebep olmaktadır. Ayrıca kanatların sürekli hareketi rüzgar türbinlerinin işletilmesi için harcanan enerjiyi artırmaktadır. Belirtilen sebeplerden dolayı kanatlar bazı kısıtlamalar altında belirlenen referans hızlarıyla hareket ettirilirse nasıl bir farklılık olacağı ele alınmıştır. Kanat hareketinin etkisini incelemek için Matlab / Simulink ortamında değişken hızlı, değişken kanat açılı rüzgar türbininin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Ardından biri önerilen diğeri klasik yapıya sahip olmak üzere kanat eğim mekanizmasını kontrol eden iki farklı çalışma modeli oluşturulmuştur. Her bir modelde kanat hareketleri incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Önerilen kontrol modelinin basit olmasına karşılık etkili bir şekilde yüklenmeleri azalttığı tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Rüzgâr hızının matematiksel modeli

Rüzgârdan elde edilen güç, rüzgarın sürekli yön ve hız değiştirmesinden dolayı zamanla değişen bir yapıya sahiptir. Birçok benzetim çalışmasında rüzgar hızı sabit kabul edilmektedir ancak dinamik modellerin kullanılması gerçeğe yakın sonuçlar almak için daha uygundur. İki temel rüzgar hızı modeli yaklaşımı vardır. İlk yaklaşıma göre rüzgar türbin modeli için gereken aerodinamik tork, gerçek rüzgar hızı bilgilerinin ölçümüne bağlı olarak oluşturulur. İkinci yaklaşım ise kullanıcı tarafından belirlenen parametrelere bağlı olarak oluşturulan rüzgar hızı modeliyle benzetim yapmaktır. Rüzgar hızı

matematiksel modeli, deterministik ve stokastik bileşen olarak iki temel bileşenin toplanmasıyla elde edilir (Ackermann, 2012; Beinke vd., 2017, Ding vd., 2016). Rüzgar hızı;

$$V_w(t) = V_{sto_{det}} \quad (1)$$

denklemlerle ifade edilebilir. Bu denklemde ortalama rüzgar hızı (V), rüzgar rampa hızı $V_{wr}(t)$ ve ani rüzgar hızı $V_{wt}(t)$ bileşenlerinin toplamı stokastik bileşen olarak adlandırılmaktadır. Türbülans bileşeni ise deterministik bileşen olarak ifade edilmektedir (Song, 2009). Denklem 2 genel haliyle rüzgar hızının bileşenlerini göstermektedir.

$$V_w(t) = V + V_{wr}(t) + V_{wt}(t) \quad (2)$$

Ortalama rüzgar hızı yüksekliğe ve yeryüzü şekline bağlı bir fonksiyondur. Yeryüzünde engel yokken bile rüzgarı etkileyen parametrelerden bahsetmek mümkündür (Song, 2009). Ortalama rüzgar hızı;

$$V_m(z) = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \cdot V_m(z_{ref}) \quad (3)$$

denklemlerle gösterilmektedir. Rüzgar rampa hızı zamana bağlı olarak üç parametreyle belirlenir (Letcher, 2017). Bunlar rüzgar rampa hızı genliği A_r , rampa hızı başlangıç zamanı T_{sr} , rampa hızı bitiş zamanı T_{er} . Rüzgar rampa hızı Denklem 4'teki gibi analitik olarak ifade edilebilir (Keyhani, 2016).

$$V_{wr}(t) = \begin{cases} t < T_{sr}, & v_{wr} = 0; \\ T_{sr} < t < T_{er}, & v_{wr} = A_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \\ T_{er} > t, & v_{wr} = A_r; \end{cases} \quad (4)$$

Üç parametreyle modellenen rüzgar ani hızı belirlenen bir zaman aralığında anlık tepe rüzgar hızıdır. Rüzgar ani hızı genliği A_g , rüzgar ani hızı başlangıç zamanı T_{sg} ve rampa hızı bitiş T_{eg} zamanıdır. Rüzgar ani hızı Denklem (5)'deki gibi gösterilebilir (Ding ve Zhu, 2016).

$$V_{wg}(t) = \begin{cases} t < T_{sg}, & v_{wg} = 0; \\ T_{sg} < t < T_{eg}, & v_{wg} = \frac{A_g}{2} \{1 - At\} \\ T_{eg} > t, & v_{wg} = 0; \end{cases} \quad (5.1)$$

$$At = \cos \left[2\pi \left(\frac{(t - T_{sg})}{(T_{eg} - T_{sg})} \right) \right] \quad (5.2)$$

Rotor alanında rüzgar davranışının zamanla değişen parçası olarak ifade edilen türbülans zamana, ortalama rüzgar hızına ve rotor pozisyonuna bağlıdır. Değişimler rastgele davranışa sahiptirler ancak havanın dinamiği rüzgar hızı değişimlerini oluşturan ana etkidir (Beinke vd., 2017). Spektral güç

yoğunluğunu göstermek için farklı fonksiyonlar olmakla birlikte genel olarak birçok uygulama için kaimal spektral güç yoğunluğu kullanılmaktadır (Letcher, 2017). Kaimal spektral güç yoğunluğu:

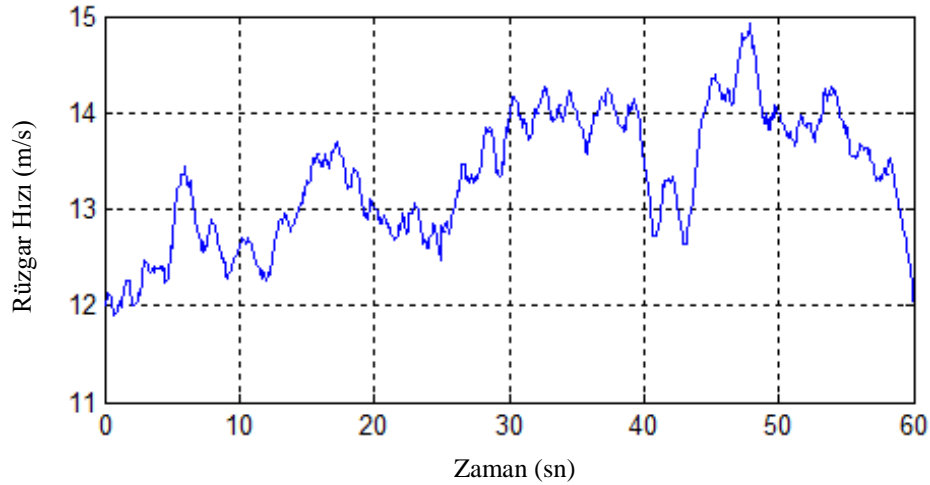
$$S_{kai}(f) = \sigma^2 \frac{4x_L/V}{(1 + 6fx_L/V)^{5/3}} \quad (6)$$

Rüzgar hızı türbülansı rastgele sayı üreticisine kaimal filtresi ve admittans filtesi uygulanarak elde edilebilir. Bu filtre 2. dereceden bir transfer fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Üç kanatlı rüzgar türbinleri için çoğunlukla 0. ve 3. çözümleri dikkate alınır (Beinke vd., 2017). 0. harmonik bileşenine uygulanan filtre Denklem 7'de 3. harmonik bileşenine uygulanan filtre ise Denklem 8'de verilmiştir.

$$H_{adm\{0p\}} = \frac{4.7869 \cdot d_{tf}^2 \cdot s^2 + 0.9904}{7.6823 \cdot d_{tf}^2 \cdot s^2 + 7.3518 \cdot d_{tf} \cdot s + 1} \quad (7)$$

$$H_{adm\{3p\}} = \frac{0.2766 \cdot d_{tf} \cdot s + 0.0307}{0.3691 \cdot d_{tf}^2 \cdot s^2 + 1.7722 \cdot d_{tf} \cdot s + 1} \quad (8)$$

$d_{tf} = R / U_0$ normalizasyon parametresi R rüzgar türbinin çapı, U_0 ortalama rüzgar hızı olarak ifade edilmektedir. Şekil 1'de benzetim çalışmasında kullanılan dinamik rüzgar hızı gösterilmiştir.



Şekil 1. Dinamik rüzgar hızı

2.2. Rüzgardan elde edilen güç ve Tork

Rüzgar türbinin aerodinamik güç modeli, rüzgar türbininden elde edilen mekanik güç ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi vermektedir. Üretilen güç, rüzgar hızının küpü ile orantılı olmasının yanı sıra hava yoğunluğu, performans katsayısı ve kanat yarıçapına bağlı olarak da değişmektedir (Ackermann, 2004)

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (9)$$

A türbin kanatlarının alan (m^2), C_p rüzgar türbini performans katsayısı, P_w türbin gücü, V rüzgar hızı, ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), β kanat açısı ($^\circ$), λ kanat hız oranı olarak ifade edilmektedir. Hava

yoğunluğu, 15° sıcaklıkta ve 1 atm. basınçta 1.225 olarak belirlenmiştir (Keyhani, 2016). Türbin kanat alanı;

$$A = \pi R^2/4 \quad (10)$$

olarak ifade edilmektedir. Performans katsayısını belirlemek için önemli olan kanat hız oranı, V rüzgar hızına, kanatların açılmal dönme hızına ω ve kanat yarıçapına R bağılı olarak değişmektedir (Zemamou vd., 2017). Kanat hız oranı Denklem 11’de, performans katsayısı ise Denklem 12 ve 13’teki eşitlikler aracılığı ile belirlenebilir.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (11)$$

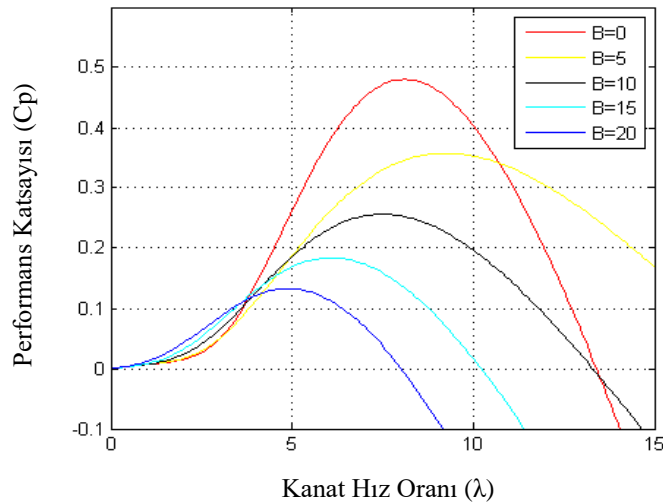
$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (13)$$

C_1 ve C_6 arasındaki katsayılar; $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 0.0068$ olarak hesaba alınmıştır. C_p ve λ arasındaki ilişki C_p - λ eğrileriyle tespit edilebilir. Bu eğri rüzgar türbini üreticileri tarafından tedarik edilen eğriler kullanarak yaklaşık olarak bulunabilir. Şekil 2’de farklı kanat açısı değerleri için C_p - λ grafikleri verilmiştir. Bu şekil incelenecek olursa $\beta = 0^\circ$ ve $\lambda = 8.1$ iken performans katsayısı (C_p) maksimum 0.48 olmaktadır. Rüzgar türbininin üreteceği tork;

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_w} \quad (14)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada P_w gücü ω_w ise açısal hız olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2. Farklı λ - β değerlerine karşılık gelen performans katsayıları (C_p)

2.3. Mekanik dişli kutusu modeli

Sertlik ve sönümlenme katsayıları ihmal edilirse iki elemanlı mekanik dişli modeline göre basitleştirilmiş olan bir elemanlı mekanik mil modeli elde edilebilir (Yin vd., 2018). Bu modelin matematiksel ifadesi;

$$T_{gen} - T'_{wtr} = \left(J_{gen} + \frac{J_{wtr}}{k^2_{gear}} \right) \frac{d\omega_{gen}}{dt} \quad (15)$$

T_{gen} , generatöre ait tork, T'_{wtr} düşük hızlı mil torkunun yüksek hızlı mil torkuna aktarılmış hali, ω_{gen} generatör milinin hızı, J_{gen} generatöre ait atalet momenti J_{wtr} rüzgar türbinine ait atalet momenti, K_{gear} yay sabiti olarak ifade edilmektedir.

2.4. Asenkron makina modeli

Asenkron makinalarının diğer makinalardan en önemli farkı harici gerilim kaynağına gerek kalmadan veya bir DC tahrik uygulanmaksızın trafolarla olduğu gibi sekonder akımların indüksiyon yoluyla oluşmasıdır. Ayrıca DC ve senkron makinalarda olduğu gibi bileziklere veya komütatöre ihtiyaç yoktur. Denklem 16 ve 17 üç fazlı devrelerin analizini basitleştirmek için kullanılan dq0-abc ve abc-dq0 (park dönüşümleri) dönüşümleri göstermektedir (Yin vd, 2018, Skvarenina vd., 2018, Ong, 1998).

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times T_{abc} \quad (16)$$

$$T_{abc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} T_{dq0} \quad (17)$$

İndüksiyon makinasının elektriksel kısmı 4, mekaniksel kısmı ise 2 diferansiyel denklemle ifade edilebilir. Stator referans alındığında, dq dönüşümüyle elde edilen stator ve rotora ait ifadeler Denklem 18-22 arasında verilmiştir. Mekaniksel Eşitlik ise Denklem 23 ve 24'te verilmiştir.

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (18)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} + \omega \varphi_{qs} \quad (19)$$

$$V'_{qr} = R'_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \phi'_{dr} \quad (20)$$

$$V'_{dr} = R'_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \phi'_{qr} \quad (21)$$

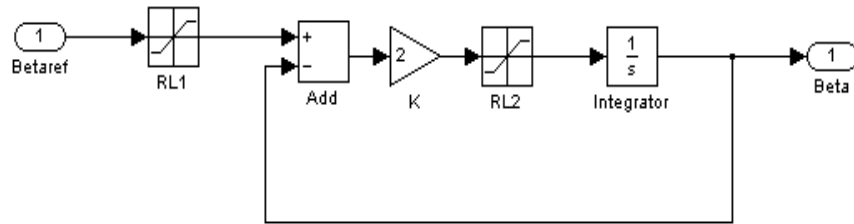
$$T_e = 1.5p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m) \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (24)$$

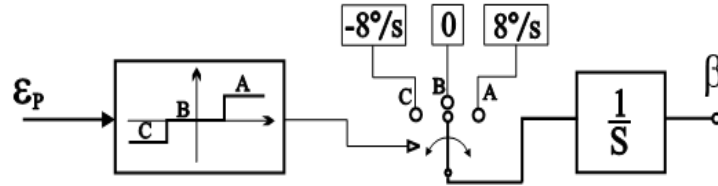
2.5. Kanat eğim mekanizması modeli

Kanat eğim kontrolü esasında türbin mil torkunu tasarım sınırları içinde tutarak aerodinamik gücü sınırlandırır. Sürücüyle ayarlanan kanatların ataleti büyüktür ve bu yüzden sınırlı hareket kapasitesine sahiptir. Kanat dinamiğinden dolayı kanat hareket mekanizması eğim açısı sınırına (+90°, -3°) ve eğim hareket hızı sınırlamasına (8°-10°/san) sahiptir (Kulka, 2004). Bazı sınırlamalar göz önüne alınarak oluşturulan kanat hareket mekanizması Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu modelde giriş referans kanat açısı değeri çıkış ise gerçek kanat açısı değerini göstermektedir. Modelde RL1 ve RL2 bir kısıtlayıcı olarak minimum 0 maksimum 42° olacak şekilde girişi kısıtlamaktadır. Fark alma bloğu ise gerçek ve referans kanat açısı arasındaki hatayı hesaplamaktadır. Son olarak elde edilen sinyalin integralinin alındığı bu modelde oransal bir kontrolör yapısı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Rüzgar türbini kanat eğim mekanizması modeli

Şekil 4'te gösterilen mekanizmada üç hız seviyesi kullanılmaktadır. Kanat açısı hareketi her iki yönde de sabit bir hızla yapılır veya sabit açıda kalır. Sinyal hatası tetikleyicinin önceden ayarlanan değerinden yüksek ise kanat hareketi sinyal sıfır olana veya daha düşük olana kadar sürer ve nihayetinde kanat bir pozisyonda kalır ve hareket durur. Kontrolörün girişine bağlanan hata sinyali için genelde güç hatası sisteme giriş olarak kabul edilir (Kulka, 2004).

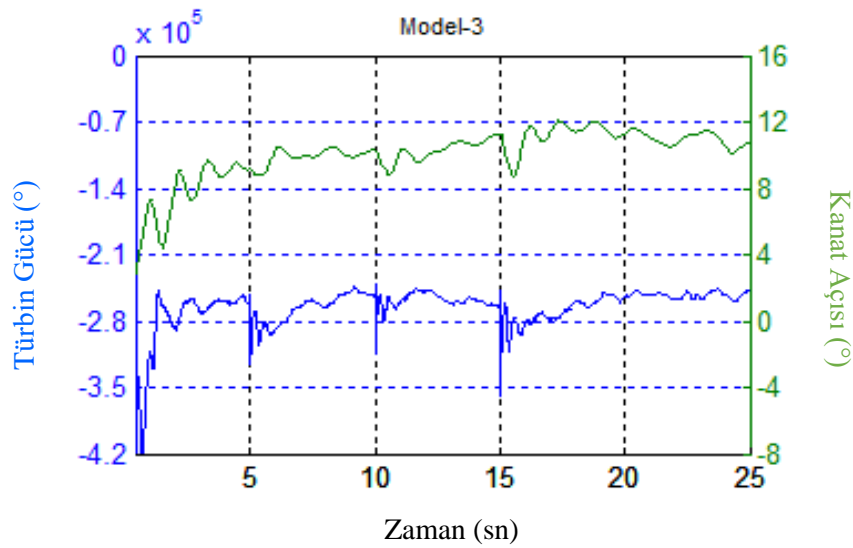


Şekil 4. Rüzgar türbini 3 hızlı kanat eğim mekanizması modeli

Üç hızlı kanat eğim mekanizmasında optimum hız ve gerçek hız arasındaki fark giriş olarak alınır. Kanat hareketi hata değeri, ölü bölge değerlerinin dışındayken aktiftir yoksa hareket mekanizması durağan kalır. Bu model, mekanik yapıyı çok zorlamaz ve daha kısa hareketli kalma süresine sahiptir. Üç hızlı kanat eğim mekanizması Matlab ortamında kod yazılarak gerçekleştirilmiş bu sebeple Şekil 4'te genel bir yapı sunulmuştur.

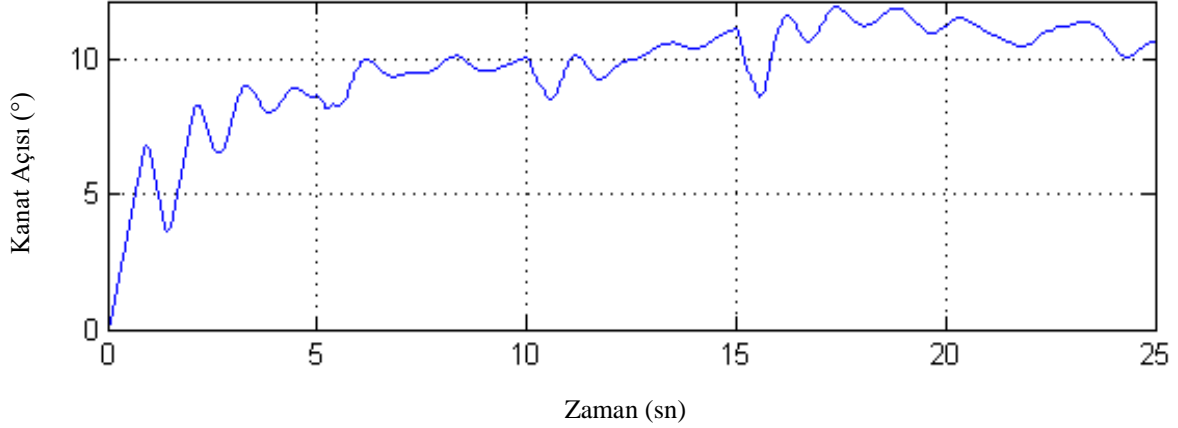
3. Araştırma Sonuçları

Benzetim modeline iki farklı kanat eğim mekanizması eklenmiş ve sonuçlar incelenmiştir. 275 kVA değerinde asenkron generatöre lokal çalışmada belirli zaman aralıklarıyla, toplamda 250 kW gücünde ohmik özellikli üç yük bağlanmaktadır. Bu durumda güce karşılık kanat açısının derece türünden değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Geliştirilen modele Şekil 1'de gösterilen zamanla değişen dinamik rüzgar hızı girişi uygulanmıştır. Şekil 5'te mavi renkle gösterilen grafik türbin gücünü, yeşil renkle gösterilen grafik ise kanat açısının değişimini göstermiştir. Önerilen model sayesinde güç değişimi salınımı nispeten daha azdır. Benzetim boyunca güç üretimi ortalama 280 kW civarında seyretmiştir. Şekilde dikey eksen generatör enerji üretimini gösterdiği için



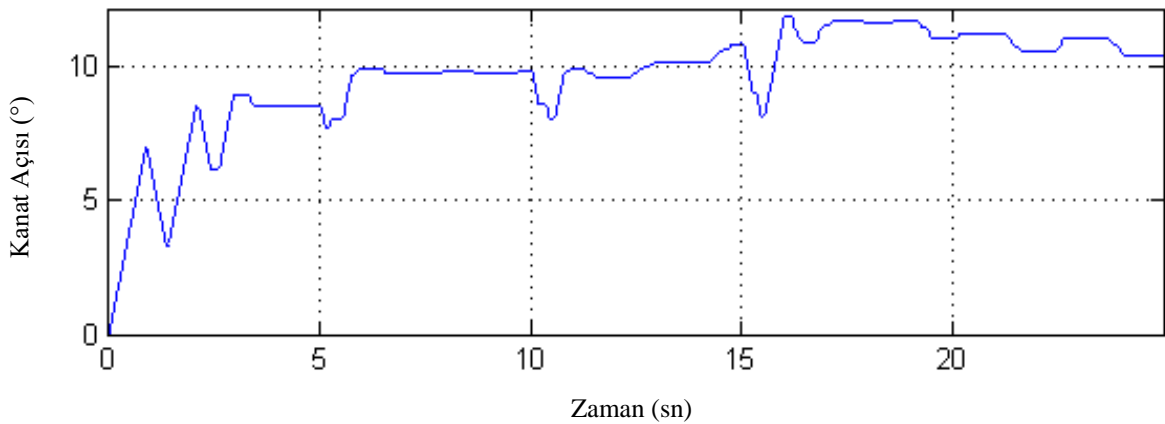
Şekil 5. Geliştirilen model için türbin Gücü ve kanat Açısı grafikleri

Şekil 5'in sağ ekseninde verilen kanat açısı grafiğinde başlangıçta kanat açısı 4° iken sistem kalıcı duruma geçtiğinde 8° - 12° arasında değişmiştir. Aynı grafikte kanat eğim mekanizmasının yön değişimi incelendiğinde 25 saniyelik benzetim süresi boyunca 44 defa değişim olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6'da ise Şekil 5'te gösterilen ve klasik yöntemlerle kontrol edilen kanat eğim mekanizmasının açısız değişiminin daha detaylı bir görünümü verilmiştir.



Şekil 6. kanat eğim mekanizmasının zamanla açısız olarak değişen hareketi

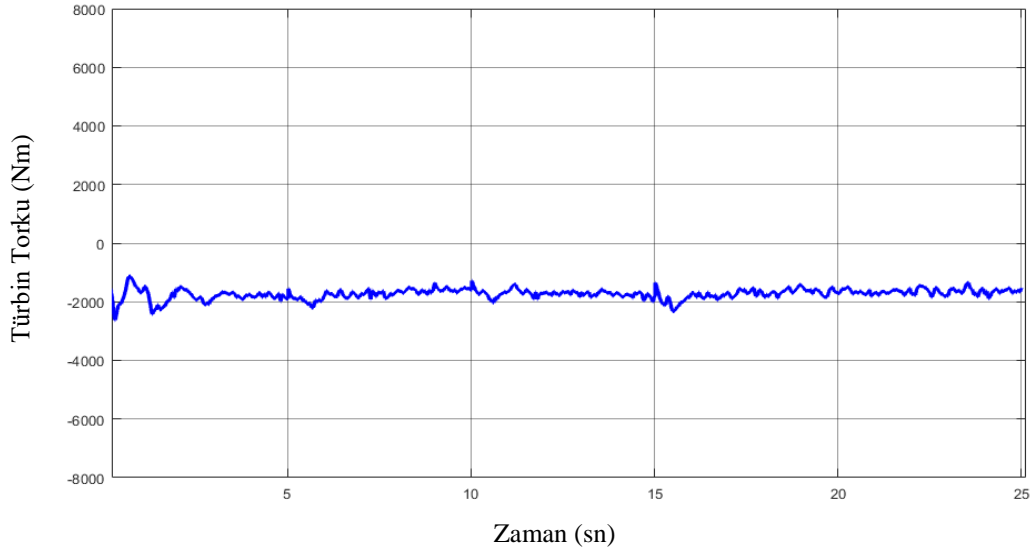
Şekil 7'de önerilen kanat kontrol mekanizmasının uygulanması sonucunda kanat hareketinin açısız değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde kanat hareketinin değişimi 32 defa gerçekleşmiştir. Şekil 6 ve 7 karşılaştırıldığında klasik kontrol hareketine göre daha basit yapıya sahip olan üç hızlı kanat eğim kontrolör mekanizması daha az hareket sağlayarak mekanik stresin azaltılmasını sağlamıştır. Klasik yapıda mekanizma yön değişimi 25 saniyelik benzetim boyunca 44 defa iken önerilen modelde 32 defa değişmesi yaklaşık %45 daha az yorulma olarak değerlendirilebilir.



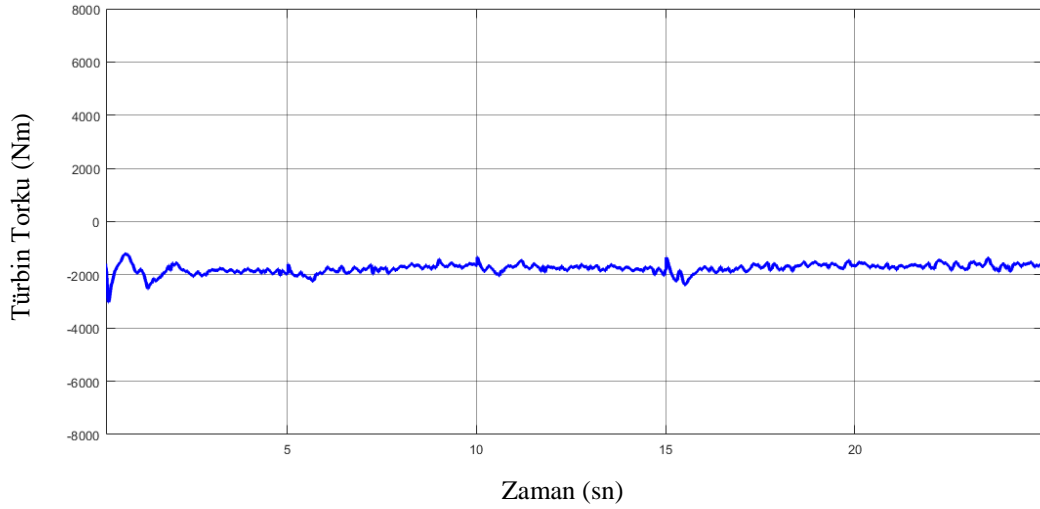
Şekil 7. Üç hız seviyeli kanat mekanizmasının zamanla değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9 sırasıyla klasik oransal kontrollü kanat eğim mekanizması ve önerilen 3 hızlı kanat eğim mekanizmasına ilişkin türbin torkunun değişimi gösterilmektedir. Bu grafikler daha detaylı incelendiğinde önerilen yöntem için tork değişiminin bir miktar daha az olduğu gözlemlenmiştir. Şekil

7’de gösterilen 3 hızlı modele ilişkin kanat açısı değişimlerinin daha az olması rüzgar türbin torkunun değişiminde etkili olmuştur.



Şekil 7. Klasik oransal kontrollü kanat eğim mekanizmasının rüzgar türbin torku



Şekil 7. Üç hız seviyeli kanat eğim mekanizmasının rüzgar türbin torku

Tablo 1 incelenecek olursa 3 hızlı kanat eğim mekanizması literatürde temel olarak gösterilen kanat hareket mekanizmasından yaklaşık %55 daha az aktif kaldığı belirlenmiştir. Yani 25 sn’lik simülasyon için yaklaşık 9 sn’lik bir çalışma gerçekleşmiştir. Devreye girme çıkma sayısını belirten anahtarlama sayısı; kanat eğim mekanizması için 44 iken 3 hız seviyeli kanat eğim mekanizması için 32 olmuştur.

Tablo-1: Kanat eğim mekanizmaları için aktif kalma zamanı ve anahtarlama sayısı

Kanat Eğim Mekanizması	Aktif Kalma Zamanı (%)	Anahtarlama sayısı
Klasik	% 100	44

3 Hız seviyeli	≈ % 45	32
----------------	--------	----

4. Sonuçlar Ve Tartışma

Bu çalışma temelde değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgar türbininde kanat açısının değişimini ele almıştır. Matlab/Simulink yazılımı ile geliştirilen modelde rüzgar hızı birçok çalışmanın aksine zamanla değişen dinamik bir giriş olarak değerlendirilmiş ve sistem girişine uygulanmıştır. Zamanla değişen rüzgar hızı ve yük değişimine karşılık nominal güç üretimi için kanat açısının ayarlanması gerekmektedir. Kanat açısının kontrolü için literatürde farklı yöntemler bulunmakla birlikte bu makalede önerilen 3 hız seviyeli eğim mekanizması modeli klasik olarak ifade edilen oransal kontrol ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda klasik olarak nitelendirilen oransal kontrollü kanat eğim mekanizmasının hassas olduğu ve bu yüzden kanat hareketinin sürekli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca klasik kanat eğim kontrolü için benzetim boyunca yön değişiminin 44 defa olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte önerilen 3 hız seviyeli mekanizmanın daha az aktif kalma zamanına sahip olduğu ve yön değişiminin 32'ye düştüğü belirlenmiştir. Bu sayede kanatların sürekli hareketinin %45 düştüğü söylenebilir. Ayrıca türbin torkuna ilişkin grafikler incelendiğinde önerilen model için değişimler biraz daha azalmıştır. Sonraki çalışmalarda kanatların sürekli hareketinin azalmasının tüketilen enerji üzerindeki etkisi incelenecektir. Ayrıca mekanik yorulma çalışan araştırmacılar için önerilen sistemin gerçekleştirilmesi durumunda yorulmanın ne kadar etkileneceği araştırılabilir.

5. Kaynakça

- Ackermann, T. (2012). *Wind Power in Power Systems*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, West Sussex, England
- Akdağ, O, Yeroğlu, C. (2019). Offshore / Onshore Rüzgâr Santralinin Modellenmesi ve Şebekeye Bağlantısı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* , (16) , 505-520 . DOI: 10.31590/ejosat.505340
- Aydın, İ. (2013). “Balıkesir’de Rüzgâr Enerjisi”, *Eastern Geographical Review*, cilt 18, sayı 29, s. 29-50. 2.
- Barambones, Oscar et al. (2019). “Variable Speed Wind Turbine Control Scheme Using a Robust Wind Torque Estimation.” *Renewable Energy* 133: 354–66.
- Bashetty, S., Guillamon, J. I., Mutnuri, S. S., & Ozelik, S. (2020). Design of a robust adaptive controller for the pitch and torque control of wind turbines. *Energies*, 13(5), 1195.
- Beinke, T., Quandt, M., Ait Alla, A., Freitag, M., & Rieger, T. (2017). Information system for the coordination of offshore wind energy maintenance operations under consideration of dynamic influences. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 8, 48-59.
- Corradini, M. L., G. Ippoliti, and G. Orlando. (2017). “An Observer-Based Blade-Pitch Controller of Wind Turbines in High Wind Speeds.” *Control Engineering Practice* 58: 186–92.
- Çolak, İ., Demirtaş, M. (2008). “Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretiminin Türkiye’deki Gelişimi,” *Türk Bilim Araştırma Vakfı (TÜBAV) Bilim Dergisi*, cilt 1, sayı 2, s. 55-62.

- Dışkaya, S. K. (2017). Türkiye'nin enerji güvenliğinde yenilenebilir enerji etkisinin politik ekonomi perspektifi. *Marmara Üniversitesi Siyasal Bilimler Dergisi*, 5(2), 129-150.
- Ding, M., & Zhu, Q. (2016). Equivalent modeling of PMSG-based wind power plants considering LVRT capabilities: electromechanical transients in power systems. *SpringerPlus*, 5(1), 2337.
- Durak, M. (2008). Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama, TÜREB, Ankara
- Gültekin, U. (2019). Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Yatırımlarının Gelişimi. *Electronic Turkish Studies*, 14(4).
- Hosseini, Ehsan, and Ghazanfar Shahgholian. (2017). "Output Power Levelling for Dfig Wind Turbine System Using Intelligent Pitch Angle Control." *Automatika* 58(4): 363–74. <https://doi.org/10.1080/00051144.2018.1455017>.
- İlkılıç, C. (2009). Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 50, sayı 593, s. 26-32.
- Jiao, X., Meng, W., Yang, Q., Fu, L., & Chen, Q. (2019). Adaptive Continuous Neural Pitch Angle Control for Variable-Speed Wind Turbines. *Asian Journal of Control*, 21(4), 1966-1979.
- Kaplan, Y. (2016). Rayleigh ve Weibull dağılımları kullanılarak Osmaniye bölgesinde rüzgar enerjisinin değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1).
- Kaya, H. (2020). Birleşik Krallık Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Politikalarının Değerlendirilmesi ve Türkiye İçin Politika Önerileri . Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi , 2 (2) , 138-157 .
- Keyhani, A. (2016). Design of smart power grid renewable energy systems. John Wiley & Sons.
- Koç, E., Şenel, M. C. (2013). "Dünya'da ve Türkiye'de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme," *Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 54, sayı 639, s. 32-44.
- Köroğlu, M. Ö., & Ülgen, K. (2018) Denizüstü Rüzgâr Enerji Santralleri: Çanakkale Örneği Offshore Wind Energy Plant: A Case study of Çanakkale. *Güç Sistemleri Konferansı*, 15-16 Kasım 2018, Ankara
- Kulka, A. (2004). Pitch and Torque Control of Variable Speed Wind Turbines. *Electric Power Engineering*, Chalmers University Of Technology, Goteborg, Sweden.
- Letcher, T. M. (2017). *Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines*. Academic Press.
- Lin, Zhongwei et al. (2018). "Coordinated Pitch & Torque Control of Large-Scale Wind Turbine Based on Pareto Efficiency Analysis." *Energy* 147: 812–25.
- Mehmet, D. A. Ş., Balpetek, N., Akpınar, E. K., & Akpınar, S. (2019). Türkiye'de bulunan farklı illerin rüzgâr enerjisi potansiyelinin incelenmesi ve sonuçların destek vektör makinesi regresyon ile tahminsel modelinin oluşturulması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 2203-2214.
- Oh, Ki Yong, Joon Young Park, Jun Shin Lee, and Jae Kyung Lee. (2015). "Implementation of a Torque and a Collective Pitch Controller in a Wind Turbine Simulator to Characterize the Dynamics at Three Control Regions." *Renewable Energy* 79(1): 150–60.

- Ong, C. M. (1998). *Dynamic Simulation of Electric Machinery – Using Matlab / Simulink*. Prentice Hall Ptr, Upple Saddle River, New Jersey
- Öksel, C., Ali, K. O. Ç., Yıldız, K. O. Ç., & YAĞLI, H. (2016). Antakya körfezi deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyel araştırılması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 18-29.
- Öztürk, H. H. 2008. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı*. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Sahoo, S., Subudhi, B., & Panda, G. (2016). Pitch angle control for variable speed wind turbine using fuzzy logic. In *2016 International Conference on Information Technology (ICIT)*(pp. 28-32). IEEE.
- Shahmaleki, Pourya. 2018. “Enhancing Wind Turbine’s Performance Using Fuzzy Pitch and Torque Controllers.” In *World Automation Congress Proceedings*, IEEE Computer Society, 170–75.
- Skvarenina, T. L. (Ed.). (2018). *The power electronics handbook*. CRC press.
- Song, D., Yang, J., Dong, M., & Joo, Y. H. (2017). Model predictive control with finite control set for variable-speed wind turbines. *Energy*, 126, 564-572.
- Song, Z., Liu, J., Hu, Y., Cheng, Y., & Tan, F. (2019). Real-time performance analyses and optimal gain-scheduling control of offshore wind turbine under ice creep loads. *IEEE Access*, 7, 181706-181720.
- Şahin, M. E. (2019) *Açık Deniz Rüzgâr Sistemleri Üzerine Bir İnceleme ve Danimarka Modeli*. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 54-67.
- Şentürk, A, Oğuz, E. (2020). Karasal ve Deniz Üstü Rüzgâr Çiftliklerinin Ekonomik ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi, Gmo Journal Of Ship And Marine Technology*, 5-32.
- Yerebakan, M. 2001. *Rüzgar Enerjisi*. İstanbul Ticaret Odası, Yayın No:2001–33.
- Yılmaz, E. (2016). Türkiye Üzerinde 21. Yüzyılda Rüzgar Hızı ve Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi ve Wasp Modeli İle Seçili Bölge İçin Sonuçların Değerlendirilmesi, <http://hdl.handle.net/11527/15240>
- Yin, M., Yang, Z., Xu, Y., Liu, J., Zhou, L., & Zou, Y. (2018). Aerodynamic optimization for variable-speed wind turbines based on wind energy capture efficiency. *Applied Energy*, 221, 508-521.
- Zemamou, M., Aggour, M., & Toumi, A. (2017). Review of savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia*, 141, 383-388.